

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Информационно-измерительная техника»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой, д.т.н, проф.
_____ А.Л. Шестаков
_____ 2017 г.

**РАЗРАБОТКА МИКРОКОНТРОЛЛЕРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
КАПЕЛЬНОГО ПОЛИВА С КОНТРОЛЕМ ЧЕРЕЗ СЕТИ СОТОВОЙ
СВЯЗИ**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382. ВКР

Руководитель проекта, доцент, к.т.н.
_____ Д.А. Кацай
_____ 2017 г.

Автор проекта
студент группы КЭ-435
_____ И.И. Федосов
_____ 2017 г.

Нормоконтролер, доцент
_____ А.А. Лысова
_____ 2017г.

Челябинск 2017

АННОТАЦИЯ

Федосов И.И. Разработка микроконтроллерной системы управления капельного полива с контролем через сети сотовой связи. – Челябинск: ЮУрГУ, КЭ-435, 2017, 86 с, 31 ил., библиогр. список – 39 наим., 13 прил.

В данной работе были изучены аналоги систем автоматического полива, выявлены их недостатки; разработана функциональная структура системы; изучены методы измерения влажности почвы и проведено экспериментальное исследование датчиков влажности почвы; проведено проектирование двух модулей системы, разработан WEB-интерфейс пользователя; создан прототип, отражающий основную часть функций системы. Разработка такой системы является актуальной задачей в рамках внедрения инноваций в агропромышленный комплекс.

Целью данной работы является разработка модульной автономной микроконтроллерной системы капельного полива с возможностью удаленного контроля через сети сотовой связи.

Задачами работы являются: анализ технического задания, обзор аналогов и выявление их недостатков; разработка функциональной структуры, определение состава системы, обзор устройств, входящих в систему; исследование методов измерения параметров почвы, изучение математических моделей; экспериментальное исследование коммерчески доступных датчиков влажности почвы, сравнительный анализ; конструирование модулей системы, создание прототипа системы и исследование его свойств.

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разр.		Федосов И.И.			Разработка микроконтроллерной системы управления капельного полива с контролем через сети сотовой связи	Лит.	Лист	Листов
Пров.		Кацай Д.А.					5	86
Н. контр.		Лысова А.А.				ЮУрГУ Кафедра ИНИТ		
Утв.		Лапин. А.П.						

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	9
1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОЛИВА С ВОЗМОЖНОСТЬЮ УДАЛЕННОГО КОНТРОЛЯ.....	11
1.1 Анализ технического задания.....	12
1.2 Обзор аналогов.....	14
1.2.1 Типы полива, применяющиеся при построении систем автоматического полива.....	14
1.2.2 Обзор существующих систем капельного полива.....	14
1.3 Теоретическое изучение элементов разрабатываемой системы.....	22
1.3.1 Разработка функциональной структуры проектируемой системы..	22
1.3.2 Уточнение технических требований на проектируемую систему..	23
1.3.3 Изучение возможностей микроконтроллерных плат «Arduino» для использования в разрабатываемой системе.....	23
1.3.4 Изучение возможностей реализации удаленного контроля с помощью Arduino (обзор беспроводных технологий).....	25
1.3.5 Обзор существующих GSM модулей со стандартом GSM/GPRS/EDGE.....	26
1.3.6 Определение структуры межмодульного взаимодействия.....	26
2 ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ СИСТЕМЫ.....	29
2.1 Измерение параметров почвы.....	29
2.1.1 Обоснование актуальности задачи измерения влажности и температуры почвы.....	29

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

2.1.2	Величины, характеризующие содержание влаги в почве, почвенно-гидрологические константы	29
2.1.3	Существующие подходы к измерению влажности почвы	31
2.1.4	Обобщенная структурная схема для анализа и синтеза приборов измерения влажности почвы	33
2.1.5	Кондуктометрический метод измерения влажности почвы.....	33
2.1.6	Диэлькометрический метод измерения влажности почвы.....	37
2.1.7	Построение математических моделей на основе кондуктометрического и диэлькометрического методов измерения влажности, выбор математической модели	42
2.1.8	Задача измерения температуры почвы	45
2.1.9	Методы измерения температуры почвы и виды термометров.....	46
2.2	Требования к микроклимату в теплице	48
3	РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ	49
3.1	Экспериментальная градуировка диэлькометрического и кондуктометрического датчиков влажности почвы.....	49
3.1.1	Выбор датчиков влажности почвы.....	49
3.1.2	Постановка эксперимента, описание установки.....	50
3.1.3	Предварительные расчеты и измерения	51
3.1.4	Проведение эксперимента по градуировке датчиков влажности ...	53
3.1.5	Оценка полученных градуировочных кривых, сравнение с теоретическими зависимостями.....	55
3.1.6	Выбор датчика влажности для использования в системе автоматического полива	58
3.2	Построение регрессионного уравнения для диэлькометрического датчика влажности почвы.....	59

3.3 Экспериментальное исследование изменения влажности почвы в динамике	68
3.3.1 Предпосылки проведения эксперимента по определению динамики изменения влажности.....	68
3.3.2 Постановка эксперимента	69
3.3.3 Проведение эксперимента по исследованию динамики изменения влажности.....	70
3.3.4 Оценка полученных результатов.....	70
4 РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОДУЛЕЙ СИСТЕМЫ	74
4.1 Проектирование модуля измерения параметров почвы	74
4.1.1 Разработка структурной схемы измерительной части модуля с учетом подобранных компонентов.....	74
4.1.2 Разработка алгоритма работы модуля измерения параметров почвы	75
4.2 Проектирование модуля управления системой полива	76
4.2.1 Разработка структурной схемы модуля с учетом подобранных компонентов.....	76
4.2.2 Разработка алгоритма работы модуля управления.....	77
4.3 Разработка WEB-интерфейса пользователя	79
4.3.1 Разработка принципа взаимодействия пользователя с системой через WEB-интерфейс, основные компоненты WEB-интерфейса.....	79
4.3.2 Разработка алгоритма функционирования WEB-интерфейса.....	81
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	83
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	85

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в стране активно производится внедрение наукоемких и инновационных решений во все сферы производственной деятельности. Одной из потенциально привлекательных сфер, в которой на данный момент наблюдается значительное отставание технологий, является агропромышленный комплекс.

Внедрение инноваций при развитии аграрного сектора России является **перспективным направлением** научно-технических разработок, подтверждением чего является государственная программа развития сельского хозяйства на 2013-2020 годы. Одной из задач в области растениеводства является полив растений. Наиболее велика роль полива в тепличном хозяйстве, так как от контроля условий в теплице полностью зависит эффективность выращивания тепличных культур.

В настоящее время **существуют** несколько решений для систем автоматизированного и автоматического полива, различающиеся типом полива, системой управления поливом, наличием или отсутствием систем мониторинга состояния микроклимата, возможностью удаленного управления поливом.

Наиболее распространенными на рынке являются системы автоматического полива растений с контролем по таймеру. Несмотря на простоту и относительно недорогую стоимость данных систем, основными их недостатками является отсутствие контроля качества произведенного полива и невозможность контроля влияющих факторов (влажность почвы, температура воздуха и другие). Более продвинутые системы обеспечивают контроль этих факторов и обладают функциями автоматического полива или проветривания. Недостатками этих систем являются высокая стоимость, ненадежность конструкции, низкая автономность, отсутствие возможности применения в крупном хозяйстве.

Актуальность темы выпускной квалификационной работы (ВКР) обусловлена следующими факторами:

1) слабая разработанность систем-аналогов, имеющих функцию удаленного управления и мониторинга состояния теплицы, их высокая стоимость;

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
						9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2) отсутствие отечественных аналогов комплексных решений по автоматизации теплицы с возможностью модульного формирования технических функций системы;

3) ненадежность существующих систем вследствие конструктивной перегруженности, их низкая автономность и высокая стоимость.

Научная новизна работы состоит в удаленном управлении теплицей на основании данных о влияющих параметрах (таких как влажность почвы, температура воздуха и других). Использование сотовых сетей обеспечит высокую мобильность и автономность системы. Разрабатываемая система позволит полностью автоматизировать тепличное хозяйство, при этом предоставляя информацию об условиях произрастания сельскохозяйственных культур. Модульность системы даст возможность для формирования различных по комплектации вариантов системы согласно всем требованиям заказчика.

Целью данной работы является разработка модульной автономной микроконтроллерной системы капельного полива с возможностью удаленного контроля через сети сотовой связи.

Задачами проекта являются:

- анализ технического задания, обзор аналогов и выявление их недостатков;
- разработка функциональной структуры, определение состава системы, обзор устройств, входящих в систему;
- исследование методов измерения параметров почвы, изучение математических моделей;
- экспериментальное исследование коммерчески доступных датчиков влажности почвы, сравнительный анализ их характеристик;
- проектирование модулей системы, создание прототипа системы и исследование его свойств.

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОЛИВА С ВОЗМОЖНОСТЬЮ УДАЛЕННОГО КОНТРОЛЯ

Инновационная деятельность в сельском хозяйстве – это совокупность последовательных действий по созданию новой или улучшению сельскохозяйственной продукции, развитию технологий, систем управления на основе применения научно-исследовательских разработок или производственного опыта [1]. Внедрение инноваций при развитии аграрного сектора России является одним из **актуальных вопросов** повышения конкурентоспособности, улучшения качественных и количественных показателей национальной сельскохозяйственной продукции на мировом рынке.

Подтверждением этого является Государственная программа развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013-2020 годы [2]. Подпрограмма «Поддержка малых форм хозяйствования» (подпрограмма 4) имеет цель поддержания, дальнейшего развития сельскохозяйственной и несельскохозяйственной деятельности малых форм хозяйствования. Одним из показателей эффективности подпрограммы является количество крестьянских (фермерских) хозяйств, начинающих фермеров, осуществивших проекты создания и развития своих хозяйств. Подпрограмма «Техническая и технологическая модернизация, инновационное развитие» (подпрограмма 5) имеет целью повышение эффективности и конкурентоспособности продукции сельскохозяйственных товаропроизводителей за счет технической и технологической модернизации производства. Одним из показателей эффективности подпрограммы является количество реализованных инновационных проектов.

Разработка микроконтроллерной системы управления капельным поливом с контролем через сети сотовой связи – это инновационный проект, который направлен на использование в малых садоводческих и фермерских хозяйствах, что в полной мере отвечает направлениям государственной программы развития.

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

Проведение в России международных агротехнических выставок, таких как АГРОСАЛОН 2016 [3] (группа 7 – Машины и оборудование для орошения и водоотвода, группа 12 – Сельскохозяйственная электроника, оборудование для измерения и взвешивания или автоматизированные системы управления и контроля в сельском хозяйстве), ЮГАГРО 2016 [4] (разделы: оборудование для полива и орошения; оборудование для теплиц) подтверждает актуальность внедрения современных автоматизированных технологий в сельское хозяйство.

1.1 Анализ технического задания

Перед началом проектирования системы необходимо проанализировать техническое задание, включающее в себя требования по функциональности, составу, конструкции системы. Техническое задание на проектирование разработка модульной автономной микроконтроллерной системы капельного полива с возможностью удаленного контроля через сети сотовой связи представлено в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Техническое задание на проектирование микроконтроллерной системы управления капельным поливом с контролем через сети сотовой связи

Описание требования	Содержание требования
Исследование эффективности различных типов полива	Проведение анализа существующих решений по поливу растений, сравнительный анализ, выбор типа полива для теплицы.
Удаленный контроль за системой на больших расстояниях	Реализация возможности удаленного мониторинга и управления системой с помощью GSM связи.
Наличие устройств контроля микроклимата	Разработка сети датчиков, необходимых для мониторинга состояния микроклимата в теплице.
Модульность в формировании системы	Формирование частей системы как законченных автономных модулей, что увеличит масштабируемость и надежность системы.

Сформулированное техническое задание носит качественный характер, проведено после обзора аналогов. На этапе анализа технического задания можно сформулировать **список вопросов**, которые необходимо проработать в рамках ВКР. Список вопросов представлен в порядке изучения.

1. Обзор существующих систем-аналогов и уточнение технического задания: изучение типов полива и их особенностей, изучение существующих аналогов систем автоматического полива, выявление их недостатков и их устранение в проектируемой системе, уточнение технического задания.

2. Разработка функциональной структуры будущей системы: определение устройств, входящих в систему, построение структуры системы, выделение в ней основных блоков и модулей, определение порядка их взаимодействия.

3. Изучения вопроса контроля микроклимата теплицы: выявления физических величин, контроль которых необходим для эффективного выращивания растений, изучение методов измерения этих величин, построение математических моделей измерительной части системы.

4. Проектирование измерительной части системы как совокупность модулей: подбор компонентов, компоновка модулей, разработка алгоритма и программного обеспечения для взаимодействия с управляющим блоком.

5. Проектирование блока управления системой: подбор компонентов, компоновка блока, разработка алгоритма и программного обеспечения для взаимодействия с измерительными модулями.

6. Проектирование удаленного мониторинга и управления системой полива: изучение возможности использования GSM сети для удаленного контроля, разработка функциональной схемы удаленного взаимодействия пользователя с системой, разработка алгоритма сетевого взаимодействия модуля управления и пользователя, разработка программного обеспечения для взаимодействия модуля управления с сетью, разработка программного обеспечения для взаимодействия пользователя с сетью.

7. Прототипирование: реализация всей системы или ее частей в качестве прототипов, исследование характеристик системы.

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

1.2 Обзор аналогов

1.2.1 Типы полива, применяющиеся при построении систем автоматического полива

На данный момент существуют два типа систем полива, широко применяющихся на практике: дождевальная система полива и капельная система полива. Данные системы имеют различия в конструкции, изучение которых необходимо для выбора оптимальной системы для поставленной задачи. Сравнение основных конструктивных особенностей и параметров этих систем полива представлено в таблице А.1 Приложения А.

После проведенного сравнительного анализа двух систем полива для реализации проекта была выбрана система капельного полива благодаря следующим основным **достоинствам**:

- 1) низкое рабочее давление, что дает возможность организовать подачу воды без применения дополнительного насоса-нагнетателя;
- 2) подача воды точно под корень растений, что поможет избежать развития сорных культур, снизить распространение болезней и ожоги в связи с попаданием воды на листья;
- 3) низкие затраты электроэнергии, что поможет повысить автономность системы;
- 4) относительно низкая стоимость полевых компонентов системы (шланги, капельницы).

1.2.2 Обзор существующих систем капельного полива

В настоящее время существуют несколько решений для систем автоматизированного и автоматического капельного полива, различающиеся системой управления поливом, наличием или отсутствием систем мониторинга состояния растений, возможностью удаленного контроля.

Рассмотрим несколько вариантов таких систем, начиная от простых систем с контролем полива по таймеру и заканчивая концептами интеллектуальных автоматических систем.

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
						14
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Система капельного полива «Водомерка».

Система капельного полива «Водомерка» обеспечивает автоматический полив растений с наибольшей экономией воды, не создаёт корки на поверхности грунта и запитывается с любой ёмкости для воды, поднятой над грунтом на 0,5 метра. Автоматический контроллер работает от двух батареек АА. В базовой комплектации автоматическая система капельного полива «Водомерка» рассчитана на 2 грядки длиной по 4 метра и близкое расположение ёмкости для воды [5]. Стоимость данной системы в представленной комплектации составляет 3700 рублей. Схема данной системы представлена на рисунке 1.1.

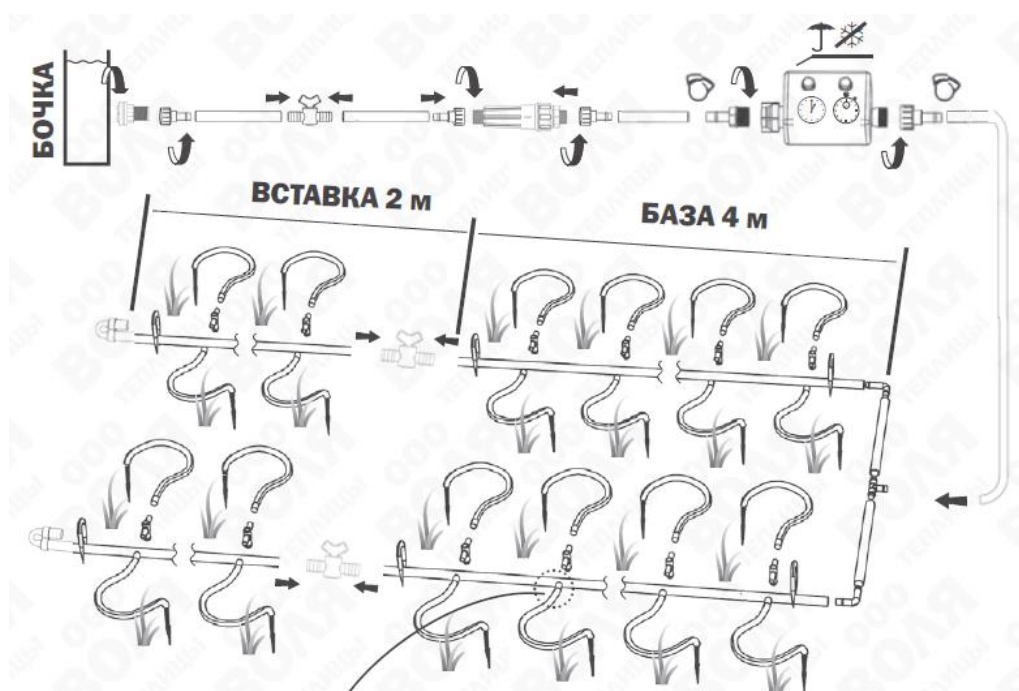


Рисунок 1.1 – Схема системы капельного полива «Водомерка»

К преимуществам данной системы можно отнести:

- простота конструкции, которая позволяет расширять систему дополнительной вставкой, отсутствие дополнительных изнашивающихся элементов (таких как насос);
- наличие таймера, регулирующего длительность и частоту полива;
- низкое энергопотребление – автономная работа таймера и клапана от двух пальчиковых батареек;
- наличие фильтра для очистки воды.

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

Таким образом, данная система представляет собой хороший пример наличия базовых элементов без конструктивной избыточности. В целом, конструкция исполнительной части данной системы (шланги, капельницы, фильтр) может быть использована в качестве прототипа для проектируемой системы.

Однако при описанных достоинствах система обладает и некоторыми **недостатками**, которые можно выделить при анализе:

- невозможность контроля качества полива (нет датчиков для обратной связи);
- невозможность контроля количества воды в емкости для полива;
- невозможность удаленного управления поливом.

Система автоматического полива «АкваДуся».

АкваДуся – это автоматическая система капельного полива, автономно выполняющая полный цикл полива на вашем огороде включая: налив бочки до определенного вами уровня; нагрев воды в бочке от солнечных лучей; запуск полива нагретой водой из бочки по определенному вами графику; медленную подачу воды каплями непосредственно под корни растений, с возможностью регулировки длительности полива для всех растений и скорости полива индивидуально для каждого растения; остановку полива [6]. Схема данной системы представлена на рисунке 1.2.

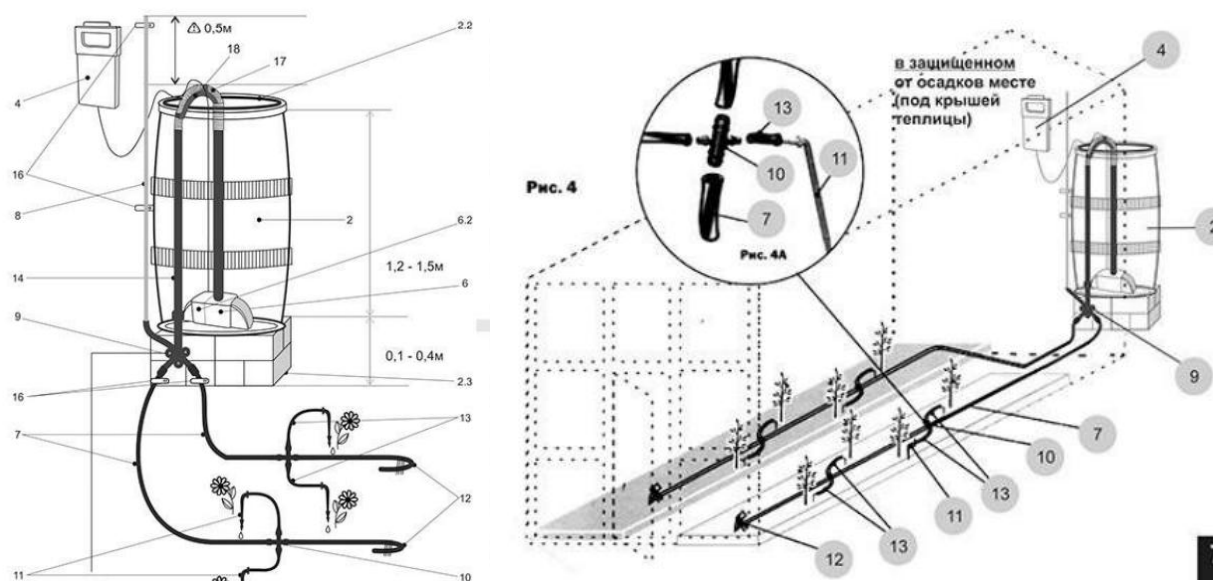


Рисунок 1.2 – Схема системы капельного полива «АкваДуся»

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

В составе системы «АкваДуся» можно выделить следующие элементы:

- 1) капельницы (с возможностью дозирования количества воды), шланги, тройники (7, 9, 11, 12, 13);
- 2) насос комбинированный (6);
- 3) контроллер с дисплеем (4);
- 4) индикатор уровня воды в бочке в виде прозрачной трубки (8);
- 5) крепежная арматура (16, 18).

Технически, система отличается от системы «Водомерка» наличием насоса, используемого для подачи воды из бочки в капельницы. Кроме того, здесь предусмотрен визуальный индикатор уровня воды в бочке, блок управления снабжен жидкокристаллическим дисплеем. Капельницы в данной системе имеют возможность регулирования количества воды, подаваемой под каждое растение.

Достоинствами этой системы (относительно системы «Водомерка») можно считать:

- наличие жидкокристаллического дисплея в некоторых версиях контроллера, его дополнительный функционал;
- возможность регулировать количество жидкости для каждого растения при заданной скорости полива (осуществляется регулированием капельницы);
- наличие визуального индикатора уровня воды в бочке;
- наличие удобной крепежной арматуры для монтажа.

К недостаткам данной системы можно отнести:

- наличие насоса как дополнительного элемента, ужесточающего требования к монтажу системы, являющегося источником дополнительного энергопотребления и снижающего общую надежность системы в целом;
- отсутствие возможности удаленного контроля в системе;
- относительно высокая стоимость данной системы (в комплектации с контроллером с дисплеем стоимость 6700 рублей).

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

Система автоматического капельного полива растений.

Данная система была обнаружена в базе патентов ФИПС под названием «Система автоматического капельного полива растений» [7]. Схема данной системы представлена на рисунке 1.3.

Данная система представляет собой интеллектуальное решение вопроса автоматизации тепличного хозяйства. По сравнению с системами, представленными выше, здесь предусмотрена обратная связь (датчики влажности почвы).

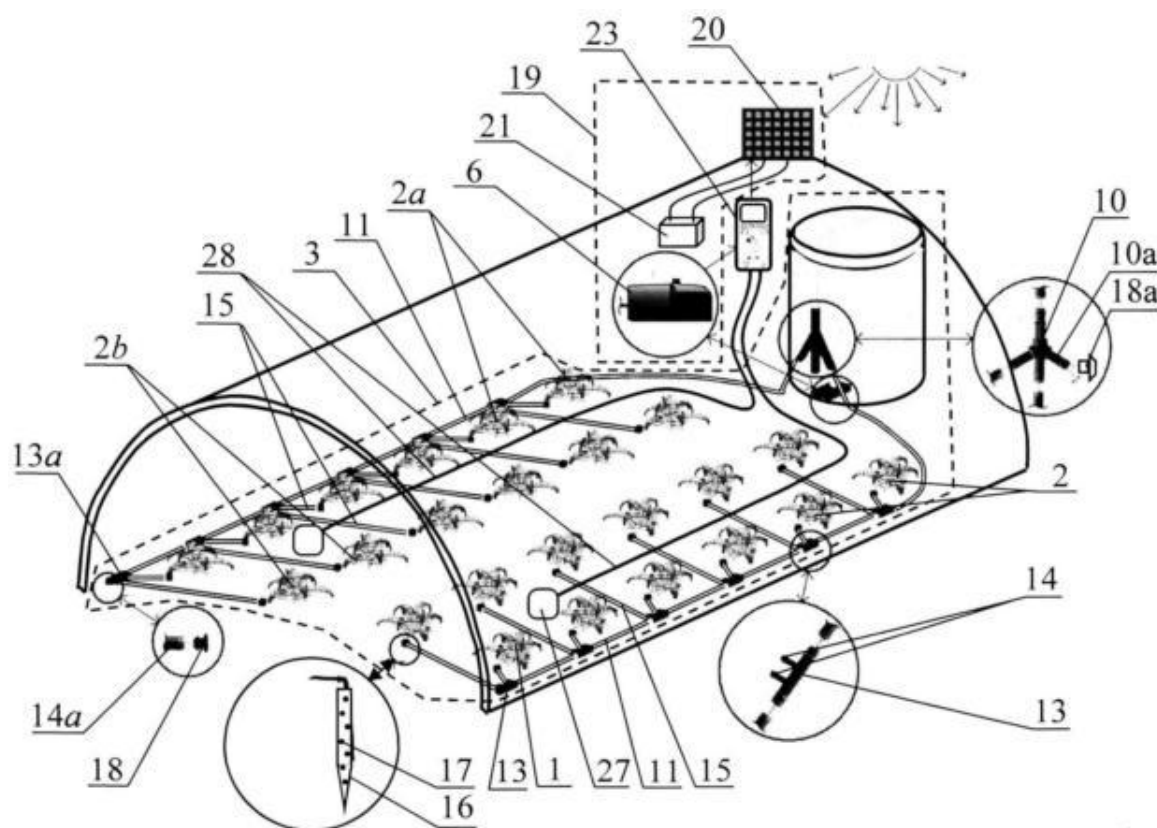


Рисунок 1.3 – Схема системы автоматического капельного полива растений

Достоинствами данной системы являются:

- питание системы осуществляется от аккумулятора с солнечной батареей, что обеспечивает высокую автономность;
- осуществляется получение информации о качестве полива с помощью датчиков влажности почвы;
- оригинальный метод расположения шлангов и капельниц в системе.

Однако система и не лишена **недостатков**, которые могут являться основой для проработки в данном проекте:

- наличие насоса-нагнетателя с одной стороны повышает давление в системе, но с другой стороны снижает надежность, так как происходит неизбежное его засорение и износ механических частей;
- отсутствие возможности удаленного контроля системы и мониторинга микроклимата;
- отсутствие возможности контроля температуры внутри теплицы и влияния на нее (нет датчиков температуры и устройств для проветривания).

Система автоматизированного управления тепличным хозяйством.

Данная система представляет собой проект студентов Хакасского государственного университета им. Н.Ф. Катанова. Система предназначена для интенсивного выращивания растений на инертных субстратах. Данная технология выращивания включает следующие элементы:

- используется метод выращивания малообъемных инертных субстратах;
- применяется капельная система полива;
- автоматизированные установки приготовления и подачи питательных веществ;
- автоматические программы контроля микроклимата;
- обеспечение контролируемым светом для круглогодичного получения продукции [8].

Схема данной системы представлена на рисунке 1.4.

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
						19
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

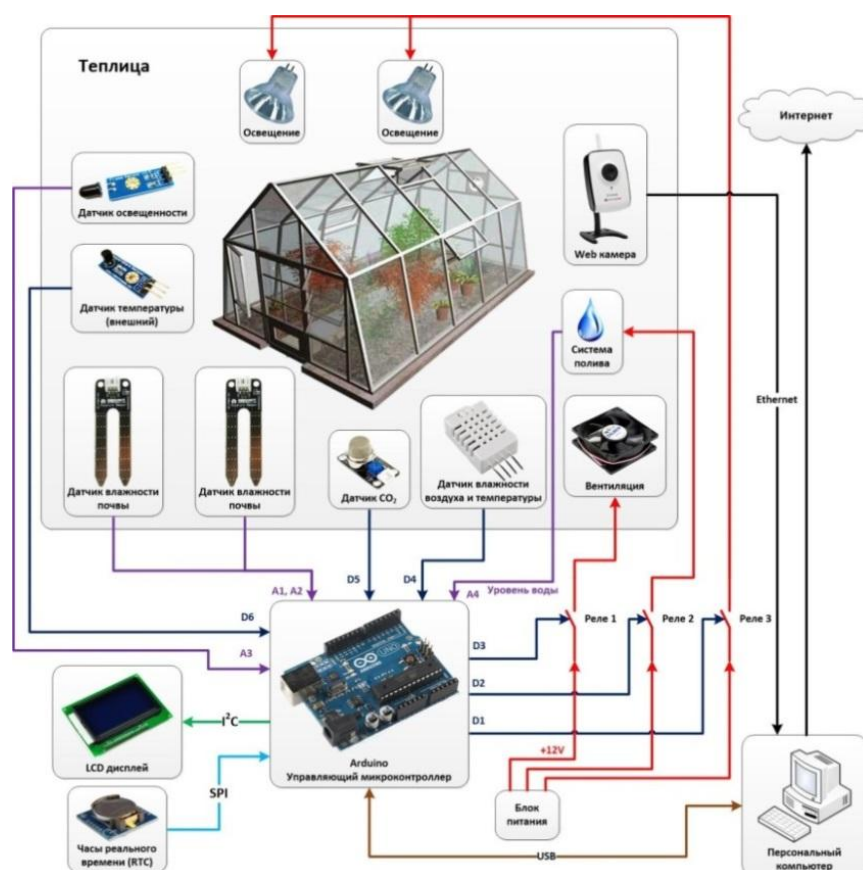


Рисунок 1.4 – Система автоматизированного управления тепличным хозяйством

При анализе данной системы можно выделить следующие *достоинства*:

- в системе реализован полноценный мониторинг микроклимата в теплице: использованы датчики влажности почвы, датчик температуры и влажности воздуха, датчик освещенности и содержания углекислого газа, датчик уровня воды в емкости;
- реализовано автоматическое управление системой полива, вентиляции и освещения теплицы;
- реализованы программы удаленного мониторинга тепличного хозяйства с выводением данных в Интернет и на мобильный телефон оператора;
- блок управления аппаратно реализован на доступной и имеющей множество возможностей расширения микроконтроллерной платформе Arduino.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Таким образом, данная система может рассматриваться как прототип реализации электронной части системы автоматического управления поливом.

Однако, как и любое техническое решение, система имеет свои **недостатки**:

- в данной системе реализован удаленный мониторинг параметров теплицы, но нет возможности осуществить удаленное управление;
- удаленный контроль осуществляется через проводной интерфейс, что не эффективно в полевых условиях;
- система питается от сети 220В, что при использовании в полевых условиях небезопасно и не дает системе автономности;
- система вентиляции не пригодна для использования в крупных теплицах.

Результаты обзора аналогов.

По результатам анализа систем-аналогов можно сделать следующие выводы:

1) ни в одном из рассмотренных аналогов нет системы удаленного управления поливом;

2) система удаленного мониторинга поливом представлена только в одном аналоге, однако для реализации в полевых условиях она должна быть пересмотрена;

3) наличие насоса-нагнетателя для подачи воды от емкости к капельницам имеется во многих системах, однако по результатам анализа установлено, что данный элемент снижает надежность системы в целом;

4) датчики для контроля состояния в теплице используются в нескольких аналогах, однако задача определения оптимального типа датчиков, необходимого количества датчиков для оценки состояния микроклимата во всей теплице с допустимой погрешностью не решена;

5) система вентиляции представлена только в одном аналоге, но она не пригодна для теплиц средних и крупных размеров;

6) использование сети 220 В в некоторых аналогах снижает безопасность системы и делает систему зависимой от сети.

Отмеченные в аналогах недостатки будут устранены в проектируемой системе, что позволит сделать ее эффективной и конкурентоспособной.

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
						21
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1.3 Теоретическое изучение элементов разрабатываемой системы

1.3.1 Разработка функциональной структуры проектируемой системы

По итогам анализа аналогов можем представить структуру нашей будущей системы на рисунке 1.5.

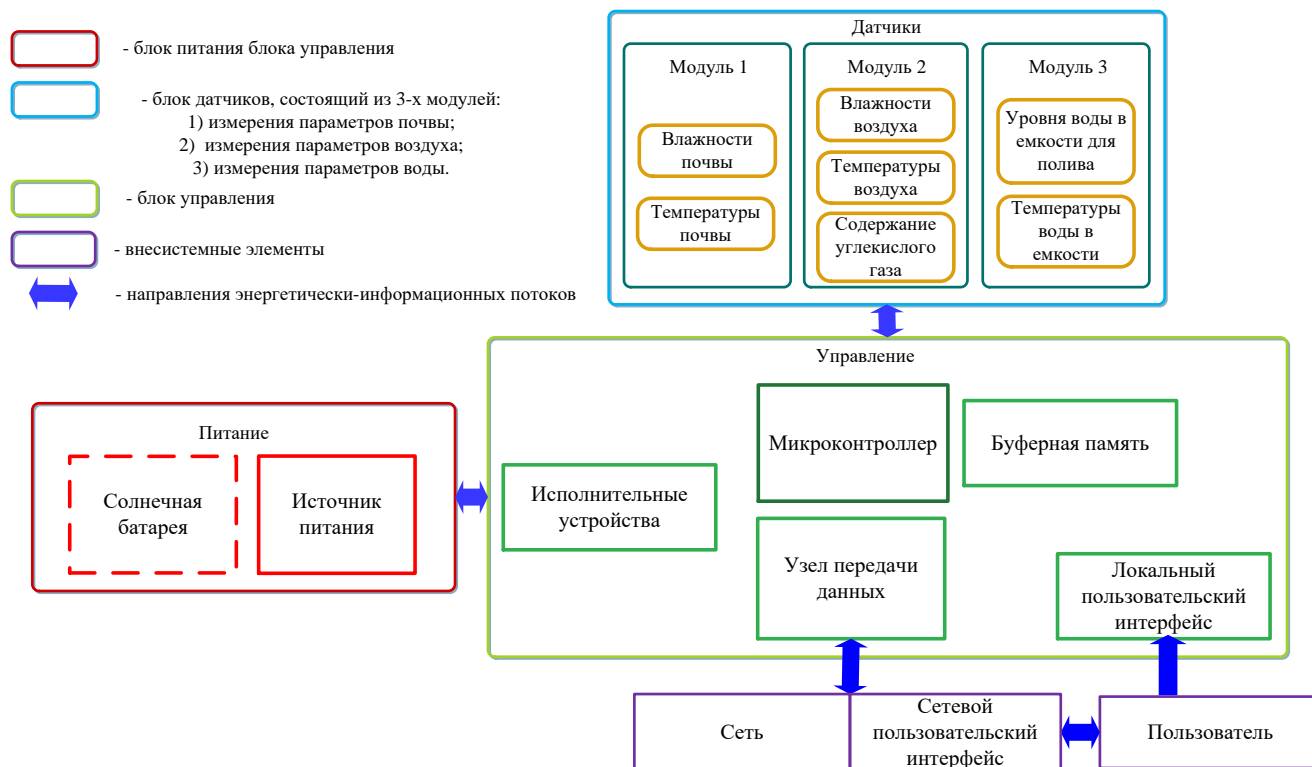


Рисунок 1.5 – Структурная схема проектируемой системы автоматического полива

Проанализируем построенную структурную схему и уточним функциональное назначение всех блоков, входящих в ее состав.

1. **Ядро системы** представляет микроконтроллер, который осуществляет сбор информации с датчиков и сохраняет ее в буферную память, производит управление периферийными устройствами (клапана, устройства проветривания), осуществляет передачу данных о состоянии микроклимата в теплице в сеть и прием из сети управляющих команд. К микроконтроллеру подключаются сигнальные линии исполнительных устройств (управление которыми осуществляется), сигнальные линии датчиков (с которых собирается информация), буферная память (в которой хранится информация с датчиков и

другая служебная информация) и узел передачи данных (отвечает за сетевое взаимодействие с системой). Вместе они образуют **блок управления**, который через локальный пользовательский интерфейс предоставляет пользователю возможность настройки и контроля системы управления.

2. **Блок датчиков** представляет собой датчики трех типов: датчики для измерения параметров почвы (влажность, температура), датчики для измерения параметров воздуха (температура, влажность, содержание углекислого газа) и датчики для измерения воды для полива (уровень воды в емкости, температура воды). С помощью данных датчиков осуществляется контроль оптимальных условий произрастания сельскохозяйственных культур в теплице.

3. **Блок питания** состоит из аккумуляторной батареи требуемой емкости, которая обеспечивает энергией систему, и солнечной батареи, служащей для подзарядки аккумуляторной батареи с целью увеличения времени автономной работы системы и снижения требований к емкости батареи.

Таким образом, в системе выделено 3 крупных функциональных блока, каждый из которых состоит из более мелких модулей. Преимуществом такого деления является возможность разработке отдельных модулей независимо друг от друга, удобство отладки взаимодействия между модулями и блоками.

1.3.2 Уточнение технических требований на проектируемую систему

Уточним качественные и количественные требования к проектируемой системе с учетом проведенного анализа аналогов и поставленных задач проектирования, представим уточненное техническое задание в таблице А.2 Приложения А. Уточненные технические требования на проектирование системы являются ориентировочными при проектировании модулей.

1.3.3 Изучение возможностей микроконтроллерных плат «Arduino» для использования в разрабатываемой системе

Микроконтроллер – это специальная микросхема, предназначенная для управления различными электронными устройствами. Микроконтроллер объединяет в себе микропроцессор, оперативное запоминающее устройство

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		23

(ОЗУ), постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) и различную периферию внутри одного корпуса.

В настоящее время существует большое количество микроконтроллеров и специальных микроконтроллерных плат для разработки различных устройств автоматизации [9] , [10], основные среди них:

- микроконтроллеры Atmel ATmega, лежащие в основе микроконтроллерных плат Arduino;
- микроконтроллеры ARM STM32, лежащие в основе микроконтроллерных плат семейства STM DISCOVERY;
- микроконтроллеры Texas Instrumensts MSP430, лежащие в основе микроконтроллерных плат Ti MSP430 LaunchPad.

Основные преимущества Arduino в сравнении с другими платами для разработки:

1) низкий порог вхождения – система разработана так, чтобы за минимальное количество времени пользователь знаний мог получить функциональное устройство;

2) быстрое прототипирование – для создание макетных образцов при помощи Arduino в основном достаточно макетной платы и наборов перемычек;

3) удобство языка программирования – Arduino программируется в Arduino IDE на C/C++ гибридном языке, большое количество готовых примеров делают программы понятными и доступными;

4) большое количество аппаратных модулей и программных библиотек – использование различных устройств и готовых библиотек к ним позволяет повысить скорость разработки, что позволяет пользователю сосредоточиться на разработке проектов, а не изучении устройства и принципов функционирования отдельных аппаратных и программных элементов.

Платформа Arduino представлена несколькими платами, отличающимися используемым микроконтроллером, объемами памяти и размерами. Сравнение различных плат Arduino представлено в таблице А.3 Приложения А.

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

Для изучения и прототипирования в данном проекте была выбрана Arduino UNO, как более удобная для сбора и отладки элементов проекта на макетной плате. Для реализации в блоках системы выбраны Arduino Nano и Arduino Pro Mini как наиболее компактные.

1.3.4 Изучение возможностей реализации удаленного контроля с помощью Arduino (обзор беспроводных технологий)

Решение задачи беспроводного мониторинга и управления системой полива может быть решено различными способами. В настоящее время существуют различные стандарты и технологии беспроводной передачи данных. Классификация актуальных на данный момент стандартов беспроводной передачи данных [11] приведена в таблице А.4 Приложения А.

Анализируя таблицу А.4, видим, что из существующих технологий наиболее подходящими для удаленного контроля являются технологии, связанные с сетями сотовой связи, а именно GSM/GPRS/EDGE и 3G. Использование сетей сотовых связей дает возможность контроля над объектом на любом расстоянии в зоне покрытия сети, что позволяет реализовать универсальные решения автоматизации.

GPRS (General Packet Radio Service – пакетная радиосвязь общего пользования) – это надстройка над технологией мобильной связи GSM, осуществляющая пакетную передачу данных. GPRS позволяет пользователю сети сотовой связи производить обмен данными с другими устройствами в сети GSM и с внешними сетями, включая Интернет [12].

Так как объем передаваемых данных незначителен и высокие требования к скорости передачи не предъявляются, то можно ограничиться стандартом GSM/GPRS/EDGE. В настоящее время на рынке представлено большое количество аппаратных модулей, поддерживающих стандарт GSM/GPRS/EDGE, и по цене они более доступны, чем модули 3G.

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

1.3.5 Обзор существующих GSM модулей со стандартом GSM/GPRS/EDGE

Использование GSM в качестве устройств связи для беспроводных решений в системах «Умный дом» и «Интернет вещей» становится все более популярным. В настоящее время на рынке представлено множество GSM модулей, которые являются интегрированными решениями для обеспечения доступа к GSM сетями (звонки, интернет), а также доступ в Internet. Обзор наиболее популярных GSM модулей, поддерживающих стандарт GPRS, представлен в таблице А.5 Приложения А.

По результатам обзора в качестве GSM-модуля для системы был выбран модуль SIM800L по причинам его низкого тока потребления в активном режиме и режим сна, а также GPRS последнего класса (что обеспечивает максимальную скорость передачи/приема) и встроенным сетевым протоколам, таким как TCP/IP (возможность соединения с Internet на уровне этого стека) и HTTP (встроенный в модуль браузер).

1.3.6 Определение структуры межмодульного взаимодействия

Как была показано при разработке функциональной структуры системы, представленной на рисунке 1.5, система состоит из управляющего модуля и автономных модулей датчиков, которые осуществляют измерения различных контролируемых параметров в системе.

При таком подходе к проектированию системы возникает вопрос о методах информационного взаимодействия между управляющим модулем и модулями датчиков. Способ обмена данными должен учитывать наличие определенного расстояния между управляющим и измерительным устройствами, предоставлять возможность гибкого размещения измерительных модулей на контролируемой площади. Возможные способы обмена данными, применяемые при построении измерительных систем, представлены на рисунке 1.6.

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
						26
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

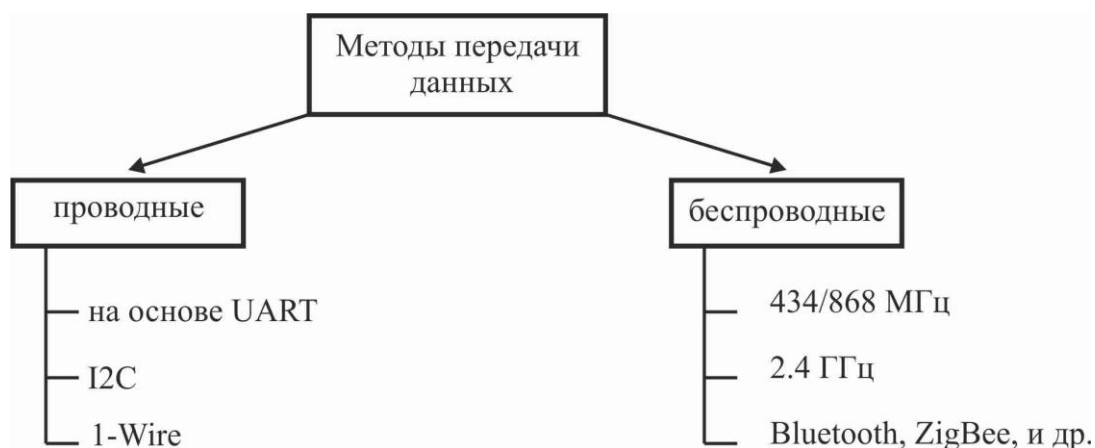


Рисунок 1.6 – Методы обмена данными между измерительным и управляющим устройствами

Для возможности удобного размещения измерительных модулей относительно управляющего было принято решение о построении беспроводной связи между ними. В качестве беспроводной технологии была выбрана радиосвязь диапазона 2.4 ГГц, что обусловлено следующими причинами:

- 1) распространенность радиомодулей, работающих частотном диапазоне 2.4 ГГц, что явилось конкурентным преимуществом относительно радиочастотного диапазона 434/868 МГц;
- 2) значительно более низкая стоимость подобного вида модулей, относительно модулей, соответствующих стандартам передачи Bluetooth и ZigBee.

В качестве радиомодуля для реализации беспроводной связи в проектируемой системе был выбран модуль 2.4GHz nRF24L01+, который распространяется в двух модификациях (с печатной антенной и без усилителя мощности, с внешней антенной и усилителем мощности). Сравнение двух модификаций модуля представлено в таблице А.6 Приложения А.

По результатам сравнения видим, что модификация модуля с внешней антенной в 10 раз больший радиус действия, но и потребление тока в модуле с внешней антенной больше примерно в 5 раз.

При проведении изучения и прототипирования данном проекте использовались модули со встроенной антенной, для использования в системе

возможно использование модулей с внешней антенной (особенно актуально для управляющего модуля).

Выводы по главе 1: подробно проанализирована актуальность темы ВКР проведен анализ технического задания и на его основании сформулированы задачи, которые будут рассмотрены в ВКР.

Были изучены различные типы систем автоматического полива, представлены системы-аналоги. В качестве аналогов были рассмотрены две системы, представленные на рынке в данный момент, и две системы-концепта. Анализ аналогов позволил выявить их недостатки, которые в проектируемой системе будут исключены.

Разработана структурная схема проектируемой системы, определен состав системы, уточнены технические требования, предъявляемые к системе.

Проведен анализ беспроводных сетей, по результатам которого доказывается эффективность использования GSM-сети для контроля системы полива, выбрано техническое решение из представленных на рынке для реализации контроля.

Проведен анализ способов межмодульного взаимодействия в системе, доказана эффективность беспроводной связи, выбрано техническое решение из представленных на рынке для реализации радиосвязи между модулями.

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

2 ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ СИСТЕМЫ

2.1 Измерение параметров почвы

2.1.1 *Обоснование актуальности задачи измерения влажности и температуры почвы*

Решение задачи повышения урожайности сельскохозяйственных культур зависит от многих факторов, однако одним из определяющих факторов является влажность почвы. При недостатке влаги резко снижается урожайность, при несвоевременном поливе растение может погибнуть совсем. Растения необходимо поливать в нужное время, которое определяется не только степенью влажности почвы (хотя это и основной фактор), но и температурой почвы, температурой воздуха, наличием или отсутствием осадков. Полив необходимо проводить в нужном количестве и правильными способами, ведь избыток влаги угнетает растения, не меньше, чем ее недостаток. Кроме того, важно учитывать, что для многих сельскохозяйственных культур требуются разные режимы полива. В связи с этим вопрос контроля влажности почвы в системе автоматического полива является основным.

Температурный режим почвы тоже способен оказывать влияние на растения. Прорастание семян, развитие корневой системы, жизнедеятельность почвенной микрофлоры, усвоение растениями продуктов минерального питания зависит от температуры почвы. Например, если температура почвы будет слишком низкой, растение начнет испытывать фосфорное голодание, слишком высокая же температура приводит к затрудненному всасыванию корнями влаги.

2.1.2 *Величины, характеризующие содержание влаги в почве, почвенно-гидрологические константы*

Влажность в почвоведении определяется как количество воды, которое приходится на количество абсолютно сухой почвы. Важно отметить особенность традиционного почвенного подхода, когда расчет влажности ведется именно на

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

абсолютно сухую навеску [13]. Влажность почвы принято характеризовать массовой или объемной влажностью.

Под массовой влажностью понимается отношение массы влаги, которая содержится в почве, к массе твердой сухой почвы:

$$W = \frac{M}{M_0}, \quad (2.1)$$

где W – массовая влажность;

M – масса влаги;

M_0 – масса сухой почвы.

Под объемной влажностью понимается отношение объема воды, которая содержится в теле, к объему твердой сухой почвы:

$$\theta = \frac{V}{V_0}, \quad (2.2)$$

где θ – объемная влажность;

V – объем воды в почве;

V_0 – объем сухой почвы.

Массовая и объемная влажности связаны между собой соотношением:

$$\theta = W\rho_{\text{п}}, \quad (2.3)$$

где $\rho_{\text{п}}$ – плотность почвы.

В практике почвоведения активно используются различные почвенно-гидрологические константы. **Почвенно-гидрологическая константа** – это характерная влажность почвы, определяемая по ее состоянию или по состоянию контактирующих с почвой объектов и используемая в практических расчетах и сравнительных оценках [13]. Перечислим ниже некоторые из них, которые будут использоваться при разработке системы автоматического полива.

Полная влагоемкость (ПВ) W_s ($W_{\text{ПВ}}$) – это предельная величина влажности почвы, определяемая заполнением всего порового пространства в почве водой. Максимальное значение полной влагоемкости для минеральных почв [14]:

$$W_{\text{ПВ}} = (40 \dots 50\%)W \quad (2.4)$$

Наименьшая влагоемкость (НВ) $W_{\text{НВ}}$ – это установившаяся после стекания избытка воды влажность предварительно насыщенной почвы, достигается примерно через 2-3 дня после интенсивного дождя или полива хорошо

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
						30
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

дренируемой однородной почвы [13]. Данная константа имеет большое практическое значение, по ней производят полив растений. Значение наименьшей влагоемкости $W_{НВ}$ относительно полной влагоемкости определяется как:

$$W_{НВ} \approx 0.5W_{ПВ} \quad (2.5)$$

Влажность завядания (ВЗ) $W_{ВЗ}$ – влажность почвы, при которой появляются устойчивые признаки завядания растений с хорошо развитой корневой системой не исчезающие при помещении растений на 12 часов в атмосферу, насыщенную парами воды [13]. Данная величина является нижней предельной границей влажности почвы, при которой растение погибает. Значение влажности завядания $W_{ВЗ}$ относительно полной влагоемкости определяется как:

$$W_{ВЗ} \approx 0.25W_{ПВ} \quad (2.6)$$

Исходя из этих констант получаем, что максимальный диапазон доступной для растений влаги определяется соотношением:

$$НВ - ВЗ = W_{НВ} - W_{ВЗ} \approx 0.25W_{ПВ} \quad (2.7)$$

На практике же наиболее оптимальным диапазоном влажности для растений является диапазон:

$$0.7НВ - НВ, \quad (2.8)$$

который следует поддерживать в корнеобитаемом слое, чтобы избежать непродуктивных потерь влаги на стекание ее в нижележащие слои и в то же время способствовать наиболее эффективному развитию растения [13].

Таким образом, диапазон измерения датчика влажности почвы должен составлять (для полного контроля влажности почвы):

$$D = (0 \dots 50\%)W, \quad (2.9)$$

а практически контролируемый уровень влажности по формуле (2.8):

$$D_c \approx (0.35 \dots 0.5)W_{ПВ} = (0.18 \div 0.25)W \quad (2.10)$$

Данные значения приняты за опорные при подборе датчика влажности почвы.

2.1.3 Существующие подходы к измерению влажности почвы

Различают два типа методов, которые применяются для измерения влажности почвы: прямые и косвенные. В прямых методах производится непосредственное разделение материала на сухое вещество и влагу. В косвенных методах измеряется величина, функционально связанная с влажностью материала [15].

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31

Схема, иллюстрирующая методы измерения влажности почвы, представлена на рисунке 2.1.

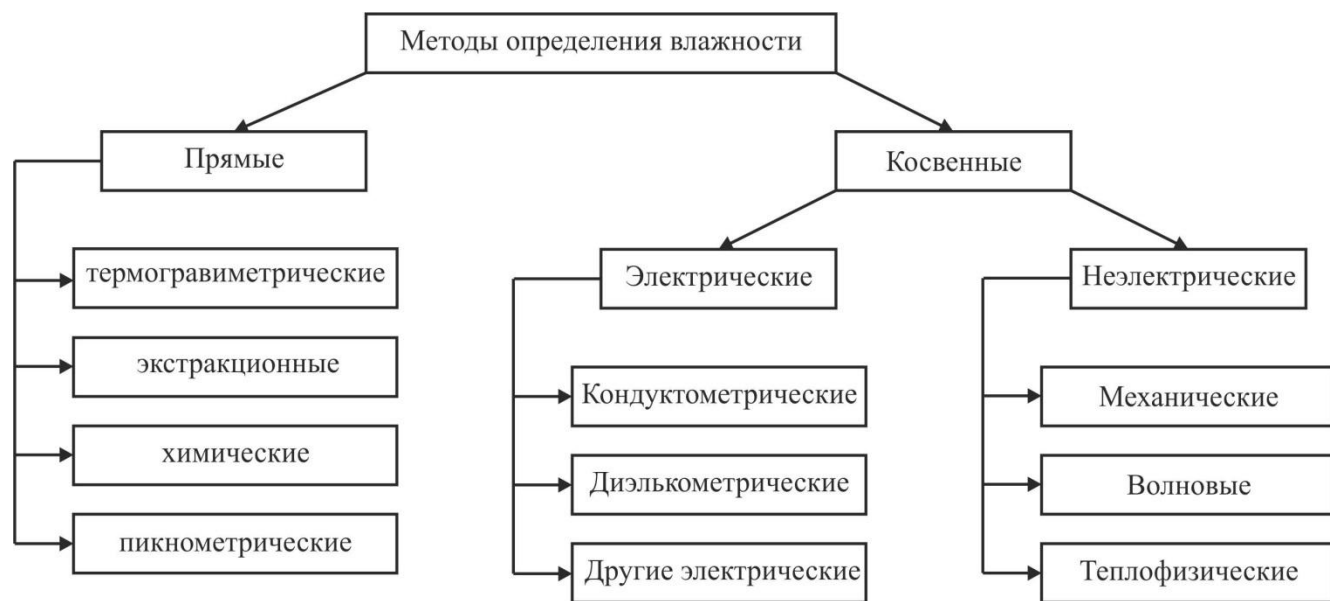


Рисунок 2.1 – Методы измерения влажности

Прямые методы используются в основном при лабораторных условиях, достаточно сложны и трудоемки, поэтому для практических измерений пользуются косвенными методами.

Косвенные методы делятся на две большие группы: электрические и неэлектрические. В данной работе будут рассматриваться электрические методы как более простые, распространенные на практике и менее дорогостоящие. Однако в настоящее время активно получили развитие и неэлектрические методы измерения влажности, в частности технологии бесконтактного измерения влажности почвы, например, на основе инфракрасного излучения [16].

Ниже рассмотрим более подробно электрические методы измерения влажности, характеристики остальных методов, их особенности, преимущества и недостатки представлены в [15], [16].

2.1.4 Обобщенная структурная схема для анализа и синтеза приборов измерения влажности почвы

При анализе и синтезе устройств измерения влажности может быть использована обобщенная структурная схема [15], представленная на рисунке 2.2.

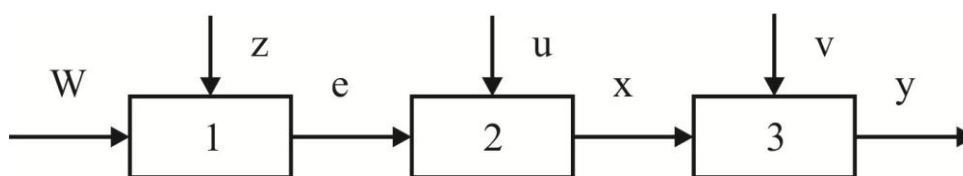


Рисунок 2.2 – Обобщенная структурная схема прибора измерения влажности почвы:

- 1 – звено, осуществляющее преобразование влажности в физическое свойство материала; W – влажность почвы; e – физическое свойство материала, используемого для измерения влажности; z – возмущающее воздействие на звено 1, связанное с изменением свойств материала под влиянием других факторов (температура, плотность, химический состав);
- 2 – первичный измерительный преобразователь (ИП); x – выходной сигнал первичного ИП; u – возмущающее воздействие на звено 2, связанное с изменением условий измерения;
- 3 – измерительное устройство, сравнивающее сигнал первичного ИП x с мерой этой величины; y – выходной сигнал прибора; v – помеха, воздействующая на измерительное устройство

Ниже эта схема будет представлена для кондуктометрического и диэлькометрического методов измерения влажности почвы.

2.1.5 Кондуктометрический метод измерения влажности почвы

Электропроводность почвы является одной из характеристик почвы, измерение которой может быть использовано при определении влажности почвы. При построении математических моделей электропроводность почвы может характеризоваться одной из следующих взаимосвязанных величин:

- 1) сопротивление почвы, R Ом;

2) электропроводность почвы:

$$Q = \frac{1}{R}, \quad (2.11)$$

где Q – электропроводность почвы, Ом^{-1} .

3) удельное сопротивление почвы:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l}, \quad (2.12)$$

где ρ – удельное сопротивление, $\text{Ом} \cdot \text{м}$;

R – сопротивление почвы, Ом ;

S – площадь сечения участка почвы, м^2 ;

l – длина участка почвы, м .

Значение сопротивления почвы зависит от большого комплекса факторов, таких как влажность, плотность, температура, химико-минералогический состав, механический состав, структура почвы. Ввиду этого электропроводность почвы изменяется в широком диапазоне с отношением $10^6 \div 10^7$ раз между максимальным и минимальным значениями. Кроме того, сопротивление почвы значительно зависит от способа измерения, в зависимости от которого возникают различные эффекты:

1) при измерении на постоянном токе необходимо оценивать эффект поляризации;

2) при изменении на переменном токе требуется учитывать влияние частоты тока на результат измерения в виду реактивных составляющих полного сопротивления почвы, обусловленных различными явлениями: токораспределение в почве, ориентации дипольных молекул, скин-эффект.

Возникновение ЭДС поляризации при прохождении постоянного тока через влажную почву приводит к увеличению сопротивления, что проявляется сильнее с ростом напряжения, приложенного к электродам. Борьба с этим нежелательным эффектом ведется различными путями: уменьшением плотности тока через электроды путем увеличения их площади, уменьшения силы тока и напряжения,

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
						34
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

использование переменного тока промышленной частоты 50 Гц вместо постоянного тока, либо тока с частотой 1-10 кГц.

Кроме того, при измерениях электропроводности почв возникает целый ряд методических трудностей по обеспечению идеального и по возможности постоянного контакта между электродами, погружаемыми в почву, и самой почвой. Этот контакт изменяется в процессе высыхания (увлажнения), уплотнения (разрыхления) почвы. Также необходимо учитывать коррозию электродов, влияние температурного эффекта и многое другое [17].

Для определения влажности почвы по ее сопротивлению было предложено множество зависимостей, в [17] наиболее близкой к реальности называется следующая зависимость для влажности почвы:

$$W = \frac{a}{R^b} + c, \quad (2.13)$$

где a, b – константы, зависящие от характера почвы;

c имеет смысл влажности при $R \rightarrow \infty$.

Отметим, что b всегда имеет значение $b \approx 1.5 - 2$.

Реальные данные, полученные по зависимости удельного сопротивления почвы от влажности [17] представлены на рисунке 2.3.

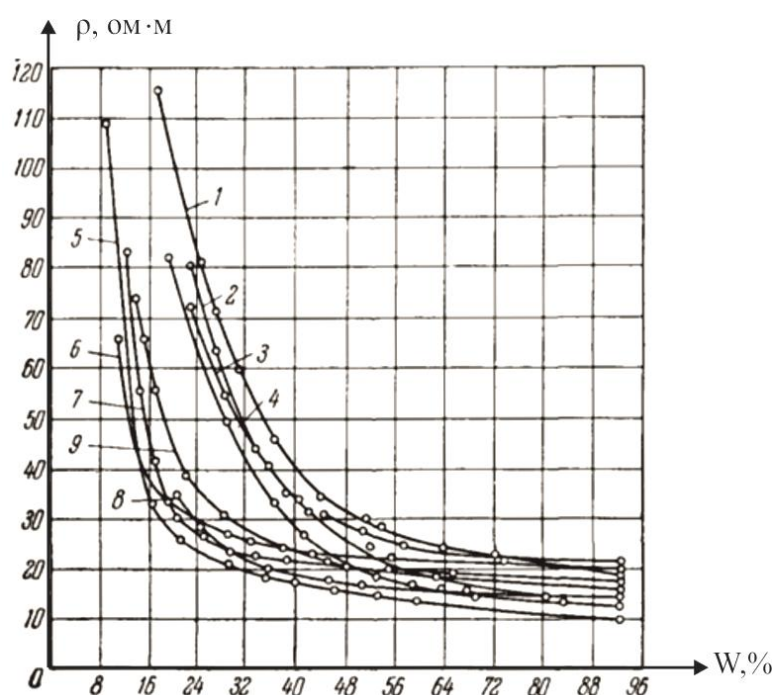


Рисунок 2.3 – Зависимость удельного сопротивления почвы от влажности

Здесь показаны зависимости $\rho = f(W)$ для тонкодисперсных почв на графиках 1-4, для грубодисперсных почв на графиках 5-9. Для получения этой зависимости все остальные факторы, которые могут одновременно с величиной W влиять на сопротивление, должны искусственным образом приводиться к постоянству. В реальных же измерительных условиях на сопротивление почвы, как было сказано выше, оказывают влияние множество факторов.

Одним из факторов, оказывающих влияние на сопротивление почвы, является температура почвы. Иллюстрация этого влияния представлена на рисунке 2.4.

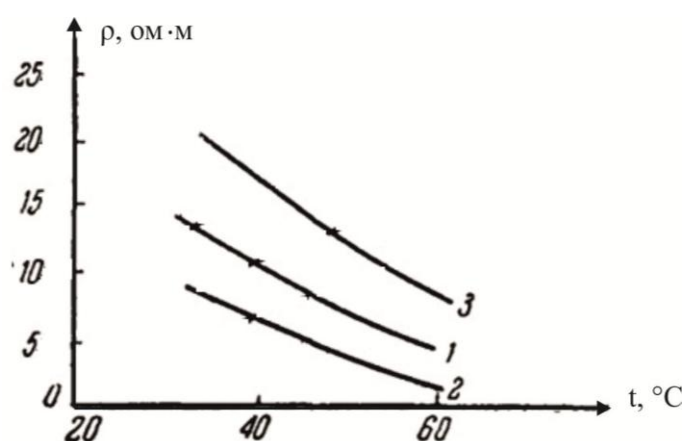


Рисунок 2.4 – Влияние температуры на удельное сопротивление почвы

С целью учета влияния температуры была получена зависимость, имеющая линейный характер [17]:

$$R_t = R_{21}(1 - \beta(t - t_{21})) \quad (2.14)$$

где R_{21} – сопротивление при 21°C ;

β – температурный коэффициент сопротивления почвы.

Зависимость удельного сопротивления почвы от температуры для более низких температур [18], представленная на рисунке 2.5, показывает, что полученную линейную зависимость (2.14) можно экстраполировать до 0°C . При температурах ниже 0°C наблюдается крутой излом характеристики ввиду перехода воды в другое агрегатное состояние.

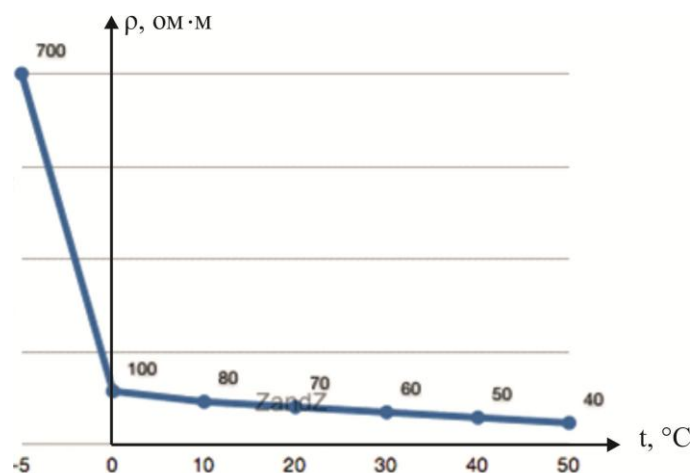


Рисунок 2.5 – Зависимость удельного сопротивления почвы от температуры в области более низких температур

Таким образом, можно сделать следующие **выводы** о характере зависимости сопротивления почвы от влажности $R(W)$:

- 1) начальный участок характеристик, соответствующий низкой и средней влажности ($W \leq 30 \%$) характеризуется высокой крутизной, то есть влагомер имеет высокую чувствительность к изменению влажности;
- 2) участок повышенной влажности ($W > 30 \%$) характеризуется значительным снижением крутизны характеристики $R(W)$ и чувствительности влагомера, стоит отметить, что дисперсность почвы влияет на чувствительность влагомера;
- 3) для корректной работы необходимо учитывать температуру почвы и вносить корректировку в измеряемое сопротивление.

2.1.6 Диэлькометрический метод измерения влажности почвы

Диэлькометрия – это процесс измерения диэлектрических свойств материалов. Диэлькометрический метод исследования наряду с кондуктометрическим является основным методом, который используется в сельскохозяйственном производстве для контроля состояния веществ и параметров технологических процессов [19]. Диэлькометрический метод обеспечивает повторяемость измерений, работу в режиме реального времени и простоту реализации средств измерений.

Диэлектрическая проницаемость почвы, которая представляет собой сложный многофазный материал, зависит от диэлектрических свойств непосредственно самой почвы (которые в свою очередь зависят от ее химических свойств, структуры частиц и других факторов), а также от диэлектрических особенностей воздуха и влаги, содержащихся в почве. При построении математических моделей, характеризующих диэлектрическую проницаемость почвы, обычно используются следующие пары величин:

1) вещественная ε' и мнимая ε'' составляющие комплексной диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon'', \quad (2.15)$$

где ε^* - комплексная диэлектрическая проницаемость почвы;

2) диэлектрической проницаемостью ε и тангенсом угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$.

Связь между этими параметрами выражается формулами:

$$\varepsilon^* = \varepsilon (1 - i \operatorname{tg} \delta); \operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2.16)$$

Емкость датчика C связана с диэлектрической проницаемостью соотношением:

$$C = g \varepsilon_0 \varepsilon_x, \quad (2.17)$$

где g – геометрический фактор, учитывающий конструктивное выполнение емкостного датчика;

$\varepsilon_0 = 8,85 * 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$ – диэлектрическая проницаемость в вакууме;

ε_x – относительная диэлектрическая проницаемость почвы, определяемая как:

$$\varepsilon_x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (2.18)$$

В теоретических исследованиях почва представляется как многокомпонентная среда, для которой используется модель диэлектрической проницаемости многокомпонентной среды. Дисперсная среда с хаотической или частично упорядоченной структурой может быть представлена в виде диэлектрических слоев, ориентированных как параллельно, так и перпендикулярно вектору электрического поля [20]. Такая модель представлена на рисунке 2.6.

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		38

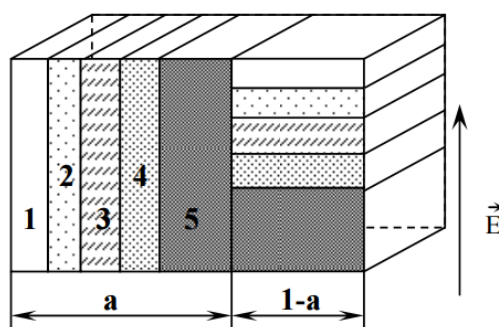


Рисунок 2.6 – Модель диэлектрической проницаемости многокомпонентной среды:

1– воздух; 2 – рыхлосвязная вода; 3 – свободная вода; 4 – твердые частицы; 5 – прочносвязная вода.

Диэлектрическая проницаемость такой модели почвы описывается соотношением:

$$\varepsilon = a \sum_i V_i \varepsilon_i + \frac{1-a}{\sum_i V_i \varepsilon_i}, \quad (2.19)$$

где V_i и ε_i – объемная доля и диэлектрическая проницаемость компонент смеси; a – свободный параметр.

Также находит применение упрощенная трехкомпонентная модель почвы [13], которая используется для дальнейших рассуждений и представлена на рисунке 2.7.

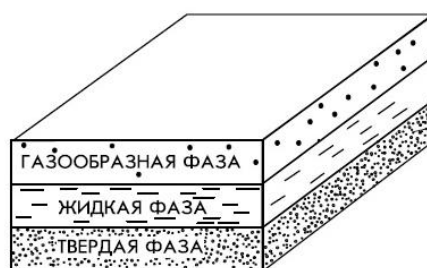


Рисунок 2.7 – Трехкомпонентная диэлектрическая модель почвы

Прибавление к почве воды, обладающей диэлектрической проводимостью в 10-20 раз большей, чем диэлектрическая проводимость других составляющих трехкомпонентной модели, приводит к возрастанию эффективной величины ε системы. Кроме того анализ влажных почв показывает, что их диэлектрическая

проницаемость слабо зависит от формы почвенных зерен и почти не зависит от их радиуса [17]. Зависимость диэлектрической проницаемости почвы от влажности представлена на рисунке 2.8

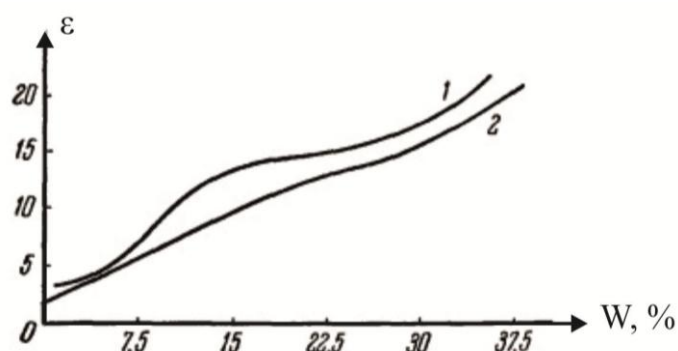


Рисунок 2.8 – Зависимость диэлектрической проницаемости от влажности почвы:

- 1 – зависимость для фракций почвы 1 ... 0,5 мм;
- 2 – для фракций 0,5 ... 0,25 мм.

Интересно отметить, что даже при высоком содержании воды в почве эффект насыщения [17], при котором $\epsilon \rightarrow \epsilon_{\text{воды}} = const$ не наступает, как это видно из рисунка 2.8. Таким образом, использование зависимости $\epsilon(W)$ для построения датчика влажности почвы с высокой влажностью является возможным.

Температура также как и на сопротивление оказывает влияние на диэлектрическую проницаемость почвы. Температурный ход диэлектрической проницаемости $\epsilon(t)$ представлен на рисунке 2.9.

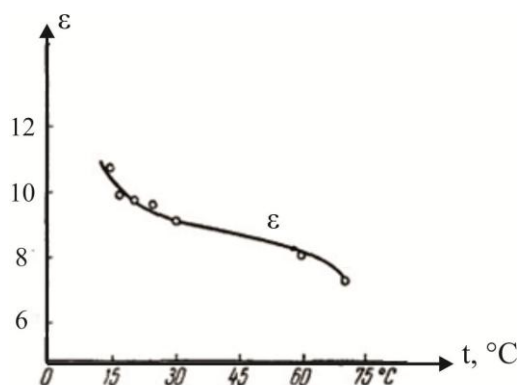


Рисунок 2.9 – Зависимость диэлектрической проницаемости почвы от температуры

Такая зависимость обусловлена тем, что согласно теории Дебая диэлектрическая постоянная зависит от времени релаксации, которое в свою очередь меняется с температурой [17]. Как видно из рисунка 2.9 изменение эффективной диэлектрической проницаемости ε в диапазоне $t = 15 \dots 60^\circ\text{C}$ имеет характер близкий к линейному, что может быть учтено путем введения линейной поправки. При рабочих частотах ниже 100 МГц вводится поправка к результатам измерения влажности по формуле:

$$W = W_{\text{и}} - k_t(t - t_0), \quad (2.20)$$

где W – истинная влажность почвы при температуре t ;

$W_{\text{и}}$ – измеренное значение влажности;

t и t_0 – температуры почвы при измерении и калибровке датчика соответственно;

k_t – температурный коэффициент почвы.

Введение поправки по формуле (2.20) возможно только при $t > 0^\circ\text{C}$, так как при отрицательных температурах диэлектрические свойства воды в почве резко меняются, и использование диэлькометрического метода становится невозможным.

Для описания зависимости диэлектрической проницаемости почвы от влажности на практике используются следующие эмпирические зависимости, основанные на трехкомпонентной диэлектрической модели почвы:

$$\varepsilon = 3,03 + 9,3W + 146W^2 - 76,7W^3 \quad (2.21)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{W + b}{a} \right)^2 \quad (2.22)$$

Формула (2.21) считается эффективной при $0 < W \leq 0,55$, формула (2.22) – при $0,55 < W \leq 1$. Графическая зависимость для этих соотношений представлена на рисунке Б.1 Приложения Б.

Из рисунка Б.1 видим, что наибольшее различие между представленными зависимостями $\varepsilon(W)$ возникает в диапазоне $W = 50 \dots 90\%$, что лежит за пределами измеряемого диапазона влажности почв.

Для измерения влажности почв с помощью диэлькометрических датчиков чаще всего применяют автогенераторные методы, когда измеряемая величина

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
						41
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

влияет на частоту или иной параметр частотного генератора, а в качестве первичного измерительного преобразователя используется датчик. Важно учитывать, что в автогенераторных моделях полуэмпирические коэффициенты выбирают в соответствии с гармонической формой сигнала, подаваемого на емкостный датчик. На практике же более целесообразно применять возбуждающий сигнал в виде прямоугольных импульсов, что значительно упрощает конструкцию генератора и снижает его энергопотребление, кроме того благодаря расширению частотного спектра сигнала обеспечивается усреднение значения диэлектрической проницаемости. В связи с этим возникает необходимость коррекции эмпирических коэффициентов.

Для борьбы с влиянием проводимости и химических свойств почвы на измерения влажности емкостный датчик выполняют электрически изолированным, что позволяет увеличить его чувствительность и повысить коррозионную стойкость, а следственно и надежность [21].

Наиболее используемыми на практике являются датчики двух типов.

1. Датчики с плоскими электродами, расположенными в одной плоскости и прилегающими к одной поверхности материала. Принцип действия таких датчиков основан на том, что при контакте материала с электродами изменяется краевая емкость датчика. С помощью таких датчиков измеряется емкость слоев материала, близких к поверхности датчика.

2. Датчики с одиночным электродом в виде проводящего стержня. Принцип такого датчика основан на изменении емкости относительно земли.

2.1.7 Построение математических моделей на основе кондуктометрического и диэлькометрического методов измерения влажности, выбор математической модели

На основании обобщенной схемы датчика измерения влажности почвы, представленной на рисунке 2.2, построим структурную схему статической характеристики влагомера с кондуктометрическим методом измерения, представим ее на рисунке 2.10.

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
						42
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

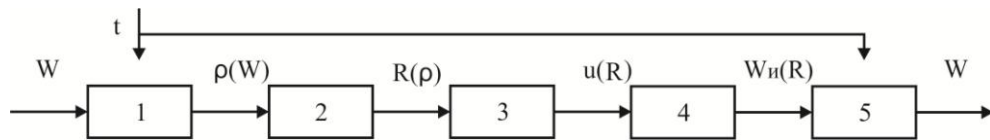


Рисунок 2.10 – Статическая характеристика кондуктометрического влагомера

Звено 1 отражает связь между удельным электрическим сопротивлением почвы ρ и влажностью почвы W . Как было показано выше эта связь может быть описана уравнением, обратным уравнению (2.13) (с учетом того, что уравнение (2.13) дает значение для сопротивления почвы сразу для конкретного типа датчика). Также на схеме показано влияние температуры на сопротивление почвы, что учитывается введением поправки при вычислении влажности почвы.

Звено 2 отражает связь между удельным сопротивлением почвы ρ и сопротивлением R , которое воспринимается датчиком. Зависит от конструктивного исполнения датчика.

Звено 3 – измерительный преобразователь, служащий для измерения сопротивления почвы R , воспринимаемого датчиком, и представления его в виде электрического сигнала u .

Звено 4 – вычислительный блок с АЦП, выполняющий оцифровку сигнала u и расчет измеренного значения влажности $W_{н}$;

Звено 5 – блок корректировки, который использует измеренное значение температуры почвы t для внесения поправки и вычисления истинной влажности почвы W .

На основании обобщенной схемы датчика измерения влажности почвы, представленной на рисунке 2.2, построим структурную схему статической характеристики влагомера с диэлькометрическим методом измерения, представим ее на рисунке 2.11.

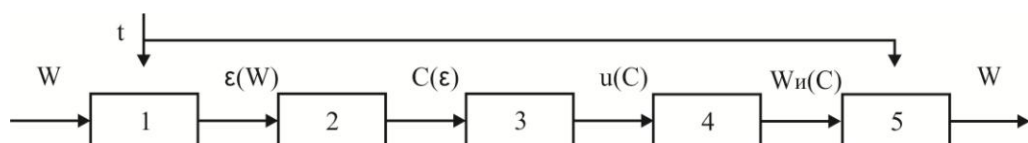


Рисунок 2.11 – Статическая характеристика диэлькометрического датчика измерения влажности

Звено 1 отражает связь между диэлектрической проницаемостью почвы ε и влажностью почвы W . Как было показано выше эта связь может быть описана уравнениями (2.21) или (2.22). Кроме того, диэлектрическая проницаемость почвы зависит от температуры (как показано на рисунке 2.9), что учитывается введением поправки при вычислении влажности почвы.

Звено 2 отражает связь между диэлектрической проницаемостью почвы и емкостью датчика, описывается уравнением (2.17).

Звено 3 – измерительный преобразователь, служащий для измерения емкости датчика C и представления ее в виде электрического сигнала u .

Звено 4 – вычислительный блок с АЦП, выполняющий оцифровку сигнала u и расчет измеренного значения влажности $W_{и}$.

Звено 5 – блок корректировки, который использует измеренное значение температуры почвы t для внесения поправки и вычисления истинной влажности почвы W по формуле (2.20).

Сравнивая полученные статические характеристики для кондуктометрического и диэлькометрического датчика и особенности каждого из этих методов измерения, можно отметить следующие моменты:

1) длина измерительной цепи для каждого из методов одинакова, что означает одинаковую сложность цепи измерительного преобразования и суммарную погрешность преобразования (с точки зрения погрешностей каждого звена преобразования) [22];

2) кондуктометрический метод имеет снижение чувствительности при достаточно высокой влажности почвы ($W > 25\%$) в то время как диэлькометрический метод показывает стабильную чувствительность при $W \approx 40\%$;

3) зависимость диэлектрической проницаемости $\varepsilon(W)$ отличается большей линейностью, чем зависимость сопротивления $R(W)$;

4) в целом диэлькометрический метод менее чувствителен к таким влияющим величинам, как температура и плотность почвы.

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
						44
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Так как в статические характеристики обоих методов входят эмпирические коэффициенты, перед использованием датчика влажности почвы необходима его предварительная градуировка. Эксперимент по градуировке кондуктометрического и диэлькометрического датчиков с сравнением полученных экспериментальных характеристик с теоретическими и ответ на вопрос о более эффективном датчике влажности приводится в главе 3.

Для правильной градуировки датчиков важно иметь понимание об их динамических характеристиках. При равномерном распределении влаги в материале электрические датчики влажности почвы можно рассматривать как безынерционные звенья, что является одним из преимуществ электрического метода измерения влажности почвы [15]. Определение условий, при которых возможно рассмотрение датчика как безынерционного звена также рассматривается в главе 3.

2.1.8 Задача измерения температуры почвы

Задача измерения температуры почвы в общем случае формулируется как задача отыскания температурного поля в почве, которое может быть выражено уравнением:

$$t = f(x, y, z, \tau), \quad (2.23)$$

где t – температура почвы;

x, y, z – пространственные координаты в декартовой системе координат;

τ – время.

Аналитическое исследование температурного поля в почве является весьма сложной задачей [17], [23]. Для получения возможности исследования температурного поля в почве делается ряд упрощений:

1) температурное поле в почве полагается одномерным, принимается, что температура почвы t изменяется только от глубины x , горизонтальные поверхности принимаются изотермическими;

2) полагается, что передача тепла в почве осуществляется только путем кондуктивной теплопроводности как в сплошном однородном твердом теле.

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
						45
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таким образом, искомое температурное поле почвы упрощается и принимает вид:

$$t = f(x, \tau) \quad (2.24)$$

Как показано в [17], получение зависимости (2.24) осуществляется на основе решения дифференциального уравнения теплопроводности Фурье, которая для нестационарной одномерной модели температурного поля в почве имеет вид:

$$C \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (2.25)$$

где C – объемная теплоемкость почвы;

λ – коэффициент кондуктивной теплопроводности почвы.

Иллюстрация динамики изменения температуры почвы в течение суток на различной глубине [17] представлена на рисунке 2.12.

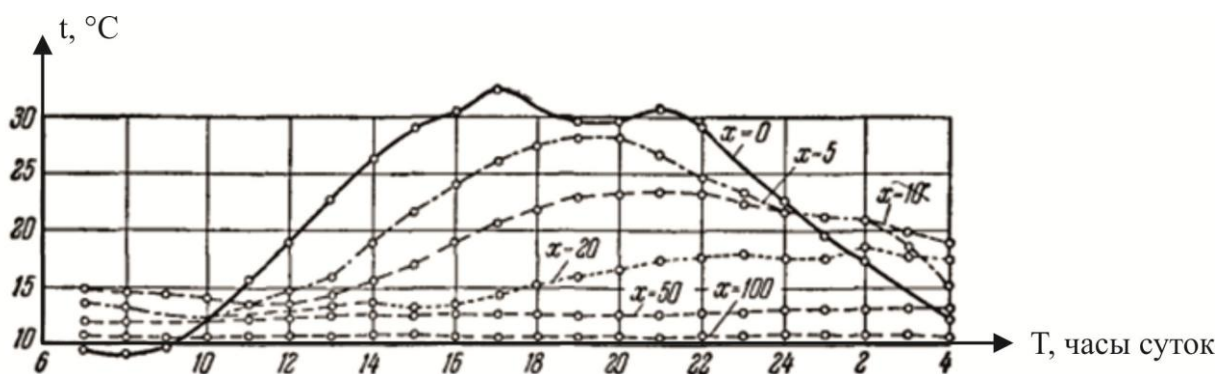


Рисунок 2.12 – Динамика температуры почв в течение суток на различной глубине x см

Для практической задачи контроля температуры почвы как влияющей величины при измерении влажности достаточно локальное измерение температуры в точке, в которой установлен электрический датчик влажности почвы. Однако, при внесении в систему полива устройств, способных оказывать влияние на температуру почвы, задача решения уравнения (2.25) и получение зависимости температурного поля в почве становится актуальной.

2.1.9 Методы измерения температуры почвы и виды термометров

Классификация термометров по методам измерения температуры почвы представлена на рисунке 2.13.

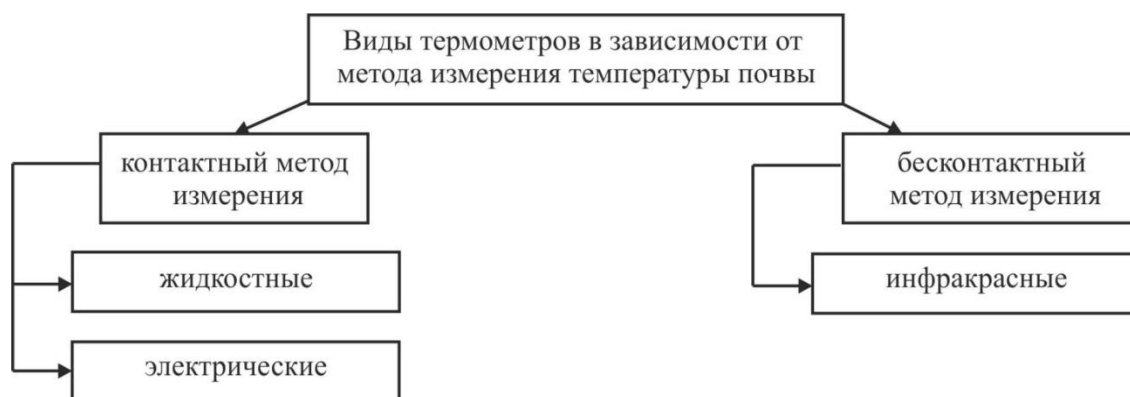


Рисунок 2.13 – Классификация термометров для измерения температуры почвы

Жидкостные термометры являются распространенным средством измерения температуры почвы, наиболее известными из применяемых на практике являются коленчатые термометры Савинова [24], внешний вид которых представлен на рисунке Б.2 Приложения Б.

Данные термометры предназначены для измерения температуры почв в диапазоне $t = -10 \dots + 50^\circ\text{C}$ на глубинах 5, 10, 15, 20 см. Цена деления термометров 0.5°C . Основным недостатком является невозможность автоматического измерения температуры.

Среди электрических термометров для измерения температуры почвы чаще всего применяются термометры сопротивления. **Термометр сопротивления** (ТС) – это термометр, чувствительный элемент которого представляет собой резистор, выполненный из металлической проволоки или пленки и имеющий известную зависимость электрического сопротивления от температуры. Чувствительный элемент помещен в керамический или металлический защитный корпус [25]. В качестве материалов для чувствительного элемента чаще всего используется платина или медь, краткое сравнение характеристик этих материалов представлено в таблице Б.1 Приложения Б.

Современным средством измерения является термометр почвенный АМ-34А, который представляет собой электрический прибор измерения температуры почвы. Чувствительный элемент прибора выполнен на базе микроплёночного платинового термометра сопротивления ТСПТ 300 с номинальным сопротивлением 100 Ом [26].

Данный термометр предназначен для измерения температуры почв в диапазоне $t = -30 \dots + 30^\circ\text{C}$, предел основной погрешности измерений равен $\Delta = \pm 0.1^\circ\text{C}$.

2.2 Требования к микроклимату в теплице

Как известно, для достижения максимальной урожайности необходимо поддержание влажности и тепла для растений в некотором оптимальном диапазоне [27], [28], [29]. Проанализируем эти данные для томатов и огурцов, результаты анализа представим в таблице Б.2 Приложения Б.

Полученные значения оптимальных параметров влажности и температуры для выращивания данных культур являются граничными при разработке алгоритма автоматического контроля микроклимата.

Выводы по главе 2: сформулирована важность контроля влажности и температуры почвы в теплицы.

Изучены основные величины, характеризующие влажность, определен диапазон изменения влажности и оптимальный диапазон для растений.

Рассмотрены принципы измерения влажности почвы, рассмотрена обобщенная структурная схема электрических влагомеров. Изучены два электрических метода измерения влажности: кондуктометрический и диэлькометрический. Описаны особенности каждого метода измерений, представлены типовые зависимости выходного параметра от влажности, определено влияние возмущающих факторов на изменение измеряемого параметра.

По результатам исследования методов измерения представлены математические модели измерительных цепей для каждого из методов, проведено сравнение. Также в главе рассмотрена методика измерения температуры почвы как влияющей величины, представлены типовые средства измерения температуры.

Для типовых культур, выращиваемых в теплицах, изучены требования к микроклимату.

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		48

3 РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ

3.1 Экспериментальная градуировка диэлькометрического и кондуктометрического датчиков влажности почвы

Как было показано в теоретическом исследовании датчиков влажности почвы, датчики обоих типов в своих статических характеристиках имеют эмпирические коэффициенты, определение которых производится в процессе калибровки. В данном разделе представлены: эксперимент по построению градуировочных характеристик для коммерчески доступных кондуктометрического и диэлькометрического датчиков влажности почвы, сравнение полученных характеристик с теоретическими, выбор датчика влажности почвы для использования в системе автоматического полива и анализ его динамических параметров.

3.1.1 Выбор датчиков влажности почвы

В качестве датчиков для измерения влажности почвы в работе были выбраны коммерчески доступные диэлькометрический (сверху) и кондуктометрический (снизу) датчики влажности почвы, внешний вид которых и сравнение габаритных размеров представлены на рисунке В.1 Приложения В.

Оба датчика имеют одинаковый принцип построения и состоят из двух функциональных блоков:

- 1) чувствительный элемент датчика, контактирующий непосредственно с почвой, который выполнен в виде заостренного конца (концов);
- 2) электронная схема датчика, выполняющая преобразование сигнала с чувствительного элемента в аналоговый выходной сигнал.

Сравнение основных характеристик датчиков представлено в таблице В.1 Приложения В.

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
						49
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3.1.2 Постановка эксперимента, описание установки

Эксперимент по градуировке датчиков влажности состоит из следующих этапов:

- 1) предварительная подготовка выбранного образца почвы (сушка в печи, измельчение крупных комков);
- 2) определение массы высушенной почвы, используемой в эксперименте;
- 3) расчет массы воды, которая обеспечит изменение влажности исследуемого образца почвы на ΔW ;
- 4) проведение эксперимента по измерению влажности почвы в диапазоне $0 \dots W_{ПВ}$ с шагом ΔW с помощью кондуктометрического и диэлектрического датчиков влажности почвы с повторными измерениями;
- 5) обработка результатов измерений, получение эмпирических зависимостей выходных сигналов датчиков от влажности, сравнение полученных результатов.

Схема проведения эксперимента представлена на рисунке 3.1.

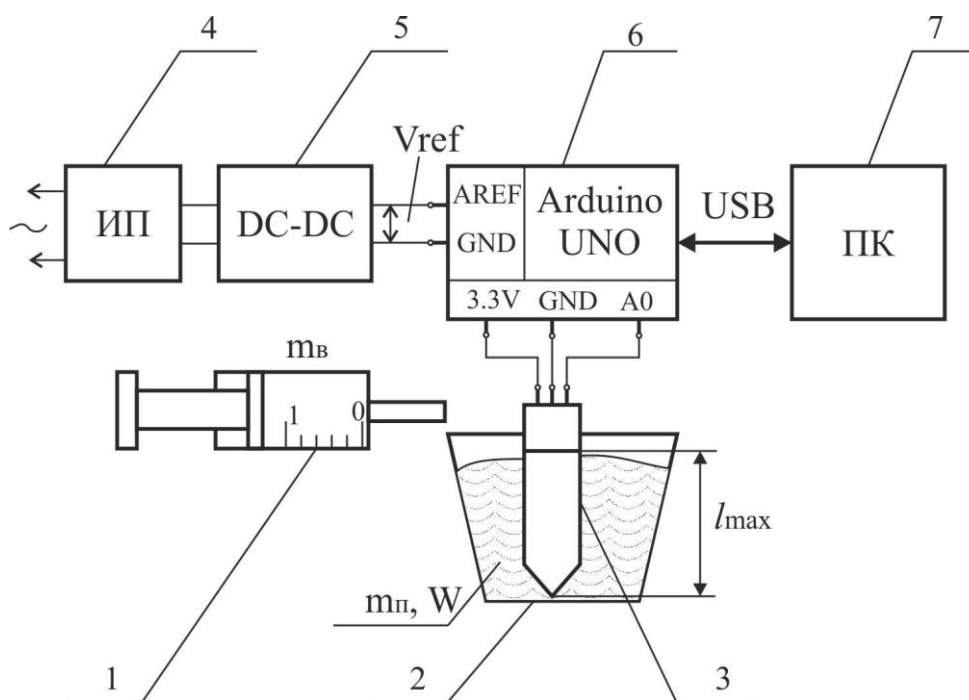


Рисунок 3.1 – Схема эксперимента

Рассмотрим представленную схему. Исследуемый образец почвы, известной массы в высушенном состоянии, помещается в емкость 2. С помощью медицинского шприца 1 в почву вносится контролируемая масса воды. Почва

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		50

тщательно перемешивается, при этом приобретая равномерную влажность W . В почву помещается датчик влажности 3, причем для улучшения контакта датчика с почвой в верхнем слое почвы производится незначительное уплотнение почвы. Датчик влажности присоединяется к контроллеру 6, который считывает аналоговое значение напряжения с датчика. Опорное напряжение для АЦП контроллера берется с понижающего стабилизатора напряжения 5, который через источник питания 4 подключен к сети. Контроллер, считывая данные с датчика, передает их через USB-интерфейс на персональный компьютер 7.

При проведении эксперимента делается ряд допущений:

1) температура воздуха, влажность воздуха и температура почвы в процессе эксперимента считаются неизменными;

2) после внесения массы воды и перемешивания почвы влажность почвы считается однородной по всему объему;

3) динамическое изменение влажности после перемешивания и во время измерений пренебрежимо мало;

4) принимается отсутствие влияния изменения структуры почвы при увеличении влажности и в результате перемешивания на определение влажности с помощью датчиков;

5) для исключения взаимного влияния датчиков между собой измерение каждым датчиков проводятся поочередно.

Фотография экспериментальной установки представлена на рисунке В.2 Приложения В. Код программы, разработанной для проведения эксперимента, представлен в Приложении Г, вид окна результата измерений представлен на рисунке В.3 Приложения В.

3.1.3 *Предварительные расчеты и измерения*

Перед проведением эксперимента необходимо определить ряд параметров, часть из которых является расчетными, часть – экспериментальными.

1. Определение влажности $W_{\text{ДВ}}$, которая соответствует полной влагоемкости исследуемого образца почвы.

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		51

Для этого был подготовлен дополнительный образец предварительно высушенной почвы того же типа, в который постепенно порциями по 2% от массы почвы добавлялась вода. Результаты эксперимента показали, что полное насыщение почвы влагой наступает при уровне влажности:

$$W_{\text{ПВ}} = 30\% \quad (3.1)$$

Критерием насыщения является неспособность почвы удерживать большее количество влаги, чем внесенное. Определяется визуально.

2. Определение шага изменения влажности ΔW .

При определении шага изменения влажности (постоянного во всем диапазоне изменения влажности) необходимо руководствоваться следующими соображениями:

1) шаг изменения влажности не должен быть слишком грубым, чтобы обеспечить эффективность определения влажности в контролируемом диапазоне, который согласно (2.10):

$$W_{\text{эфф}} = 18 \div 25 \% \quad (3.2)$$

2) шаг изменения влажности не должен быть слишком точным, так как высокая точность измерений не требуется, а максимальный диапазон изменения влажности почвы достаточно широкий:

$$W = 0 \dots W_{\text{ПВ}} = 0 \dots 30\% \quad (3.3)$$

На основании представленных выше соображений шаг изменения влажности в эксперименте был выбран:

$$\Delta W = 2 \% \quad (3.4)$$

3. Определение массы исследуемого образца почвы и определения объема вносимой воды ΔV для обеспечения шага изменения влажности ΔW .

Как было показано выше, влажность почвы определяется соотношением (2.1):

$$W = \frac{M}{M_0}, \quad (3.5)$$

По результатам взвешивания масса абсолютно сухого исследуемого образца почвы:

$$M_0 = 500 \text{ г} \quad (3.6)$$

Тогда массу вносимой влаги ΔM для обеспечения изменения влажности ΔW определили как:

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
						52
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\Delta M = \frac{M_0 \Delta W}{100} \quad (3.7)$$

$$\Delta M = \frac{500 * 2}{100} = 10 \text{ г}$$

С учетом плотности воды ρ_B по известному соотношению связи массы и объема получим величину объема воды ΔV , которую необходимо внести для обеспечения изменения влажности ΔW :

$$\Delta V = \frac{\Delta M}{\rho_B} \quad (3.8)$$

$$\Delta V = \frac{10 \text{ г}}{1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}} = 10 \text{ мл}$$

4. Определение коэффициента пропорциональности аналого-цифрового преобразователя (АЦП)

Для пересчета измеренных значений напряжения на датчике влажности с помощью АЦП микроконтроллера в значения напряжения использовалось соотношение:

$$U_{\text{изм}} = N_{\text{изм}} \left(\frac{U_э}{N_э} \right) = N_{\text{изм}} K_{ADC}, \quad (3.9)$$

где $U_{\text{изм}}$ – измеренное значение напряжения, В; $N_{\text{изм}}$ – измеренное значение напряжения в кодах АЦП, $U_э$ – эталонное значение напряжения, В; $N_э$ – эталонное значение напряжения в кодах АЦП. При измерении использовался 10-ти разрядный АЦП, то есть $N_э = 1023$. В качестве опорного напряжения было принято $U_э = 2.6$ В. Тогда коэффициент передачи АЦП:

$$K_{ADC} = \frac{2.6}{1023} = 0.0025 \text{ В} \quad (3.10)$$

3.1.4 Проведение эксперимента по градуировке датчиков влажности

Значения влияющих величин, измеренных дополнительно непосредственно перед проведением эксперимента, представлены в таблице В.2 Приложения В.

Перед проведением основного эксперимента был проведен дополнительный эксперимент по определению граничных значений диапазона показаний датчиков. В эксперименте были установлены показания датчиков, находящихся в воздухе и

показания датчиков, погруженных в воду. Результаты эксперимента представлены в таблице В.3 Приложения В.

Результаты эксперимента по градуировке для кондуктометрического датчика влажности представим в таблице В.4, для диэлькометрического – в таблице В.5 Приложения В.

Построенные зависимости для средних значений выходного сигнала для каждого из типа датчиков с наложенными аппроксимирующими кривыми в форме полинома 3-й степени представлены на рисунках 3.2 и 3.3 соответственно. Кривые получены с помощью Excel и носят справочный характер. Также на каждый график нанесены граничные значения, измеренные с помощью каждого датчика в воздухе и в воде.

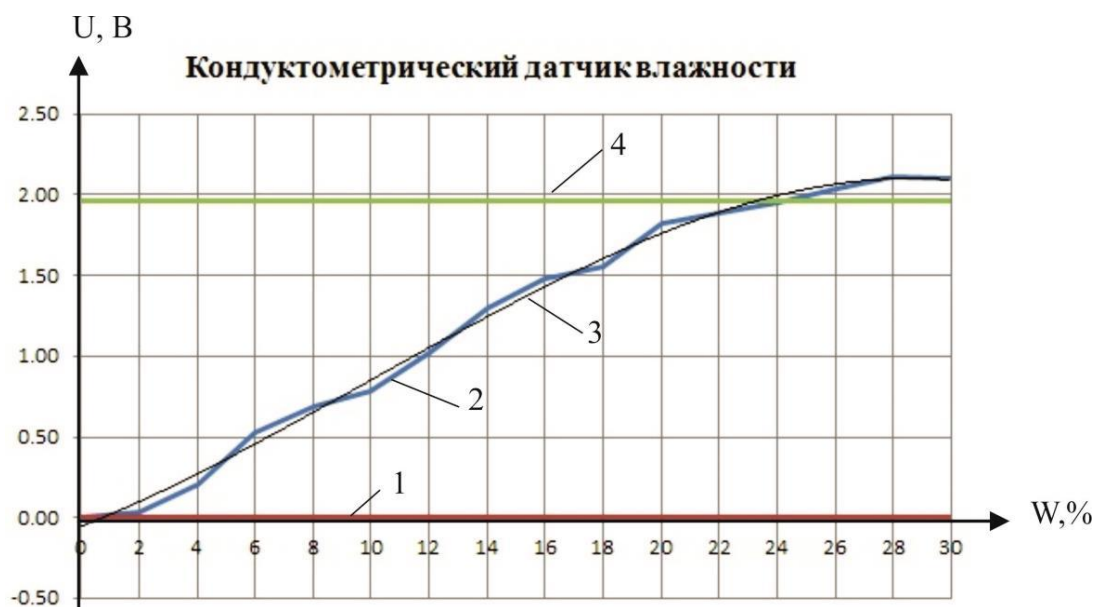


Рисунок 3.2 – Зависимость выходного напряжения от влажности для кондуктометрического датчика влажности почвы:

1 – нижняя граница; 2 – график экспериментальных данных; 3 – график полиномиальной аппроксимации 3-го порядка; 4 – верхняя граница

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

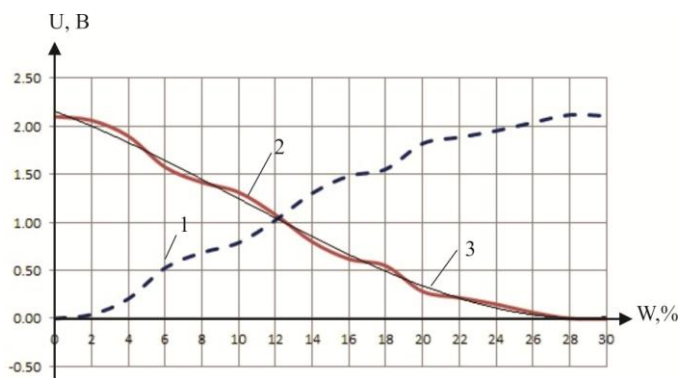


Рисунок 3.3 – Зависимость выходного напряжения от влажности для диэлькометрического датчика влажности почвы:

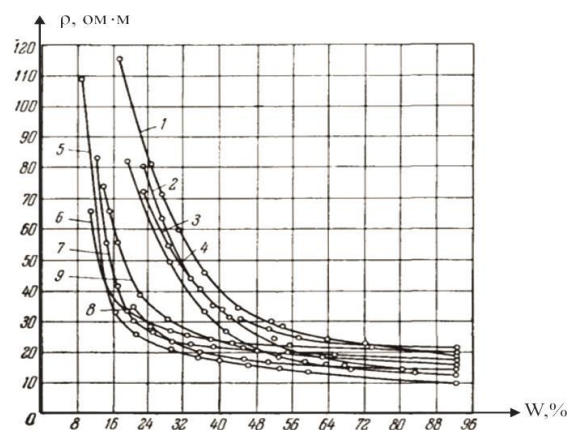
1 – нижняя граница; 2 – график экспериментальных данных; 3 – график полиномиальной аппроксимации 3-го порядка; 4 – верхняя граница

3.1.5 Оценка полученных градуировочных кривых, сравнение с теоретическими зависимостями

Для проверки вида полученных кривых сравним их с теоретическими зависимостями, которые были представлены в главе 2 на рисунках 2.3 и 2.8. Чтобы сопоставить полученные графики и теоретические, полученные в эксперименте графики инвертированы. Сопоставление представлено на рисунках 3.4 и 3.5 для кондуктометрического и диэлькометрического датчиков соответственно.



а)

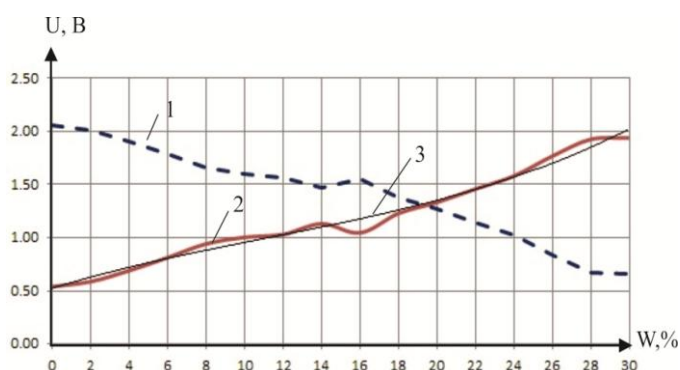


б)

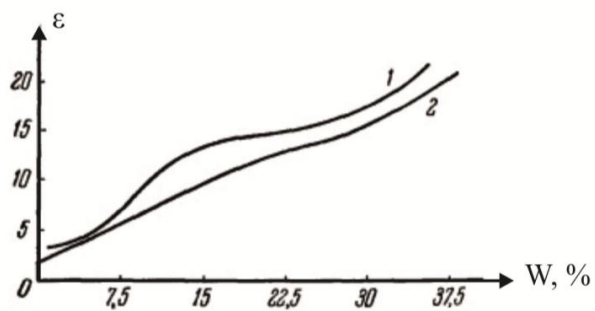
Рисунок 3.4 – Сопоставление экспериментальных и теоретических зависимостей для кондуктометрического датчика:

а) – экспериментальные кривые (1 – исходная, 2 – инвертированная, 3 – аппроксимирующая);

б) – теоретические зависимости



а)



б)

Рисунок 3.5 – Сопоставление экспериментальных и теоретических зависимостей для диэлькометрического датчика:

а) – экспериментальные кривые (1 – исходная, 2 – инвертированная, 3 – аппроксимирующая);

б) – теоретические зависимости

На основании анализа полученных экспериментальных кривых для каждого типа датчиков и сравнения их с теоретическими кривыми можно сделать следующие выводы.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

1 Анализ результатов эксперимента для кондуктометрического датчика влажности почвы.

По результатам обработки экспериментальных данных для кондуктометрического датчика влажности почвы получены следующие выводы:

- полученная по экспериментальным точкам кривая хорошо аппроксимируется полиномом 3-й степени;
- при увеличении влажности $W \geq 24\%$ наблюдается выход экспериментальной кривой за граничное значение, которое было определено при погружении датчика воду, что вызывает сомнения в достоверности полученных результатов при $W \geq 24\%$ (превышение полученных значений напряжения граничных обусловлено, скорее всего, процессами генерации ЭДС в почве);
- экспериментальный график схож с теоретической зависимостью (6 на рисунке 3.4 б)), однако при малых значениях влажности $W < 16\%$ экспериментальная кривая имеет более пологий характер, чем теоретическая.

Таким образом, для кондуктометрического датчика полученная экспериментальная кривая имеет значительные отличия от теоретической, кроме того наблюдаются неконтролируемые процессы увеличения выходного сигнала напряжения при большой влажности.

2 Анализ результатов эксперимента для диэлькометрического датчика влажности почвы.

По результатам обработки экспериментальных данных для диэлькометрического датчика влажности почвы получены следующие выводы:

- полученная по экспериментальным точкам кривая в целом (за исключением нескольких точек) хорошо аппроксимируется полиномом 3-й степени, что согласуется с теорией;
- экспериментальная кривая не выходит за рамки определенных граничных значений;

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
						57
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- экспериментальный график хорошо согласуется с теоретической зависимостью (1 на рисунке 3.5 б)) во всем диапазоне изменения влажности, в том числе наблюдается характерный перегиб характеристики при средних значениях влажности.

Таким образом, для диэлькометрического датчика полученная экспериментальная кривая хорошо согласуется с теоретической, поведение экспериментальной кривой обосновано во всем диапазоне изменения влажности, чувствительность (угол наклона) на разных участках экспериментальной кривой примерно постоянна.

3.1.6 Выбор датчика влажности для использования в системе автоматического полива

На основании результатов эксперимента и сравнения технических характеристик в качестве датчика влажности почвы для разрабатываемой системы автоматического полива был выбран диэлькометрический датчик влажности почвы, у которого были выявлены следующие достоинства:

1) длина рабочей поверхности датчика больше (соответственно больше и глубина погружения в почву), что позволяет давать оценку влажности на большей глубине почвы;

2) датчик электрически изолирован от почвы, что значительно уменьшает влияние коррозии и повышает надежность;

3) показания датчика не зависят от уровня питающего напряжения, датчик может работать при низком напряжении питания (3.3 В), потребление тока почти в 2 раза меньше, чем у кондуктометрического датчика;

4) эксперимент по градуировке показывает высокую сходимость полученной градуировочной характеристики с теоретической зависимостью $\varepsilon(W)$, что означает линейность участка измерительной цепи (см. рисунок 2.11), отвечающий за преобразование $\varepsilon \rightarrow C \rightarrow u$, где u – выходной сигнал постоянного напряжения.

3.2 Построение регрессионного уравнения для диэлькометрического датчика влажности почвы

Для использования датчика влажности в системе автоматического полива необходимо определить явную зависимость вида:

$$U = f(W) \quad (3.11)$$

где W – измеряемая влажность почвы;

U – напряжение на выходе датчика влажности.

Для нахождения по результатам эксперимента связи выходной величины, которая рассматривается как случайная, с измеряемой величиной будем использовать регрессионный анализ [30]. Представим результаты эксперимента для диэлькометрического датчика влажности почвы из таблицы В.5 Приложения В в виде значений напряжения, рассчитаем оценки среднего и дисперсии по формулам (3.12) и (3.13) соответственно, результаты представим в таблице 3.1. Для построения регрессионной кривой были исключены 2 точки, соответствующие уровням влажности $W = 12\%$ и $W = 30\%$, в виду их большого отклонения от искомой регрессионной кривой (считаем их промахами).

$$\bar{U} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n U_i, \quad (3.12)$$

где U_i – значение выходного параметра U в повторных измерениях;

\bar{U} – оценка среднего значения выходного параметра;

n – число повторных измерений.

$$S_{U_i}^2 = \frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2, \quad (3.13)$$

где $S_{U_i}^2$ – оценка дисперсии выходного параметра.

Сформируем таблицу исходных данных для регрессионного анализа, представим ее в таблице В.6 Приложения В.

Таблица 3.1 – Исходные данные для регрессионного анализа

В качестве математической модели искомой зависимости (3.11) выберем полином 3-го порядка, так как этот тип зависимости описывается в теории и

хорошо согласуется с экспериментальной кривой, как это было показано на рисунке 3.3. Тогда искомая регрессионная модель имеет вид:

$$U = a_0 + a_1W + a_2W^2 + a_3W^3, \quad (3.14)$$

где a_i – коэффициенты регрессионной модели, определение которых является задачей регрессионного анализа.

В качестве критерия близости экспериментальных данных и данных, определяемых по регрессионной модели, будем использовать метод наименьших квадратов (МНК), который имеет вид:

$$\sum_{i=1}^N (\Delta y_i)^2 = \min, \quad (3.15)$$

где Δy_i – расхождение между экспериментальными данными и данными математической модели в i – ой точке.

Для использования МНК должны быть выполнены следующие предпосылки:

- случайные ошибки распределены по нормальному закону;
- все измерения равноточны (то есть $\sigma_i^2 = \sigma^2$, где σ_i^2 – дисперсия отдельной партии);
- входная величина измеряется точно.

Первое условие выполняется согласно центральной предельной теореме теории вероятностей, согласно которому сумма многочисленных независимых элементарных ошибок, которые в совокупности составляют ошибку измерения, имеет нормальный закон распределения [31].

Третью предпосылку считаем выполненной согласно условиям постановки эксперимента, которые были описаны выше и который обеспечивают точность измерения входной величины (влажности).

Проверку второй предпосылки осуществим согласно критерию Кохрена равенства дисперсий нескольких выборок одинакового объема. Зададим гипотезу H_0 равенства дисперсий выборок:

$$H_0: S_1^2 = S_2^2 = \dots S_{16}^2 \quad (3.16)$$

Определим уровень значимости:

$$p = 0.01 \quad (3.17)$$

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
						60
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Проведем расчет критической статистики по формуле:

$$G = \frac{S_{max}^2}{\sum_{i=1}^k S_i^2}, \quad (3.18)$$

где S_i^2 – несмещенная оценка дисперсии для i -ой выборки;

k – число выборок;

S_{max}^2 – максимальная несмещенная оценка дисперсии из k выборок.

Выполняя расчет по данным из таблицы 3.1, получим:

$$G = 0.091 \quad (3.19)$$

Если гипотеза H_0 верна, критическая статистика G имеет распределение Кохрена. Найдем квантиль распределения Кохрена, которое является двухпараметрическим с параметрами:

$$f = n - 1, \quad (3.20)$$

где n – объем исследуемых выборок.

Второй параметр распределения k – число исследуемых выборок. Значение квантиля $G_{k,f,p}$ для данных параметров из таблиц математической статистики [32]:

$$G_{k,f,p} = 0.2593 \quad (3.21)$$

Так как выполняется неравенство

$$G < G_{k,f,p}, \quad (3.22)$$

значит гипотеза H_0 верна и дисперсии $S_1^2, S_2^2 \dots S_{16}^2$ однородны, а, следовательно, в качестве критерия близости может использоваться МНК.

Распишем критерий близости (3.15) с учетом вида модели (3.14), вводя функцию M :

$$M = \sum_{i=1}^N (U_i - a_0 - a_1 W_i - a_2 W_i^2 - a_3 W_i^3)^2 \quad (3.23)$$

Найдем минимум функции M , дифференцируя ее по каждому из коэффициентов a_i и приравнявая к 0 соответствующие частные производные. В результате получили систему:

$$\begin{cases} \frac{\partial M}{\partial a_0} = 0 \\ \frac{\partial M}{\partial a_1} = 0 \\ \frac{\partial M}{\partial a_2} = 0 \\ \frac{\partial M}{\partial a_3} = 0 \end{cases} \quad (3.24)$$

Вычисляя частные производные и выполняя группировку слагаемых в (3.24), получим:

$$\begin{cases} N * a_0 + a_1 * \sum_{i=1}^N W_i + a_2 * \sum_{i=1}^N W_i^2 + a_3 * \sum_{i=1}^N W_i^3 = \sum_{i=1}^N U_i \\ a_0 * \sum_{i=1}^N W_i + a_1 * \sum_{i=1}^N W_i^2 + a_2 * \sum_{i=1}^N W_i^3 + a_3 * \sum_{i=1}^N W_i^4 = \sum_{i=1}^N U_i * W_i \\ a_0 * \sum_{i=1}^N W_i^2 + a_1 * \sum_{i=1}^N W_i^3 + a_2 * \sum_{i=1}^N W_i^4 + a_3 * \sum_{i=1}^N W_i^5 = \sum_{i=1}^N U_i * W_i^2 \\ a_0 * \sum_{i=1}^N W_i^3 + a_1 * \sum_{i=1}^N W_i^4 + a_2 * \sum_{i=1}^N W_i^5 + a_3 * \sum_{i=1}^N W_i^6 = \sum_{i=1}^N U_i * W_i^3 \end{cases} \quad (3.25)$$

Решение данной системы относительно a_i будем искать с помощью матричных уравнений. Введем следующие матрицы:

$$W = \begin{pmatrix} 1 & W_1 & \dots & W_1^3 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & W_{14} & \dots & W_{14}^3 \end{pmatrix} \quad (3.26)$$

- матрица независимых переменных;

$$U = \begin{pmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_{14} \end{pmatrix} \quad (3.27)$$

- вектор выходных экспериментальных данных, где $U_1 = \bar{U}_1$;

$$A = \begin{pmatrix} a_0 \\ \vdots \\ a_3 \end{pmatrix} \quad (3.28)$$

- вектор коэффициентов.

Тогда согласно теории [30] система вектор коэффициентов A выражается как:

$$A = (W^T W)^{-1} W^T U \quad (3.29)$$

а вектор рассчитанных по уравнению регрессии значений выходных переменных:

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		62

$$\hat{U} = WA \quad (3.30)$$

Ниже представлен расчет вектора коэффициентов A в Mathcad.

$$W =$$

	0	1	2	3
0	1	0	0	0
1	1	2	4	8
2	1	4	16	64
3	1	6	36	216
4	1	8	64	512
5	1	10	100	$1 \cdot 10^3$
6	1	12	144	$1.728 \cdot 10^3$
7	1	14	196	$2.744 \cdot 10^3$
8	1	18	324	$5.832 \cdot 10^3$
9	1	20	400	$8 \cdot 10^3$
10	1	22	484	$1.065 \cdot 10^4$
11	1	24	576	$1.382 \cdot 10^4$
12	1	26	676	$1.758 \cdot 10^4$
13	1	28	784	$2.195 \cdot 10^4$

$$U =$$

	0
0	2.057
1	2.01
2	1.907
3	1.784
4	1.656
5	1.594
6	1.568
7	1.467
8	1.37
9	1.266
10	1.141
11	1.019
12	0.831
13	0.674

$$A := (W^T \cdot W)^{-1} \cdot W^T \cdot U = \begin{pmatrix} 2.1 \\ -0.071 \\ 3.197 \times 10^{-3} \\ -8.922 \times 10^{-5} \end{pmatrix} \quad U_{ev} := W \cdot A =$$

	0
0	2.1
1	1.971
2	1.863
3	1.772
4	1.694
5	1.624
6	1.558
7	1.492
8	1.343
9	1.251
10	1.142
11	1.011
12	0.854
13	0.668

На рисунке 3.6 представлен график полученной регрессионной кривой с наложенными экспериментальными точками.

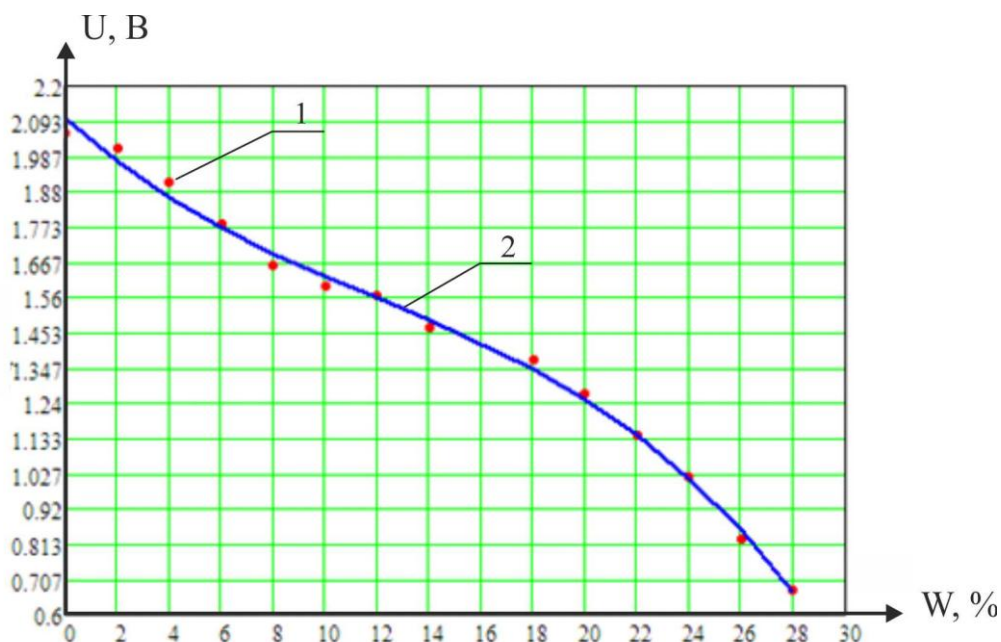


Рисунок 3.6 – Рассчитанная регрессионная кривая с наложенными значениями экспериментальных данных
 1 – данные эксперимента;
 2 – построенная регрессионная кривая.

Далее необходимо определить значимость полученных коэффициентов и адекватность математической модели в целом. Считаем, что полученный вектор коэффициентов A – это вектор оценок коэффициентов, которые также являются случайными величинами и имеют свою дисперсию. Для вычисления дисперсии коэффициентов определим матрицу ковариации C как:

$$C = (W^T W)^{-1} \quad (3.31)$$

Умножив матрицу ковариации на оценку средней дисперсии $\overline{S_U^2}$, получим следующую матрицу:

$$C * \sigma_y^2 = \begin{matrix} \begin{matrix} \sigma_{a0}^2 & cov_{a0a1} & cov_{a0a2} & cov_{a0a3} \\ cov_{a1a0} & \sigma_{a1}^2 & cov_{a1a2} & cov_{a1a3} \\ cov_{a2a0} & cov_{a2a1} & \sigma_{a2}^2 & cov_{a2a3} \\ cov_{a3a0} & cov_{a3a1} & cov_{a3a2} & \sigma_{a3}^2 \end{matrix} \end{matrix} \quad (3.32)$$

где $\sigma_{a_j}^2$ - дисперсии коэффициентов;

$cov_{a_j a_U}$ – корреляционный момент между коэффициентами a_j, a_U .

Если $cov_{a_j a_U} = 0$, коэффициенты a_j, a_U независимы, иначе – между коэффициентами есть стохастическая связь. Представим матрицу ковариации и расчет дисперсий коэффициентов в Mathcad ниже.

Средняя дисперсия:

$$S_y := 2.89245E-04 = 2.892 \times 10^{-4}$$

Матрица ковариации:

$$C := (W^T \cdot W)^{-1} = \begin{pmatrix} 0.674 & -0.172 & 0.012 & -2.361 \times 10^{-4} \\ -0.172 & 0.069 & -5.631 \times 10^{-3} & 1.24 \times 10^{-4} \\ 0.012 & -5.631 \times 10^{-3} & 5.006 \times 10^{-4} & -1.162 \times 10^{-5} \\ -2.361 \times 10^{-4} & 1.24 \times 10^{-4} & -1.162 \times 10^{-5} & 2.787 \times 10^{-7} \end{pmatrix}$$

Матрица, в которой определены дисперсии коэффициентов и корреляционные моменты:

$$COVAR := C \cdot S_y = \begin{pmatrix} 1.949 \times 10^{-4} & -4.982 \times 10^{-5} & 3.409 \times 10^{-6} & -6.828 \times 10^{-8} \\ -4.982 \times 10^{-5} & 1.998 \times 10^{-5} & -1.629 \times 10^{-6} & 3.586 \times 10^{-8} \\ 3.409 \times 10^{-6} & -1.629 \times 10^{-6} & 1.448 \times 10^{-7} & -3.36 \times 10^{-9} \\ -6.828 \times 10^{-8} & 3.586 \times 10^{-8} & -3.36 \times 10^{-9} & 8.063 \times 10^{-11} \end{pmatrix}$$

Дисперсии коэффициентов:

$$S_{a_0} := COVAR_{0,0} = 1.949 \times 10^{-4} \quad S_{a_2} := COVAR_{2,2} = 1.448 \times 10^{-7}$$

$$S_{a_1} := COVAR_{1,1} = 1.998 \times 10^{-5} \quad S_{a_3} := COVAR_{3,3} = 8.063 \times 10^{-11}$$

$$S_a = \begin{pmatrix} 1.949 \times 10^{-4} \\ 1.998 \times 10^{-5} \\ 1.448 \times 10^{-7} \\ 8.063 \times 10^{-11} \end{pmatrix}$$

Значимость коэффициентов математической модели определяется через критическую статистику, которая имеет распределение Стьюдента, и рассчитывается по формуле:

$$t_{a_j} = \frac{|a_j|}{S_{a_j}} \quad (3.33)$$

где $S_{a_j} = \sqrt{S_{a_j}^2}$ – среднеквадратическое отклонение для a_j . Расчет критической статистики в Mathcad представлен ниже.

$$S_a = \begin{pmatrix} 1.949 \times 10^{-4} \\ 1.998 \times 10^{-5} \\ 1.448 \times 10^{-7} \\ 8.063 \times 10^{-11} \end{pmatrix} \quad \sigma_a := \sqrt{S_a} = \begin{pmatrix} 0.014 \\ 4.47 \times 10^{-3} \\ 3.805 \times 10^{-4} \\ 8.979 \times 10^{-6} \end{pmatrix} \quad A = \begin{pmatrix} 2.1 \\ -0.071 \\ 3.197 \times 10^{-3} \\ -8.922 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

Рассчитанные значения критической статистики:

$$t_{a_0} := \frac{|A_0|}{\sigma_{a_0}} = 150.466 \quad t_{a_2} := \frac{|A_2|}{\sigma_{a_2}} = 8.401$$

$$t_{a_1} := \frac{|A_1|}{\sigma_{a_1}} = 15.821 \quad t_{a_3} := \frac{|A_3|}{\sigma_{a_3}} = 9.936$$

Распределение Стьюдента является однопараметрическим, параметр определяется как:

$$f = k - 1, \quad (3.34)$$

Зададим уровень значимости:

$$p = 0.01 \quad (3.35)$$

Найдем значение квантиля $t_{f,p}$ для данных параметров из таблиц математической статистики [32], выполним сравнение рассчитанных по (3.33) значений критической статистики с квантилем, представим расчеты в Mathcad.

$$t_a = \begin{pmatrix} 150.466 \\ 15.821 \\ 8.401 \\ 9.936 \end{pmatrix} \quad t_{1\%_f} := 2.6025 \quad \text{- квантиль распределения Стьюдента}$$

$$t_a < t_{1\%_f} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Так как неравенство

$$t_{a_j} < t_{p,f} \quad (3.36)$$

не выполнено для всех коэффициентов a_j , то все коэффициенты математической модели следует признать значимыми.

Наконец, необходимо определить адекватность модели в целом. Для этого рассчитывается разброс значений, полученных по регрессионной модели, относительно экспериментальных точек, называемый дисперсией адекватности:

$$S_{ад}^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(U_i - \hat{U}_i)^2}{(k - (m + 1))} \quad (3.37)$$

где m – старшая степень полинома, используемого в регрессионной модели.

Расчет дисперсии адекватности в Mathcad представлен ниже.

Расчет дисперсии адекватности:

$$S_{ад} := \frac{1}{k - (3 + 1)} \cdot \sum (U - U_{ev})^2 = 1.006 \times 10^{-3}$$

$$S_U = 2.892 \times 10^{-4}$$

Для сравнения дисперсий необходимо рассчитать критическую статистику, имеющую распределение Фишера:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_U^2} \quad (3.38)$$

Распределение Фишера является двухпараметрическим с параметрами:

$$f_{ад} = k - (m + 1) \quad (3.39)$$

- параметр от дисперсии адекватности;

$$f_U = \sum_{i=1}^k f_{S_{U_i}^2} = (n - 1)k \quad (3.40)$$

- параметр от средней дисперсии выходной переменной.

Зададим уровень значимости:

$$p = 0.1\% \quad (3.41)$$

Найдем значение квантиля $F_{f_{ад}, f_U, p}$ для данных параметров из таблиц математической статистики [32], выполним сравнение рассчитанных по (3.38)

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		67

значений критической статистики с квантилем, представим расчеты в Mathcad ниже.

$$f_{ад} := k - (3 + 1) = 10$$

$$f_y := (5 - 1) \cdot N = 4N$$

$$F := \frac{S_{ад}}{S_U} = 3.479$$

$$F_{01\%_{фад_фy}} := 3.54 \quad \text{- квантиль распределения Фишера}$$

$$F < F_{01\%_{фад_фy}} = 1$$

Так как неравенство

$$F < F_{f_{ад}, f_{U, p}} \quad (3.42)$$

выполнено, то рассчитанную модель следует признать адекватной.

Полученную модель с подставленным значением коэффициентов представим ниже:

$$U(W) = 2.1 - (7.1 * 10^{-2})W + (3.2 * 10^{-3})W^2 - (8.9 * 10^{-5})W^3 \quad (3.43)$$

В дальнейшем данное уравнение может быть использовано для вычисления промежуточных значений влажности и формирования таблицы значений.

3.3 Экспериментальное исследование изменения влажности почвы в динамике

3.3.1 Предпосылки проведения эксперимента по определению динамики изменения влажности

Как было показано при теоретическом исследовании электрических датчиков влажности почвы во 2 главе, при равномерном распределении влаги в почве датчик можно считать безынерционным звеном. Данное предположение использовалось при получении градуировочных характеристик.

При практическом использовании датчика распределение влажности, особенно в процессе полива, нельзя считать равномерным. Теоретические исследования показывают [33], что в корнеобитаемом слое почвы процесс влагообмена может быть представлен следующим дифференциальным уравнением, которое описывает систему «вода-почва-растение»:

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
						68
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\theta \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_B \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) - g \frac{\partial K_B}{\partial z} + Q(z, t) \quad (3.44)$$

где θ – объемная влажность;

$\Phi(z, t)$ – капиллярный потенциал почвенной влаги;

K_B – коэффициент влагопроводности, в общем случае $K_B = K_B(z)$;

g – ускорение силы тяжести;

$Q(z, t)$ – поглощение влаги корневой системой из единицы объема почвы;

z – вертикальная координата.

Решение данного уравнения затруднено, особенно из-за наличия большого количества эмпирических констант, и в данной практической задаче не является необходимым. Для практических целей необходимо определить время установления влажности в исследуемом слое почвы (время переходного процесса), и величину превышения измеренным значением влажности реального значения (величину перерегулирования), которые необходимо будет учитывать при автоматическом управлении поливом.

3.3.2 Постановка эксперимента

Эксперимент по определению динамического изменения влажности в почве состоит из следующих этапов:

1) предварительная подготовка выбранного образца почвы (сушка в печи, измельчение крупных комков);

2) определение массы высушенной почвы, используемой в эксперименте;

3) установка датчика на определенном контролируемом расстоянии от «капельницы», которая является источником воды;

4) установка влажности на определенном значении W^* ;

5) снятие показаний с датчика на протяжении времени от начала внесения влаги, до некоторого конечного значения, длина временного интервала $t_{\text{изм}}$.

Схема проведения эксперимента совпадает со схемой, которая использовалась для градуировки датчиков и была представлена на рисунке 3.1.

Схему установки датчика относительно капельницы и результаты промачивания почвы на ее поверхности после эксперимента представлены на рисунке В.4 Приложения В.

Знание параметров r и R напрямую связано с влажностью почвы, как показано в работе [34], примерный вид распределение влаги в процессе капельного полива представлен на рисунке В.5 Приложения В.

При эксперименте запланировано достижение максимального уровня влажности:

$$W^* = 24 \%, \quad (3.45)$$

которое обеспечивается внесением количества воды:

$$V^* = 120 \text{ мл}$$

в течение времени:

$$t_{\Pi} = 4 \text{ мин} \quad (3.46)$$

3.3.3 Проведение эксперимента по исследованию динамики изменения влажности

При проведении эксперимента значения влияющих величин совпадают со значениями, которые представлены в таблице . Коэффициент передачи АЦП соответствует значению, полученному в (3.10).

Результаты эксперимента по исследованию динамики изменения влажности почвы представлены в таблице Д.1 в Приложении Д. Отметим, что время начала измерений совпадает со временем начала полива.

3.3.4 Оценка полученных результатов

Представим график переходного процесса, полученного в результате эксперимента, на рисунке 3.7.

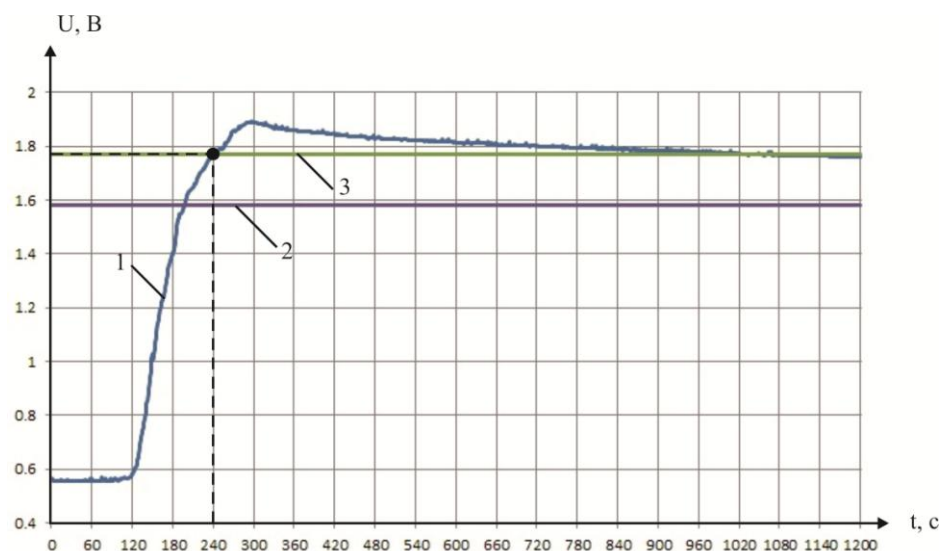


Рисунок 3.7 – График динамического изменения влажности в процессе полива

Здесь 1 – показания датчика влажности, 2 – градуировочное значение напряжения $U^* = 1.58$, соответствующее $W^* = 24\%$, 3 – градуировочное значение напряжения $U = 1.77$, соответствующее $W = 26\%$. Точкой указан момент времени t_{Π} , в который была прекращена подача воды. Участок от t_{Π} до $t_{\text{изм}}$, соответствующий переходному процессу после окончания полива представим на рисунке 3.8.

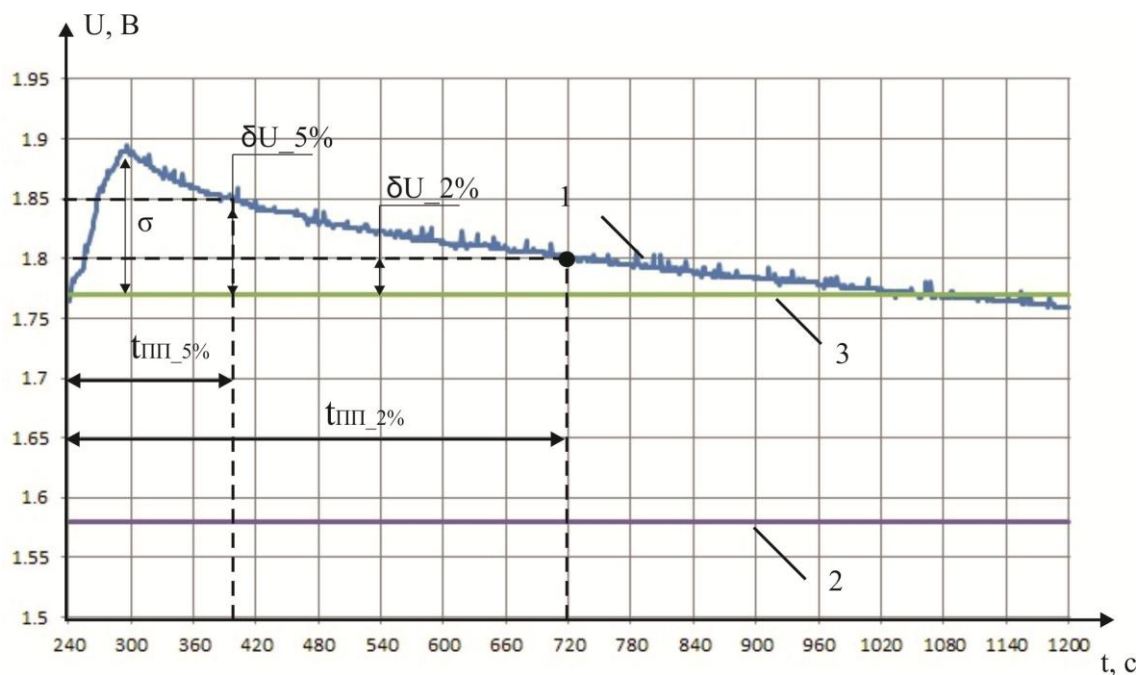


Рисунок 3.8 – Увеличенная часть графика переходного процесса после окончания полива

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Так как процесс перехода к установившемуся значению влажности в почве осуществляется достаточно длительное время (по результатам эксперимента за 20 минут был достигнут уровень влажности на 2% превышающий заданный как видно из рисунка 3.8), то при построении системы управления в качестве установившегося значения можно принимать уровень влажности на 1-2% выше задаваемого.

Полагая

$$W = 26 \% = W_{уст} \quad (3.47)$$

по рисунку 3.8 можем оценить такие параметры переходного процесса, как перерегулирование σ и время переходного процесса $t_{пп}$.

Величина перерегулирования может быть оценена по формуле:

$$\sigma = \frac{U_{max} - U_{уст}}{U_{уст}} 100\%, \quad (3.48)$$

где σ – перерегулирование;

U_{max} – максимальное значения выходного напряжения датчика.

Получим:

$$\sigma = \frac{1.89 - 1.77}{1.77} 100\% = 6.78\%$$

Время переходного процесса может быть оценено по разному в зависимости от допускаемого отклонения напряжения от установившегося значения δU .
Определим время переходного процесса для двух значений δU :

$$\begin{aligned} \delta U = 2\% &\rightarrow t_{пп} = 720 \text{ с} = 12 \text{ мин}; \\ \delta U = 5\% &\rightarrow t_{пп} = 390 \text{ с} = 6.5 \text{ мин} \end{aligned} \quad (3.49)$$

Выводы по главе 3: выбраны два датчика влажности на основе кондуктометрического и диэлькометрического методов измерения, проведен сравнительный анализ параметров датчиков.

Поставлен эксперимент по градуировке датчиков влажности, разработана экспериментальная установка, проведено экспериментальное снятие показаний датчиков. Выполнено сравнение полученных результатов с теорией, показаны

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		72

преимущества диэлькометрического датчика, по результатам которых данный датчик выбран в качестве датчика влажности почвы для системы.

По результатам эксперимента построена регрессионная модель для диэлькометрического датчика влажности, проведена оценка адекватности полученной модели.

Поставлен и проведен эксперимент по определению динамических свойств диэлькометрического датчика влажности, оценены параметры переходного процесса.

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		73

4 РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОДУЛЕЙ СИСТЕМЫ

4.1 Проектирование модуля измерения параметров почвы

4.1.1 *Разработка структурной схемы измерительной части модуля с учетом подобранных компонентов*

По результатам предварительного анализа в качестве контроллера для модуля измерения параметров почвы была выбрана плата Arduino Pro Mini на базе контроллера ATmega328 с напряжением питания 3.3 В. Для связи с модулем управления был выбран радиомодуль nRF24L01+ со встроенной антенной. По результатам исследования датчиков влажности почвы был выбран диэлектрический датчик влажности почвы, имеющий аналоговый выходной сигнал по напряжению. Для контроля температуры почвы был выбран датчик температуры DS18B20 в металлической гильзе, характеристики которого представлены в Приложении Е. Контроль времени пробуждения модуля измерителя влажности осуществляется с помощью микросхемы часов реального времени (Real-time clock, (RTC)) DS3231, документация на которую представлена в Приложении Ж.

Представим структурную схему модуля измерения параметров почвы с выбранными компонентами на рисунке 4.1.

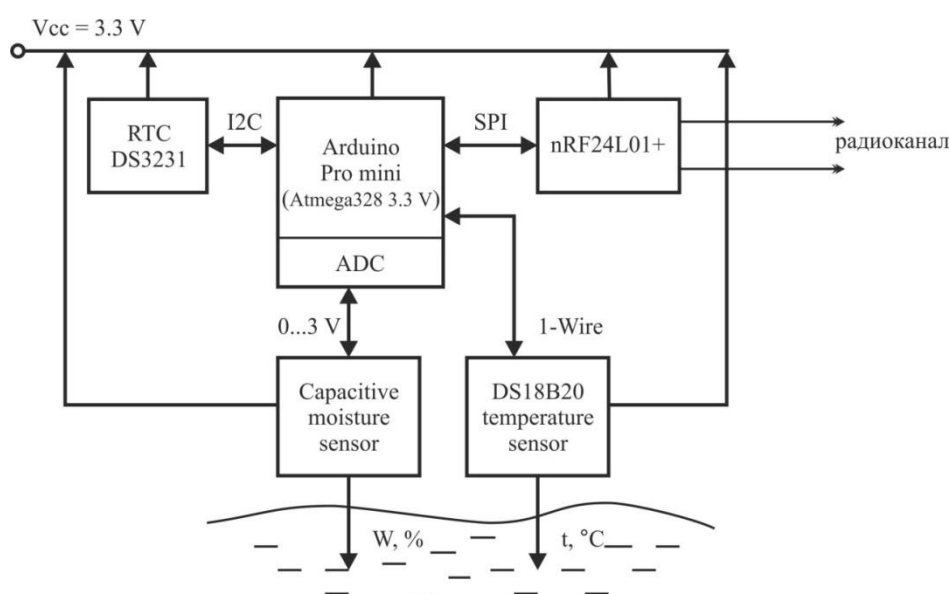


Рисунок 4.1 – Структурная схема модуля измерения параметров почвы

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		74

4.1.2 Разработка алгоритма работы модуля измерения параметров почвы

Алгоритм работы модуля измерения параметра почвы можно представить в виде следующей последовательности действий:

- 1) первичная инициализация устройств после подачи питания;
- 2) отправка управляющему модулю сообщения о том, что измерительный модуль включен;
- 3) получения от управляющего модуля сообщения с параметрами конфигурации, в числе которых значение реального времени;
- 4) проверка наличия флага-сигнализатора о необходимости проведения измерений;
- 5) после проведения проверки и выполнения действий (проведение измерений и отправка результатов или отправка статусного сообщения на модуль управления) радиомодуль и микроконтроллер переводятся в режим глубокого сна, выход из которого осуществляется по прерыванию от RTC. Блок схема основного алгоритма представлена на рисунке К.1 Приложения К, алгоритм обработки прерывания по часам – на рисунке К.2 Приложения К.

Поясним некоторые функции и подпрограммы, которые представлены на блок-схемах основной программы на рисунке К.1. Подпрограмма «Инициализация» включает конфигурацию режима работы микроконтроллера, настройка портов микроконтроллера, настройка параметров радиомодуля (формат сообщений, скорость передачи, мощность передачи, квитирование и др.), настройка связи между радиомодулем и микроконтроллером, установка начального значения RTC.

Функции `radio_transmit` и `radio_receive` обеспечивают передачу и получение соответственно массива данных, которые они принимают в качестве аргумента, между измерительным модулем и модулем управления. Внутри функций обеспечивается переключение режима радиомодуля, цикл ожидания пакета, проверка полученного пакета.

Функция `set_parameters` осуществляет установку параметров конфигурации системы в модуль измерения (время на RTC, нижние и верхние границы

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
						75
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

контролируемого диапазона изменения влажности и температуры почвы в данной зоне).

Подпрограмма «Проведение измерений и отправка результатов» осуществляет проведение опроса датчиков влажности и температуры почвы (с повторными измерениями), усреднение полученных значений, формирование сообщения и отправку его на модуль управления.

Подпрограмма «Проведение синхронизации между модулями» осуществляет проверку соответствия времени RTC измерительного модуля и времени RTC модуля управления. При значительном расхождении во времени проводится корректировка времени измерительного модуля.

Подпрограмма «Переход в спящий режим» осуществляет установку будильника на RTC, который генерирует прерывание для пробуждения микроконтроллера. Затем осуществляется перевод в режим глубокого сна радиомодуля, отключение неиспользуемой периферии микроконтроллера и перевод микроконтроллера в режим глубокого сна.

4.2 Проектирование модуля управления системой полива

4.2.1 Разработка структурной схемы модуля с учетом подобранных компонентов

По результатам предварительного анализа в качестве контроллера для модуля управления была выбрана плата Arduino Nano на базе контроллера ATmega328 с напряжением питания 5 В. Для связи с контролируемыми модулями был выбран радиомодуль nRF24L01+PA+LNA с внешней антенной. Для связи с сервером был выбран GSM-модуль SIMCOM SIM800L. Контроль времени пробуждения управляющего модуля осуществляется с помощью микросхемы часов реального времени (Real-time clock, (RTC)) DS3231.

Представим структурную схему управляющего модуля с выбранными компонентами на рисунке 4.2.

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
						76
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

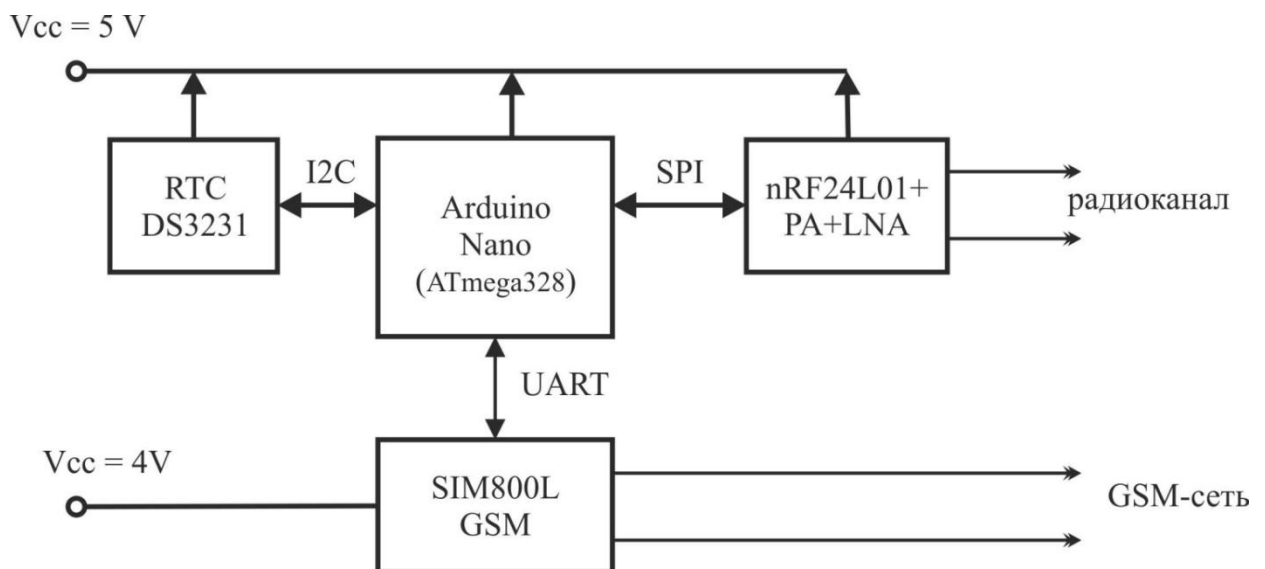


Рисунок 4.2 – Структурная схема модуля управления системой

В схеме на рисунке 4.2 схему не включен локальный пользовательский интерфейс (жидкокристаллический алфавитно-цифровой индикатор, кнопки навигации и настройки), однако при дальнейшей разработке они могут быть включены в качестве одной из возможных конфигураций модуля управления.

4.2.2 Разработка алгоритма работы модуля управления

Алгоритм работы модуля управления можно представить в виде следующей последовательности действий:

- 1) первичная инициализация устройств модуля после подачи питания;
- 2) отправка сообщения на сервер о подключении модуля управления и конфигурации системы по умолчанию;
- 3) получение от сервера сообщения с параметрами конфигурации системы;
- 4) применение параметров конфигурации системы в параметрах модуля управления;
- 5) переход в цикл регистрации ведомых модулей системы, ожидание сообщений от ведомых модулей;
- 6) при получении сообщения от ведомого модуля он регистрируется в модуле управления, ему отправляется сообщение о параметрах состояния системы;

7) если число регистрируемых модулей достигло максимального или превышено время ожидания регистрации, осуществляется выход из цикла ожидания регистрации;

8) вход в основной цикл программы, проведение опроса модулей;

9) отправка на сервер сообщения об измеренных параметрах системы, получение сообщения о конфигурации системы;

10) передача модулям сообщения о конфигурации системы;

11) переход в режим глубокого сна, выход из которого осуществляется по прерыванию от RTC.

При использовании стационарного источника питания для модуля управления переход в режим сна может быть исключен.

Блок-схема алгоритма основной программы модуля управления представлена на рисунке Л.1 Приложения Л, блок схема обработки прерывания на рисунке Л.2 Приложения Л.

Подпрограмма «Инициализация» включает конфигурацию режима работы микроконтроллера, настройка портов микроконтроллера, настройка параметров радиомодуля (формат сообщений, скорость передачи, мощность передачи, квитирование и др.), настройка связи между радиомодулем и микроконтроллером, настройка связи микроконтроллера с GSM-модулем, настройка параметров GSM-модуля, установка начального значения RTC.

Функции GSM_transmit и GSM_receive аналогичны описанным в пункте 4.1.2 функциям radio_transmit и radio_receive и используются для передачи и приема сообщения через GSM-модуль соответственно.

Функция reg_module осуществляет регистрацию ведомого модуля (присвоение ему уникального адреса) в модуле управления.

Подпрограмма «Опрос модулей» осуществляет последовательный опрос модулей, получения от них измеренной информации и формирование сообщения с использованием этой информации для отправки на сервер.

Подпрограмма «Переход в спящий режим» осуществляет установку будильника на RTC, который генерирует прерывание для пробуждения

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
						78
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

микроконтроллера. Затем осуществляется перевод в режим глубокого сна периферии и микроконтроллера.

4.3 Разработка WEB-интерфейса пользователя

4.3.1 Разработка принципа взаимодействия пользователя с системой через WEB-интерфейс, основные компоненты WEB-интерфейса

Взаимодействие пользователя с управляющим модулем системы, получение данных о системе и отправка команд осуществляются удаленно. Для этого был разработан пользовательский WEB-интерфейс, принцип действия которого представлен на рисунке 4.3.

Рассмотрим средства, с помощью которых осуществляется реализация WEB-интерфейса пользователя, представленного на рисунке 4.3.

На WEB-сервере располагаются база данных, планировщик задач и серверные скрипты, написанные на языке PHP. Структура WEB-сервера представлена на рисунке 4.4.

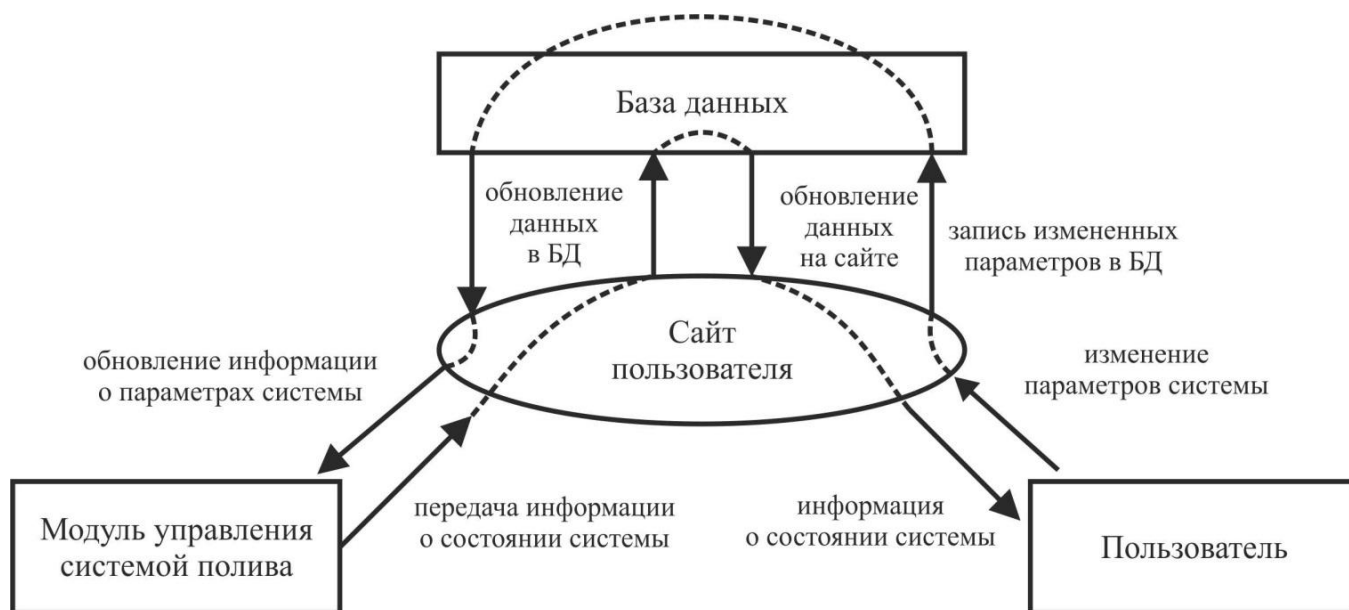


Рисунок 4.3 – Принцип взаимодействия пользователя с управляющим модулем через WEB-интерфейс

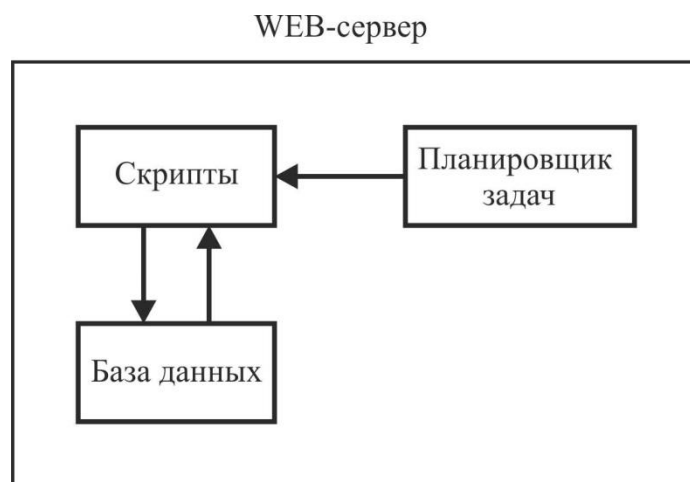


Рисунок 4.4 – Структура WEB-сервера

Результатом работы скриптов на сервере может быть взаимодействие с базой данных, а также возврат HTML, CSS или JavaScript кода в ответ на запрос клиента. База данных обеспечивает хранение информации, с которой взаимодействует сервер. Данные в базе данных представлены в виде таблиц и взаимосвязей между ними, что обеспечивает целостность данных [35].

Совокупность модуля управления, WEB-сервера и пользователя реализует модель «клиент-серверного» взаимодействия, где модуль управления и пользователь являются **клиентами**, которые инициируют и посылают запрос на сервер, WEB-сервер исполняет функции сервера, который ожидает соединения для получения запроса, выполняет установленную программу и возвращает обратно сообщение с результатом [36].

Однако в такой модели инициировать «клиент-серверное» взаимодействие могут только клиенты, так как скрипты запускаются на сервере в момент обращения клиента. Для независимого запуска скриптов используется планировщик задач, который осуществляет запуск скриптов по расписанию. В нашей системе это позволит проводить проверку последнего обращения модуля управления на сервер и в случае, если модуль не присылал новые данные слишком долго, уведомить пользователя о нарушении связи.

4.3.2 Разработка алгоритма функционирования WEB-интерфейса

Взаимодействие с сервером модуля управления. Снимая показания с датчиков, управляющий модуль формирует информационное сообщение, выполняя функцию клиента. Сообщение на сервер может быть передано в формате GET или POST запроса, форма, структура и назначение которых определены в протоколе HTTP, который в свою очередь является протоколом прикладного уровня стека TCP/IP [36], [37].

PHP скрипт на сервере осуществляет извлечение данных из запроса от модуля, запись данных в базу. JavaScript код осуществляет обновление данных, отображаемых на сайте, через определенный промежуток времени или при обновлении данных в базе.

В ответ на сообщение модуля PHP скрипт, обращаясь к базе, формирует сообщение с параметрами конфигурации, которые могут быть изменены пользователем через сайт и передает его на модуль.

При длительном отсутствии информации от модуля управления сервер через специальный сервис формирует SMS-сообщение о потере связи с системой и отправляет его пользователю на мобильный телефон.

Взаимодействие пользователя с сервером. Взаимодействие осуществляется через браузер пользователя. Загружая страницы сайта, пользователь получает информацию о состоянии системы в текстовой и графической форме. На странице изменения конфигурации системы пользователь может внести изменения в текущие параметры системы (время полива, частоту, требуемый к поддержанию уровень влажности и другие). Внесение изменений передается как POST запрос на сервер, где PHP скрипт выполняет обработку изменений и запись их в базу данных.

Выводы по главе 4: спроектирован модуль измерения параметров почвы, разработана структурная схема модуля с указанием входящих в него устройств и интерфейсов взаимодействия между ними, разработан алгоритм модуля измерения параметров почвы.

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		81

Спроектирован модуль управления системой, разработана структурная схема модуля управления с указанием входящих в него устройств и интерфейсов взаимодействия между ними, разработан алгоритм модуля управления.

Изучена возможность построения WEB-интерфейса пользователя, разработан принцип сетевого взаимодействия пользователя с системой, изучена структура WEB-сервера и разработан алгоритм функционирования WEB-интерфейса.

Для демонстрации основных функций системы разработаны прототипы модуля измерения параметров почвы, модуля управления и прототип WEB-интерфейса с упрощенными алгоритмами работы. Описание и фотографии прототипов представлены в Приложении П.

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
						82
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполнения ВКР в первой главе был произведен анализ технического задания на проектирование системы, изучены аналоги и выявлены их недостатки, разработана функциональная структура системы и технические требования. В теоретическом разделе первой главы были изучены микроконтроллерные платы на основе разных архитектур, технологии удаленного контроля, проводные и беспроводные технологии передачи данных между устройствами в системе. На основании сравнительного анализа осуществлен подбор основных электронных модулей системы.

Во второй главе проведено теоретическое исследование математических моделей, используемых при измерении влажности и температуры почвы. Изучены величины, характеризующие влажность почвы, подробно рассмотрены два электрических метода измерения влажности: кондуктометрический и диэлектрический. По результатам рассмотрения проведен сравнительный анализ обоих методов, выявлены их достоинства и недостатки, особенности проведения измерений каждым из методов. Кроме того в главе изучена теория измерения температуры почвы, рассмотрены различные методы измерения температуры. Также во вторую главу входит обзор требований к микроклимату в теплице для различных сельскохозяйственных культур.

В третьей главе проводится экспериментальное исследование и сравнение двух коммерчески доступных датчиков влажности почвы. Разработана установка для исследования датчиков и правила проведения эксперимента, получены градуировочные характеристики и проведено сравнение их с теорией для каждого из датчиков. По результатам сравнения для использования в системе выбран диэлектрический датчик влажности, для него рассчитано уравнение регрессии, которое связывает влажность и выходной сигнал датчика, проведен эксперимент по исследованию динамических характеристик датчика.

В четвертой главе рассмотрено проектирование некоторых модулей системы. Проведено проектирование модуля измерения параметров почвы, построена

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
						83
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

структурная схема с подобранными электронными компонентами, разработан алгоритм работы модуля, построены основные блок-схемы алгоритма. Также проведено проектирование модуля управления системой, разработана его структурная схема и алгоритм работы. Кроме того в главе рассмотрена разработка WEB-интерфейса пользователя, определена структура сетевого взаимодействия и алгоритм функционирования интерфейса с привязкой к WEB-серверу. Результатом четвертой главы является разработка прототипов спроектированных модулей и WEB-интерфейса для демонстрации заявленных функций системы.

Итогом ВКР является решение комплекса задач проектирования при разработке модульной автономной микроконтроллерной системы капельного полива с возможностью удаленного контроля через сети сотовой связи.

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		84

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инновационная деятельность в аграрном секторе экономики России / под ред. Трибулиной И.Т., Ушачева И.Г. – М.: Колос, 2007. – 636 с.
2. О внесении изменений в Государственную программу развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013 – 2020 годы – <http://www.mcx.ru/documents/document/show/22026.htm>.
3. <http://www.agrosalon.ru/>.
4. <http://www.yugagro.org/>.
5. <http://www.perchina.ru/catalog/sistemy-poliva/product/sistema-poliva-vodomerk>.
6. <http://www.aquadusya.ru/>.
7. Полезная модель 155918 МПК А01G 25/02 (2006.01). Система автоматического капельного полива растений / А.А. Воронин. – № 2015125923/13, заявл.: 30.06.2015, опуб.: 20.10.2015 Бюл. № 29.
8. <http://radioprogram.ru/post/100>.
9. <http://сhem.net/mc/mc194.php>.
10. Аникин, А. Обзор современных технологий беспроводной передачи данных / А. Аникин // Беспроводные технологии. – Вып. 4. – 2011.
11. Колыбельников, А.И. Обзор технологий беспроводных сетей / А.И. Колыбельников // Труды МФТИ. – №4. – Вып. 2. – 2012.
12. Шеин, Е.В. Курс физики почв: учебник / Е.В. Шеин. – М.: Изд-во МГУ, 2005 – 432 с.
13. Мазиров, М.А. Агрофизика: учебное пособие / М.А. Мазиров, В.М. Гончаров, Е.В. Шеин. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2014 – 92 с.
14. Берлинер, М.А. Измерение влажности / М.А. Берлинер. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.
15. Попов, А.Н. Технология и техническое средство бесконтактного измерения влажности почвы на основе инфракрасного излучения.: диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук / А.Н Попов. – Мичуринск: Наукоград РФ, 2014. – 212 с.
16. Нерпин, С.В. Физика почв / С.В. Нерпин, А.Ф. Чудновский. – М.: Наука, 1967. – 584 с.
17. http://www.zandz.ru/udelnoe_soprotivlenie_grunta.html.
18. Болотов, А.Г. Измерение влажности почв методом частотной диэлькометрии / А.Г. Болотов, Т.А. Карась, А.А. Лёвин, И.В. Гефке, А.Н. Шаталов, И.Н. Бутырин, Е.А. Копыч // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – №12. – 2013.
19. Бобров, А.П. Определение диэлектрической проницаемости прочно- и рыхлосвязной воды на СВЧ с использованием емкостной модели диэлектрической проницаемости почв / А.П. Бобров, П.П. Бобров, О.А. Ивченко, В.Н. Мандрыгина // Вестник Омского государственного педагогического университета. – 2006.

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		85

20. Лисичкин, В.Г. Сравнительный анализ моделей диэлектрических свойств почвы при автогенераторных измерениях влажности / В.Г. Лисичкин, С.Н. Шведов // Измерительная техника – №2. – 2008.

21. Орнатский, П.П. Теоретические основы информационно измерительной техники / П.П. Орнатский. – Киев: Вища школа, 1983 – 455 с.

22. Хворова, Л.А. Математические модели в теории и практике точного земледелия / Л.А. Хворова // Известия Алтайского государственного университета – 2011.

23. Полякова, Л.С. Метеорология и климатология: учебное пособие /Л.С. Полякова, Д.В. Каширин. – Новочеркасск, 2004. – 108 с.

24. http://temperatures.ru/pages/termometry_soprotivleniya.

25. РД 52.33.760 – 2011. Температура почвы сельскохозяйственных угодий. Методика измерений термометром почвенным АМ-34А. – Обнинск: ФГБУ ВНИИГМИ-МЦД, 2011 – 24 с.

26. <http://www.activestudy.info/rezhim-vlazhnosti-v-teplicax/>.

27. http://www.ovoport.ru/ovosh/tomat/zas_grunt1_2.htm.

28. http://www.virasti-sam.com/ovosh_ogurec_virashivanie%20v%20teplica.php.

29. Зажигаев, Л.С. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента / Л.С. Зажигаев, А.А. Кишьян, Ю.И. Романиков – М.: Атомиздат, 1978. – 232 с.

30. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей /Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.

31. Большев, Л.Н. Таблицы математической статистики /Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. – М.: Наука, 1983. – 416 с.

32. Галиулина, Е.Ю. Капельное орошение яблоневого сада в условиях сухостепной зоны Волгоградской области.: диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук / Е.Ю. Галиулина. – Волгоград, 2015. – 152 с.

33. Алиев, И.Н. Экологически безопасная технология микроорошения сельскохозяйственных культур в условиях недостаточно увлажненных зон Азербайджана / И.Н. Алиев, Б.Г. Алиев. – Баку: Нурлан, 2002. – 113 с.

34. <http://lazysmart.ru/distantcionnoe-upravlenie/sozdanie-veb-prilozheniya-dlya-iot-urok-1/>.

35. <https://ru.wikipedia.org/wiki/HTTP>.

36. Олифер, Н.А. Компьютерные сети /Н.А. Олифер, В.Г. Олифер. – СПб.: Питер, 2007. – 957 с.

37. <http://khsu.ru/rc/rc-projects/greenhouse.html>.

38. <http://lot84.narod.ru/msfu/metod/metod1.htm>.

39. <http://www.sensorica.ru/docs/art3.shtml>.

					ЮУрГУ–12.03.01.2017.19-076-1382.ВКР	Лист
						86
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		