

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Саратовский государственный университет генетики,  
биотехнологии и инженерии им. Н.И. Вавилова»

*На правах рукописи*

**АБЗАЛОВ Муслим Аликович**

**РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПОЛИВА  
ОБОСНОВАНИЕМ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА  
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ**

**Специальность:** 4.3.2 Электротехнологии, электрооборудование  
и энергоснабжение агропромышленного комплекса

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук,  
доцент Бакиров С.М.

Саратов 2026

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ВВЕДЕНИЕ.....                                                                                                                                                                                     | 4   |
| ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СПОСОБОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОЛИВОМ. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ .....                                                                                           | 10  |
| 1.1 Анализ режимов полива сельскохозяйственных культур .....                                                                                                                                      | 10  |
| 1.2 Оценка существующих способов и технических средств автоматизации полива сельскохозяйственных культур .....                                                                                    | 18  |
| 1.3 Анализ современных способов и технических средств измерения влажности почвы.....                                                                                                              | 26  |
| 1.4 Особенности измерения влажности емкостным способом .....                                                                                                                                      | 39  |
| 1.5 Постановка цели и задач исследования.....                                                                                                                                                     | 51  |
| ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ПОСЛОЙНОГО КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ .....                                                                                                           | 56  |
| 2.1 Обоснование объекта исследования .....                                                                                                                                                        | 56  |
| 2.2 Обоснование параметров первичного преобразователя устройства послойного контроля влажности почвы .....                                                                                        | 62  |
| 2.3 Обоснование параметров вторичного преобразователя .....                                                                                                                                       | 71  |
| 2.4 Разработка функциональной схемы и алгоритма работы устройства послойного контроля влажности почвы .....                                                                                       | 80  |
| 2.5 Обоснование функциональной схемы и алгоритма управления оросительным комплексом на основе данных датчиков послойного контроля влажности почвы.....                                            | 88  |
| 2.6 Выводы по главе.....                                                                                                                                                                          | 100 |
| ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДАТЧИКА ПОСЛОЙНОГО КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ.....                                                                                                 | 102 |
| 3.1 Методика проведения экспериментальных исследований .....                                                                                                                                      | 102 |
| 3.2 Разработка первичного и вторичного преобразователей.....                                                                                                                                      | 106 |
| 3.3 Проведение лабораторных и полевых испытаний датчика послойного контроля влажности.....                                                                                                        | 126 |
| 3.4 Разработка электрической принципиальной схемы автоматического управления включения насосного агрегата и дождевальнoй машины на основе данных датчика послойного контроля влажности почвы..... | 132 |
| 3.5 Выводы по главе.....                                                                                                                                                                          | 135 |

|                                                                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ГЛАВА 4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДАТЧИКА ПОСЛОЙНОГО КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ.....                             | 136 |
| 4.1 Результаты экспериментальных исследований в лабораторных условиях с помощью заданных значений первичного преобразователя.....          | 136 |
| 4.2 Результаты измерения влажности почвы и определения коэффициента ее увлажненности и погрешностей.....                                   | 141 |
| 4.3 Оценка сходимости теоретической и экспериментальной зависимостей коэффициента увлажненности почвы.....                                 | 145 |
| 4.4 Результаты применения датчика послойного контроля влажности в схеме автоматизации управления насосным агрегатом и дождевальная машиной | 149 |
| 4.5 Выводы по главе.....                                                                                                                   | 153 |
| ГЛАВА 5. ОБОСНОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННЫХ РЕШЕНИЙ.....                                                                 | 154 |
| 5.1 Методика расчета технико-экономических эффективности предложенных решений.....                                                         | 155 |
| 5.2 Определение капиталовложений в разработку датчика послойного контроля влажности.....                                                   | 156 |
| 5.3 Расчет экономической эффективности внедрения датчика послойного контроля влажности.....                                                | 162 |
| 5.4 Расчёт водопотребления и экономии поливной воды.....                                                                                   | 166 |
| 5.5 Выводы по главе.....                                                                                                                   | 171 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                                                                                                           | 172 |
| РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ.....                                                                                                             | 174 |
| ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ .....                                                                                               | 174 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....                                                                                                                     | 175 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ .....                                                                                                                           | 187 |

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Орошаемое земледелие в Российской Федерации развивается быстрыми темпами. Ежегодно в России для целей гидромелиорации вводится более 1000 га площади земель сельскохозяйственного назначения. Режимы работы оросительных комплексов, состоящих из насосных станций и электрифицированных дождевальных машин, определены графиком полива посевов, построенного на основе климатических зон. Анализ графиков показал, что они не совпадают с реальной влагообеспеченностью почвы. Межполивной период отличается в 1,7–3,3 раза от планируемого из-за изменения реальной влажности почвы.

Обратная связь в системах автоматизации работы насосных агрегатов и дождевальных машин осуществляется разными средствами и способами измерения влажности почвы. Методы измерения влажности очень разнообразны и имеют индивидуальные алгоритмы исключения погрешностей. Самым достоверным методом измерения является термостатно-весовой. Однако продолжительность такого метода измерения составляет 12–36 часов, из которых 90 % времени затрачивается на сушку отобранных образцов. За это время реальная влажность почвы в поле может несколько раз измениться. Оперативное измерение влажности в поле осуществляют с помощью электрических методов, цепи которых смоделированы на основе измерения сопротивления, проводимости, емкости или мощности излучения.

У отдельных возделываемых полевых культур (кукуруза, соя) основная часть корневой системы располагается на глубине 0,4–0,6 м, а общая длина проникновения корней достигает 1,0 м. Послойный контроль влажности в системах автоматического управления (САУ) поливом позволяет адекватно оценить дефицит влаги, определить динамические процессы перемещения влаги внутри почвогрунтов и своевременно подать требуемое количество воды. Контактные методы измерения позволяют это реализовать путем заглубления датчиков по отдельности на разную глубину. Однако при этом нарушается

реальная плотность грунта, что приводит к грубым погрешностям измерения, так как в этих местах атмосферная или поливная влага проникает или испаряется с более высокой скоростью, чем в реальном грунте.

Анализ технического исполнения датчиков влажности показал, что 96 % устройств требуют рыхления почвы и имеют высокую погрешность измерения. Кроме того, 96 % устройств не интегрированы в схемы автоматизации насосных агрегатов и дождевальных машин, а отсутствие возможности точных настроек (70–75 %) ведёт к потерям урожая и перерасходу электроэнергии. Наибольший положительный эффект достигается именно в системах автоматизации с обратной связью, где данные датчиков используются для точного управления режимами работы оборудования. Измерительное устройство послойного контроля влажности, используемое в качестве обратной связи системы автоматического управления поливом, позволит объективно оценить влажность почвы по слоям для культурных растений с разной корневой системой и минимизировать продолжительность работы насосов и дождевальных машин.

Основанием для данной работы, являющейся продолжением комплекса работ по созданию, совершенствованию и эксплуатации электрифицированных дождевальных машин кругового действия и автоматизированных систем управления поливом, являются:

- федеральная целевая программа «Развитие мелиорации сельскохозяйственных земель России» на 2014–2020 годы (в рамках государственной программы развития сельского хозяйства с продолжением в мероприятиях до 2030 года);
- государственная программа Саратовской области «Развитие сельского хозяйства и регулирование рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия в Саратовской области», подпрограмма «Техническая и технологическая модернизация, научно-инновационное развитие» (постановление правительства Саратовской области от 02.10.2013 № 520-П);
- приоритетное научное направление ФГБОУ ВО Вавиловский университет «Модернизация инженерно-технического обеспечения

агропромышленного комплекса на основе цифровых технологий и автоматизации технологических процессов», программа стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (постановление Правительства РФ от 13.05.2021 № 730), в рамках которой реализуется стратегический проект «Аридное земледелие».

**Степень разработанности темы.** Разработками методов измерения влажности почвы занимались такие ученые, как И. П. Ананьев, Л. Н. Кошкин, Н. Ф. Рыжко, А. А. Роде, Р. Дж. Хэнкс, Дж. Л. Ашкрофт, М. А. Берлинер, В. Ю. Шишмарёв. Исследования зависимостей электрических параметров измерительных устройств в разных влагосодержащих средах отражены в работах А. В. Вострухина, Е.А. Вахтиной, Т. В. Филимоновой, Н. К. Шаруева, Д. П. Евстафьева. Общими вопросами многофункциональных измерительных систем занимались Ю. Б. Томашевский, С. М. Бакиров, В. А. Каргин, И. П. Ананьев, А. А. Белов, Р. А. Полуэктов и др. Однако вопросы по разработке первичного преобразователя, исключающего нарушение плотности грунта при установке, а также измерительного устройства в целом, удовлетворяющего требованиям послойного контроля влажности почвы, остаются не изученными.

**Цель работы** – снижение расхода воды на полив сельскохозяйственных культур обоснованием автоматизированного устройства послойного контроля влажности почвы и управления электрооборудованием системы орошения.

**Задачи исследования:**

1. Проанализировать существующие технические средства контроля влажности почвы и автоматизации полива сельскохозяйственных культур.
2. Теоретически обосновать параметры схемы первичного и измерительного преобразователей устройства послойного контроля влажности почвы.
3. Разработать алгоритм работы устройства и схему его интеграции в систему автоматического управления электрооборудованием оросительного комплекса.
4. Провести экспериментальные исследования устройства и оценить технико-экономическую эффективность его применения.

**Объект исследования** – процесс автоматизированного управления поливом сельскохозяйственных культур с использованием средств послойного контроля влажности.

**Предмет исследования** – закономерности изменения параметров электрической цепи измерительного устройства и режимы работы электрооборудования оросительного комплекса.

**Научную новизну** работы представляют:

- разработанная структура автоматизированной системы полива, основанная на емкостном методе послойного измерения параметра и использовании результата измерения в канале обратной связи управляющего устройства;

- обоснованная математическая модель зависимости выходного сигнала устройства от влажности почвы, позволяющая снизить погрешность управления в автоматическом режиме работы оросительного комплекса (насосного агрегата и дождевальная машины);

- разработанный алгоритм взаимодействия измерительного блока с электросиловой частью оросительного комплекса, обеспечивающий оптимизацию времени работы насосных агрегатов и дождевальных машин.

**Теоретическая и практическая значимость** работы состоит:

- в расширении и дополнении знаний использования диэлектриметрического метода измерения влажности почвы, а именно в разработке теоретических зависимостей изменения влажности при послойном контроле, позволяющих снизить инструментальную погрешность измерения влажности почвы и снизить погрешность измерительной схемы в целях повышения эффективности автоматизированной системы полива полевых культур;

- в разработке устройства послойного контроля влажности почвы, обеспечивающего низкую погрешность измерения;

- в практическом применении научных разработок, экспериментального измерительного устройства послойного контроля влажности и результатов исследования в лабораторных, полевых, производственных условиях на

предприятиях УНПО «Поволжье», КФХ Гамаюнов А. А. Саратовской области и ООО «Мироторг-Курск» Курской области, а также в учебном процессе ФГБОУ ВО Вавиловский университет при чтении лекций, проведении лабораторных и практических занятий по электрическим измерениям и автоматизации технологических процессов.

**Методология и методы исследований.** Методология исследования основана на поэтапном решении задачи уменьшения и исключения инструментальной погрешности при измерении влажности почвы в поле при послойном контроле за счет обоснования геометрических и электрических параметров измерительного устройства как обратной связи САУ поливом. Исследования проведены с использованием теории электрических измерений и автоматического управления с применением программ MS Excel 2010, Statistica v.10. Моделирование схем и устройств выполнено с помощью программ KiCad, КОМПАС 3D V16 и Multisim v. 8.2. При определении проблемной ситуации использованы эмпирические методы исследования: изучение, наблюдение, измерение и сравнение, а при решении проблемы – системный подход, анализ, синтез, эксперимент, статистические методы обработки данных и обобщение.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

- математическая модель изменения введенного коэффициента увлажнения почвы, который рассчитывается как отношение емкости конденсатора, измеренной на низкой частоте, к емкости, измеренной на высокой частоте от влажности почвы;
- структура и алгоритм системы автоматического управления оросительным комплексом (насосным агрегатом и дождевальная машиной) с устройством послойного контроля влажности почвы, используемого в качестве обратной связи.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов исследований подтверждена в ходе экспериментальной проверки работоспособности устройства послойного контроля влажности почвы и достаточной сходимостью теоретических и экспериментальных данных.

Основные положения работы обсуждены на научно-практических конференциях с международным участием «Актуальные проблемы энергетики» (г. Саратов, 2021–2026 гг.); конференциях ППС кафедры «Электрооборудование, энергоснабжение и роботизация» ФГБОУ ВО Вавиловский университет (г. Саратов, 2021–2026 гг.); на Всероссийском конкурсе научно-инновационных работ среди студентов, аспирантов и молодых ученых, направление «Технические науки» (г. Саратов, г. Уфа, г. Ставрополь, 2023 г.).

Основные положения диссертации опубликованы в 10 работах, в том числе в 5 статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК. Получен 1 патент на полезную модель. Общий объем публикаций составляет 3,88 печ. л., из которых 2,13 печ. л. принадлежит лично соискателю.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 116 наименований, 13 из которых на иностранном языке. Материал работы изложен на 197 страницах машинописного текста, включает в себя 77 рисунка, 22 таблицу и 2 приложения.

# **1. АНАЛИЗ СПОСОБОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОЛИВОМ. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ**

## **1.1 Анализ режимов полива сельскохозяйственных культур**

Решение о назначении полива сельскохозяйственных культур во многом зависит от данных о фактическом состоянии влажности в почве, которые получают при помощи датчиков влажности [2, 11, 15]. Датчики контроля влажности почвы имеют различные принципы измерения влажности [1, 11, 16, 69]. Используя эти данные, агрономы могут регулировать воздействие поливом (влагообеспечением) в соответствии с конкретными фазами роста растений, что способствует при своевременной подаче воды ресурсосбережению и повышению урожайности сельскохозяйственных культур. Такой подход при получении точной и надежной информации обеспечивает более эффективное и устойчивое ведение сельского хозяйства [15, 18, 24].

Контролировать влажность почвы необходимо для того, чтобы определить критическое значение влажности и своевременно повысить ее путем поверхностного, капельного полива или полива дождеванием [68, 71, 84]. Однако в какой момент назначить полив по данным влажности почвы, до конца не исследовано. Например, в одних источниках предлагается контролировать верхний слой, а в других – контролировать влажность на глубине 20–30 см и затем принимать решение о поливе [73, 74, 86]. Практических рекомендаций в литературных источниках недостаточно.

Достаточная влажность почвы обеспечивает нормальное протекание процессов обмена микроэлементов с корневой системой и в целом является жизненно важным ресурсом для роста растений. Обоснование решений по своевременному поливу основано на нескольких ключевых факторах, включая вид растений, условия окружающей среды, тип почвы и стадию роста [6, 13, 18,].

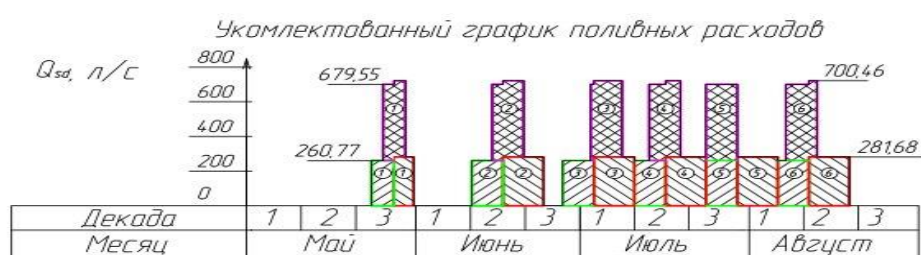
Прежде всего важно понимать потребности в воде конкретных видов растений. Разные растения имеют разные требования к влагообеспеченности:

некоторые из них более устойчивы к засухе, а другие прекрасно себя чувствуют в постоянно влажных условиях [74, 83, 97]. Необходимо исследовать и определить конкретные потребности в воде каждого растения, чтобы обеспечить оптимальный рост и развитие.

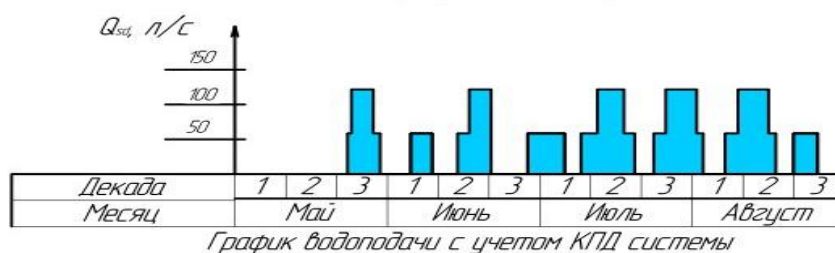
Условия окружающей среды играют важную роль в принятии решений по поливу. Такие факторы, как температура, влажность воздуха, ветер и солнечный свет, влияют на скорость испарения и транспирации воды растениями. Мониторинг этих условий помогает определить частоту и объем подачи воды, необходимые для компенсации потерь воды и поддержания достаточного уровня влажности почвы.

Тип почвы, в которой выращиваются растения, также влияет на решение о поливе. Состав почвы обуславливает ее способность удерживать воду и обеспечивать дренаж [96, 85, 106]. Например, песчаные почвы быстро отводят воду, требуя более частого полива, а глинистые почвы сохраняют влагу в течение более длительного периода времени. Понимание водоудерживающей способности почвы имеет решающее значение для определения интервалов полива [6, 13, 18].

Некоторые проектные решения графиков поливов показаны на рисунке 1.1.



*a*



*б*

Рисунок 1.1 – Графики поливов: *a* – поочередный полив; *б* – полив одной очереди

Согласно графику поочередного полива участков (см. рисунок 1.1, *a*), полив начинают в конце мая после всходов с подачей 260 л/с [79, 80, 96]. Однако влажность в почве может быть критической уже в первой декаде мая (значение влажности не показано или не известно в данном проектном решении). Следующий полив для первой очереди (зеленый прямоугольник рисунка 1.1, *a*) назначен через 10 дней, но реальная влажность почвы также не известна. В этот промежуток времени между поливами может пройти дождь или наблюдаться высокие солнечная активность и температура воздуха, что так или иначе изменит фактическое содержание влаги в почве. Вместе с некорректным периодом полива неправильно указана подача воды. Например, для второго полива 15 июня (красный прямоугольник рисунка 1.1, *a*) определена подача 260 л/с на участок, хотя фактическая влагообеспеченность почвы не известна и может быть необходима подача 350 л/с или меньше (100 л/с). Таким образом, проектные решения не корректно указывают режимы орошения без учета реальной влагообеспеченности и действующих факторов окружающей среды.

Один из современных способов контроля влажности по спутниковым снимкам позволяет косвенно определить увлажненность почвы. Однако данный способ зависит от оснащения фотофиксирующими устройствами, времени и цикла полета спутника. Необходимо также учитывать стоимость услуг операторов спутниковой связи. Использование спутниковой связи для контроля влажности почвы не приемлемо, так как нельзя обеспечить стабильность получения данных. Полученные со спутника данные могут служить как контрольные для анализа испарения и поглощения влаги (рисунок 1.2).

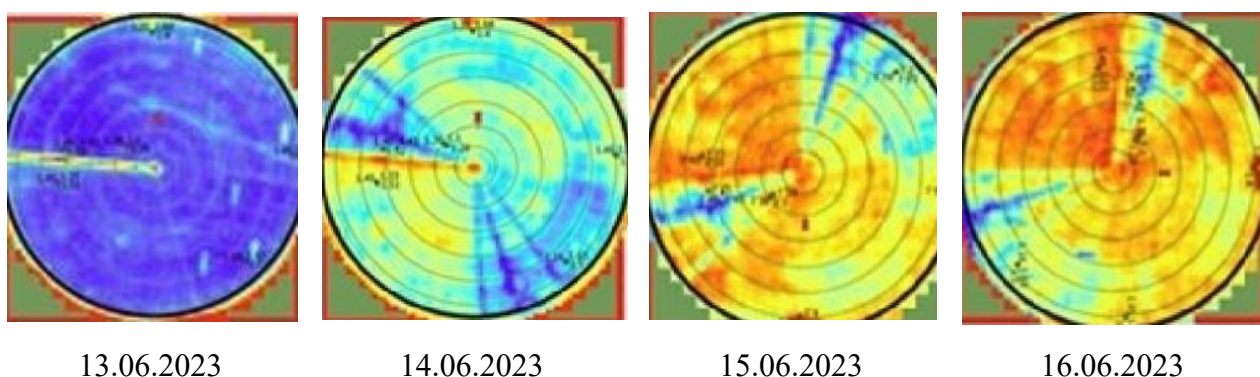


Рисунок 1.2 – Спутниковые снимки увлажненности почвы орошаемого участка

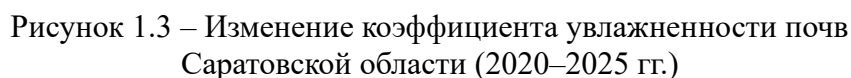
На полученных со спутника снимках (рисунок 1.2) видно, что 13.06.2023 после первого полива наблюдалось равномерное увлажнение всей площади поля. Имела место корреляция между рельефом местности (зоны, обозначенные светло-синим цветом) и распределением воды по полю, проявляющаяся в локальном стоке воды с возвышенных участков; 14.06.2023 – на второй день после полива – отмечено существенное изменение распределения влаги, обусловленное воздействием солнечной радиации, ветрового режима и микрорельефа местности, в результате которого произошел сток воды в низменности участка; 15.06.2023 – к третьему дню после орошения – значительно снизился уровень почвенной влаги с преобладанием сухих участков. Остаточная влажность почвы локализована преимущественно в отдельных зонах, что может быть обусловлено как наличием тени, так и неоднородностью рельефа; 16.06.2023 – на четвертый день после полива уровень почвенной влаги на поле приблизился к критическому значению наименьшей влагоемкости (НВ).

Данные со спутников необходимо проверять, калибровать с другими средствами измерения влажности, так как спутники дают оценку увлажненности с верхнего слоя почвы. Вместе с тем нарастающая зеленая масса в зрелом состоянии растений ограничивает действие фотофиксирующих устройств спутника при оценке влажности.

На принятие решения о назначении полива влияет стадия роста растений. Обычно на ранних стадиях развития (например, всходы) требуется более частый полив для формирования сильной корневой системы, а на стадии налива зерна потребность во влажности и частом поливе может резко уменьшиться. Регулирование частоты подачи и поливной нормы в зависимости от стадии развития растений обеспечивает высокую эффективность полива.

В ГОСТ Р 58331.3-2019 [43] по оросительным нормам для каждой области предложены значения годового объема воды для конкретной культуры. Некоторые значения оросительной нормы представлены в таблице 1.1.

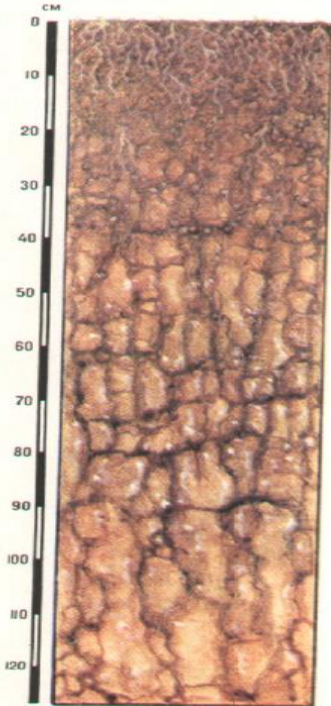
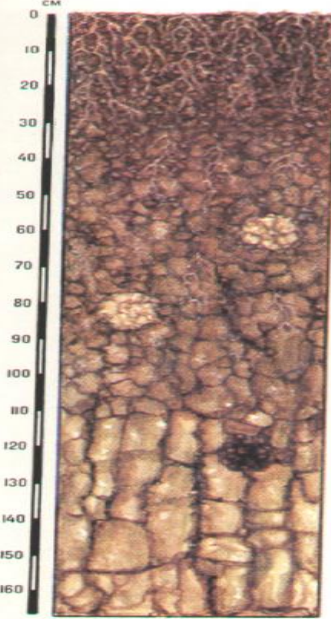
Данные, указанные в таблице 1.1, представлены укрупненно с учетом общих условий по области. Однако в современных научных изданиях [24, 54, 68] доказано, что почвы Саратовской области резко отличаются друг от друга на правом и на левом берегах Волги, и эти различия касаются как структуры почвы, так и коэффициента увлажненности. В работах [6, 54, 106] приводятся данные по изменению климата, в том числе и для Саратовской области (рисунок 1.3).



Согласно рисунку 1.3, происходят изменения коэффициента увлажнения, это, соответственно, изменяет оросительную норму, предложенную в 2019 г. ГОСТ Р 58331.3-2019.

При возделывании сельскохозяйственных культур применяют различные агротехнические мероприятия для повышения агро-гигроскопичности почвы, вносят удобрения. При этом структура и показатели почвы даже в пределах одного поля могут значительно различаться (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Основные показатели почв Саратовской области согласно [41, 64, 89]

| Показатель                              | Значение                                                                                           | Внешний вид                                                                           |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Левый берег р. Волги (каштановые почвы) |                                                                                                    |                                                                                       |
| Плотность                               | Высокая в нижних слоях (до 1,4–1,6 г/см <sup>3</sup> ), в гумусовом слое 1,0–1,2 г/см <sup>3</sup> |   |
| Влагоемкость и водопроницаемость        | Низкая водопроницаемость (особенно у солонцеватых); быстро пересыхают                              |                                                                                       |
| Мощность гумуса                         | Невысокая: 20–40 см; содержание гумуса 2,5–4,5 %                                                   |                                                                                       |
| Гранулометрический состав               | Чаще тяжелосуглинистый и глинистый, реже супесчаный.                                               |                                                                                       |
| Структура                               | Комковато-пылеватая или мелкозернистая; неустойчивая при увлажнении                                |                                                                                       |
| Теплоемкость                            | Относительно низкая; почвы быстро нагреваются и остывают («теплые» почвы)                          |                                                                                       |
| Пластичность (липкость)                 | Высокая липкость во влажном состоянии, при высыхании образуют твердую корку                        |                                                                                       |
| Кислотность (рН)                        | Слабощелочная (рН 7,0–8,0); часто присутствуют карбонаты                                           |                                                                                       |
| Правый берег р. Волги (чернозем)        |                                                                                                    |                                                                                       |
| Плотность                               | Оптимальная (рыхлая): 1,0–1,2 г/см <sup>3</sup> в пахотном горизонте                               |  |
| Влагоемкость и водопроницаемость        | Высокая влагоемкость; хорошая водопроницаемость за счет пористой структуры                         |                                                                                       |
| Мощность гумуса                         | Высокая: 60–100 см (в Заволжье 40–70 см); содержание гумуса 5–10 %                                 |                                                                                       |
| Гранулометрический состав               | Тяжелосуглинистый или среднесуглинистый                                                            |                                                                                       |
| Структура                               | Прочная зернисто-комковатая; высокая водоустойчивость агрегатов                                    |                                                                                       |
| Теплоемкость                            | Высокая; за счет темного цвета интенсивно поглощает солнечное тепло                                |                                                                                       |
| Пластичность (липкость)                 | Умеренная пластичность; легче поддается обработке в широком диапазоне влажности                    |                                                                                       |
| Кислотность (рН)                        | Нейтральная или близкая к нейтральной (рН 6,5–7,2)                                                 |                                                                                       |

Все агротехнические мероприятия улучшают условия роста растений, но насколько эффективно достигается результат обработки почвы, проверить сложно, а в некоторых случаях невозможно.

Способность почвы удерживать влагу зависит от грануметрического состава и физической плотности. При нарушении этих параметров способность удерживать влагу изменяется. На перемещении влаги в почве влияют множество факторов. Направление и скорость перемещения влаги внутри почвы определяет условия роста корневой системы полевых культур. Перемещение влаги зависит в основном от температурного поля [18, 95, 106]. В работах [6, 15, 24] приводятся результаты лабораторных исследований распределения влаги в почве в зависимости от температуры (рисунок 1.4).

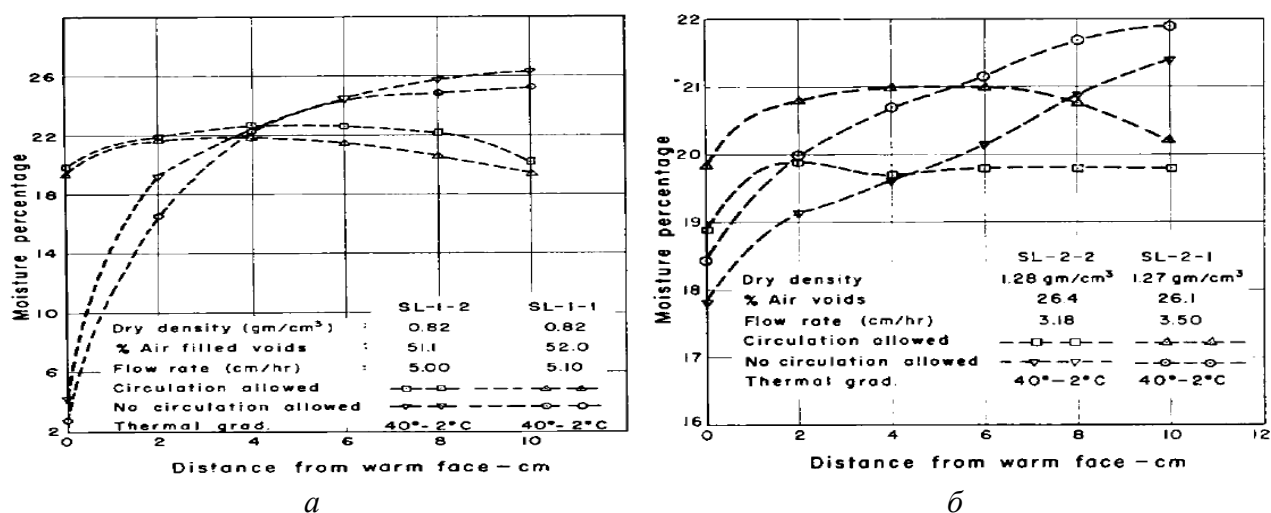


Рисунок 1.4 – Результаты лабораторных исследований перемещения (распределения) влаги: а – в обрабатываемых почвах; б – в необрабатываемых (авторы: R. L. Rollins, M. G. Spangler, D. Kirkham [120])

Как видно на рисунке 1.4, основной запас влаги для корневой системы растений распределен в слое от 10 до 30 см. Это та влага, которая не подвержена быстрому переносу под воздействием солнечной инсоляции и ветра. На поверхности поля (1–3 см) влага практически не удерживается и определяется влажностью и температурой воздуха. При этом на влагопроницаемость и влагоемкость влияют структура и влажность почвы.

Стремление к влаге развито у растений на генном уровне. Корневая система формируется случайным образом, но у каждого вида растений существуют отличительные особенности, некоторые из них показаны на рисунке 1.5.

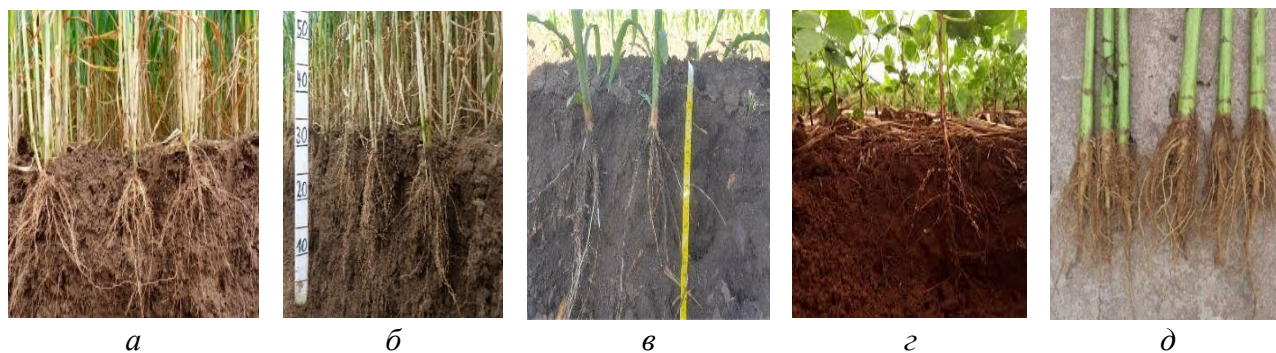


Рисунок 1.5 – Распределение корней по глубине почвы [81, 85, 90, 10]:

*а* – пшеница; *б* – рожь; *в* – кукуруза; *г* – соя; *д* – подсолнечник

Основная масса корневой системы пшеницы (см. рисунок 1.5, *а*) сконцентрирована в слое 7–12 см, ржи (см. рисунок 1.5, *б*) – в слое 8–14 см, кукурузы – в слое 45–55 см, сои – в слое 30–38 см, подсолнечника – в слое 15–21 см. Корневая система полевых культур развита так, чтобы располагаться в гумусном слое, где сконцентрирована устойчивая часть влаги в почве.

Таким образом, орошение полевых культур основано на оросительных нормах по ГОСТ и полевым нормам, предусмотренных проектами. Однако реальная влагообеспеченность на поле зависит от многих факторов и точно может быть оценена с помощью контроля влажности. На основе анализа норм орошения и изменения климата в Саратовской области для конкретных полей поливные нормы нужно корректировать на основе данных контроля влажности почвы, поскольку только в Саратовской области насчитывается 7–8 видов почв с разными гранулометрическим составом и мощностью.

Анализ корневой системы культур показывает, что контроль влажности следует осуществлять по всему фронту глубины расположения в почве, так как корни забирают влагу на разных слоях. Послойный контроль влажности позволит своевременно назначать полив и определять поливную норму таким образом, чтобы обеспечить требуемую влажность в конкретном слое корневой системы и не допустить переувлажнения.

Значение влажности в почве изменяется по слоям в зависимости от факторов, действующих на почву, ее физико-механических свойств и микроскопической структуры. Скорость изменения (уменьшения или увеличения) влажности зависит от плотности и наличия воздушных пустот, а

также от взаимодействия корневой системы растения с почвой. В данном представлении вопрос изменения влажности и выявления закономерностей этого изменения в конкретных почвогрунтах по слоям для принятия решения о поливе в нормативных документах и научных исследованиях как отечественных и зарубежных авторов остается не изучен.

## 1.2 Оценка существующих способов и технических средств автоматизации полива сельскохозяйственных культур

Орошение является одним из самых энерго- и водоёмких процессов. Согласно [27, 62], на долю сельского хозяйства приходится до 70 % мирового забора пресной воды, при этом потери при поливе достигают 60 % из-за несовершенства технологий и низкого уровня автоматизации. Эффективность использования водных ресурсов остаётся низкой. Автоматизация полива позволяет не только сократить расход воды и топливно-энергетических ресурсов до 50 %, но и повысить урожайность на 25–30 % за счёт своевременного и точного поддержания влажности почвы в корнеобитаемом слое. Поэтому необходимо оценить существующие способы и технические средства автоматизации полива.

Представим классификацию систем автоматизации полива, при этом отразим все существующие системы орошения на 2026 год (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Классификация систем автоматизации полива

| Признак классификации        | Типы систем                                                    | Примеры                                            |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| По способу орошения          | Дождевание, капельный, внутрипочвенный, поверхностный полив    | Дождевальные машины «Кубань-ЛК1», капельные ленты  |
| По степени автоматизации     | Ручные, полуавтоматические, автоматические, интеллектуальные   | Таймерные, с датчиками влажности, IoT-системы      |
| По типу управляющего сигнала | Временные, объёмные, комбинированные, адаптивные               | Полив по расписанию, по влажности, по ET-испарению |
| По наличию обратной связи    | Разомкнутые (без контроля результата), замкнутые (с контролем) | Без датчиков, с датчиками влажности                |
| По способу передачи данных   | Проводные, беспроводные (Wi-Fi, LoRa, ZigBee, GSM)             | RS-485, радиочастотные сети                        |

Наибольший интерес представляют замкнутые адаптивные системы с обратной связью по влажности почвы или метеопараметрам, поскольку они способны минимизировать вмешательство человека и обеспечивать полив точно в соответствии с потребностями растений.

Анализ способов контроля влажности почвы как основы автоматизации показывает, что наиболее адаптивные системы управления орошением оборудованы устройствами обратной связи.

Под системами автоматического управления поливом понимают совокупность устройств подачи воды в систему распределения, которая может быть выполнена в виде различных типов оросительных устройств: капельная система, поверхностный полив, внутripочвенный полив. В зависимости от этого система автоматического управления поливом имеет разную структуру. Рассмотрим автоматизацию полива поливных культур на примере управления дождевальными машинами и насосным агрегатом.

Как правило, в качестве обратной связи используют датчики влажности почвы. Сравнительный анализ датчиков влажности для систем автоматизации полива приведён в таблице 1.4

Таблица 1.4 – Характеристики датчиков влажности почвы для автоматизации орошения

| Параметр                           | Методы измерения влажности |            |           |                     |
|------------------------------------|----------------------------|------------|-----------|---------------------|
|                                    | резистивный                | тензиометр | ёмкостной | рефлектометрический |
| Диапазон измерений, %              | 0...50                     | —          | 0...100   | 0...100             |
| Погрешность, %                     | ±5...10                    | ±3...5     | ±2...30   | ±1...2              |
| Передача данных                    | +                          | —          | +         | +                   |
| Время отклика, с                   | 60...300                   | 120...300  | 1...5     | 0...1               |
| Зависимость от засоления           | высокая                    | низкая     | средняя   | низкая              |
| Долговечность, лет                 | 1...2                      | 2...5      | 5...10    | 5...10              |
| Цена (за единицу), тыс. руб.       | 2...5                      | 5...15     | 10...30   | 100...150           |
| Пригодность для дождевальных машин | низкая                     | средняя    | высокая   | высокая             |

Из таблицы 1.4 видно, что для автоматизации полива, в систему которой входят, например, насосный агрегат и электрифицированная дождевальная машина, наиболее рациональным является использование ёмкостных датчиков,

оптимальных по многим критериям: точность, возможность передачи данных, долговечность, время отклика.

Современные дождевальные машины, особенно электрифицированные кругового и фронтального действия, представляют собой сложные мехатронные комплексы, в которых управление осуществляется с помощью реле времени в повторно-кратковременном режиме электропривода.

Интенсивность дождевания на современных машинах регулируется двумя способами:

а) изменением рабочего давления насосной станции (поддерживается частотным преобразователем) [86, 96];

б) импульсным или пропорциональным управлением электромагнитными клапанами на каждой опоре [56, 70] – технология VRI (Variable Rate Irrigation).

Система VRI позволяет отключать отдельные секции и выводы дождеобразующих устройств при прохождении над уже достаточно увлажнёнными участками или над препятствиями. Карта-задание для VRI может создаваться по нескольким вариантам: либо на основе данных дистанционного зондирования (спутниковые снимки с расчетом коэффициента NDVI – Normalized Difference Vegetation Index – нормализованный относительный индекс растительности), либо на основе почвенных датчиков. Исследования показывают, что внедрение VRI снижает расход воды на 15–25 % и уменьшает вымывание удобрений [6, 62].

Дистанционное зондирование почвы на основе спутниковых снимков затруднено в связи с отсутствием постоянных данных, так как спутники перемещаются по орбите хаотично. Наиболее интенсивно развивающимся направлением является интеграция датчиков влажности в контур управления дождевальной машины. Анализ нормативно-технической документации и зарубежного опыта показывает, что современные системы орошения оснащаются датчиками влажности в целях обратной связи автоматизации полива. Однако все системы автоматического управления дождевальными машинами и насосными агрегатами с обратной связью не совершенны.

Рассмотрим основные решения автоматических режимов работы.

1. Система Valley 365 (компания Lindsay Corporation) позволяет подключать до 10 почвенных датчиков марки Watermarks модели TEROS через беспроводной интерфейс. Данные отображаются на веб-портале; оператор вручную или автоматически запускает полив при достижении нижнего порога.

2. FieldNET Advisor (компания Lindsay) использует сочетание данных почвенных датчиков, метеостанций и спутниковых изображений для рекомендации сроков и норм полива.

3. AgSense (компания Valmont) предоставляет возможность управления дождевальными машинами со смартфона, а также автоматического включения / выключения по показаниям датчиков метеостанций.

4. Field Connect (компания СтатусАгро) – система управления дождевальными машинами на основе данных датчиков влажности почвы Kaipos.

Все перечисленные системы обладают общим недостатком: они используют датчики влажности, установленные на фиксированной глубине (обычно 20–30 см). Это не позволяет получить информацию о послойном распределении влаги по профилю почвы. Для многих культур (зерновые, кукуруза, подсолнечник) корневая система проникает на глубину 80–100 см. Тогда полив необходимо вести с учётом влагозапасов всего корнеобитаемого слоя. Контроль только верхнего горизонта при назначении полива приводит к недоувлажнению либо к перерасходу ресурсов (водных и энергетических).

В Российской Федерации исследования в области автоматизации орошения ведутся в ФГБНУ «ВНИИГиМ им. А. Н. Костякова» (г. Энгельс), ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ (г. Краснодар), ФГБОУ ВО Вавиловский университет (г. Саратов). В Вавиловском университете разработана и апробирована система послойного контроля влажности почвы (патент РФ № 222477). Она включает в себя группу ёмкостных датчиков, размещаемых на разных горизонтах (10 см; 20; 30; 40 см) в одном вертикальном разрезе [76].

Однако в схемах автоматизации современных дождевальных машин обратную связь в виде датчика влажности почвы устроить сложно, так как управление дождевальной машиной зависит от других агротехнологических процессов (работы машинно-тракторных агрегатов на поле, фазы развития

растений, готовности насосной станции). Комплексная автоматизация возможна при проведении дополнительных исследований.

Рассмотрим некоторые схемы автоматизации современных отечественных и зарубежных производителей (рисунки 1.6 и 1.7).

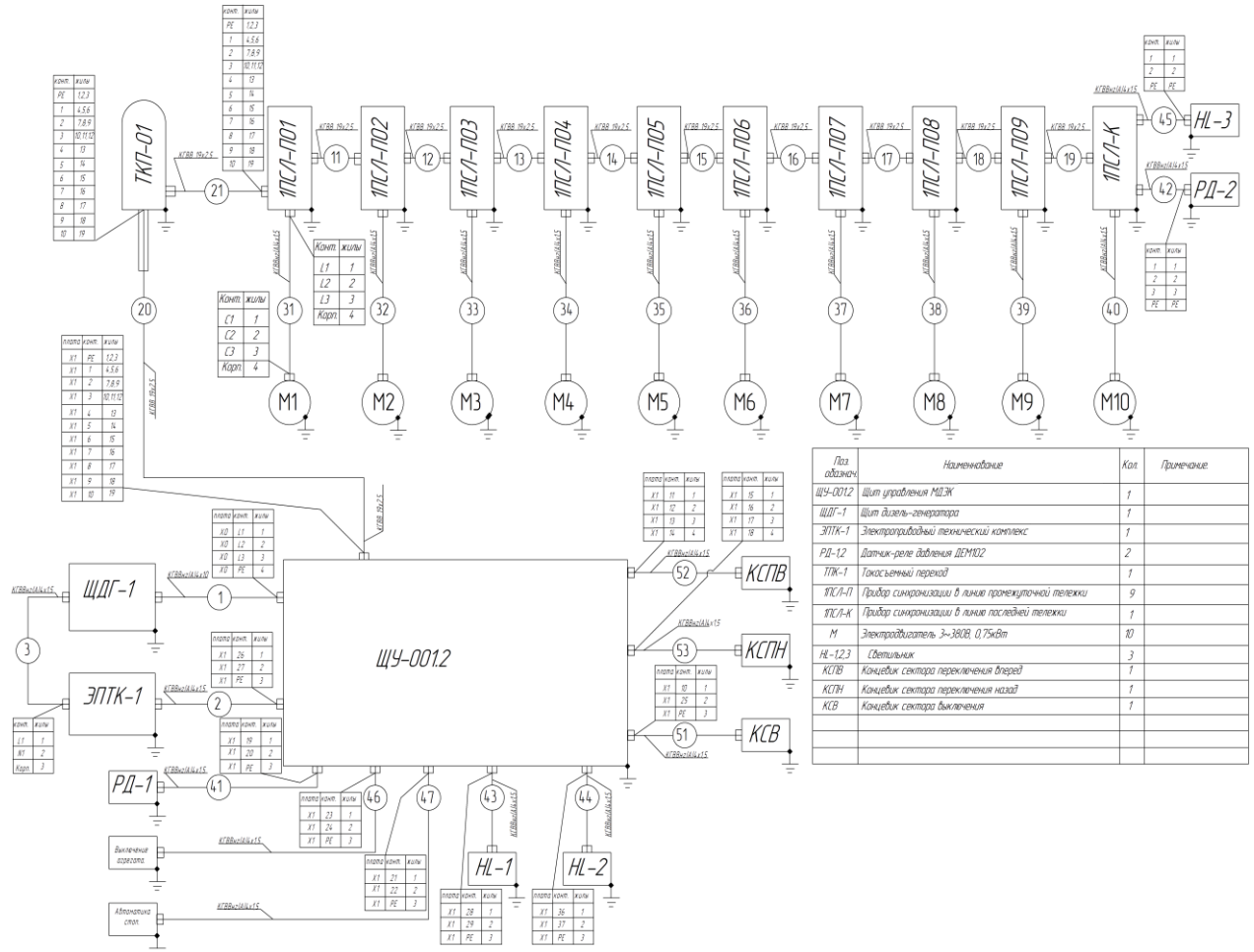


Рисунок 1.6 – Функциональная схема автоматизации пуска и управления движением кругового действия «Каскад-Мелиомаш»: ЩУ – щит управления; РД – регулятор давления; ЩДГ – щит дизель-генераторной установки; ЭПТК – электро (производственно-) технологический комплекс; КСПВ – концевик сектора переключения вперед; КСПН – концевик сектора переключения назад; КСВ – концевик сектора выключения; М1...М10 – электропривод опорных тележек; ПСЛ-П – прибор синхронизации в линию промежуточной опорной тележки; ПСЛ-К – прибор синхронизации в линию последней опорной тележки; ТКП – токоусъемный переход

На рисунке 1.6 основным элементом систем автоматического управления является регулятор давления, который предназначен для подачи команды на отключение цепей управления электроустановкой. Когда контакт РД размыкается, цепь рвется, питание с цепи управления пропадает. Также в ЩУ предусмотрен штатный главный выключатель ручного режима (так называемый «аварийный стоп»), который используется только в аварийных ситуациях.

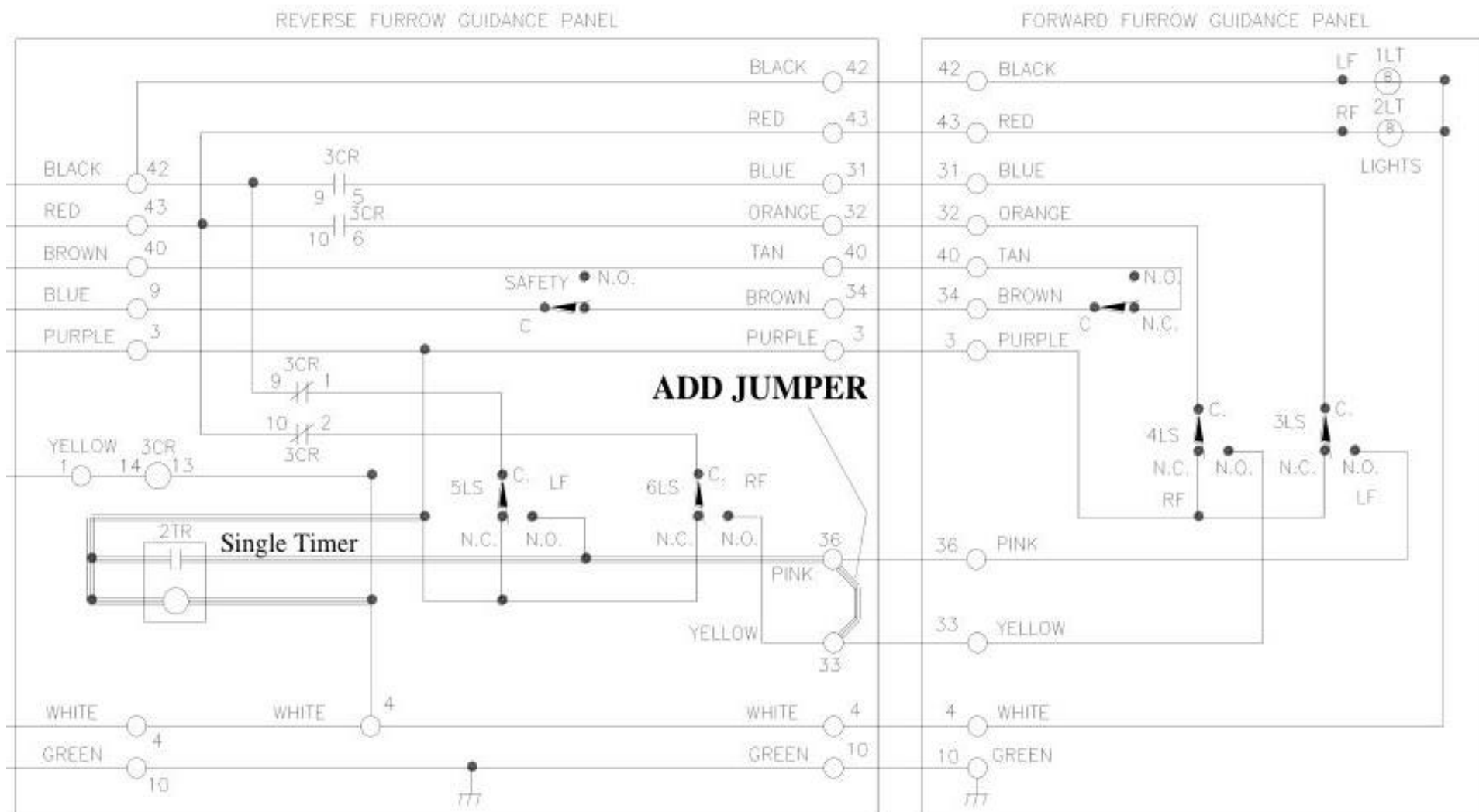


Рисунок 1.7 – Электрическая схема управления дождевальнй машиной фронтального действия Zimmatic на основе процентного таймера Single Timer (регулирует норму подачи воды путем управления общей скоростью движения машины)

Регулирование скорости в автоматическом режиме осуществляется процентным таймером «СКОРОСТЬ». Скорость задается в ручном режиме путём установки в ЩУ режима работы электродвигателя крайней опорной тележки (непрерывный или повторно-кратковременный) с продолжительностью включения (ПВ) в диапазоне от 10 до 100 %.

Схемы автоматического управления дождевальными машинами зарубежного производства схожи и основаны на повторно-кратковременном режиме работы электропривода.

Рассмотрим электрическую схему автоматизации дождевальной машины фронтального действия Zimmatic (см. рисунок 1.7).

Логика управления дождевальной машиной фронтального действия (см. рисунок 1.7) устроена по принципу «ИЛИ» и может быть выполнена путем использования как реле времени, так и микропроцессорного устройства.

Анализ существующих схем автоматического управления показывает, что режим работы дождевальной машины задается в ручном режиме, т. е. непосредственное воздействие на таймер оказывает человек, который оценивает множество технологических процессов. Такое положение связано с отсутствием единой научно обоснованной методики автоматического управления дождевальной машиной с обратной связью в виде датчиков влажности почвы, а именно от выбора количества и глубины установки датчиков влажности в зависимости от типа почвы, культуры и климатической зоны. Как показывает практика, параметры выбираются эмпирически или по рекомендациям производителя, что не гарантирует оптимального полива с наименьшими затратами ресурсов и электроэнергии при эксплуатации не только дождевальной машины, но и насосных агрегатов.

Алгоритмы управления дождевальными машинами при использовании датчиков влажности не применяются в схемах управления, а лишь используются как индикаторы ручного управления и чаще всего реализованы как пороговые (вкл. / выкл.) без учёта динамики процессов. Схемы сопряжения датчиков с контроллером дождевальной машины часто выполняются по аналоговым

интерфейсам (4–20 мА, 0–10 В), что ограничивает количество подключаемых датчиков из-за проблемы гальванической развязки и длины линий.

Анализ литературных источников и патентных материалов позволяет выделить некоторые тренды автоматизации полива:

- разработка схем автоматического управления, учитывающих потребность влаги в корнеобитаемом слое при послойном контроле влажности почвы и высокой точности измерения;
- разработка автономных датчиков с беспроводной передачей данных (LoRaWAN, NB-IoT, GSM и ГЛОНАСС);
- создание самообучающихся алгоритмов на основе нейронных сетей, которые адаптируют параметры полива под конкретное поле, используя историю измерений;
- интеграция данных с беспилотных авиационных систем (БПЛА), которые позволяют получать карты влажности и индекса вегетации с высоким пространственным разрешением;
- применение методов нечёткой логики для принятия решений о начале и окончании полива при неопределённости входных данных.

Таким образом, проведённая оценка существующих способов и технических средств автоматизации полива показывает, что наиболее эффективными являются системы, использующие ёмкостные датчики влажности в замкнутом контуре управления электрифицированной дождевальная машиной и насосным агрегатом, подключенному к ней. Однако реализованные на практике системы имеют ограничения, связанные с отсутствием послойного контроля, эмпирическим выбором параметров датчиков и примитивными алгоритмами управления. Это выделяет актуальность исследования, направленного на научно обоснованное определение параметров датчика послойного контроля влажности (количество горизонтов, глубина установки, пороговые значения, частота опроса, алгоритмы обработки и интеграцию в схему автоматизации полива как обратной связи), для повышения точности поддержания требуемой влажности почвы и снижения водопотребления при поливе электрифицированными дождевальными машинами.

### **1.3 Анализ современных способов и технических средств измерения влажности почвы**

В ГОСТ 28268-89 представлены основные требования к методам и средствам измерения влажности [41]. Данный нормативный документ регламентирует и структурирует принципы измерения влажности. Несмотря на современность данных ГОСТа, методы и средства измерения влажности почвы (ИВП) постоянно совершенствуются, способствуя повышению надежности работы, точности измерения, скорости получения данных и их информативности.

Для сельскохозяйственных производителей важно определять влажность по массе [13, 35, 46], которая рассчитывается как отношение массы влаги в ограниченном объеме грунта к массе сухого грунта этого же объема. Точную массу влаги определить можно термостатно-весовым способом [36, 68, 73] путем выпаривания воды из почвы. Влажность по объему определить легче, используя различные косвенные методы [53, 73, 83].

Рассмотрим основные методы и технические средства измерения влажности, предлагаемые производством.

Для обоснования параметров орошения обычно используют известные методы определения влажности почвы [5, 16, 25]: бесконтактные – излучением; контактные – емкостной метод и метод проводимости, а также методы максимальной гигроскопичности, устойчивого увядания растений с применением теории прогнозирования состояния.

Влажность почвы играет важную роль для корневой системы. Она регулирует процессы первичного и вторичного метаболизма растений, определяя их рост и развитие [5, 26, 47]. Точный мониторинг уровня влажности почвы позволяет фермерам оптимизировать процесс орошения, сохранить водные ресурсы и в результате повысить урожайность культур.

В работах разных авторов встречается множество положений по нормам полива, периодичности полива и минеральному составу раствора [2, 6, 64]. Например, для кукурузы требуется непрерывный мониторинг влажности, так как от этого зависит протекание всех необходимых процессов развития (рисунок 1.8).

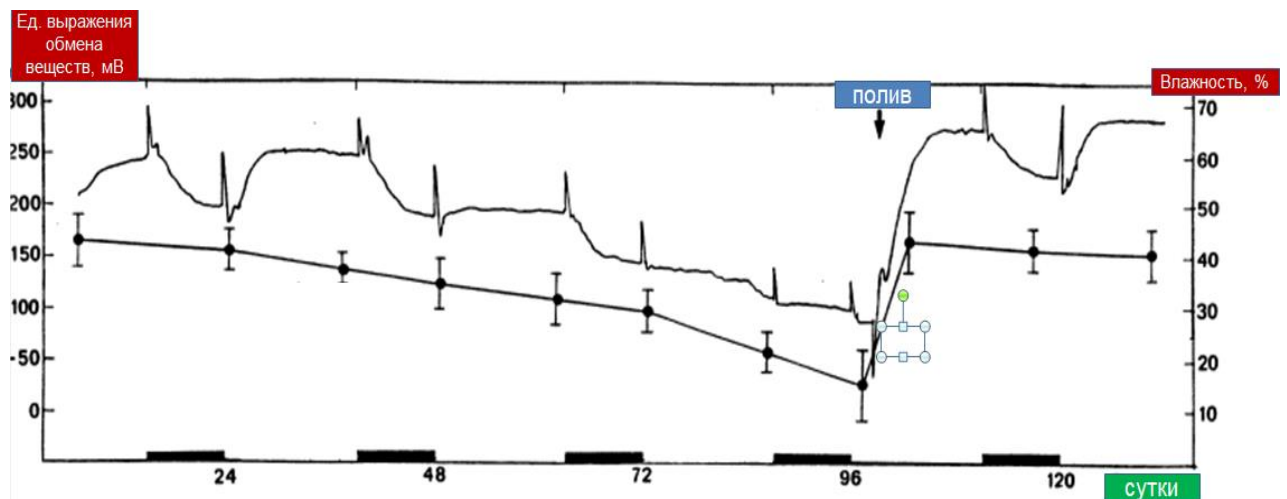


Рисунок 1.8 – Зависимость активности обмена веществ растений кукурузы от влажности почвы в течение нескольких суток (автор Jorg Fromm, Houman Fei, Канада [113])

Анализ различных источников показывает, что при возделывании полевых культур требуется непрерывный контроль влажности почвы для исключения стрессовых состояний.

Сельхозтоваропроизводители используют различные датчики влажности почвы. Они бывают разных типов, каждый из которых имеет свои преимущества и области применения. Оценим достоинства и недостатки данных средств измерений.

Методы измерения влажности очень разнообразны и имеют индивидуальные алгоритмы исключения погрешностей [6, 19, 20]. Самым достоверным методом измерения является термостатно-весовой, так называемый неэлектрический метод измерения [11, 31, 44]. Он состоит в использовании специализированного прибора, который позволяет измерить содержание влаги в почве путем взвешивания почвенного образца. Метод основан на оценке изменения массы образца почвы. Образец помещают в специальный прибор термостат, где поддерживается специально заданная температура. Образец периодически взвешивается. После того, как образец почвы высыхает, его опять взвешивают. Разница в массе до сушки и после нее позволяет определить содержание влаги в почве.

Однако у данного метода измерения есть главный недостаток – продолжительность измерения составляет от 12 до 36 часов, из которых 90 %

времени затрачивается на сушку отобранных образцов. За это время реальная влажность почвы в поле может несколько раз поменяться. Поэтому, как правило, этот метод контроля используют как эталонный или калибровочный.

Тензиометры измеряют натяжение воды в почве с помощью вакуумметра [18, 28, 31]. Эти устройства определяют силу натяжения или всасывания, необходимую для извлечения воды из почвы (рисунок 1.9). Они обеспечивают прямое измерение влажности почвы с точки зрения ее водного потенциала. Прибор реализует принцип капиллярного действия.

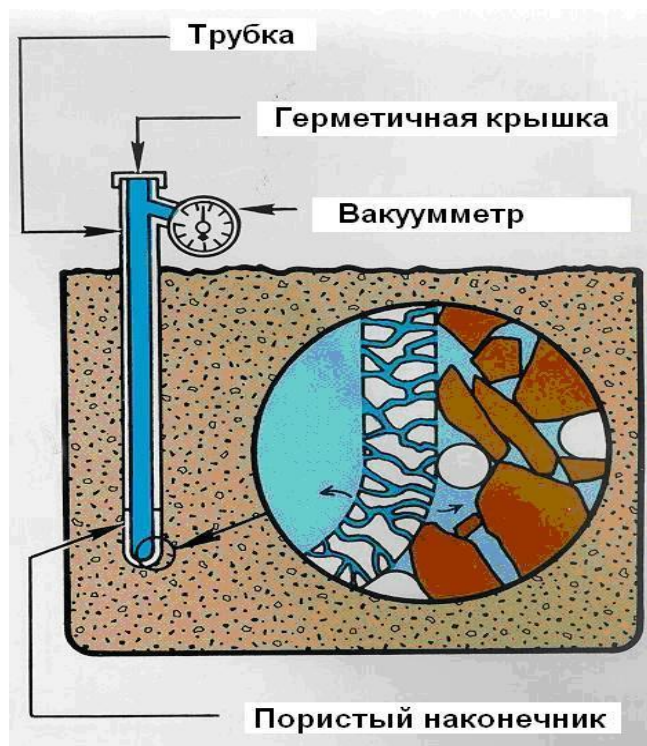


Рисунок 1.9 – Устройство современного тензиометра

Тензиометр представляет собой стеклянную трубку, или капилляр, с тонким отверстием, частично погруженный в жидкость. Последняя поднимается или опускается внутри капилляра из-за изменения баланса между поверхностным натяжением жидкости и давлением, оказываемым весом жидкости. Измеряя высоту жидкости в капилляре и применяя соответствующие математические уравнения, можно определить поверхностное натяжение жидкости.

Тензиометры точны, но требуют регулярного обслуживания, а именно проверки вакуума [6, 18, 37]. Внешний вид тензиометра показан на рисунке 1.10.



Рисунок 1.10 – Внешний вид тензиометра

Применение тензиометра ограничено тем, что это прибор непосредственного измерения, т. е. данные о влажности получают умозрительно со шкалы стрелочного манометра.

Оперативное измерение влажности в поле осуществляют с помощью электрических методов. Цепи электрических устройств смоделированы на основе измерения сопротивления, проводимости, емкости или мощности излучения.

Самые распространенные датчики – емкостные, так как они не вступают в прямой контакт с почвой, в отличие от принципа измерения проводимости [33, 51, 62]. Принцип действия емкостных датчиков основан на измерении диэлектрической проницаемости почвы, которая связана с содержанием в ней воды.

Емкостной датчик может работать как в частотной, так и во временной области. Он состоит из двух проводящих электродов, разделенных непроводящим материалом и образующих конденсатор. Содержание влаги влияет на диэлектрическую проницаемость почвы, что, в свою очередь, изменяет емкость датчика при помещении его в почву [45, 60, 98]. Измеряя это изменение емкости с помощью датчика, можно определить уровень влажности почвы (рисунок 1.11).

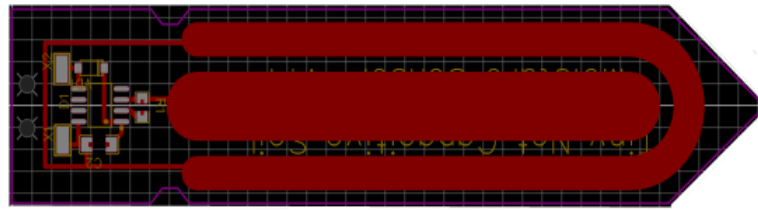


Рисунок 1.11 – Емкостной датчик влажности почвы

Электрическая схема платы распространенного емкостного датчика показана на рисунке 1.12.

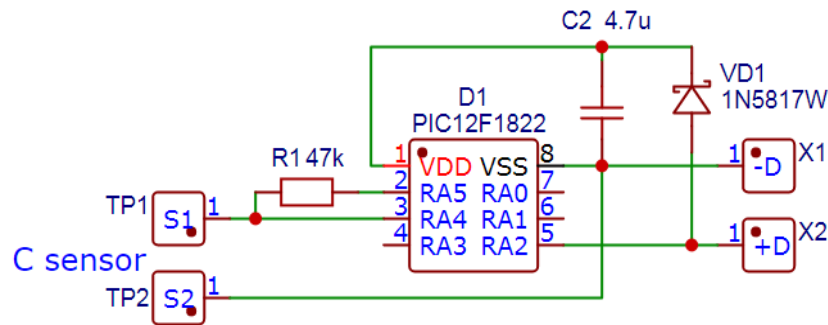


Рисунок 1.12 – Принципиальная схема электрическая схема емкостного датчика

Другие контактные методы измерения электрических величин (рисунок 1.13) подвержены деградации при взаимодействии с почвогрунтами, а применение способов борьбы с деградацией сенсоров увеличивает погрешность измерений. Однако это направление методов непосредственного измерения развивается: например, в настоящее время научились ряд погрешностей исключать путем программных решений.



Рисунок 1.13 – Формы различных контактных датчиков влажности: *а* – резистивный датчик влажности почвы YL-69; *б* – Delta-T ML3 ThetaKit (емкостной принцип измерения); *в* – Aquaterr M-350 (емкостной принцип измерения); *г* – KAIPOS 100STM (емкостной принцип измерения)

Особенность таких датчиков состоит в том, что сбор данных по влажности осуществляется непрерывно с возможностью передачи и хранения данных.

Рефлектометрия во временной области (TDR) [59, 65, 72] – метод измерения влажности почвы, основанный на принципе распространения волн. Он включает в себя отправку электромагнитного импульса по линии передачи (обычно это металлический зонд, вставленный в почву). Когда импульс проходит через почву, он сталкивается с изменениями диэлектрической проницаемости, вызванными изменениями содержания влаги. Импульс частично отражается обратно к прибору TDR (рисунок 1.14) на этих интерфейсах. Измеряется время, необходимое для возвращения отраженного импульса, и эта временная задержка пропорциональна расстоянию, пройденному импульсом. Анализируя временную задержку, прибор TDR может определить диэлектрическую проницаемость почвы, которая напрямую связана с ее влажностью. Это позволяет точно оценить уровень влажности почвы на разных глубинах профиля почвы.



Рисунок 1.14 – Внешний вид датчика рефлектометрии во временной области (TDR)

Однако данный прибор, как и тензиометр, осуществляет непосредственное измерение, т. е. для дистанционного мониторинга показаний влажности его использовать нельзя.

Датчики нейтронного зонда (рисунок 1.15) [11, 77, 92] измеряют влажность почвы, испуская в нее быстрые и медленные нейтроны и измеряя количество возвращающихся нейтронов. Эти устройства используют для специальных измерений влажности в различных средах. Датчик работает на основе принципа, согласно которому количество атомов водорода в почве прямо пропорционально содержанию влаги в ней. Зонд испускает в почву быстрые нейтроны, а атомы

водорода в почве замедляют эти нейтроны за счет столкновений. Измеряя количество замедленных нейтронов, зонд может определить влажность почвы. Обычно более влажная почва замедляет большее количество нейтронов, что указывает на более высокое содержание влаги.



Рисунок 1.15 – Внешний вид датчика нейтронного зонда

Устройство, измеряющее выпуск нейтронов, является прибором высокой точности, который используют для измерения влажности объектов в космосе, при проведении фундаментальных исследований и т. п., поэтому этот принцип измерения влажности можно использовать как контрольный, но не для постоянного контроля влажности почвы при выращивании сельскохозяйственных культур

Бесконтактные методы измерения инфракрасными (ИК), короткими (КВ) и сверхвысокочастотными (СВЧ) волнами отличаются от контактных высокой точностью и интерпретируют содержание молекул воды ( $H_2O$ ) в почвогрунтах без учета влияния солей и других минералов [19, 76, 93]. Особенность данного метода измерения состоит в том, что он показывает влажность поверхностного слоя или слоя, на который настроен прибор излучения (рисунок 1.16).



Рисунок 1.16 – СВЧ-влажномер – прибор MW1000

Микроволновой метод определения влажности почвы предполагает измерение диэлектрических свойств почвы. Передавая микроволны в почву и анализируя отраженные или проходящие волны, можно определить содержание влаги на основе соотношения между диэлектрической проницаемостью воды и влажностью почвы. Этот метод основан на том принципе, что влажность почвы влияет на способность микроволн проникать в почву и поглощаться или отражаться.

Также к бесконтактным методам определения влажности относятся приборы измерения индуктивности почвы, на основе которой устанавливают уровень влажности на всем слое действия прибора [33, 78, 91]. Однако такие приборы очень чувствительны к металлическим предметам, которые находятся в почве, и в целом показывают электропроводность почвогрунтов (рисунок 1.17).



Рисунок 1.17 – Измеритель электропроводности EM38-МК2 измеряет как квадратурно-фазовую (проводимость), так и синфазную (восприимчивость) составляющие влажности почвы с помощью двух катушек индуктивности

Спутниковые методы определения влажности почвы обычно включают в себя методы дистанционного зондирования. В этих методах используются спутники, оснащенные датчиками, которые могут измерять электромагнитное излучение, отраженное или излучаемое поверхностью Земли. Анализируя диаграммы направленности, можно оценить содержание влаги в почве. Для этой цели обычно используют различные спутниковые датчики, такие, как микроволновые радиометры или радары с синтезированной апертурой (SAR). Они измеряют микроволновое излучение, излучаемое почвой, на которое влияет ее влажность. Эти измерения затем используются для получения информации о влажности почвы в больших масштабах, предоставляя ценные данные для сельскохозяйственных, гидрологических и экологических приложений.

Инфракрасный метод определения влажности почвы предполагает использование инфракрасных датчиков для измерения количества инфракрасного излучения, отраженного или поглощенного почвой. Сухая почва отражает больше инфракрасного излучения, а влажная его больше поглощает. Сравнивая инфракрасное излучение, излучаемое или отражаемое почвой, с эталонным значением, можно оценить содержание влаги.

При возделывании полевых культур, у которых корневая система развивается так, что общая длина проникновения корней достигает 100 см, а основная часть корневой системы располагается на глубине 40–60 см, влажность необходимо измерять и контролировать по слоям. Послойный контроль влажности позволяет адекватно оценить дефицит влаги и определить динамические процессы перемещения влаги внутри почвогрунтов. Контактные методы измерения позволяют это реализовать путем использования сенсоров на разном расстоянии по длине штанги заглубления в грунт [1, 58, 82]. Обычно послойный контроль осуществляют путем заглубления датчиков по отдельности на разную глубину [24, 73, 93]. Однако при установке таких датчиков нарушается реальная плотность грунта [70, 97, 107], что приводит к грубым погрешностям измерения, так как в этих местах атмосферная или поливная влага проникает или испаряется намного быстрее, чем в реальном грунте.

Современные датчики влажности из-за высокой потребности в послойном контроле осуществляют измерение по слоям [2, 68, 116,]. Например, датчик NERO производства ООО «Кайпос» (Россия) имеет два сенсора, расположенных на расстоянии 100 мм друг от друга (рисунок 1.18).

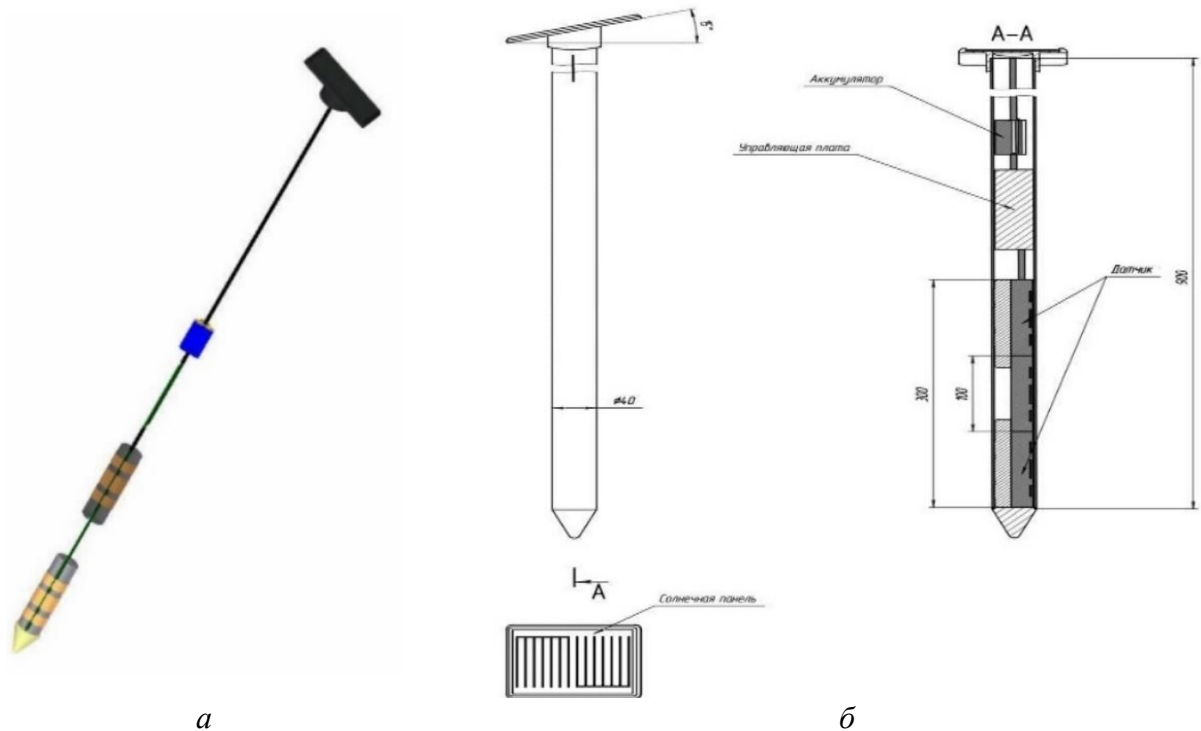


Рисунок 1.18 – Датчик влажности NERO (ООО «Кайпос» Россия):  
а – общий вид; б – схема

Другие изготовители (например, ООО «Статус Агро») специализируются на орошении и изготавливают также датчик послойного контроля, сенсоры которых устанавливают на расстоянии 15–20 см друг от друга.

Однако у данных датчиков есть ряд существенных недостатков. Принцип измерения влажности по слоям имеет высокую погрешность. Например, в слоях 30 см, 50, 70 см датчик конденсаторного типа, насыщаясь почвенной влагой, изменяет свое состояние с высокой задержкой по времени (рисунок 1.19) – от 7 до 30 дней при условии стабильности состояния влажности среды (рисунок 1.20).

На рисунке 1.19 видно, что на глубине 30 см не происходило изменения влажности, хотя с 2.06 по 18.06 выпадали осадки или осуществлялся полив. При этом контрольная проверка влажности термостатно-весовым методом показала другие результаты (рисунок 1.21).

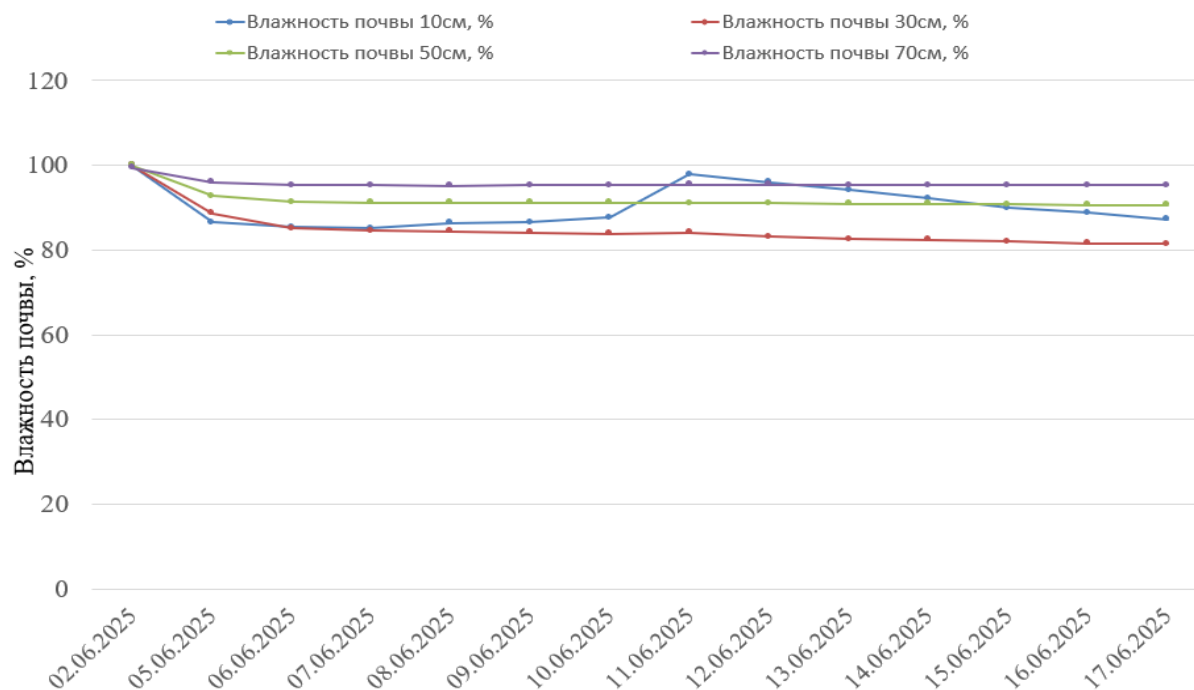


Рисунок 1.19 – Показания датчика послыйного контроля влажности (ООО «Статус Агро»)

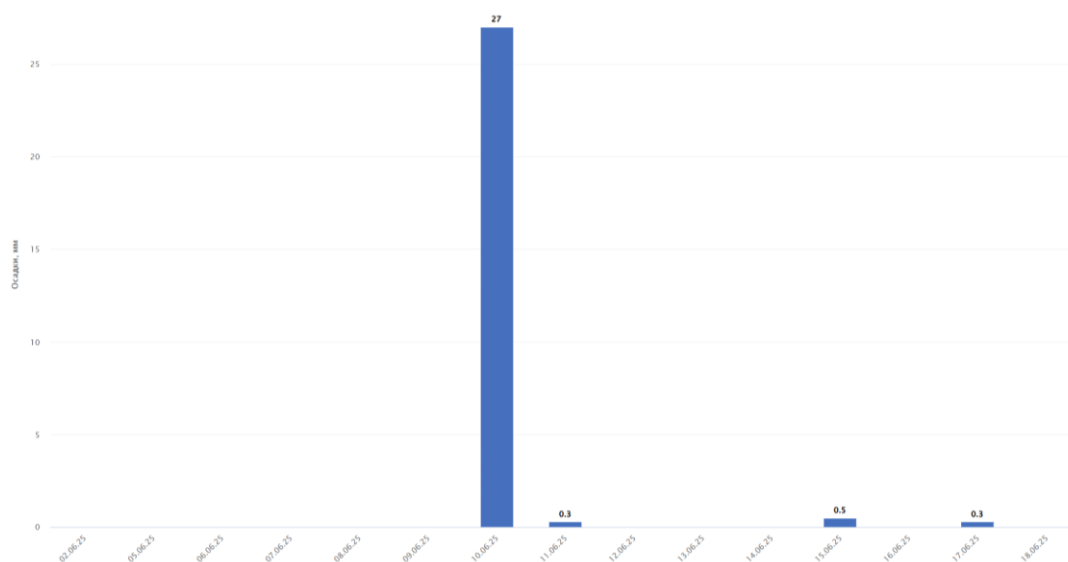


Рисунок 1.20 – Количество осадков за период измерения (ООО «Статус Агро»)

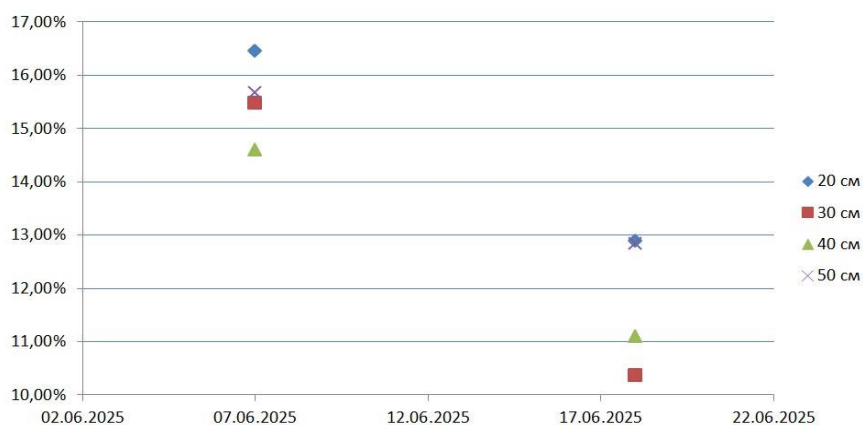


Рисунок 1.21 – Влажность, измеренная термостатно-весовым методом 7.06.25 и 18.06.2025

При сравнении результатов измерений видно, что данные существенно расходятся (см. рисунки 1.19 и 1.21). Несмотря на то, что датчик послойного контроля измеряет влажность по объему, а термостатно-весовым методом определяют влажность по массе, данные все равно различаются. Эти два физических параметра связывать нельзя, однако в динамике влажность по массе в слое 50 см должна была измениться. В более динамическом 30-сантиметровом слое этот показатель совсем не меняется (см. рисунок 1.19). Это связано с погрешностью способа измерения влажности, основанного на измерении диэлектрической проницаемости [26, 40, 48].

Рассмотрим первичный преобразователь, который измеряет влажность на глубине 30–70 см (рисунок 1.22).

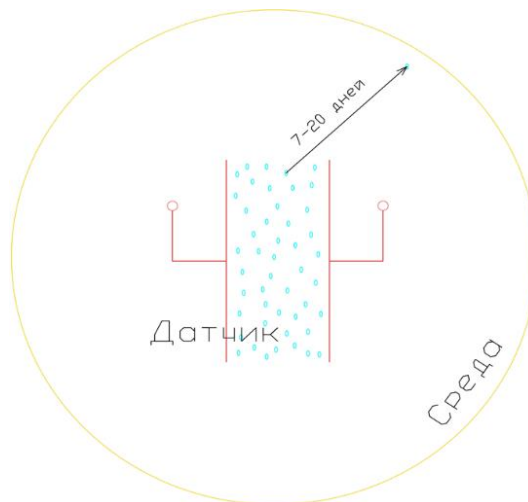


Рисунок 1.22 – Модель первичного преобразователя в виде электрического конденсатора

Влага насыщает диэлектрик между обкладками. Далее при высыхании почвы влажность среды изменяется и происходит выравнивание, равномерное распределение влаги внутри первичного преобразователя и среды вокруг датчика. Однако на глубине эти процессы происходят очень медленно, даже незаметно. На рисунке 1.19 видно, что на протяжении 20 дней влажность на глубине 30–70 см абсолютно не изменяется. Это подтверждает тот факт, что для послойного контроля требуется использовать другой принцип измерения, более чувствительный к изменению влажности, что требует проведения дополнительных исследований.

Датчики влажности почвы становятся незаменимыми помощниками в современном сельском хозяйстве. Они предоставляют фермерам точные данные

о влажности почвы, что позволяет принимать обоснованные решения о поливе и в результате способствует экономии водных ресурсов и повышению общей рентабельности производства сельскохозяйственной продукции. Однако современные средства измерения влажности обладают недостаточной точностью и высокой погрешностью измерения влажности по слоям почвы.

На основе проведенной оценки различных средств измерения влажности почвы можно сделать вывод о том, что при возделывании полевых культур лишь некоторые из них удовлетворяют требованиям сельхозтоваропроизводителей. Существующие системы послойного контроля характеризуются низкой точностью из-за несовершенного принципа измерения.

Нами была сформулирована таблица требований (таблица 1.5), удовлетворяющих сельхозтоваропроизводителей в плане принятия решения о назначении своевременного полива. При этом основные требования к средствам измерения, такие, как точность, надежность, чувствительность, быстроедействие, остаются в приоритете, но к ним дополнительно добавлены скорость получения данных, динамика изменения показателя, послойный контроль, автономность сбора данных, дистанционная передача данных, хранение данных, точная координата измерения на поле.

Таблица 1.5 – Требования к средствам измерения влажности

| Свойство                                             | Тензиометры | Датчики на основе измерения импеданса | Датчики измерения рефлектометрии | Датчики типа TDR | KAIP0S 100STM |
|------------------------------------------------------|-------------|---------------------------------------|----------------------------------|------------------|---------------|
| Обеспечение непрерывного контроля в полевых условиях | —           | +                                     | —                                | +                | +             |
| Погрешность не более 5 %                             | +           | +                                     | +                                | +                | —             |
| Возможность дистанционной передачи данных            | —           | +                                     | —                                | +/-              | +             |
| Репрезентативность данных                            | —           | —                                     | —                                | —                | +             |
| Возможность измерения влажности по слоям             | —           | —                                     | —                                | —                | +             |
| Длительность работы в автономном режиме              | —           | +/-                                   | —                                | +/-              | —             |
| Использование в полевых условиях                     | —           | +/-                                   | —                                | +/-              | +             |

Примечание: «+» – условие выполняется в любом исполнении датчика; «-» – условие не выполняется; «+/-» – условие выполняется при использовании дополнительных приспособлений

Требования, представленные в таблице 1.5, сформулированы на основе данных наблюдений при возделывании культур на орошаемых участках сельскохозяйственных предприятий Энгельсского, Калининского, Пугачевского районов Саратовской области [40, 55, 87].

На основе оценки данных средств измерения и необходимых свойств сформулированы требования к датчикам влажности с учетом условий для объективного принятия решения о поливе. В настоящий момент стоит задача разработки датчика послойного контроля, устанавливаемого без нарушения плотности грунта с обеспечением высокой чувствительности измерения влажности по слоям. Это возможно сделать путем обоснования формы сенсоров, параметров элементов электрических схем и в целом устройства датчика.

#### **1.4 Особенности измерения влажности емкостным способом**

Любое измерение сопровождается рядом характерных особенностей. Датчик влажности представляет собой устройство, которое, подвергаясь воздействию измеряемой физической величины (влажность почвы), выдает эквивалентный сигнал, обычно электрической природы (заряд, ток, напряжение или импеданс), являющийся функцией измеряемой величины:

$$s = f(m), \quad (1.1)$$

где  $s$  – электрический сигнал,  $m$  – значение физической величины, в нашем случае – влажность почвы.

Соотношение (1.1) выражает в общей теоретической форме физические законы, положенные в основу работы датчиков. Будучи выраженными численно, эти законы предопределяют выбор конструкции (геометрии и размеров) и материалов для их изготовления, допустимые характеристики окружающей среды, при которых датчики могут работать, и условия применения [4, 40, 94]. Для всех датчиков характеристика преобразования соотношение (1.1) в численной форме определяется экспериментально в результате градуировки, при проведении которой для ряда точно известных значений  $m$  измеряют соответствующие значения  $s$ , что позволяет построить градуировочную кривую.

Обычно датчик стараются сконструировать таким образом, чтобы существовала линейная зависимость между малыми приращениями выходного сигнала и входной физической величиной:

$$\Delta s = S \Delta m, \quad (1.2)$$

где  $S$  – чувствительность датчика.

Важно при разработке датчика обеспечить постоянство чувствительности, которая должна как можно меньше зависеть от значений влажности почвы, частоты ее изменения от времени и от воздействия других физических величин, например, влияния магнитного поля Земли [23, 56, 67].

Датчик с точки зрения вида сигнала на его выходе может быть активным – генератором, выдающим заряд, напряжение или ток, либо пассивным с выходным сопротивлением, индуктивностью или емкостью, изменяющимися соответственно входной величине. В нашем случае первичным преобразователем лучше принять электрический конденсатор с переменной диэлектрической проницаемостью, т. е. переменный пассивный элемент. Электрическая схема, непосредственно связанная с пассивным датчиком, формирует его сигнал.

Измерительная схема, к которой подключен датчик, преобразует изменение импеданса в электрический сигнал [21, 25, 88]. Электрические свойства почвы и состояние чувствительного элемента датчика также могут зависеть от различных физических величин, таких, как температура, давление, влажность и освещенность. Если контролировать все переменные, кроме одной, можно установить однозначную зависимость между измеряемой величиной и импедансом датчика. Эта зависимость описывается градуировочной кривой.

Вторичным преобразователем датчика влажности почвы, как правило, является электрическая измерительная схема. В различных научно-технических источниках [94, 100, 109] представлены различные схемы: потенциометрическая, мостовая, колебательный контур, операционный усилитель.

Выбор схемы формирования сигнала изменения влажности почвы зависит от метрологических характеристик измерительного комплекса [30, 38, 104] (погрешность, чувствительность, линейность и помехоустойчивость). В общем

виде на датчики (а именно, на первичный и вторичный преобразователи) влияют следующие традиционные факторы:

- температура, которая влияет на электрические свойства датчиков, а также на размеры их компонентов;
- атмосферное давление и другие механические воздействия;
- переменные или постоянные магнитные поля, которые способствуют образованию наводок в электрических схемах;
- диапазоны изменения амплитуд или частот напряжения питания источника и др.

Тогда зависимость электрического сигнала примет вид:

$$s = f(m, t, p, e, w, \dots), \quad (1.3)$$

где  $t$  – температура;  $p$  – атмосферное давление,  $e$  – напряженность электрического поля;  $w$  – напряженность магнитного поля.

При конструировании датчиков влажности сталкиваются с решением задач по снижению погрешностей. Как отмечалось ранее, реальная влажность почвы отличается от влажности почвы, в которую установлен датчик, так как при установке этого датчика была нарушена структура почвы, что привело к погрешности получения данных. В научно-технической литературе [3, 8, 22] описаны разные методы снижения погрешностей. Как правило, систематические погрешности возникают из-за неточностей в измерительной системе или неправильного ее использования. Например, использование неоткалиброванного оборудования или неподходящей методики измерения может привести к систематической погрешности. Если наиболее вероятные значения влажности почвы, полученные в разных сериях измерений (например, в лабораторных или полевых условиях), различаются, это может указывать на наличие систематической погрешности.

При измерении влажности модель изменения электрического сигнала при высыхании почвы или увлажнении приобретает характеристику погрешности на гистерезисе. Согласно [32, 41, 109], погрешность гистерезиса определяется как

половина максимальной разницы между выходными сигналами, получаемыми при одной и той же измеряемой величине, если она достигается в процессе возрастания или убывания входной величины.

Поддержание стабильной работы датчика, контролирующего влажность, связано с возможными наводками и влиянием магнитного поля Земли на диэлектрическую проницаемость измерительного конденсатора, а также с использованием дополнительных элементов измерительной электрической схемы: стабилизация напряжения питания; применение усилителей с малым дрейфом и АЦП с достаточным разрешением; надлежащее заземление экранов и установок; применение усилителей с высокой степенью подавления синфазных помех; применение фильтров. В нашем случае работоспособность существующих послойных средств измерения, изготовленных ООО «Кайпос» и ООО «Статус Агро» [40, 116], снижена из-за системной погрешности диэлектрической проницаемости на глубине, поэтому возникают требования к определению влажности по слоям, основанном на другом принципе.

Существуют методы дифференциальных измерений (например, применение пушпульных схем); устранение паразитных сетевых наводок путем применения преобразователей с подводкой сигнала по двухпроводной линии; извлечение сигнала из шумов, его селекция путем синхронного детектирования и использования корреляционных методов [75, 101, 105]. Статистическая обработка результатов позволяет определить наиболее вероятное значение измеренной величины и оценить пределы его погрешности. Если измерение одной и той же неизвестной величины повторяется  $n$  раз и дает результаты  $m_1, m_2, \dots, m_n$ , то, среднее значение  $\bar{m}$ :

$$\bar{m} = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{n}. \quad (1.4)$$

Разброс результатов характеризуется среднеквадратичным отклонением  $\sigma$ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{(m_1 - \bar{m})^2 + (m_2 - \bar{m})^2 + \dots + (m_n - \bar{m})^2}{n - 1}}. \quad (1.5)$$

Если случайные погрешности измерения влажности, сопровождающие различные серии измерений, взаимно независимы, то вероятность появления различных результатов обычно удовлетворительно описывается нормальным законом, называемым также законом Гаусса [57, 58, 108]. Вероятность соответствия полученного значения емкости (напряжения) на первичном преобразователе измеряемой влажности почвы в пределах от  $m_1$  до  $m_2$   $P(m_1, m_2)$  можно записать в виде:

$$P(m_1, m_2) = \int_{m_1}^{m_2} p(m) dm, \quad (1.6)$$

где  $P(m)$  – плотность вероятности для измеряемой величины  $m$ .

В случае соблюдения закона Гаусса:

$$p(m) = 1 / \sigma \sqrt{2\pi} \exp \left\{ -\frac{(m - \bar{m})^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (1.7)$$

наиболее вероятная величина  $m$  равна  $\bar{m}$ , а вероятность появления результатов измерения в указанных ниже пределах:

$$P(\bar{m} \pm \sigma) = 68,27 \%; \quad (1.8)$$

$$P(\bar{m} \pm 2\sigma) = 95,45 \%; \quad (1.9)$$

$$P(\bar{m} \pm 3\sigma) = 99,73 \%. \quad (1.10)$$

Среднеквадратичное отклонение является важнейшим показателем разброса измерений и часто рассматривается как погрешность воспроизведения, что позволяет воспроизвести количественную оценку. Значение измеряемой величины, полученное из серии измерений с малым среднеквадратическим отклонением, может оказаться достаточно далеко отстоящим от истинного значения, если на случайные погрешности накладываются существенные систематические погрешности.

Для достижения заданного уровня точности измерения влажности почвы как физической величины требуется:

- а) выбор надлежащего метода измерения, основанного на измерении диэлектрической проницаемости [52, 61, 103];
- б) выбор соответствующего первичного преобразователя [30, 45];
- в) разработка и реализация измерительной схемы – вторичного преобразователя [8, 23, 98].

Влажность может быть обусловлена составом минералов. Чем больше минеральных солевых соединений, тем больше влияние на диэлектрическую проницаемость первичного преобразователя. Если измеряемая величина зависит только от одного физического параметра, а датчик невосприимчив к другим влияющим величинам, градуировка упрощается. Градуировка датчиков влажности определяется простым способом. Она называется прямая и абсолютная, то есть грунт высушивается до нулевой влажности и значение электрического сигнала соответствует в этот момент нулю. Далее в соответствии с [40, 42, 83], задаваясь единицей влажности по массе или по объему, рассчитывают количество необходимой влаги, чтобы получить 100 % влажности почвы, и измеряют это значение электрического сигнала. Значение влажности больше 100 % не может быть, а значение электрического сигнала в первичном преобразователе может изменяться в ограниченных пределах в зависимости от геометрических параметров, например, конденсатора. Линейность шкалы от 0 до 100 % рассмотрим далее.

Датчики в условиях их применения характеризуются зависимостью чувствительностью от частоты. Эта характеристика определяет диапазон частот, внутри которого преобразование датчика оптимально и чаще всего не зависит от частоты; вне этого диапазона – полосы пропускания датчика – характеристики обычно ухудшаются тем сильнее, чем дальше отстоит частота от границ полосы пропускания. В таких условиях необходимо проводить двойную градуировку, определяя:

- а) частотную характеристику датчика, получаемую путем измерения выходного сигнала в зависимости от частоты измеряемой величины, амплитуда которой поддерживается постоянной;

б) зависимость выходного сигнала датчика от амплитуды измеряемой величины при фиксированной частоте, выбираемой внутри полосы пропускания.

Чувствительность  $S$  датчика в общем случае определяется для диапазона вблизи некоторого постоянного значения измеряемой величины  $m_i$  как отношение вариации сигнала  $\Delta s$  на выходе к изменению  $\Delta m$  измеряемой величины, которое вызвало эту вариацию сигнала:

$$S = \left. \frac{\Delta s}{\Delta m} \right|_{m=m_i}. \quad (1.11)$$

Единицы, в которых выражается  $S$ , зависят от принципа работы датчика и от природы измеряемой величины – мВ/%.

Согласно [65, 72, 92], чувствительность зависит от амплитуды или частоты напряжения питания, температуры окружающей среды, где находится датчик, или частоты изменений измеряемой величины. Для некоторых датчиков выходной сигнал пропорционален амплитуде напряжения питания  $E$ , что дает (в допустимых пределах):

$$S(E) = S_1 E \left. \frac{\Delta s}{\Delta m} \right|_{m=m_i}, \quad (1.12)$$

откуда

$$S_1 = \frac{1}{E} \left. \frac{\Delta s}{\Delta m} \right|_{m=m_i}, \quad (1.13)$$

$S_1$  – значение чувствительности на 1 В напряжения питания.

Частота изменений измеряемой величины является другим важным параметром, влияющим на чувствительность. В зависимости от частоты существуют два различных режима работы датчиков, с которыми связаны соответствующие параметры чувствительности [81, 100, 104]:

а) статический режим работы, при котором измеряемая величина постоянна или меняется очень медленно (постоянный поток излучения, постоянное ускорение);

б) динамический режим работы, при котором измеряемая величина меняется быстро (модулированный поток излучения, ускорение, связанное с вибрациями конструкции).

Измеряя влажность, в первую очередь следует обратить внимание на чувствительность диполей молекул воды к изменению частоты воздействующих колебаний. На разной частоте измерительной схемы можно получить абсолютно разные значения отклика электрического сигнала при одной и той же влажности. Частотные характеристики описываются дифференциальными уравнениями первого и второго порядка.

Рассмотрим уравнение первого порядка:

$$A \frac{ds}{dt} + Bs = m(t), \quad (1.14)$$

где  $A$  и  $B$  – постоянные.

Чувствительность датчика зависит также от частоты и выражается [4, 77, 107]:

$$S(f) = \frac{s_1}{m_1} = \frac{1}{B} \frac{1}{\sqrt{1 + (f / f_c)^2}}. \quad (1.15)$$

При  $f \rightarrow 0$  чувствительность в динамическом режиме стремится к значению статической чувствительности  $S(0) = 1/B$ . Следовательно, частотную характеристику можно записать в виде:

$$S(f) = S(0) \frac{1}{\sqrt{1 + (f / f_c)^2}}. \quad (1.16)$$

Дифференциальное уравнение, описывающее такую систему, имеет вид:

$$A \left( \frac{d^2 s}{dt^2} \right) + B \left( \frac{ds}{dt} \right) + Cs = m(t), \quad (1.17)$$

где  $A, B, C$  – константы.

Если измеряемая величина изменяется по синусоидальному закону

$$m(t) = m_1 \cos \omega t, \quad (1.18)$$

то чувствительность в установившемся режиме можно записать следующим образом:

$$s(t) = s_1 \cos(\omega t + \varphi). \quad (1.19)$$

Используя комплексные обозначения, после соответствующих преобразований:

$$m(t) \rightarrow m_1 e^{j\omega t}; \quad s(t) \rightarrow s_1 e^{j\varphi} e^{j\omega t}, \quad (1.20)$$

где  $m_1$  и  $s_1$  – действительные числа,

получим уравнение колебаний системы:

$$-A\omega^2 s_1 e^{j\varphi} + j\omega B s_1 e^{j\varphi} + C s_1 e^{j\varphi} m_1. \quad (1.21)$$

Подставляя  $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{C/A}$  и  $\vartheta = B / 2\sqrt{CA}$ , где  $f_0$  и  $\vartheta$  – собственная частота незатухающей системы и коэффициент затухания соответственно, имеем:

$$\varphi = -\operatorname{arctg} \left\{ \frac{2\vartheta}{\left(\frac{f_0}{f}\right) \left[1 - \left(\frac{f_0}{f}\right)^2\right]} \right\}. \quad (1.22)$$

Выражение для частной зависимости чувствительности в динамическом режиме принимает вид [11, 19, 65]:

$$S(f) = \frac{s_1}{m_1} = \frac{1}{C \sqrt{\left[1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right]^2 + 4\vartheta^2 \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}}, \quad (1.23)$$

или, подставляя чувствительность в статическом режиме при  $f = 0$ ,  $S(0) = 1/S$ , получим:

$$S(f) = S(0) / \sqrt{\left[1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right]^2 + 4\vartheta^2 \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}. \quad (1.24)$$

Для  $\vartheta < 1/\sqrt{2} = 0,707$  АХЧ имеет максимум на частоте  $f_m = f_0 \sqrt{1 - 2\vartheta^2}$ . Этот максимум выражен тем резче, чем меньше  $\vartheta$  в соответствии с формулой [72, 91, 110]:

$$S(f_m) = \frac{S(0)}{2\vartheta\sqrt{1-2\vartheta^2}}. \quad (1.25)$$

Для  $\vartheta \geq 1/\sqrt{2}$  АЧХ монотонно убывает, становясь наиболее ровной для  $\vartheta = 1/\sqrt{2}$ . В этом случае полоса пропускания равна  $f_0$ . Можно несколько расширить полосу пропускания, если допустить небольшой подъем кривой  $S(f)$ . Так, при  $\vartheta = 0,59$   $S(f_m) = 1,05S(0)$  и  $B = 1,16f_0$ .

В статическом режиме линейность определена наличием линейного участка на статической характеристике датчика. В динамическом режиме, при изменении измеряемой величины с частотой  $f$ , чувствительность изменяется в соответствии с определенными зависимостями:

- для системы первого порядка:

$$S(f) = \frac{S(0)}{\sqrt{1+(f/f_c)^2}}, \quad (1.26)$$

- для системы второго порядка:

$$S(f) = \frac{S(0)}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right]^2 + 4\vartheta^2 \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}}. \quad (1.27)$$

Таким образом, линейность зависимости влажности между обкладками конденсатора и электрического сигнала, например, напряжения на конденсаторе при измерительной схеме в виде колебательного контура, в динамическом режиме зависит от чувствительности статического режима  $S(0)$  и параметров частной характеристики ( $f_c$ ,  $f_0$  и  $\vartheta$ ), которые не зависят от значений измеряемой величины в диапазоне, где чувствительность  $S(0)$  постоянна.

Для определения градуировочной характеристики датчика по полученному некоторому числу пар точек ( $s_i$  и  $m_i$ ) график этой характеристики будет несколько отличаться от прямой линии из-за неточности измерений и (или) несовершенства конструкции датчика.

Распределение экспериментальных данных можно аппроксимировать уравнением прямой, что обычно делают методом наименьших квадратов [9, 29,

99]. Для такой прямой сумма квадратов отклонений  $\varepsilon_s$  экспериментальных точек минимальна. Установлено, что приближение к прямой вида

$$s = am + b \quad (1.28)$$

достигается при

$$a = \frac{N \sum s_i m_i - \sum s_i \sum m_i}{N \sum m_i^2 - (\sum m_i)^2}; \quad (1.29)$$

$$b = \frac{\sum s_i \sum m_i^2 - \sum s_i m_i \sum m_i}{N \sum m_i^2 - (\sum m_i)^2}, \quad (1.30)$$

где  $N$  – число градуировочных точек.

Опишем некоторые особенности измерительных схем (вторичных преобразователей) в виде колебательного контура, в схеме которого используются эталонный и измерительный конденсаторы. При этом влажность почвы определяется изменением электрического сигнала (напряжение, емкость, заряд и т. п.). Тогда согласно [77, 93, 100], в генераторных измерительных схемах частота синусоидальных колебаний генератора является определенной и при соответствующих условиях равняется резонансной частоте контура, состоящего из катушки с индуктивностью  $L_0$  и конденсатора емкостью  $C_0$ , соединенных последовательно или параллельно. На резонансной частоте  $F_0$  сопротивление контура оказывается чисто активным, и  $F_0$  определяется выражениями:

а) для последовательного колебательного контура:

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}}; \quad (1.31)$$

б) для параллельного колебательного контура:

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}} \sqrt{1 - 1/Q_L^2}, \quad (1.32)$$

где  $Q_L$  – добротность катушки,  $Q_L = L_0 \Omega_0 / R_s$ ;  $R_s$  – сопротивление катушки;  $\Omega_0 = 2\pi F_0$ .

Обычно  $Q_L^2 \gg 1$ , так что для обоих контуров:

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}}. \quad (1.33)$$

если емкостной датчик является элементом резонансного контура генератора, вариации его реактивного сопротивления вызывают соответствующие изменения частоты колебаний. В предположении, что амплитуда изменений его реактивного сопротивления невелика, для соответствующих изменений частот  $\Delta F$  справедливо соотношение:

$$\frac{\Delta F}{F_0} = -\frac{\Delta C}{2C_0}, \quad (1.34)$$

т. е.

$$F = F_0 \left( 1 - \frac{\Delta C}{2C_0} \right). \quad (1.35)$$

Если измеряемая величина изменяется относительно значения  $m_0$  по гармоническому закону с амплитудой колебаний, при которой характеристику преобразования датчика можно считать линейной, а чувствительность равной  $S$ , то  $m(t) = m_0 + m_1 \cos \omega t$ , а  $\Delta L = \Delta C = S m_1 \cos \omega t$ . Мгновенное значение частоты генератора при этом:

$$F(t) = F_0(1 - k m_1 \cos \omega t), \quad (1.36)$$

где  $k = S / 2L_0$  или  $k = S / 2C_0$  в зависимости от типа датчика.

Выходной сигнал измерительной системы имеет свой частотный спектр, определяемый как спектром измеряемой величины, так и характеристиками датчика и измерительной цепи.

Если генератор колебательного контура вторичного преобразователя является источником заряда  $q_c(m)$  с внутренним емкостным импедансом  $C_c$ , то вследствие малой выходной мощности источника к его выходу обычно подключают усилитель с большим входным сопротивлением (рисунок 1.23, а).

При этом необходимо учитывать паразитную емкость  $C_p$  и для таких датчиков лучше использовать усилитель (рисунок 1.23, б), напряжение на зажимах которого должно быть пропорционально заряду, а не емкости конденсатора, т. е. конкретной влажности почвы.

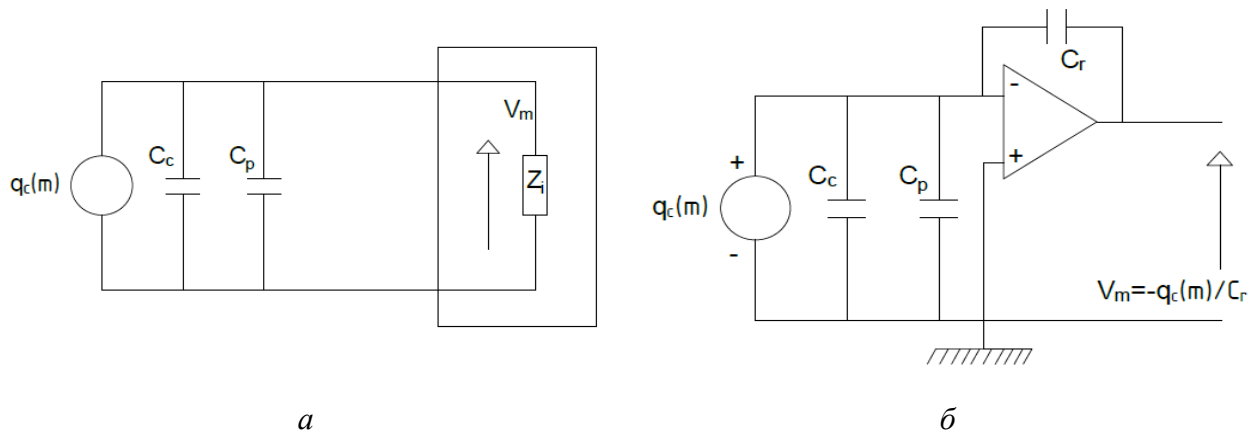


Рисунок 1.23 – Эквивалентные схемы согласования с измерительной цепью датчика, являющегося источником заряда: *а* – общая эквивалентная электрическая схема; *б* – схема с электрическим усилителем;  $V_m$  – напряжение на импедансе;  $C_r$  – емкость усилителя;  $Z_i$  – импеданс датчика

Таким образом, анализ нормативно-технической литературы и работ разных ученых позволяет установить основные принципы измерения влажности почвы, охарактеризовать устройство и принцип работы первичного и вторичного преобразователей, а также выявить основные закономерности и пути достижения высокой точности измерения влажности почвы. Существующие принципы измерения, общее устройство датчиков и разных измерительных систем позволяет выявить недостатки существующих датчиков послойного контроля влажности и смоделировать усовершенствованную измерительную систему влажности почвы с обоснованием первичного и вторичного преобразователей.

### 1.5 Постановка цели и задач исследования

Обобщая проведённый анализ, следует отметить ряд положений, способствующих формированию цели и задач исследований.

Принятие решений о поливе в системах автоматического управления насосами и дождевальными машинами должно проводиться на основе данных о реальной влагообеспеченности, т. е. с учетом обратной связи. Изменение влажности почвы происходит с разной скоростью и зависит от солнечной инсоляции, скорости и направления ветра, влажности и температуры воздуха, фазы развития растений и т. п. Как показывает исследование, вместе с внешними факторами на влагообеспеченность влияют тип почвы, её структура, гранулометрический состав, плотность и др. Пестрота, мощность и наличие примесей в почве вызывают дополнительные изменения влажосостояния в

конкретный момент времени на поле. Это подтверждает тот факт, что влажность почвы необходимо непрерывно контролировать.

Существующие ГОСТы определяют требования к измерителю влажности, в том числе и к измерителям влажности почвы. Отечественные заводы-изготовители предлагают различные типы датчиков влажности почвы. Зарубежные приборы также используются сельхозтоваропроизводителями.

Принципы действия приборов разнообразны. Наибольшее распространение получили приборы, реализующие электрический принцип измерения. Электрический сигнал легко можно преобразовать в приемлемый для понимания вид. Непрерывный контроль влажности почвы могут осуществлять не все датчики, а только имеющие автономный источник питания и устройство передачи данных. Однако несмотря на разнообразие принципов действия, сотни линеек и моделей датчиков влажности почвы сельхозтоваропроизводители применяют термостатно-весовой способ измерения влажности как контрольный. Это связано с тем, что при использовании этих приборов возникают погрешности от наводок, методов установки, скоротечной деградации сенсоров, несовершенства принципов измерения и т. п. Например, при установке датчиков в почву легко нарушить ее плотность, что приведёт к искаженным данным в момент установки от данных влажности ненарушенных почв.

Как правило, полив осуществляется для влаголюбивых культур, не устойчивых к засухам. Анализ показал, что для Саратовской области такими культурами являются кукуруза, соя, их корневая система развита на глубине 30–50 см от поверхности земли. В этом случае следует использовать датчики послойного контроля, чтобы определить, как влага доходит до корней после полива или дождя, какова удерживающая способность у грунта, а также как происходит распределение влаги по слоям.

Контроль влажности почвы по слоям позволяет моделировать перемещение влаги и в дальнейшем прогнозировать полив. На рынке предложены приборы, которые имеют несколько сенсоров по длине измерительной штанги, установленных на расстоянии друг от друга от 10 до 20 см. Заявлено, что эти приборы способны определять влажность по слоям. Однако, как показывает практика, условия измерения влажности на глубине

отличаются от условий измерения на поверхности. Экспериментально установлено, что датчики емкостного типа, измеряющие диэлектрическую проницаемость, насыщаясь влагой на глубине, имеют большую временную характеристику отклика при изменении влажности среды вокруг датчика. При сравнении измерений такого датчика типа NERO (производитель ООО «Кайпос») с термостатно-весовым способом были отмечены существенные различия (измерения проведены на левом берегу реки Волга на предприятии УНПО «Поволжье», на правом берегу – в УНПО «Мумовское» (рисунок 1.24).

Принцип измерения диэлектрической проницаемости и, соответственно, влажности является самым простым и экономически целесообразным для непрерывного контроля. На основе анализа научно-технической литературы установлено, что первичный преобразователь определяет уровень чувствительности к изменению физической величины (влажности почвы), а вторичный – системную погрешность измерения. Тогда для выполнения требований к условию установки датчика без нарушения плотности и обеспечению высокой чувствительности необходимо обосновать характеристику первичного преобразователя нового типа.

Таким образом, приведённый анализ показывает, что для своевременного полива требуется ввести непрерывный контроль влажности по слоям так, чтобы при установке датчика не нарушалась естественная плотность грунта, а принцип измерения влажности на основе получения электрических сигналов позволял бы исключить длительный отклик изменения влажности на глубине, точно передать данные о влажности почвы в корневой части растений в качестве обратной связи систем автоматического управления поливом, в которую входят насосный агрегат и дождевальная машина. Неточность настроек устройств измерения, контроля и управления (70–75 %) влияет не только на потери урожая, но и повышает непроизводительный расход воды и электроэнергии насосными установками. Наибольший положительный эффект достигается именно в системах автоматизации с обратной связью. Это требует разработки нового устройства

послойного контроля влажности почвы емкостного типа, используемого в качестве обратной связи в САУ оросительным комплексом.

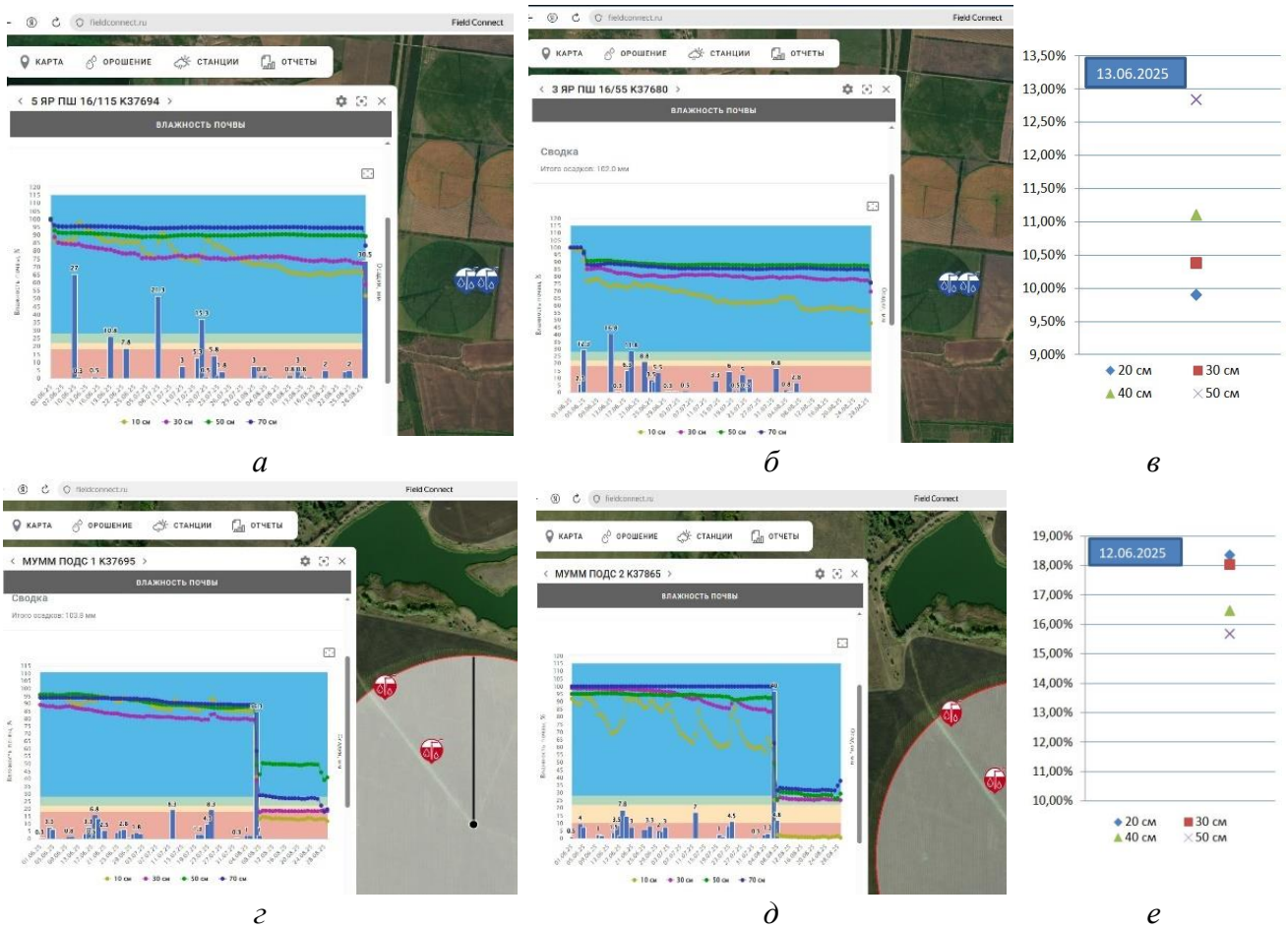


Рисунок 1.24 – Данные контроля влажности по слоям в программе Fild Connect «Статус Агро» и данные контрольных проверок влажности трмостатно-весовым способом:

- а – датчик № 1 в УНПО «Поволжье»; б – датчик № 2 в УНПО «Поволжье»;
- в – значения влажности, измеренные термостатно-весовым способом;
- г – датчик № 1 в УНПО «Мумовское»; д – датчик № 2 в УНПО «Мумовское»;
- е – значения влажности, измеренные термостатно-весовым способом

*Гипотеза:* измерительное устройство послойного контроля влажности, используемое в качестве обратной связи системы автоматического управления оросительным комплексом, позволит объективно оценить влажность почвы по слоям для культурных растений с разной корневой системой и снизить расход воды и электроэнергии на 5–15 %.

**Цель работы** – снижение расхода воды на полив сельскохозяйственных культур обоснованием автоматизированного устройства послойного контроля влажности почвы и управления электрооборудованием системы орошения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Проанализировать существующие технические средства контроля влажности почвы и автоматизации полива сельскохозяйственных культур.

2. Теоретически обосновать параметры схемы первичного и измерительного преобразователей устройства послойного контроля влажности почвы.

3. Разработать алгоритм работы устройства и схему его интеграции в систему автоматического управления электрооборудованием оросительного комплекса.

4. Провести экспериментальные исследования устройства и оценить технико-экономическую эффективность его применения.

**Объект исследования** – процесс автоматизированного управления поливом сельскохозяйственных культур с использованием средств послойного контроля влажности.

**Предмет исследования** – закономерности изменения параметров электрической цепи измерительного устройства и режимы работы электрооборудования оросительного комплекса.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ПОСЛОЙНОГО КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ

### 2.1 Обоснование объекта исследования

Поливной сезон в Саратовской области длится 3–4 месяца, как правило с середины мая по сентябрь. Контролировать влажность по слоям необходимо в течение всего сезона, т. е. датчик необходимо стационарно установить в поле на продолжительность всего поливного сезона.

Как отмечалось в первой главе, датчик контактирует с почвой с помощью первичного преобразователя, который выступает в качестве пассивного элемента, изменяя своё состояние в прямой зависимости от влажности почвы. При этом интенсивность изменения влажности также зависит от свойств почвы. Как известно, разные виды почв имеют отличную друг от друга наименьшую влагоёмкость [73, 79, 116]. Рассматривая почвенный разрез по слоям, можно отметить, что с глубиной изменяются как плотность, так и гранулометрический состав (рисунок 2.1), причём чем глубже, тем почва плотнее и менее богатая гумусными вставками (примесями).



Рисунок 2.1 – Почвенный разрез поля от поверхности до 100 см

По разрезу (см. рисунок 2.1) видно, что сенсоры датчика будут в почвах с разными свойствами. Это выдвигает требования к сенсорам послойного контроля при калибровке датчика и его условиям исследования. Например, при мощности гумусного слоя 25 см сенсоры на 10 и 20 см будут находиться в одной и той же по типу почве, но с разной плотностью, а сенсоры на 30 и 40 см – в слое

почв с более высокой плотностью. Если этот же откалиброванный датчик переставить в другое место на поле, где гумусный слой составит 50–70 см, то сенсоры нижних слоев также будут искажать данные и потребуется новая калибровка. Тогда следует предусмотреть универсальный способ измерения, основанный на последовательности или принципе измерения.

На основе приведённого анализа требований к контролю влажности почвы рассмотрим требования к процессу, точности и периодичности измерения, а также условия эксплуатации устройства:

- 1) исключение влияния датчика послойного контроля влажности на плотность почвы при его установке;
- 2) обеспечение контроля влажности в слоях 10 см; 20; 30; 40 см от поверхности почвы;
- 3) возможность фиксации данных влажности 1 раз в час для детального учета перемещения влаги в почвогрунтах;
- 4) обеспечение автономности энергоснабжения датчика в течение поливного сезона;
- 5) обработка и передача данных о влажности не реже 2 раз в день;
- 6) возможность интеграции данных датчика послойного контроля влажности почвы в систему автоматического управления дождевальными машинами и насосного агрегата;
- 7) опознаваемость датчика в поле при выполнении агротехнических мероприятий сельскохозяйственной техникой.

Для исключения воздействия на плотность почвы следует предусмотреть форму датчика в виде вертикальной штанги, на которой заподлицо расположены сенсоры, например, через каждые 100 мм. Штангу целесообразно выполнить цилиндрической стандартного диаметра, чтобы можно было использовать бур стандартного строительного диаметра длиной около 600–700 мм. Около пробуренного слоя нарушается плотность почвы, поэтому следует предусмотреть бур диаметром на один шаг меньше диаметра измерительной штанги.

Расположение сенсоров по измерительной штанге может быть разным в зависимости от расположения корневой системы растения. Предполагается разместить их на равном расстоянии так, чтобы в дальнейшем можно было оценивать, как перемещается влага внутри почвы с разным гранулометрическим составом. При разработке конструкции измерительной штанги необходимо предусмотреть возможность изменения расстояния между сенсорами. С точки зрения компоновки каналов сбора данных, трассировки измерительной схемы применим 4 сенсора.

Другие требования относительно фиксации данных, автономности энергоснабжения передачи данных связаны с вторичным преобразователем и его характеристиками. Один цикл включает в себя ежечасный сбор данных о влажности с каждого сенсора до момента отправки пакета данных. Примем, что пакет данных формируется два раза в сутки.

Тогда для передачи данных одного пакета требуется устройство, которое два раза в сутки включается и передаёт пакет данных на сервер по известным каналам, например, GSM-связи. На основе энергозатрат, сформированных в цикле, и количестве циклов определим запасную энергию аккумуляторной батареи  $W_{акб}$ :

$$W_{акб} = n_{ц}(12W_i + W_{пи}) + W_0, \quad (2.1)$$

где  $n_{ц}$  – количество циклов передачи пакетов данных о влажности в течение поливного сезона,  $n_{ц} \approx 240 \dots 260$ ;  $W_i$  – затраты электроэнергии на 1 сбор данных и сохранение, кВт·ч;  $W_0$  – наименьшее количество электроэнергии для обеспечения работы устройства.

Емкость электрического конденсатора изменяется при насыщении влагой диэлектрика между обкладками конденсатора. При этом доказано [68, 112], что электрический конденсатор имеет высокую чувствительность, а также большой разброс диапазона изменений емкости. Значение емкости формируется типом обкладок и геометрическими параметрами. Любой материал, из которых выполнены обкладки конденсатора – первичного преобразователя, имеет электрический потенциал относительно земли (таблица 2.1). Поэтому первичный

преобразователь при прямом контакте с грунтом будет иметь погрешность измерения.

Таблица 2.1 – Электрический потенциал материалов относительно земли

| Материал | Электрический потенциал, В | Примечание                                                                                                                   |
|----------|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Медь     | +0,337...+0,521            | Зависит от валентности ( $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^+$ ). Положительный потенциал указывает на низкую химическую активность   |
| Алюминий | –1,66                      | Активный металл; в реальности быстро покрывается оксидной пленкой, меняющей свойства поверхности                             |
| Железо   | –0,44                      | Отрицательный потенциал ( $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}$ ) способствует коррозии при контакте с более благородными металлами     |
| Серебро  | +0,79                      | Благородный металл, обладает высокой стойкостью к окислению                                                                  |
| Хром     | –0,74                      | Значение –0,85 В часто встречается для определенных условий, но стандартным для $\text{Cr}^{3+}/\text{Cr}$ считается –0,74 В |
| Платина  | +1,18                      | Ранее часто указывалось +0,96 В                                                                                              |
| Золото   | +1,69                      | Самый высокий положительный потенциал среди представленных (для $\text{Au}^+/\text{Au}$ ).                                   |

Для снижения скорости деградации первичного преобразователя примем медные обкладки с изоляцией от прямого контакта с грунтом. Представим в общем виде объект исследования (рисунок 2.2).

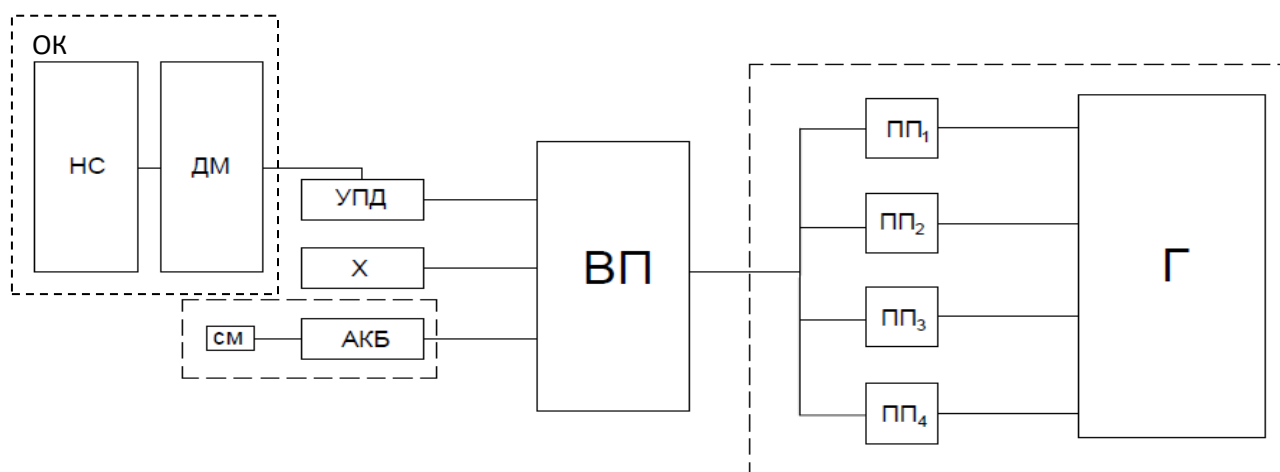


Рисунок 2.2 – Блок-схема объекта исследования: ОК – оросительный комплекс; НС – насосная станция; ДМ – дождевальная машина; УПД – устройство передачи данных; Х – устройство хранения данных; СМ – солнечный модуль; Э – энергоснабжение; АКБ – аккумуляторная батарея; ВП – вторичный преобразователь; ПП<sub>1...4</sub> – первичные преобразователи; Г – грунт (почва)

Первичный преобразователь (так называемый сенсор), выполненный в виде электрического конденсатора с медными обкладками, изолированными от почвогрунтов, плотно устанавливаются в грунт.

Примем форму датчика такой, чтобы четыре сенсора располагались на расстоянии 100 мм друг от друга (рисунок 2.3). В качестве первичного преобразователя используем электрический конденсатор. Один из преобразователей – сенсор, состоящий из двух пластин, расположенных на расстоянии 0,5 мм друг от друга (рисунок 2.4).

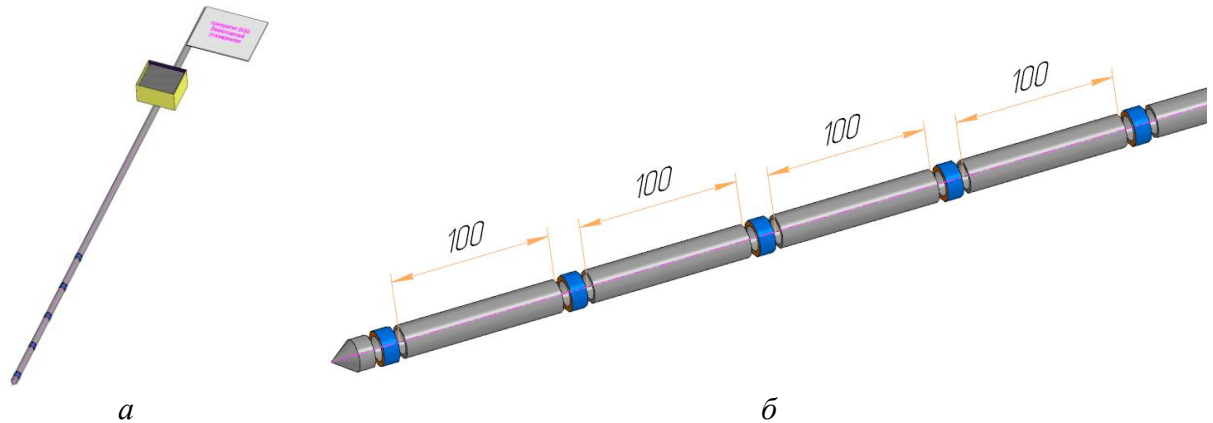


Рисунок 2.3 – 3D-модель датчика послойного контроля влажности:  
*а* – общий вид датчика; *б* – расположение сенсоров каждые 100 мм в части заглубления

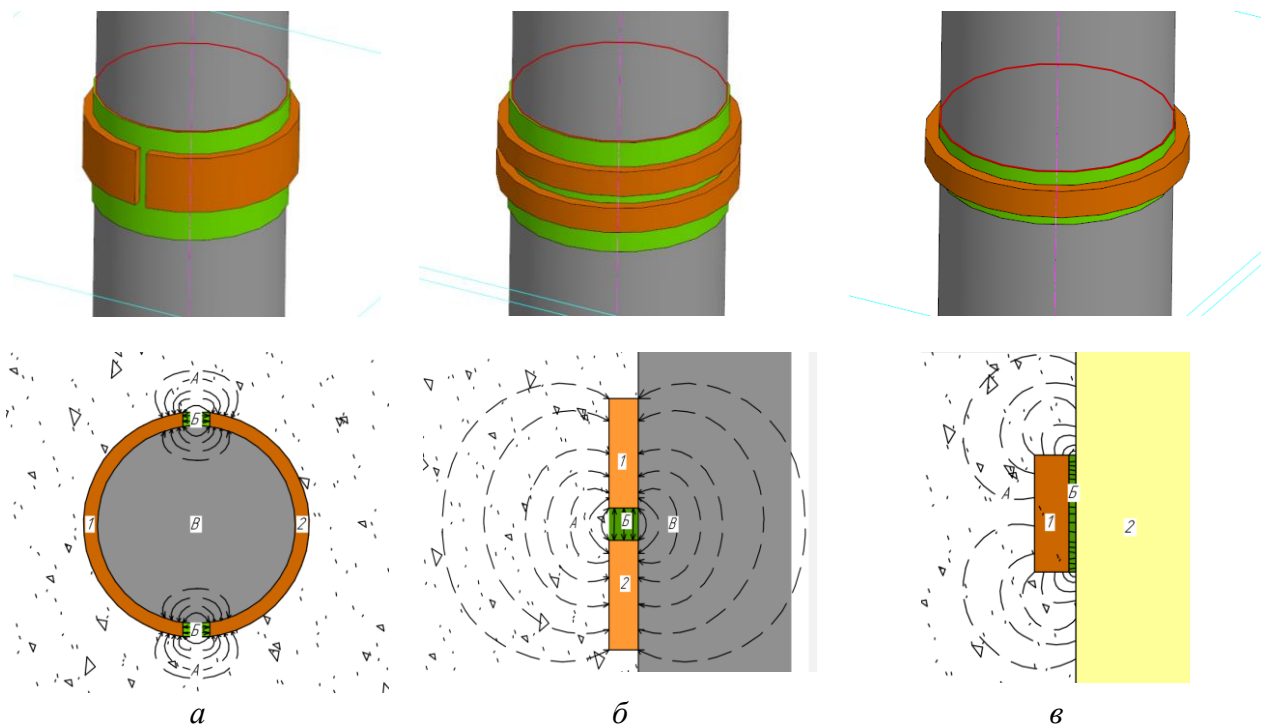


Рисунок 2.4 – Возможные формы первичных преобразователей-сенсоров, используемых как обкладки конденсаторов в цепи измерения емкости и вид взаимодействия обкладок:  
*а* – два изолированных полукольца; *б* – два изолированных кольца; *в* – одно кольцо и стойка;  
 1, 2 – обкладки конденсатора; А, Б и В – среды с различной диэлектрической проницаемостью соответственно почвы, диэлектрика между обкладками и стойки

Рассмотрим функцию емкости первичного преобразователя (ПП), которая зависит от следующих составляющих:

$$C = f(d, k, \varepsilon_r, \rho_p, m_{вл}), \quad (2.2)$$

где  $d$  – расстояние между обкладками, м;  $k$  – площадь взаимодействия обкладок, м<sup>2</sup>;  $\varepsilon_r$  – диэлектрическая проницаемость грунта;  $\rho_p$  – плотность грунта, кг/м<sup>3</sup>;  $m_{вл}$  – масса влаги около обкладок конденсатора, кг.

На емкость ПП влияет множество факторов, из которых сложно выделить долю влажности почвы (грунта). Согласно [16, 71, 86], более точным методом установления влажности почвы является определение комплексной диэлектрической проницаемости. Воспользуемся данным методом при обосновании формы сенсоров.

Вторичным преобразователем (ВП) является измерительная схема. Примем измерительную схему на основе цепи с генератором для моделирования колебательного контура с разной частотой колебаний. Известно, что емкость электрического конденсатора зависит от свойств диэлектрика. Моделирование в цепи колебательного контура с конденсатором, являющимся первичным преобразователем, в разных частотных диапазонах позволит определить свойства диэлектрика и установить уровень влажности почвы за счет изменения диэлектрической проницаемости ПП. Предложен 1 вторичный преобразователь на все сенсоры (см. рисунок 2.2). Следует отметить, что в логику работы ВП заложен корректирующий коэффициент для первичных преобразователей, расположенных в разных слоях грунта, т. к. на микроскопическом уровне действие термодинамических законов [25, 37, 101] существенно изменит значение диэлектрической проницаемости конденсатора, что также следует установить в ходе эксперимента.

Известно, что частота колебательного контура влияет на емкость конденсатора. Моделирование работы схемы на разных частотах выполнили с помощью генератора переменной частоты или использовали несколько генераторов, поочередно включая в цепь ПП<sub>1</sub>, затем ПП<sub>2</sub>, ПП<sub>3</sub>, ПП<sub>4</sub>. На цепь ВП–ПП влияют длина проводника, качество экранирования проводника.

Устройство вторичного преобразователя также подразумевает интегрирование других элементов датчика, а именно микроконтроллера для выполнения конкретных пошаговых действий и взаимодействия с другими элементами, устройства передачи данных, хранения данных, элементов электроснабжения. При разработке измерительной схемы была учтена интеграция всех элементов датчика.

## **2.2 Обоснование параметров первичного преобразователя устройства послыйного контроля влажности почвы**

В качестве первичного преобразователя примем электрический конденсатор. Чувствительным показателем при измерении влажности почвы является диэлектрическая проницаемость, которая имеет статическую и динамическую составляющие. Геометрические параметры конденсатора и свойства среды, в которой он установлен, определяют его заряд, емкость.

В научно-технической литературе [4, 33, 69] представлено многообразие методов и принципов измерения емкости. Формирование емкости конденсатора зависит от почвенных включений и характеристик поля, в котором распределение зарядов происходит на пространственные электроды, в том числе зондовые, в результате чего система выводится из равновесия в каждый момент времени. Поэтому измерить емкость конденсатора прибором высокой точности практически невозможно, только лишь в конкретный момент времени (так называемый квазистатический режим).

Задача по определению влажности почвы сводится к тому, чтобы при изменении емкости конденсатора выявить это изменение именно из-за влажности и исключить влияние других факторов. Диэлектрическая проницаемость состоит из действительной и мнимой составляющих [16, 60, 77]. Мнимая составляющая отражает изменение емкости в зависимости от влажности почвы.

На основе математического анализа существующих моделей различных авторов [7, 21, 25] мнимую составляющую диэлектрической проницаемости среды запишем следующим образом:

$$\frac{\omega \varepsilon''}{\varepsilon_0} = \frac{1}{\sqrt{R^2 - \frac{1}{\omega^2 C^2}}}, \quad (2.3)$$

где  $\varepsilon''$  – мнимая составляющая диэлектрической проницаемости среды;  $\omega$  – круговая частота изменения электрического поля, рад/с;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $R$  – активное сопротивление среды, Ом;  $C$  – электрическая емкость, Ф.

Преобразовав выражение (2.3) с учетом свойств среды, получим:

$$C = \frac{1}{\omega \sqrt{\frac{\rho_r^2 d^2}{k^2} - \frac{\omega^2 \varepsilon''^2}{\varepsilon_0^2}}} \quad (2.4)$$

где  $\rho_r$  – удельное сопротивление грунта, Ом·мм<sup>2</sup>/м.

Приняв за основу форму первичного преобразователя в виде круглых обкладок конденсатора (см. рисунок 2.4), ограничимся действием внешних факторов, существенно оказывающих влияние на значение емкости. Примем допущение, что общая диэлектрическая проницаемость зависит от ДП почвы (грунта, в котором находится ПП), ДП межобкладочного пространства и ДП измерительной штанги. При этом почва имеет разрозненную структуру характерных твердых тел и существенно влияет на значение ДП. Условно примем, что ДП для каждого вида почв лежит в диапазоне конкретных характерных для вида значений.

Первое слагаемое в знаменателе под корнем выражения (2.4) показывает количество влаги в почве при расчете емкости ПП. Однако при сопоставлении выражения (2.4) и характеристики взаимодействия обкладок между собой (см. рисунок 2.4) комплексная емкость зависит от нескольких диэлектрических проницаемостей сред. Опишем суммарную емкость выражением:

$$C = C_A + C_B + C_B, \quad (2.5)$$

где  $C_A$  – емкость, зависящая от диэлектрической проницаемости почвы (см. рисунок 2.4);  $C_B$  – емкость, зависящая от диэлектрической проницаемости диэлектрика между обкладками;  $C_B$  – ёмкость, зависящая от диэлектрической проницаемости стойки (при условии, что стойка выполнена из диэлектрика, рисунок 2.4, в).

Эквивалентная емкость выражения (2.5) представлена алгебраической суммой, однако следует рассмотреть геометрическую сумму для конкретной формы конденсатора. Модель эквивалентного конденсатора для формы ПП (см. рисунок 2.4, б) представлена на рисунке 2.5.

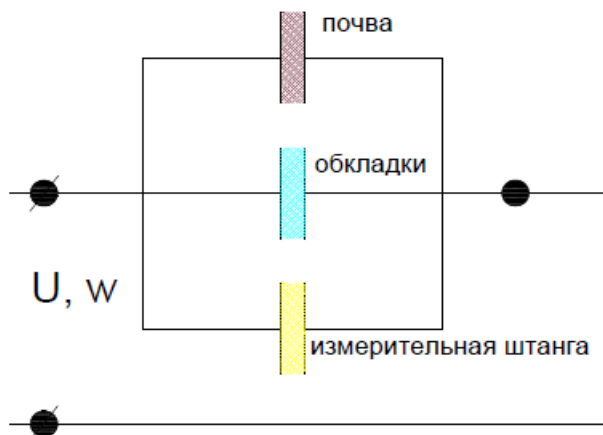


Рисунок 2.5 – Модель эквивалентного конденсатора, принятого в теоретическом исследовании

Первичный преобразователь, состоящий из двух обкладок в виде медных колец (см. рисунок 2.4, б), представляет собой электрический конденсатор, емкость которого зависит от многих факторов [81, 100, 104]. Основной заряд представленного ПП будет накоплен в диэлектрике между обкладками (Б – на рисунке 2.4, б). Вместе с этим кольца, закрепленные на измерительной штанге, имеют контакт с креплением, что создаст дополнительный внешний заряд между обкладками на измерительной штанге (В – на рисунке 2.4, б). При этом на измерительной штанге закреплены другие ПП, определяющие влажность в других слоях. Измерительная штанга соединена со стойкой, которая находится на поверхности земли около растений. Измерительная штанга и стойка подвержены влиянию электрического и магнитного поля внешней среды. Поэтому влияние изменения емкости ПП при взаимодействии с измерительной штангой следует обязательно учитывать. Для повышения точности измерения примем диэлектрики между обкладками и между измерительной штангой в виде диэлектриков с низкой способностью поглощать влагу (гигроскопичностью).

Обкладки конденсатора взаимодействуют с почвой (рисунок 2.6). При этом на величину емкости влияет плотность грунта [8, 23, 98]. Снизить это влияние

при измерении влажности можно путем уравнительной изоляции, которая также ограничит деградацию медных обкладок.

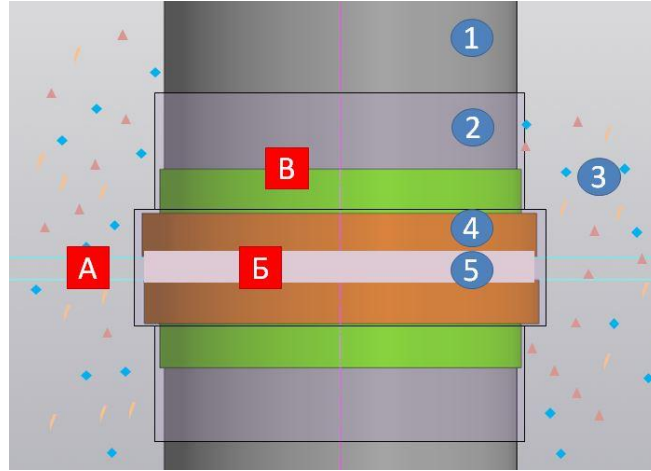


Рисунок 2.6 – Модель первичного преобразователя и основных влияющих на него факторов: 1 – измерительная штанга; 2 – изоляция обкладок от внешней среды (почвы); 3 – внешняя среда (почва); 4 – обкладка первичного преобразователя; 5 – диэлектрик между обкладками; А – взаимодействие обкладок с почвой; Б – взаимодействие обкладок между собой; В – взаимодействие обкладок между измерительной штангой

Изоляция обкладок 2 (см. рисунок 2.6) служит для снижения деградации медных колец и выполняет функцию исключения прямого влияния неоднородности грунта вокруг датчика. В данной модели первичного преобразователя будем считать взаимодействие обкладок с почвой в совокупности с изоляцией 2. Тогда при изменении влажности в почве на емкость ПП будет влиять суммарная проницаемость почвы и изоляции вокруг обкладок (взаимодействие А на рисунке 2.6).

Подставим в выражение (2.3) полученное выражение (2.4) с учетом особенностей сред взаимодействия. Мгновенную емкость в момент времени  $t$  определим по формуле:

$$c(t) = \int_{d_A=d_k}^{2l+d_k} \frac{1}{\omega \sqrt{\frac{\rho_A^2 d^2}{k_A^2} - \frac{\omega^2 \varepsilon_A'^2}{\varepsilon_0^2}}} dd_A + \frac{1}{\omega \sqrt{\frac{\rho_B^2 d_B^2}{k_B^2} - \frac{\omega^2 \varepsilon_B'^2}{\varepsilon_0^2}}} +$$

$$+ \int_{d_B=d_B}^{2\Gamma+d_B} \frac{1}{\omega \sqrt{\frac{\rho_B^2 d^2}{k_B^2} - \frac{\omega^2 \varepsilon_B'^2}{\varepsilon_0^2}}} dd_B, \quad (2.6)$$

где  $l$  – длина взаимодействующих обкладок в среде А, м;  $r$  – длина взаимодействующих обкладок в среде В, м.

Графическая зависимость емкости от частоты колебательного контура измерительной цепи имеет гиперболический характер (рисунок 2.7). Покажем теоретическую зависимость для разных форм ПП.

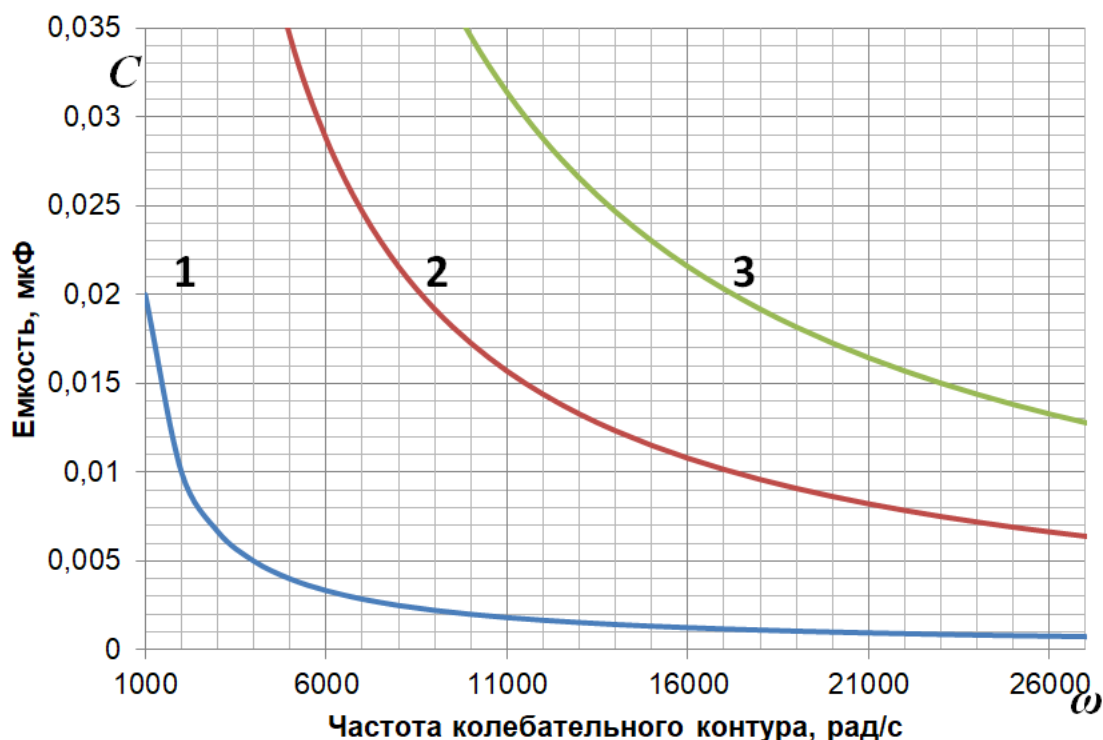


Рисунок 2.7 – Зависимость емкости первичного преобразователя разной формы (см. рисунок 2.4) от частоты колебательного  $RLC$ -контура при одинаковых условиях: насыщения влагой, удельном электрическом сопротивлении почвогрунта, расстояниями между обкладками: 1 – ПП 1 типа (рисунок 2.4, а); 2 – ПП 2 типа (рисунок 2.4, б); 3 – ПП 3 типа (рисунок 2.4, в)

На рисунке 2.7. видно, что при высокой частоте колебательного контура емкость ниже, чем при низкой. Данную зависимость используем для установления оптимальной частоты колебательного контура при измерении влажности. Однако исследования показывают, что электрическая емкость при измерении подвержена влиянию разного рода наводкам, действию электрических и магнитных полей, влиянию источников измерительной схемы и т. п. Даже небольшое воздействие на установленный диапазон емкости может привести к существенным ошибкам измерения. Поэтому при измерении влажности необходимо использовать другой интерпретирующий параметр, связанный с емкостью.

Определить изменение влажности на измерительном конденсаторе можно путем измерения напряжения на его зажимах [36, 41, 68, 76]. Преобразование напряжения на зажимах измерительного конденсатора в цифровой сигнал позволит более точно оценить значение влажности. Рассмотрим в дальнейших исследованиях взаимосвязь влажности почвы, емкости конденсатора и напряжения на его зажимах как совокупность параметров первичного преобразователя.

Ёмкостной метод измерения влажности широко известен и используется различными производителями. Однако в электрических принципиальных схемах важно определить постоянное пассивное значение емкости и диапазон активной емкости, которая зависит от формы обкладок, взаимодействующих с почвой.

По сравнению с методом измерения электропроводности, когда сенсоры находятся в прямом контакте с почвой и деградируют, ёмкостной метод измерения исключает деградацию сенсоров при условии изоляции обкладок (см. рисунок 2.6).

Зависимость емкости конденсатора от частоты и мнимой диэлектрической проницаемости  $\epsilon''$ , которая влияет на значение емкости при различной влажности почвы, изобразим на графике (рисунок 2.8).

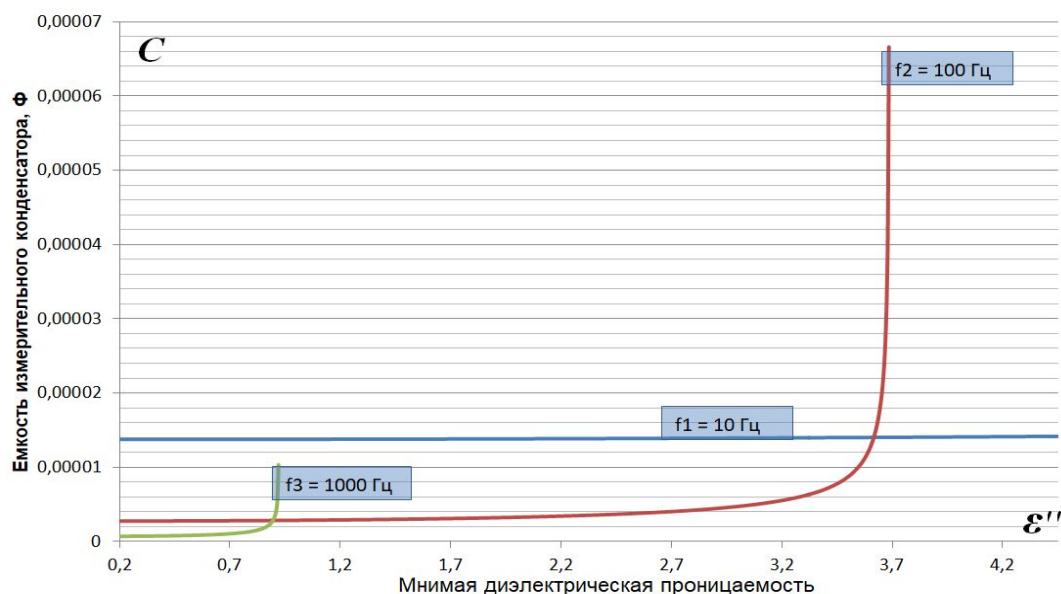


Рисунок 2.8 – Зависимость емкости измерительного преобразователя от мнимой диэлектрической проницаемости при разных частотах

На рисунке 2.8 показаны изменения емкости от диэлектрической проницаемости. При низкой частоте значение емкости изменяется в пределах 5 % относительно влажности почвы. Если же частоту колебательного контура увеличить в 10 раз, то значение емкости изменится в 3–5 раз относительно влажности (диэлектрической проницаемости). Анализ графика, построенного по формуле (2.4), позволяет сделать вывод о том, что определение емкости измерительного первичного преобразователя на разных частотах колебательного контура измерительной схемы с минимальным интервалом времени между измерениями позволит получить достаточный отклик по влажности почвы.

Напряжение на зажимах конденсатора определяется через накопленный заряд. При этом при параллельном соединении конденсаторов (см. рисунок 2.5) эквивалентный заряд рассчитывается как сумма накопленных зарядов всех конденсаторов в цепи:

$$U_{(t)} = \frac{\sum q_{(t)}}{C_{(t)}}, \quad (2.7)$$

где  $q_{(t)}$  – накопленный заряд в момент времени  $t$ .

Определим накопленный заряд между обкладками конденсатора:

$$\sum q_{(t)} = q_A^x + q_B + q_B^z, \quad (2.8)$$

где  $q_A^x$  – накопленный заряд в совокупности почвы и изоляции 2 (см. рисунок 2.6), Кл;  $q_B$  – накопленный заряд между обкладками в изоляции 5 (см. рисунок 2.6, Кл;  $q_B^z$  – накопленный заряд на измерительной штанге, Кл;  $x$  – степень изменения заряда при разной влажности почвы (устанавливается эмпирически);  $y$  – степень изменения заряда при действии на измерительную штангу внешних магнитных и электрических полей (изменяется хаотично, произвольно и требует проведения дополнительных исследований, не входящих в данную работу).

Заряд  $q_A$ , сформированной влажной или сухой почвой, будет изменяться в широком диапазоне, в отличие от полей Б и В (см. рисунок 2.6) между обкладками и измерительной штангой.

Условно примем что каждая молекула воды в почве формирует заряд в поле А (см. рисунок 2.6). Тогда запишем:

$$q_A^x = nq_{in}, \quad (2.9)$$

где  $n$  – количество действующих молекул воды в почве, формирующих заряд;  $q_{in}$  – заряд одной молекулы воды, Кл.

Физика процесса формирования заряда в почве обусловлена количеством молекул воды. Диполь молекулы воды сонаправлена с электрическим полем. При изменении направления поля [15, 40, 57] диполь стремится соответствовать направлению поля. При резком изменении направления поля молекула воды, находясь в химическом соединении статично (без перемещения), ориентируется (разворачивается) в соответствии с направлением поля с запозданием. Известно, что дипольный момент молекулы воды в 1,87 раза [36, 37, 93] выше момента других заряженных частиц. Тогда при резком изменении частоты колебательного контура молекулы воды не успевают ориентироваться в электрическом поле, тем самым изменяя суммарный заряд  $q_A^x$  в поле А (см. рисунок 2.6). Как следствие, это является откликом влажности в почве.

Примем допущение, что влажность почвы не влияет на диэлектрики между обкладками и измерительной штангой и, соответственно, на заряд  $q_B + q_V$ , а количество действующих молекул воды формируется при действии всех молекул  $N$ , отнесенных к частоте колебательного контура. Запишем:

$$n = f[N(\omega)], \quad (2.10)$$

где  $n$  – количество молекул воды;  $N$  – общее количество химически связанных молекул воды в почве.

С учетом принятых допущений преобразуем выражение (2.7) с учетом (2.8) и (2.9) и получим напряжение (разность потенциалов) на обкладках измерительного конденсатора с учетом действия зарядов в полях А, Б, В (см. рисунок 2.6):

$$U_{(t)} = \frac{q_A^x + q_B + q_B^z}{1} = \omega \sqrt{\frac{\rho_r^2 d^2}{k^2} - \frac{\omega^2 \varepsilon''^2}{\varepsilon_0^2}} (nq_{in} + q_B + q_B^z). \quad (2.11)$$

$$\omega \sqrt{\frac{\rho_r^2 d^2}{k^2} - \frac{\omega^2 \varepsilon''^2}{\varepsilon_0^2}}$$

С учетом допущений напряжение на зажимах первичного преобразователя:

$$U_{(t)} = 2\pi f \sqrt{\frac{\rho_r^2 d^2}{k^2} - \frac{(2\pi f)^2 \varepsilon''^2}{\varepsilon_0^2}} Q_{(t)}, \quad (2.12)$$

где  $Q_{(t)}$  – заряд, сформированный в момент измерения  $t$ , соответствующий конкретному значению влажности, Кл;  $\omega = 2\pi f$ .

Представим теоретическую зависимость выражения (2.11) в графическом виде (рисунок 2.9).

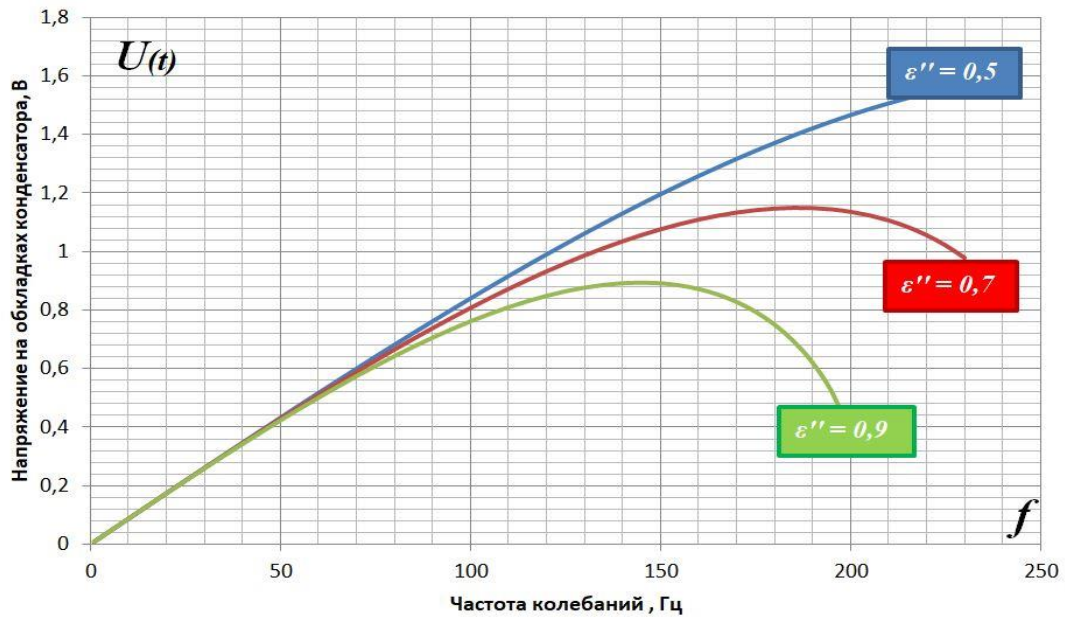


Рисунок 2.9 – Зависимость напряжения на зажимах конденсатора от частоты колебательного контура и мнимой диэлектрической проницаемости при условии: суммарный заряд  $(Q_A + Q_B + Q_V) + 1,2$  Кл; расстояние между обкладками  $d = 0,5$  мм; площадь обкладки конденсатора  $k = 43$  мм<sup>2</sup>, удельное сопротивление грунта  $\rho_r = 100$  Ом · м

Напряжение на зажимах измерительного конденсатора нелинейно зависит от частоты колебательного контура, а также мнимой диэлектрической проницаемости (красная линия на рисунке 2.9 –  $\varepsilon'' = 0,7$ ; зеленая –  $\varepsilon'' = 0,9$ ; синяя –  $\varepsilon'' = 0,5$ ). На различных частотах колебательного контура (от 150 до 200 Гц) напряжение резко изменяется в зависимости от мнимой диэлектрической проницаемости. Если влажность почвы низкая ( $\varepsilon'' = 0,5$ ), то напряжение на конденсаторе изменяется

незначительно. Если же влажность почвы высокая ( $\varepsilon'' = 0,9$ ), то на основе графической интерпретации теоретического исследования возникает экстремум функции напряжения с конкретным значением частоты колебательного контура.

Таким образом, первичный преобразователь в виде электрического конденсатора является наиболее чувствительным, его эквивалентная емкость сформирована действием полей между обкладками, почвой в совокупности с внешней изоляцией и измерительной штангой. Для первичного преобразователя, выполненного в виде двух колец, установлено, что емкость формируется тремя основными составляющими: влажностью и плотностью почвы в совокупности с внешней изоляцией обкладок, диэлектрической проницаемостью и гигроскопичностью материала между обкладками конденсатора и измерительной штанги. Увлажнение почвы изменяет емкость ПП за счет заряда, формируемого диполями молекул воды. Определено также, что частота колебательного контура влияет на суммарный электрический заряд, сформированный в поле А (почва с внешним диэлектриком) в связи с инертным свойством дипольного момента молекул воды. Молекулы воды не успевают расположиться в электрическом поле первичного преобразователя, тем самым изменяя заряд и напряжение на зажимах. Для дальнейшего исследования рассмотрим параметры измерительной схемы.

### 2.3 Обоснование параметров вторичного преобразователя

Измерительная схема вторичного преобразователя позволит установить значение электрического сигнала от первичного преобразователя, которое соответствует конкретному значению влажности почвы. Как отмечалось ранее, определение емкости электрического конденсатора сопровождается рядом сложных операций по использованию специальных средств и методов расчета. Например, для классического метода определения емкости конденсатора требуется таймер высокой точности или осциллограф, чтобы установить время разрядки конденсатора на известное активное сопротивление и затем определить емкость по выражению:

$$C = \frac{t}{R} \ln(2), \quad (2.13)$$

где  $t$  – продолжительность разрядки конденсатора,  $C$ .

Другие способы определения емкости также требуют специального оборудования. Примем метод косвенного определения емкости – метод двух вольтметров, простейшая схема которого представлена на рисунке 2.10.

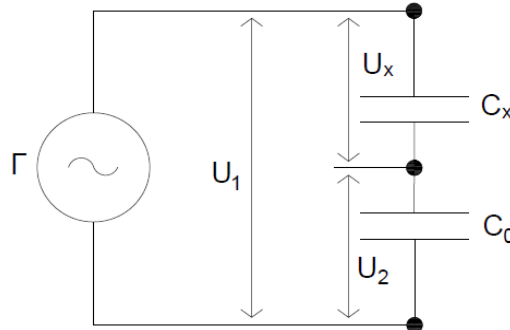
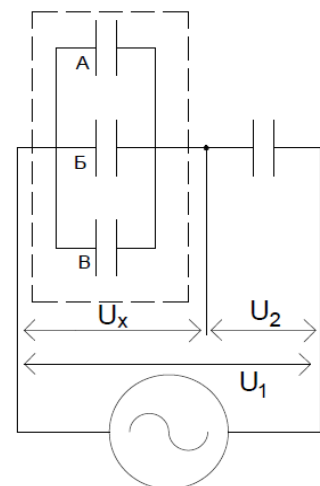


Рисунок 2.10 – Схема измерения емкости методом двух вольтметров

Данный метод описан в работах [4, 31, 46] и использует измерительную цепь с генератором синусоидального напряжения и двумя последовательно соединенными конденсаторами, один из которых  $C_0$  является эталонным с известным значением емкости, а второй  $C_x$  – сенсором (первичным преобразователем) влажности почвы.

Полная эквивалентная схема вторичного преобразователя приведена на рисунке 2.11.

Рисунок 2.11 – Полная эквивалентная схема вторичного преобразователя (А, Б, В – взаимодействие обкладок конденсатора соответственно с почвой, между собой и измерительной штангой)



Расчет емкости  $C_x$  (сенсора влажности почвы) проведем на основе равенства эквивалентного накопленного заряда:

$$q = q_x = q_0, \quad (2.14)$$

где  $q_x$  – заряд, накопленный на ПП, Кл;  $q_0$  – заряд, накопленный на эталонном конденсаторе, Кл.

Выразим (2.14) через значение вольтметров  $U_1$  и  $U_2$ :

$$U_1 C_{\text{экв}} = U_x C_x = U_2 C_0, \quad (2.15)$$

где  $C_{\text{экв}}$  – эквивалентная емкость измерительной схемы, Ф.

Рассчитав эквивалентную емкость и заменив напряжение на сенсоре  $U_x$ , получим:

$$U_1 = \frac{C_x C_0}{C_x + C_0} = C_x (U_1 - U_2) = C_0 U_2. \quad (2.16)$$

Преобразуем формулу (2.16) через выражение:

$$C_x = \frac{U_2 C_0}{U_1 - U_2}, \quad (2.17)$$

где  $U_2$  – напряжение на эталонном конденсаторе емкостью  $C_0$ , В;  $U_1$  – напряжение, выдаваемое генератором вторичного преобразователя, В.

Анализ схемы вторичного преобразователя (см. рисунок 2.11) и выражения (2.16) показывает, что соотношения емкости эталонного и измерительного конденсаторов, а также напряжения генератора  $U_1$  требуется выбирать так, чтобы отклик изменения емкости был максимально чувствительным.

Примем отношение емкости измерительного и эталонного конденсаторов  $\alpha$ , которое определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{C_x}{C_0}, \quad (2.18)$$

а также отношение напряжения на эталонном конденсаторе к напряжению на генераторе  $\gamma$ :

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= \frac{U_2}{U_1} \\ \gamma &\neq 1 \\ \gamma &< 1 \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

Тогда выражение (2.17), позволяющее установить соотношение емкости и напряжения вторичного преобразователя (ВП), примет вид:

$$\alpha = \frac{C_x}{C_0} = \frac{U_2}{U_1 - U_2} = \frac{U_1 \gamma}{\frac{U_2}{\gamma} - U_1} = \frac{U_1 \gamma}{U_2 \left( \frac{1}{\gamma} - 1 \right)}. \quad (2.20)$$

После преобразований получим:

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{\gamma} - 1}. \quad (2.21)$$

Представим данную зависимость на графике (рисунок 2.12)



Рисунок 2.12 – Зависимость отношения емкости конденсаторов к отношению напряжений на эталонном конденсаторе и генераторе вторичного преобразователя

Анализ рисунка 2.12 показывает, что емкость эталонного конденсатора  $C_0$  должна быть в несколько раз больше емкости измерительного конденсатора, величина которого изменяется в конечном диапазоне в зависимости от влажности. Чем больше емкость эталонного конденсатора, тем больший отклик чувствительности имеет измерительная схема (красная зона на рисунке 2.12).

Исследование первичного преобразователя показывают, что при изменении частоты заряд конденсатора пропорционально изменяется в зависимости от количества молекул воды, которые находятся во взаимодействии обкладок измерительного конденсатора с почвой. На основе данного эффекта

предположим, что изменение частоты в схеме позволит определить содержание воды в среде вокруг первичного преобразователя.

Используя эффект высокого дипольного момента молекул воды и схему вторичного преобразователя с двумя генераторами высокой и низкой частоты, введем критерий увлажнения  $K_B$ .

Критерий увлажнения почвы  $K_B$  – отношение емкости на измерительном конденсаторе при низкой частоте  $f_1$  к емкости измерительного конденсатора, измеренного при высокой частоте  $f_2$ . Критерий увлажнения  $K_B$  определим по выражению:

$$K_B = \frac{C_{\text{хнч}}}{C_{\text{хвч}}} = \frac{C_{x1}(f_1)}{C_{x2}(f_2)}, \quad (2.22)$$

где  $C_{\text{хнч}}$  ( $C_{x1}$ ) – емкость, косвенно измеренная на первичном преобразователе на низкой частоте;  $C_{\text{хвч}}$  ( $C_{x2}$ ) – емкость, косвенно измеренная на первичном преобразователе на высокой частоте.

Преобразуем выражение (2.22) с учетом выражения (2.16):

$$K_B = \frac{U_{2.1}(U_1 - U_{2.2})}{(U_1 - U_{2.1})U_{2.2}}, \quad (2.23)$$

где  $U_{2.1}$  – напряжение на эталонном конденсаторе при низкой частоте  $f_1$ , в измеренное в момент времени  $t_1$ , В;  $U_{2.2}$  – напряжение на эталонном конденсаторе на высокой частоте  $f_2$ , измеренное в момент времени  $t_2$ , В.

Установим, что измерение емкости на разных частотах осуществляется последовательно – сначала на низкой частоте  $f_1$ , затем на высокой частоте  $f_2$  с наименьшим промежутком времени между измерениями.

Преобразуем выражение (2.23) с учетом напряжения на измерительном конденсаторе:

$$K_B = \frac{U_{2.1}U_{x2}}{U_{2.2}U_{x1}}, \quad (2.24)$$

где  $U_{x2}$  – напряжение на измерительном конденсаторе при высокой частоте;  $U_{x1}$  – напряжение на измерительном конденсаторе при низкой частоте.

Примем отношение напряжений на эталонном конденсаторе:

$$u \approx \frac{U_{2.1}}{U_{2.2}}. \quad (2.25)$$

Тогда коэффициент увлажнения почвы:

$$K_B = u \frac{U_{x2}}{U_{x1}}. \quad (2.26)$$

Напряжение на измерительном конденсаторе изменяется в зависимости от мнимой диэлектрической проницаемости (влажности почвы). Используем при расчете коэффициента увлажнения почвы выражение (2.12):

$$K_B = u \frac{f_2 \sqrt{\frac{\rho_r^2 d^2}{k^2} - \frac{\varepsilon''^2 2\pi f_2^2}{\varepsilon_0^2} Q_2}}{f_1 \sqrt{\frac{\rho_r^2 d^2}{k^2} - \frac{\varepsilon''^2 2\pi f_1^2}{\varepsilon_0^2} Q_1}}, \quad (2.27)$$

где  $Q_1$  и  $Q_2$  – накопленные заряды на измерительном конденсаторе соответственно на низкой и высокой частотах колебательного контура;  $u$  – отношение напряжения на эталонном конденсаторе при низкой и высокой частотах.

Примем допущение, что низкая и высокая частота колебательного контура различаются в  $\vartheta$  раз:

$$\vartheta = \frac{f_2}{f_1}, \quad (2.28)$$

где  $\vartheta$  – отношение высокой частоты к низкой.

Также примем что при высокой частоте диполи молекул воды в почве, способствующие изменению заряда измерительного конденсатора, не успевают поворачиваться в переменном электрическом поле. Тогда заряд, накопленный при низкой частоте, будет отличаться в  $\tau$  раз от заряда, накопленного на высокой частоте:

$$\tau = \frac{Q_2}{Q_1}. \quad (2.29)$$

Обозначив

$$A = \frac{\rho_r^2 d^2}{k^2}, \quad (2.30)$$

получим коэффициент увлажнения почвы с учетом выражений (2.28) и (2.29):

$$K_{\text{в}} = u \vartheta \tau \frac{\sqrt{A - \frac{\varepsilon''^2 2\pi f_2^2}{\varepsilon_0^2}}}{\sqrt[1]{A - \frac{\varepsilon''^2 2\pi f_1^2}{\varepsilon_0^2}}}. \quad (2.31)$$

Полученная теоретическая зависимость коэффициента увлажнения почвы (2.31) оценивает влияние частот колебательного контура измерительной схемы. Она позволяет также оценить влияние влажности почвы на заряд конденсатора и установить зависимость от мнимой диэлектрической проницаемости. Решением функции коэффициента увлажнения почвы являются такие значения параметров, которые удовлетворяют системе уравнений:

$$\left. \begin{array}{l} t_1 - t_2 = \Delta t \\ \Delta t \rightarrow 0 \\ f_1 < f_2 \\ \tau_2 < \tau_1 \end{array} \right\}. \quad (2.32)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – время начала измерения соответственно на низкой и высокой частоте, с.

Промежуток времени между измерениями необходимо свести к минимальному значению, так как воздействие электрического поля на влажность почвы поляризует частицы вокруг первичного преобразователя и влечет к снижению чувствительности. Оценим влияние времени на измерение емкости при разных частотах при построении экспериментальных исследований.

Вариация параметров выражения (2.31) в пределах натуральных чисел позволяет использовать теорию математического подобия функции коэффициента увлажнения почвы и ее зависимости от мнимой диэлектрической проницаемости и, соответственно, влажности почвы [19, 36, 99]. Используя принцип математического подобия, коэффициент увлажнения почвы:

$$K_{\text{в}} = 1 + \vartheta u \ln(1 + \varepsilon''). \quad (2.33)$$

Полученная зависимость (2.33) характеризует экспоненциальную зависимость коэффициента увлажнения от мнимой диэлектрической проницаемости при влиянии показателей относительного заряда  $\tau$ , относительной частоты  $\vartheta$  и относительного напряжения  $u$ . Допустим, что влажность почвы  $\varphi$  пропорциональна мнимой диэлектрической проницаемости  $\varepsilon''$  и условно определяется по выражению:

$$\varphi = \sigma \varepsilon'', \quad (2.34)$$

где  $\sigma$  – коэффициент пропорциональности (устанавливается эмпирически).

Представим полученную теоретическую зависимость в графическом виде (рис. 2.13).

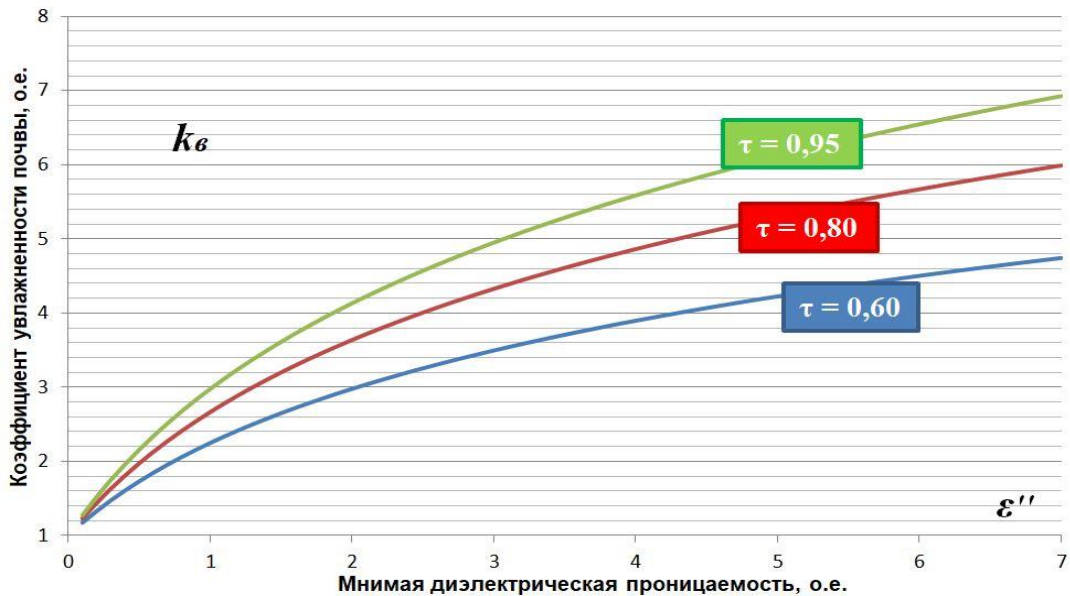


Рисунок 2.13 – Теоретическая зависимость коэффициента увлажнения от мнимой диэлектрической проницаемости при условии относительной частоты  $\vartheta = 10$  и относительного напряжения  $u = 0,5$

Также представим обратную теоретическую зависимость влажности почвы при различном коэффициенте увлажнения:

$$\varphi = \sigma \frac{(K_v - 1)^e}{(u\tau\vartheta)^e}. \quad (2.35)$$

В графическом виде зависимость (2.35) показана на рисунке 2.14.

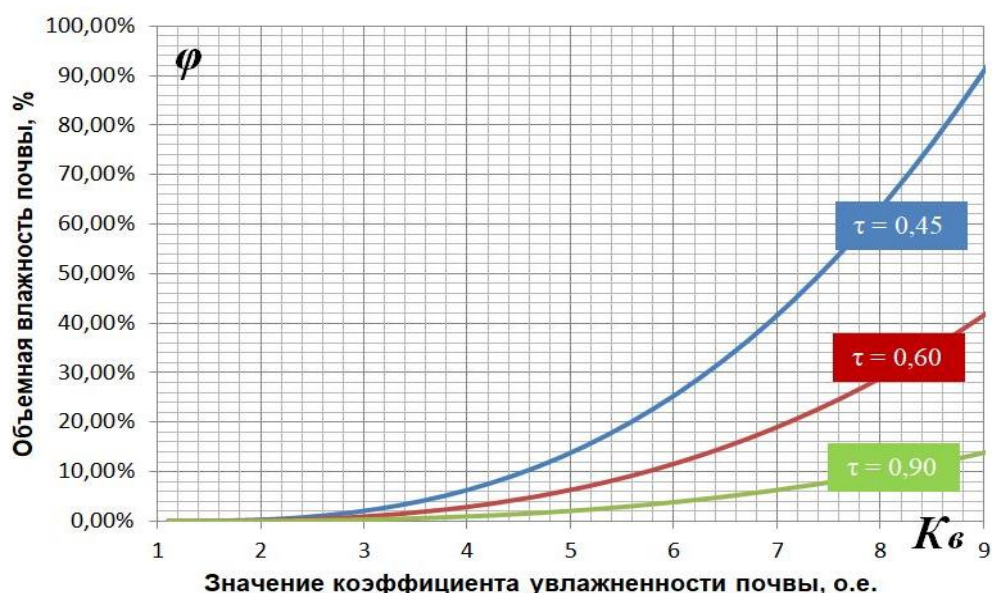


Рисунок 2.14 – Теоретическая зависимость влажности почвы от значения коэффициента увлажнения почвы при разных отношениях заряда  $\tau$ , отношении высокой частоты к низкой частоте  $\vartheta = 10$  и отношении напряжений на эталонном конденсаторе  $u = 0,9$

Как видно из рисунков 2.13 и 2.14, на коэффициент увлажнения почвы существенное влияние оказывает значение отношения накопленного заряда на измерительном конденсаторе при низкой и высокой частотах. При  $\tau$  от 0,5 до 0,6 коэффициент увлажнения имеет наилучший отклик при соответствующей влажности почвы.

Таким образом, теоретическое обоснование параметров вторичного преобразователя в виде измерительной схемы, состоящей из двух поочередно включающихся генераторов переменного синусоидального тока высокой и низкой частоты для цепи последовательно соединенных измерительного (первичного преобразователя) и эталонного конденсаторов, позволяет моделировать работу измерительной схемы так, чтобы определить влажность почвы. Для этого введен коэффициент увлажнения почвы, который рассчитывается как отношение емкости, измеренной (косвенно) на низкой частоте, к емкости, измеренной на высокой частоте. Математический анализ с использованием принципов математического подобия позволил установить зависимость коэффициента увлажнения почвы от значений  $\tau$  (отношение заряда конденсатора, измеренного на высокой и низкой частотах);  $\vartheta$  (отношение высокой частоты к низкой частоте колебательного контура вторичного

преобразователя), а также  $u$  (отношение напряжения на эталонном конденсаторе на низкой и высокой частотах). Теоретически установлено, что существенное влияние на значение коэффициента увлажненности оказывает относительный заряд на измерительном конденсаторе (первичном преобразователе).

## 2.4 Разработка функциональной схемы и алгоритма работы устройства послыойного контроля влажности почвы

Датчик послыойного контроля влажности включает в себя, помимо измерительного блока, устройство, которое содержит блоки энергоснабжения, хранения и передачи данных. Общая функциональная схема автономного устройства контроля влажности почвы представлена на рисунке 2.15.

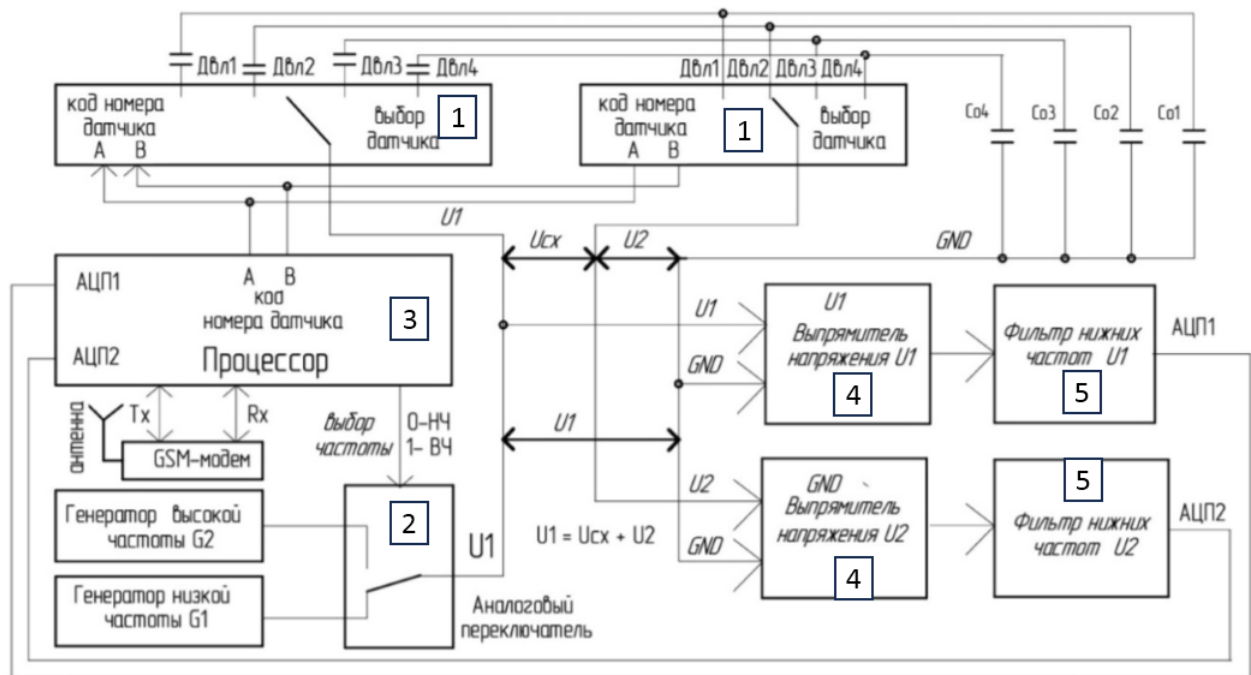


Рисунок 2.15 – Функциональная схема устройства контроля влажности почвы:

1 – коммутаторы; 2 – аналоговый переключатель; 3 – процессор;

4 – выпрямитель напряжения; 5 – фильтры нижних частот

Обоснование зависимости параметров и формы первичного преобразователя, а также параметров вторичного преобразователя – измерительной схемы и ввод нового параметра – коэффициента увлажненности почвы определяют функциональную схему работы датчика. Для послыойного контроля в схему встроены несколько сенсоров. Сенсоры Двл1, Двл2, Двл3, Двл4 (см. рисунок 2.15) расположены на измерительной штанге на равном или произвольном (в

зависимости от потребности агронома) расстояний друг от друга. Количество сенсоров можно принять любым, однако оно влияет на стоимость всей установки. Один сенсор имеет два вывода, которые необходимо коммутировать в цепь измерительной схемы. Примем четыре сенсора, ограничившись выводами коммутатора. Вместе с сенсорами в схеме разместим последовательно эталонные конденсаторы. Измерение напряжения на генераторе, эталонном конденсаторе произведем поочередно, подключая к цепи отдельную ветвь сенсоров Двл1, Двл2, Двл3, Двл4. Для этого автономный датчик укомплектован коммутаторами 1 (см. рисунок 2.15). Выбор датчика при измерении выполнен на основании кодировки, например: Двл1 ( $A = 0, B = 0$ ), Двл2 ( $A = 1, B = 0$ ), Двл3 ( $A = 0, B = 1$ ), Двл4 ( $A = 1, B = 1$ ).

Коэффициент увлажненности как отношение емкости конденсатора, измеренного на высокой и низкой частотах, рассчитывается исходя из полученных данных. В измерительную схему необходимо встроить источник (генератор) сигнала. Для повышения надежности работы используем два отдельных генератора и, согласно теоретическим данным, выберем значения низкой  $f_{нч}$  и высокой  $f_{вч}$  частот. Генераторы высокой и низкой частот подключены в измерительную цепь параллельно через коммутатор 2 (см. рисунок 2.15). Выбор генератора в схеме установлен в автоматическом режиме с помощью процессора 3. Для измерения значений  $U_1, U_2$  в измерительную цепь включены выпрямитель напряжения 4, фильтр низких частот 5, а также блок аналогово-цифровых преобразователей АЦП1, АЦП2. Величина генерируемого напряжения зависит от источника питания и типа генератора. Автономные устройства, как правило, комплектуются литий-ионными компактными источниками тока стандартного напряжения [22, 50, 123].

В измерительной схеме предусмотрим двухполупериодный выпрямитель как пассивный компонент, который не усиливает сигнал, а только преобразует его форму. Для вторичного преобразователя рассмотрим схему прецизионного выпрямителя. В этом случае коэффициент усиления задается соотношением резисторов в цепи обратной связи, т. е. суммирующим выпрямителем (на двух

операционных усилителях (ОУ) или на одном ОУ с двумя диодами). Коэффициент усиления для положительной и отрицательной полуволн часто устанавливают разным или одинаковым, в зависимости от задачи.

Допустим, что в схеме на двух ОУ (повторитель и сумматор) коэффициент усиления для модуля входного напряжения задается резисторами.

Формула для амплитуды выходного напряжения (для модуля):

$$U_{\text{вых}} = \frac{R_3}{R_1} U_{\text{вх}}, \quad (2.36)$$

где  $R_1$  – резистор на входе, Ом;  $R_3$  – резистор обратной связи сумматора, Ом.

В активных выпрямителях коэффициент усиления задается только резисторами (а не конденсаторами), чтобы не вносить частотную зависимость в процесс выпрямления. Традиционный подход к устройству двухполупериодного выпрямителя (рисунок 2.16) состоит в том, чтобы установить коэффициенты усиления  $IC_1$  и  $IC_2$  (в нашем случае равными 1) и, используя управляющие диоды  $D_1$  и  $D_2$  для суммирования полупериодов входной синусоиды, сформировать выпрямленный выходной сигнал. Для положительной полуволны входного сигнала  $IC_1$  является не инвертирующим усилителем с коэффициентом усиления, равным 1. Для отрицательной полуволны входного сигнала  $IC_2$  является инвертирующим усилителем с коэффициентом усиления  $-1$ .

Такая схема двухполупериодного выпрямителя часто объединяется с фильтром низких частот, образуя недорогой AC/DC преобразователь. Если используется двухполупериодный выпрямитель с усилением, объединение этих двух функций в одной схеме обеспечивает экономию затрат и снижение количества компонентов и площади платы.

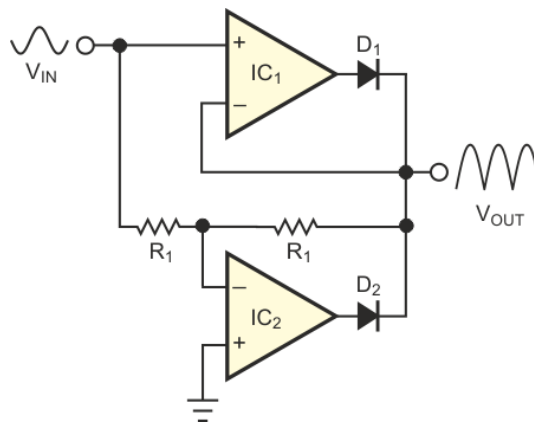


Рисунок 2.16 – Схема двухполупериодного выпрямителя с фиксированным коэффициентом усилителя  $-1$

После активного двухполупериодного выпрямителя сигнал получается пульсирующим и для измерений с целью получения постоянного напряжения, пропорциональное амплитуде или среднеквадратичному значению, использован фильтр нижних частот (ФНЧ). ФНЧ в измерительной схеме выполняет три основные функции: преобразование пульсирующего напряжения в постоянное, усреднение в зависимости от нужного параметра и подавление шумов и наводок.

Для снижения погрешности измерения в измерительную часть схемы предусмотрен после  $RC$ -фильтра повторитель напряжения на операционном усилителе (буфер) с высоким входным сопротивлением. Для быстрых измерений выбрана более высокая частота среза.

В целом измерительная схема имеет последовательность, представленную на рисунке 2.17.

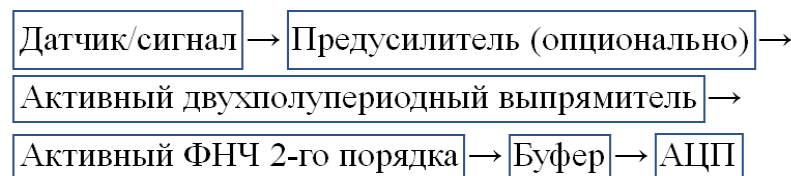


Рисунок 2.17 – Блок-схема измерительного устройства

Фильтр в данной схеме выполняет роль усреднителя, преобразуя пульсирующий сигнал в постоянное напряжение, готовое для подключения к АЦП. Классическая амплитудно-частотная характеристика показана на рисунке 2.18.

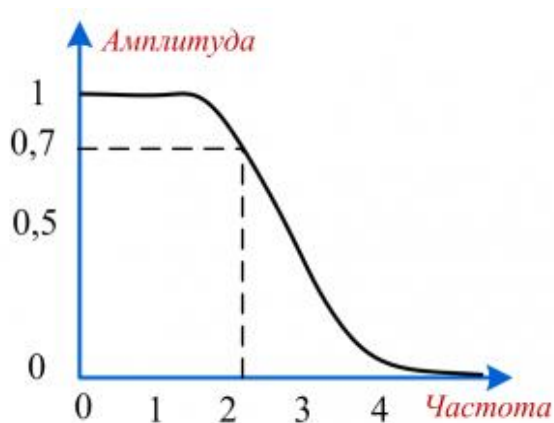


Рисунок 2.18 – Амплитудно-частотная характеристика типового фильтра низкой частоты

Фильтр низкой частоты ограничит сигнал, поступающий через АЦП в процессор. На рисунке 2.18 приведена амплитудно-частотная характеристика типичного ФНЧ. Единице условно присвоена максимальная амплитуда сигнала – точка с амплитудой 0,7, что соответствует частоте среза ФНЧ, относительно которой производится расчёт ФНЧ по большинству существующих методик. От нулевой частоты до частоты среза ФНЧ находится полоса частот пропускания, справа – полоса частот подавления (задержания).

Классическая амплитудно-частотная характеристика ФНЧ имеет вид гладкой спадающей кривой. В полосе пропускания (от 0 до частоты среза  $f_{\text{ср}}$ ) коэффициент передачи максимален и остается практически неизменным (пульсации отсутствуют, если это фильтр Баттерворта [26, 39, 69]). На частоте среза  $f_{\text{ср}}$  сигнал ослабляется на 3 дБ (до уровня 0,707 от исходного, рисунок 2.18). Затем начинается полоса подавления, где характеристика спадает с постоянным наклоном:  $-20$  дБ на декаду (6 дБ/октаву) для каждого порядка фильтра. Чем выше порядок, тем круче спад и эффективнее подавление высокочастотных составляющих выше среза.

В измерительной схеме с АЦП предусмотрим отдельный источник опорного напряжения, к которому согласно [62, 72, 76] выдвигается ряд требований: низкий шум (1–10 мкВ в полосе 0,1–10 Гц), низкий температурный дрейф (1–10 ppm/°C), высокая начальная точность.

Предусмотрен также отдельный автономный источник питания в виде аккумуляторной батареи, который имеет абсолютную чистоту питания. Аккумуляторный источник не создает пульсаций, высокочастотных помех, что критически важно для прецизионных измерений (микровольтные сигналы, высокоточные АЦП). Важно отметить, что при выборе источника питания необходимо предусмотреть схемы подзарядки, а также подключение *LDO*-стабилизатора [33, 67, 100] после батареи для получения стабильного напряжения.

Комплексная работа первичного и вторичного преобразователей с учетом структуры измерительного устройства определяется последовательностью конкретных операций. Обоснуем алгоритм работы автономного измерительного устройства послыонного контроля влажности (ПКВ) почвы.

1. Активирование осуществляется при подаче питающего напряжения на ПКВ с помощью переключателя.

2. Выделение для каждого из четырех датчиков влажности области памяти процессора для сохранения численных значений следующих параметров:

- \*Значение образцовой емкости  $C_0 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$ ;
- \*Значение напряжения  $U_{1\text{нч}}$ ;
- \*Значение напряжения  $U_{2\text{нч}}$ ;
- \*Значение напряжения  $U_{2\text{нчк}}$ ;
- \*Значение емкости  $C_{x1\text{нч}}$ ;
- \*Значение напряжения  $U_{1\text{вч}}$ ;
- \*Значение напряжения  $U_{2\text{вч}}$ ;
- \*Значение напряжения  $U_{2\text{вчк}}$ ;
- \*Значение емкости  $C_{x1\text{вч}}$ ;
- \*Значение коэффициента увлажнения  $K_{1\text{вл}}$ .

3. Выбор первого датчика контроля влажности (Двл1) путем формирования кода  $A = 0$ ,  $B = 0$ .

4. Выбор низкой частоты генератора путем формирования кода 0-НЧ на выводе процессора.

5. Чтение сигнала АЦП1 и сохранение в ячейке памяти измеренного значения в виде напряжения  $U_{1нч}$ .

6. Чтение сигнала АЦП2 и сохранение в ячейке памяти измеренного значения в виде напряжения  $U_{2нч}$ .

7. Вычисление значения  $U_{2нчк} = U_{2нч}/1,66$ .

8. Вычисление и сохранение в ячейке памяти значения:

$$C_{x1нч} = \frac{U_{2нчк} C_0}{U_{1нч} - U_{2нчк}}. \quad (2.37)$$

9. Выбор высокой частоты генератора путем формирования кода 1-ВЧ на выводе процессора.

10. Чтение сигнала АЦП1 и сохранение в ячейке памяти измеренного значения в виде напряжения  $U_{1вч}$ .

11. Чтение сигнала АЦП2 и сохранение в ячейке памяти измеренного значения в виде напряжения  $U_{2вч}$ .

12. Вычисление значения  $U_{2вчк} = U_{2вч}/1,66$ .

13. Вычисление и сохранение в ячейке памяти значения:

$$C_{x1вч} = \frac{U_{2вчк} C_0}{U_{1вч} - U_{2вчк}}. \quad (2.38)$$

14. Вычисление коэффициента  $K_{в1} = (C_{x1нч}) / (C_{x1вч})$  и сохранение в ячейке памяти в виде коэффициента  $K_{в1}$ .

15. Выбор второго датчика контроля влажности (Двл2) путем формирования кода  $A = 1, B = 0$  на выводах процессора.

16. Выполнение п.п. 3–14 для второго датчика Двл2.

17. Выбор третьего датчика контроля влажности (Двл3) путем формирования кода  $A = 0, B = 1$  на выводах процессора.

18. Выполнение п.п. 3–14 для третьего датчика Двл3.

19. Выбор четвертого датчика контроля влажности (Двл4) путем формирования кода  $A = 1, B = 1$  на выводах процессора.

20. Выполнение п.п. 3–14 для четвертого датчика Двл4.

21. Передача всех накопленных данных по каналу связи для интерпретации данных о влажности почвы в конкретные промежутки времени измерения.

Представим алгоритм работы автономного устройства контроля влажности в виде блок-схемы (рисунок 2.19).

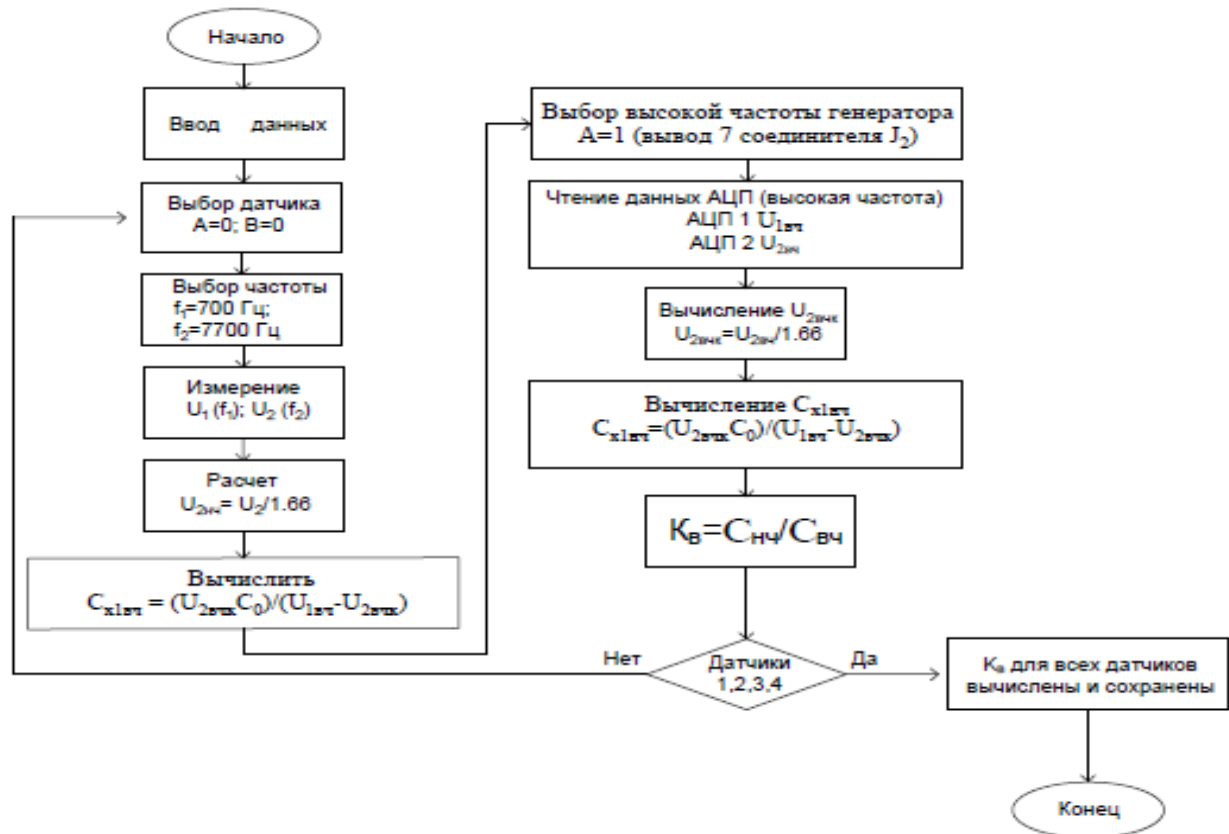


Рисунок 2.19 – Блок-схема алгоритма работы автономного устройства послынного контроля влажности почвы (измерительная часть)

Разработанный алгоритм обеспечивает полный цикл измерения влажности в четырех слоях почвы по методу измерения электрической емкости на двух отличающихся друг от друга частотах. При подаче питания через переключатель, процессор инициализирует области памяти для хранения промежуточных параметров: опорной емкости, напряжений АЦП, скорректированных значений и вычисленных емкостей датчиков. Логика работы определяется последовательностью опроса первичных преобразователей путем мультиплексирования адресными кодами (А, В). Для каждого ПП выполняются измерения на низкой и высокой частотах генератора, что позволяет разделить вклад емкости чувствительного элемента от паразитных влияний. Коррекция напряжений (деление на 1,66) и вычисление емкостей обеспечивают

компенсацию систематических схемных погрешностей. Коэффициент увлажнения почвы рассчитывается как указано в п. 2.3 и является информативным параметром, пропорциональным влажности почвы, не зависящим от абсолютных значений емкостей. По завершении цикла данные всех четырех датчиков пакетно передаются по каналу связи для последующей интерпретации, привязки к временным меткам и интеграции в схему автоматизации полива в виде обратной связи, а именно управления насосным агрегатом и дождевальным машиной.

## **2.5 Обоснование функциональной схемы и алгоритма управления оросительным комплексом на основе данных датчиков послойного контроля влажности почвы**

В существующей практике орошения решение о поливе сельскохозяйственных культур, график работы насосного агрегата (НА) и электрифицированной дождевальной машины (ДМ) обычно принимаются агрономом на основе зональных рекомендаций, нормативных документов (например, ГОСТ Р 58331.3-2019 «Водопотребность для орошения сельскохозяйственных культур»), данных метеостанций и прогнозов погоды. Однако перечисленные инструменты не формируют конкретной рекомендации о поливе и не обладают достаточной точностью для своевременного включения НА и ДМ, что приводит к снижению урожайности культур и экономической эффективности производства. Автоматизировать данный процесс можно на основе внедрения алгоритма и функциональной схемы с обратной связью в виде датчиков влажности.

В ручном режиме дополнительное влияние оказывают техническая оснащённость хозяйства, объём водисточника, качество поливной воды и компетенции персонала. Использование датчиков послойного контроля в системе автоматизации позволит прогнозировать время полива и режим работы насосного агрегата и дождевальной машины, а также учитывать микрорельеф орошаемого участка и свойства математического прогнозирования влажности на последующие 12–24 часа, что позволит повысить эффективность полива.

Для разработки функциональной схемы автоматизации полива с обратной связью рассмотрим основные особенности и условия орошения. Ключевым элементом нового способа управления является расстановка датчиков влажности почвы с учётом микрорельефа поля, который оценим с помощью подробной геодезической съёмки (например, данных, полученных с помощью беспилотного летательного аппарата, с разрешением картографирования  $100 \times 100$  мм<sup>2</sup>). Минимальное количество датчиков, обеспечивающее репрезентативность контроля влажности поля, на котором установлена электрифицированная дождевальная машина, примем в количестве пяти штук по методике [86]. Чем больше количество датчиков на орошаемом участке, тем выше точность оценки влагообеспеченности. Используем в предлагаемом способе управления не менее пяти устройств послойного контроля влажности почвы, из которых два датчика установлены в нижних (наиболее влажных) точках микрорельефа, два – в верхних (наиболее сухих) точках и один – в нейтральной средней точке. Такое расположение устройств контроля влажности позволит выявить закономерности изменения влажности на поле с учетом влияния микрорельефа почвы и определить приоритетные датчики. Некоторые варианты расположения устройств контроля влажности на основании микрорельефа местности показаны на рисунке 2.20.

Каждый датчик снабжён четырьмя первичными преобразователями для послойного измерения влажности на глубинах 0,1 м; 0,2; 0,3 и 0,4 м (с шагом 100 мм), что позволяет отслеживать влагообеспеченность корнеобитаемого слоя.

Сбор данных следует осуществлять с высокой периодичностью как днем, так и ночью (например, 1 раз в час) и по GSM-связи передавать их на серверный компьютер, где формируется таблица с привязкой к номеру датчика, глубине измерения и времени. Пример сбора данных показан на рисунке 2.21.

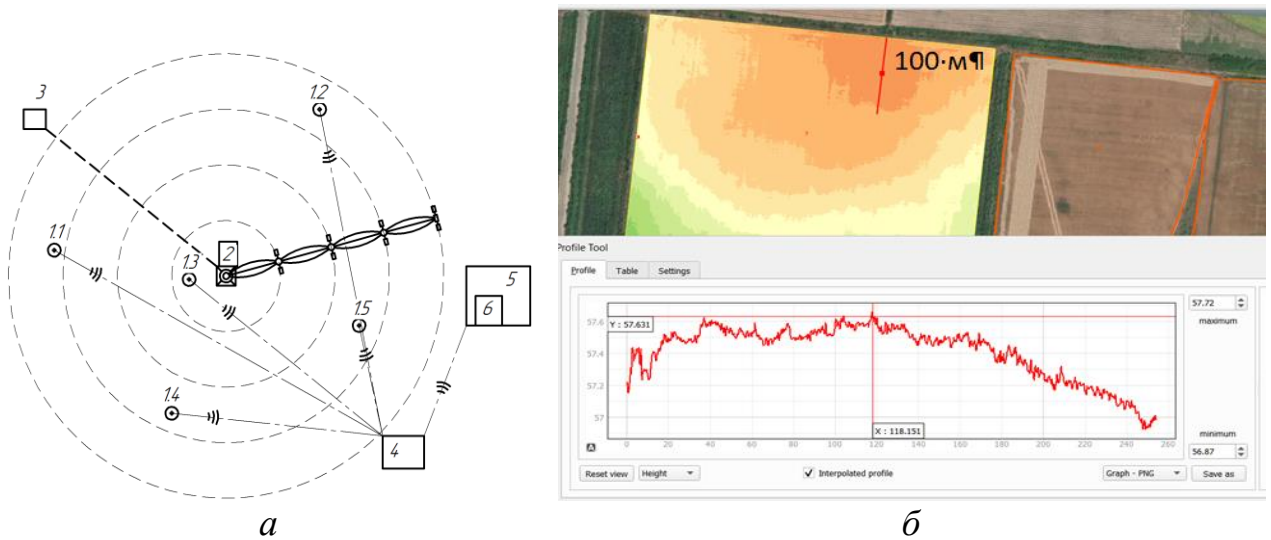


Рисунок 2.20 – Расстановка датчиков по полю с учетом микрорельефа орошаемого участка:  
 а – проекция захвата дождевальная машины кругового действия с расстановкой датчика (ГОСТР 58331.3-2019. Водопотребность для орошения сельскохозяйственных культур);  
 б – оценка микрорельефа с помощью квадрокоптера

| Дата       | Время    | 10 см            | 20 см  | 30 см  | 40 см  | 50 см  | 10 см             | 20 см  | 30 см  | 40 см  | 50 см  | 10 см            | 20 см  | 30 см  | 40 см  | 50 см  | 10 см           | 20 см  | 30 см  | 40 см  | 50 см  | 10 см             | 20 см  | 30 см  | 40 см  | 50 см  |
|------------|----------|------------------|--------|--------|--------|--------|-------------------|--------|--------|--------|--------|------------------|--------|--------|--------|--------|-----------------|--------|--------|--------|--------|-------------------|--------|--------|--------|--------|
|            |          | Датчик 1 - низ 1 |        |        |        |        | Датчик 2 - верх 1 |        |        |        |        | Датчик 3 - низ 2 |        |        |        |        | Датчик 4 - сред |        |        |        |        | Датчик 5 - верх 2 |        |        |        |        |
| 30.05.2022 | 16.04.12 | 46.13%           | 47.89% | 55.15% | 59.15% | 63.12% | 44.17%            | 45.68% | 45.96% | 49.60% | 52.34% | 48.19%           | 48.96% | 49.25% | 53.14% | 59.64% | 45.26%          | 46.23% | 46.85% | 48.95% | 53.17% | 39.86%            | 42.52% | 44.17% | 48.36% | 51.16% |
|            | 17.04.12 | 46.12%           | 47.85% | 54.98% | 58.15% | 63.18% | 43.85%            | 45.38% | 45.82% | 49.52% | 52.30% | 48.15%           | 48.90% | 49.20% | 53.08% | 59.61% | 45.24%          | 46.24% | 46.85% | 48.96% | 53.17% | 39.72%            | 42.48% | 44.10% | 48.30% | 51.09% |
|            | 18.04.12 | 46.12%           | 47.85% | 54.98% | 58.14% | 63.01% | 43.62%            | 45.15% | 45.68% | 49.32% | 51.99% | 48.06%           | 48.81% | 49.16% | 52.97% | 59.62% | 45.20%          | 46.22% | 46.82% | 48.96% | 53.16% | 39.56%            | 42.44% | 44.03% | 48.16% | 51.08% |
|            | 19.04.12 | 46.12%           | 47.85% | 54.95% | 58.12% | 63.00% | 43.60%            | 45.02% | 45.60% | 49.16% | 51.93% | 47.98%           | 48.69% | 49.14% | 52.77% | 59.58% | 45.20%          | 46.17% | 46.81% | 48.97% | 53.16% | 39.28%            | 42.42% | 43.89% | 48.09% | 51.02% |
|            | 20.04.12 | 46.13%           | 47.82% | 54.82% | 58.05% | 62.84% | 43.53%            | 44.93% | 45.46% | 49.17% | 51.90% | 47.89%           | 48.52% | 49.12% | 52.51% | 59.52% | 45.19%          | 46.11% | 46.77% | 48.96% | 53.15% | 39.21%            | 42.36% | 43.85% | 48.05% | 51.00% |
|            | 21.04.12 | 46.12%           | 47.81% | 54.69% | 58.02% | 62.82% | 43.30%            | 44.90% | 45.41% | 49.10% | 51.86% | 47.86%           | 48.43% | 49.05% | 52.55% | 59.50% | 45.09%          | 45.99% | 46.75% | 48.95% | 53.15% | 39.12%            | 42.34% | 43.84% | 48.03% | 51.00% |
|            | 22.04.12 | 46.12%           | 47.75% | 54.68% | 58.00% | 62.80% | 43.21%            | 44.65% | 45.09% | 48.99% | 51.80% | 47.59%           | 48.38% | 49.02% | 52.43% | 59.44% | 45.08%          | 45.83% | 46.74% | 48.93% | 53.15% | 39.03%            | 42.30% | 43.84% | 48.01% | 50.99% |
|            | 23.04.12 | 46.10%           | 47.70% | 54.62% | 58.01% | 62.77% | 43.06%            | 44.48% | 45.01% | 48.93% | 51.75% | 47.52%           | 48.27% | 49.00% | 52.40% | 59.36% | 45.05%          | 45.82% | 46.74% | 48.92% | 53.13% | 38.95%            | 42.26% | 43.83% | 48.00% | 50.98% |
|            | 0.04.12  | 46.05%           | 47.62% | 54.66% | 58.01% | 62.73% | 42.85%            | 44.36% | 44.85% | 48.81% | 51.68% | 47.52%           | 48.13% | 49.00% | 52.36% | 59.18% | 45.04%          | 45.82% | 46.73% | 48.92% | 53.13% | 38.92%            | 42.25% | 43.80% | 47.99% | 50.98% |
|            | 1.04.12  | 46.01%           | 47.53% | 54.59% | 57.99% | 62.70% | 42.68%            | 44.30% | 44.80% | 48.77% | 51.62% | 47.48%           | 48.00% | 48.98% | 52.33% | 59.11% | 45.00%          | 45.72% | 46.68% | 48.90% | 53.12% | 38.90%            | 42.24% | 43.79% | 47.90% | 50.96% |
| 31.05.2022 | 2.04.12  | 45.88%           | 47.40% | 54.55% | 57.83% | 62.70% | 42.42%            | 44.21% | 44.67% | 48.74% | 51.58% | 47.40%           | 47.93% | 48.86% | 52.26% | 59.07% | 44.98%          | 45.70% | 46.60% | 48.85% | 53.10% | 38.85%            | 42.24% | 43.77% | 47.90% | 50.92% |
|            | 3.04.12  | 45.85%           | 47.16% | 54.55% | 57.80% | 62.58% | 42.16%            | 44.13% | 44.44% | 48.59% | 51.49% | 47.25%           | 47.81% | 48.80% | 52.18% | 59.03% | 44.87%          | 45.62% | 46.50% | 48.82% | 53.08% | 38.81%            | 42.23% | 43.70% | 47.90% | 50.85% |
|            | 4.04.12  | 45.82%           | 47.10% | 54.52% | 57.77% | 62.50% | 42.00%            | 44.08% | 44.28% | 48.27% | 51.38% | 47.11%           | 47.68% | 48.70% | 52.07% | 58.98% | 44.80%          | 45.43% | 46.35% | 48.77% | 53.06% | 38.77%            | 42.20% | 43.62% | 47.85% | 50.84% |
|            | 5.04.12  | 45.81%           | 47.08% | 54.51% | 57.68% | 62.42% | 41.89%            | 43.87% | 44.19% | 48.09% | 51.15% | 46.88%           | 47.32% | 48.54% | 51.96% | 58.94% | 44.79%          | 45.03% | 46.01% | 48.64% | 53.01% | 38.74%            | 42.14% | 43.60% | 47.84% | 50.80% |
|            | 6.04.12  | 45.35%           | 47.02% | 54.41% | 57.42% | 62.28% | 41.65%            | 43.60% | 43.72% | 47.89% | 50.98% | 46.18%           | 47.08% | 48.41% | 51.74% | 58.91% | 44.74%          | 44.93% | 45.64% | 48.51% | 53.00% | 38.62%            | 42.03% | 43.55% | 47.83% | 50.70% |
|            | 7.04.12  | 45.11%           | 46.82% | 54.35% | 57.06% | 62.23% | 41.08%            | 43.22% | 43.41% | 47.05% | 50.59% | 45.89%           | 46.80% | 48.20% | 51.64% | 58.82% | 44.64%          | 44.72% | 45.19% | 48.33% | 52.96% | 38.41%            | 41.82% | 43.39% | 47.80% | 50.62% |
|            | 8.04.12  | 44.80%           | 46.16% | 54.30% | 56.53% | 61.94% | 40.35%            | 42.19% | 43.08% | 46.43% | 50.03% | 45.49%           | 46.42% | 48.02% | 51.32% | 58.62% | 44.27%          | 44.44% | 44.88% | 48.13% | 52.84% | 38.05%            | 41.60% | 43.19% | 47.72% | 50.55% |
|            | 9.04.12  | 44.03%           | 46.00% | 53.85% | 56.13% | 61.63% | 39.16%            | 41.00% | 42.61% | 46.05% | 49.29% | 45.17%           | 46.06% | 47.55% | 51.03% | 58.38% | 44.01%          | 43.95% | 44.60% | 48.02% | 52.75% | 37.67%            | 41.35% | 43.02% | 47.61% | 50.39% |
|            | 10.04.12 | 43.12%           | 45.55% | 53.15% | 55.84% | 61.38% | 37.55%            | 40.25% | 42.03% | 45.13% | 48.16% | 44.69%           | 45.52% | 47.10% | 50.53% | 58.02% | 43.26%          | 43.21% | 44.32% | 47.79% | 52.67% | 37.14%            | 41.01% | 42.77% | 47.40% | 50.29% |
|            | 11.04.12 | 42.25%           | 45.12% | 52.54% | 55.16% | 61.02% | 35.02%            | 39.21% | 41.35% | 44.29% | 47.11% | 44.15%           | 45.01% | 46.53% | 49.68% | 57.68% | 42.56%          | 42.72% | 44.00% | 47.60% | 52.57% | 36.55%            | 40.52% | 42.51% | 47.24% | 50.06% |
|            | 12.04.12 | 42.10%           | 44.87% | 52.08% | 54.92% | 60.66% | 33.09%            | 38.01% | 40.55% | 43.48% | 45.85% | 43.26%           | 44.43% | 45.88% | 48.77% | 57.27% | 41.86%          | 42.01% | 43.60% | 47.38% | 52.41% | 36.00%            | 39.89% | 42.23% | 47.15% | 49.86% |
| 31.05.2022 | 13.04.12 | 40.88%           | 44.13% | 51.16% | 54.16% | 60.27% | 31.00%            | 36.15% | 38.97% | 42.55% | 44.44% | 42.68%           | 43.35% | 45.12% | 47.81% | 56.88% | 40.39%          | 41.23% | 43.13% | 47.04% | 52.21% | 34.95%            | 39.25% | 41.92% | 47.01% | 49.50% |
|            | 14.04.12 | 38.14%           | 43.02% | 50.18% | 53.80% | 59.82% | 28.98%            | 34.72% | 37.81% | 41.69% | 43.73% | 42.11%           | 42.35% | 44.40% | 46.93% | 56.40% | 39.39%          | 40.33% | 42.56% | 46.56% | 52.01% | 33.58%            | 38.55% | 41.48% | 46.00% | 49.05% |
|            | 15.04.12 | 37.00%           | 42.41% | 49.19% | 53.11% | 59.08% | 26.31%            | 33.03% | 36.54% | 40.15% | 42.36% | 41.33%           | 41.53% | 43.65% | 45.98% | 56.00% | 38.54%          | 39.49% | 42.02% | 46.15% | 51.00% | 32.18%            | 37.84% | 41.05% | 46.52% | 48.44% |
|            | 16.04.12 | 35.75%           | 41.00% | 48.29% | 52.70% | 58.59% | 23.69%            | 31.59% | 35.29% | 39.05% | 41.46% | 40.34%           | 40.72% | 42.79% | 45.17% | 55.41% | 37.99%          | 38.77% | 41.66% | 45.81% | 51.64% | 31.03%            | 37.11% | 40.64% | 46.11% | 47.89% |
|            | 17.04.12 | 35.01%           | 41.00% | 47.36% | 52.05% | 58.08% | 22.86%            | 30.16% | 34.29% | 37.45% | 40.77% | 39.68%           | 40.05% | 41.99% | 44.29% | 54.65% | 37.42%          | 38.11% | 41.43% | 45.95% | 51.26% | 30.73%            | 36.56% | 40.21% | 45.88% | 47.70% |
|            | 18.04.12 | 34.66%           | 39.99% | 46.84% | 51.69% | 57.57% | 22.04%            | 29.52% | 33.65% | 35.12% | 39.89% | 39.24%           | 39.66% | 41.13% | 43.58% | 54.22% | 37.03%          | 37.54% | 41.30% | 45.29% | 51.03% | 29.58%            | 36.02% | 39.84% | 45.63% | 47.54% |
|            | 19.04.12 | 34.56%           | 39.07% | 46.15% | 51.40% | 57.09% | 21.53%            | 29.06% | 33.02% | 34.66% | 39.06% | 38.64%           | 39.02% | 40.50% | 42.86% | 53.79% | 36.85%          | 37.04% | 41.20% | 45.13% | 50.99% | 29.00%            | 35.44% | 39.50% | 45.44% | 47.40% |
|            | 20.04.12 | 34.15%           | 38.28% | 45.92% | 51.10% | 56.99% | 21.17%            | 28.53% | 32.44% | 33.64% | 38.55% | 38.07%           | 38.44% | 39.84% | 42.22% | 53.26% | 36.66%          | 36.77% | 41.11% | 44.98% | 50.93% | 28.46%            | 35.16% | 39.32% | 45.28% | 47.20% |
|            | 21.04.12 | 34.12%           | 37.68% | 45.93% | 50.96% | 56.96% | 20.68%            | 27.98% | 31.99% | 32.95% | 38.06% | 37.52%           | 38.00% | 39.17% | 41.83% | 53.20% | 36.58%          | 36.63% | 41.07% | 44.90% | 50.90% | 28.03%            | 35.03% | 39.14% | 45.08% | 47.06% |
|            | 22.04.12 | 34.15%           | 37.12% | 45.17% | 50.90% | 56.82% | 20.04%            | 27.54% | 31.28% | 32.74% | 37.41% | 36.90%           | 37.65% | 38.86% | 41.60% | 53.08% | 36.51%          | 36.60% | 41.06% | 44.82% | 50.84% | 27.76%            | 34.86% | 39.02% | 44.99% | 47.00% |
|            | 23.04.12 | 34.15%           | 37.12% | 45.19% | 50.61% | 56.59% | 19.42%            | 27.39% | 31.06% | 32.51% | 36.86% | 36.50%           | 37.14% | 38.50% | 41.58% | 53.03% | 36.40%          | 36.51% | 41.06% | 44.74% | 50.82% | 27.50%            | 34.73% | 39.00% | 44.95% | 46.95% |
| 31.05.2022 | 0.04.12  | 34.11%           | 37.05% | 45.16% | 50.24% | 56.48% | 18.88%            | 27.34% | 30.88% | 32.33% | 36.15% | 36.00%           | 36.86% | 38.02% | 41.53% | 52.97% | 36.25%          | 36.42% | 40.99% | 44.70% | 50.76% | 27.34%            | 34.69% | 38.99% | 44.94% | 46.94% |
|            | 1.04.12  | 34.18%           | 37.05% | 44.99% | 50.24% | 56.12% | 18.27%            | 27.14% | 30.52% | 32.15% | 35.99% | 35.92%           | 36.58% | 38.00% | 41.45% | 52.88% | 36.04%          | 36.33% | 40.93% | 44.70% | 50.75% | 27.30%            | 34.65% | 38.95% | 44.93% | 46.92% |
|            | 2.04.12  | 34.13%           | 36.99% | 44.82% | 50.22% | 56.02% | 17.77%            | 27.03% | 30.14% | 32.07% | 35.83% | 35.90%           | 36.33% | 37.95% | 41.37% | 52.86% | 35.77%          | 36.28% | 40.89% | 44.68% | 50.72% | 27.29%            | 34.62% | 38.89% | 44.92% | 46.88% |
|            | 3.04.12  | 34.15%           | 36.99% | 44.82% | 50.12% | 55.04% | 17.06%            | 26.82% | 29.59% | 32.05% | 35.00% | 35.65%           | 36.24% | 37.90% | 41.30% | 52.84% | 35.56%          | 36.10% | 40.82% | 44.67% | 50.72% | 27.77%            | 34.50% | 38.85% | 44.92% | 46.76% |

Рисунок 2.21 – Сбор данных о влажности с периодичностью опроса 1 раз в час

Обработку массива данных выполним с помощью регрессионных моделей вида  $W = f(t)$ , где  $W$  – влажность по объему, %;  $t$  – время. Для каждого датчика и каждого слоя почвы построен график изменения влажности и на основе аппроксимирующей функции, продлив линию тренда, получен прогноз времени наступления значения влажности ниже критической от наименьшей влагоёмкости почвы. Момент пересечения трендом критического значения влажности (наименьшей влагоёмкости почвы для конкретной сельскохозяйственной культуры, определяемой экспериментально) соответствует прогнозируемому времени полива

и включения дождевальной машины и насосной станции, что принято за основу в функциональной схеме автоматизации полива (рисунок 2.22).

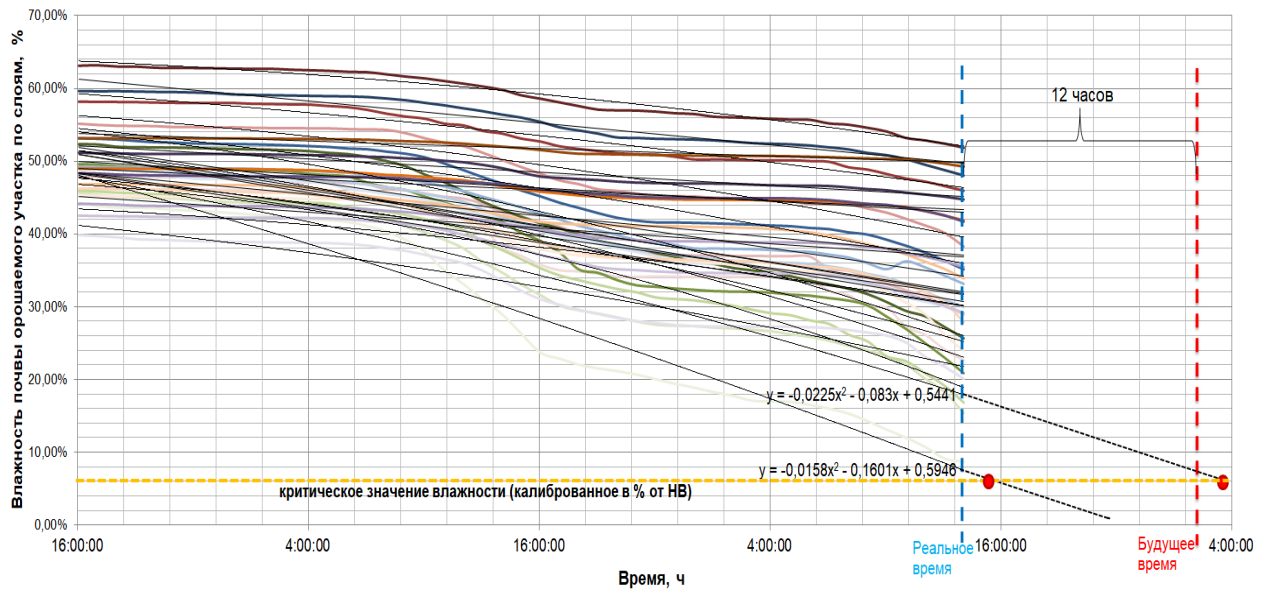


Рисунок 2.22 – Прогнозирование даты полива за 12–24 ч

Поскольку на поле установлено несколько датчиков, возникает необходимость выбора приоритетного из них. Эмпирически установлено, что приоритет следует отдавать датчику с максимальной скоростью снижения влажности, например, в слоях 0,1 и 0,2 м, так как именно он первым сигнализирует о наступлении дефицита влаги в активной корневой зоне для молодого растения. Изменение влажности почвы зависит от влажности воздуха, скорости ветра и интенсивности инсоляции, что учитывается в модели путём корректировки параметров изменения линии тренда (рисунок 2.23).

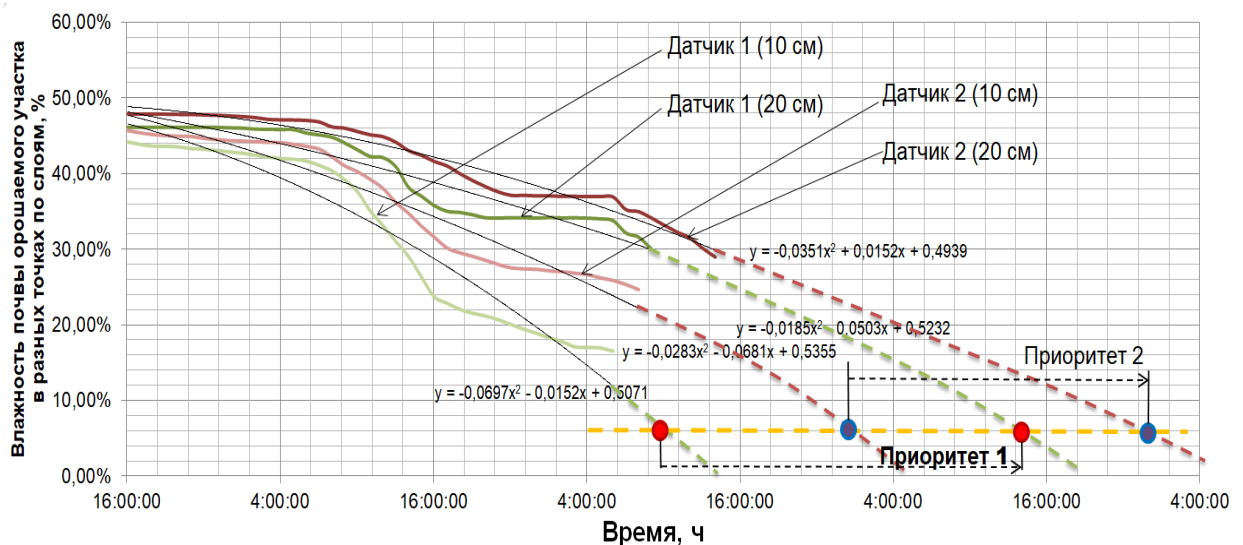


Рисунок 2.23 – Графическое определение приоритетного датчика влажности

Способ управления дождевальнoй машиной и насосным агрегатом, интегрирующий гидрологическое моделирование, автоматизацию сбора данных (дизельметрические датчики послойного контроля влажности) и учёт микрорельефа с помощью точной топографической съёмки, позволяет существенно повысить обоснованность и своевременность полива, что приводит к созданию наилучших условий для роста и развития растений. Согласно исследованиям ученых агрономов, выращивание полевых культур без дефицита влаги позволяет повысить урожайность на 16–31 % [6, 30, 57].

Суть работы насосного агрегата и дождевальнoй машины состоит в том, чтобы своевременно осуществить полив и обеспечить поддержание влажности почвы в заданных пределах для сельскохозяйственной культуры. Включение НА и ДМ в автоматическом режиме происходит по обратной связи (при снижении влажности ниже порога – наименьшей влагоемкости почвы). В таких системах, как правило, существует инерционное запаздывание на время подготовки машины и снижения влажности на слоях почвы ниже критического уровня.

Для создания теории автоматического управления с обратной связью и прогнозирования включения НА и ДМ по данным датчиков влажности мы воспользовались основными положениями прогнозирования состояния. Тогда пуск дождевальнoй машины должен происходить с упреждением, обеспечивающим начало полива в момент, когда влажность в корнеобитаемом слое ещё не достигла значения ниже наименьшей влагоемкости.

Исходными данными для прогнозирования являются фактические значения данных с четырех слоев почвы на расстоянии 0,1 м; 0,2; 0,3 и 0,4 м. Изменения влажности в межполивной период аппроксимируются на коротких интервалах. С периодом опроса 1 раз в час формируется база данных скорости изменения влажности по слоям во времени, которая определяется по формуле:

$$v_i(t_k) = \frac{W_i(t_k) - W_i(t_{k-1})}{T_{\text{оп}}}, \quad (2.39)$$

где  $T_{\text{оп}}$  – период опроса,  $T_{\text{оп}} = 1$  ч;  $W_i(t)$  – текущее значение влажности, %.

Тогда наименьшее прогнозируемое время, при котором следует включить НА и ДМ:

$$t_{\min}(t_k) = \min \{t_{\text{pred},1}(t_k), t_{\text{pred},2}(t_k), t_{\text{pred},3}(t_k), t_{\text{pred},4}(t_k)\}, \quad (2.40)$$

где  $t_{\text{pred},i}$  – упреждающее время, ч (интервал от момента принятия решения о пуске до момента реального поступления воды в зону корней);  $t_k = kT_s$  – каждый дискретный момент времени, который вычисляется как прогнозное время падения влажности до нижнего порога для каждого слоя и принятия решение о поливе.

Отрицательное значение  $v_i$  соответствует снижению влажности. При  $v_i < 0$  прогнозируемое время достижения нижнего порога  $t_{\text{pred},i}$  определяется из линейного уравнения:

$$W_i(t_k) + v_i t_{\text{pred},i} = W_{\text{low},i} \rightarrow t_{\text{pred},i} = \frac{W_{\text{low},i} - W_i(t_k)}{v_i}. \quad (2.41)$$

Если  $v_i \geq 0$ , то влажность растёт или стабильна (например, выпали осадки в виде дождя).

На основании скорости изменения влажности по выражению (2.39) и прогнозируемого времени наступления значения влажности почвы ниже критической формируется сигнал о включении НА и ДМ через  $t_{\min}$ .

Детально рассмотрим работу системы управления на функциональной схеме.

Обоснуем продолжительность работы насосного агрегата (НА) и дождевальной машины (ДМ), которая определяется исходя из дефицита влаги в каждом контролируемом слое, производительности оборудования и требуемой поливной нормы.

Общий дефицит влаги в корнеобитаемом слое рассчитаем по выражению:

$$\Delta W = \sum_{i=1}^4 \alpha_i (W_{\text{пор},i} - W_{\text{тек},i}) h_i S_i, \quad (2.42)$$

где  $\alpha_i$  – весовой коэффициент значимости  $i$ -го слоя (определяется глубиной залегания корневой системы);  $W_{\text{пор},i}$  – верхний порог влажности (наименьшая

влажностью), %;  $W_{\text{тек},i}$  – текущая влажность в  $i$ -м слое, %;  $h_i$  – мощность слоя (0,1 м);  $S$  – площадь полива, га.

Поливная норма  $m$  (м<sup>3</sup>/га):

$$m = \frac{\Delta W}{S} = \sum_{i=1}^4 \alpha_i (W_{\text{пор},i} - W_{\text{тек},i}) h_i. \quad (2.43)$$

Время работы насосного агрегата  $T_{\text{нас}}$  (ч) и, соответственно, дождевальной машины при известной производительности насоса  $Q_{\text{нас}}$  (м<sup>3</sup>/ч):

$$T_{\text{нас}} = \frac{mS}{Q_{\text{нас}} \eta_{\text{пол}}}, \quad (2.44)$$

где  $\eta_{\text{пол}}$  – коэффициент полезного использования поливной воды (учитывает потери на испарение и фильтрацию).

Отдельно для дождевальной машины кругового или фронтального действия время работы  $T_{\text{дм}}$  определяется как отношение длины пути к скорости движения, причём скорость корректируется в зависимости от требуемой поливной нормы:

$$T_{\text{дм}} = \frac{L}{U_{\text{дм}}}; \quad U_{\text{дм}} = f(m), \quad (2.45)$$

где  $L$  – длина прохода машины, м;  $U_{\text{дм}}$  – скорость движения, м/ч, которая выбирается из расчёта обеспечения заданной поливной нормы (чем больше норма, тем меньше скорость).

В автоматическом режиме контроллер, получив данные о текущей влажности по слоям, вычисляет  $T_{\text{нас}}$  и  $T_{\text{дм}}$  по приведённым формулам (2.44) и (2.45), после чего формирует управляющие сигналы на включение оборудования на расчётное время. По окончании времени работы производится повторный опрос датчиков и, при необходимости, коррекция режима.

Для совокупности действий оросительного комплекса с устройством послойного контроля влажности почвы разработана функциональная схема автоматизации (рисунок 2.24).

Функциональная схема автоматизации (см. рисунок 2.24) построена на основе данных, получаемых с датчика влажности. С учетом корнеобитаемого



и  $U_2$  на низкой и высокой частотах (согласно методике, описанной в п. 2.3) микроконтроллер вычисляет коэффициент увлажнённости  $K_v$ . Этот коэффициент является информативным параметром, пропорциональным влажности почвы по объему, и не зависит от абсолютных значений ёмкости, что позволяет компенсировать паразитные влияния и повысить точность измерений. Контроллер (блок управления) непрерывно сравнивает текущее значение  $K_v$  с заданными пороговыми значениями (нижний порог – включение полива, верхний порог – отключение). При снижении влажности ниже нижнего порога контроллер формирует управляющий сигнал на включение насосного агрегата и дождевальной машины. В зависимости дефицита влаги (разности между текущим и пороговым значениями) контроллер также определяет необходимую производительность насоса (например, через частотный преобразователь) или скорость движения дождевальной машины. Это обеспечивает адаптивное регулирование поливной нормы – чем суше почва, тем больше подача воды за счёт увеличения времени работы или снижения скорости перемещения машины. При достижении верхнего порога влажности (или по истечении расчётного времени) контроллер выдаёт команду на отключение оборудования. Таким образом, система реализует замкнутый цикл управления с обратной связью по влажности почвы, минимизируя непроизводительные затраты воды и электроэнергии.

С начала работы алгоритма задается несколько параметров: культура и дата сева для определения величины корневой системы. Датчики непрерывно измеряют влажность по слоям. Если влажность падает ниже порога (особенно на глубине 0,4 м при глубоком расположении корней), блок «Регулирование» рассчитывает необходимое время полива (по принципу: для глубокой корневой системы – больше, для поверхностной – меньше). Затем блок «Управление» включает исполнительные механизмы, которые оснащены источниками питания электрической энергии (ЭЭ). Запускаются двигатель насоса, задвижки, опорные тележки дождевальной машины. В процессе полива датчик давления (РТ), указанный на рисунке 2.24 под номером 5.1, контролирует давление. При

отклонениях давления от расчетного значения блок «Регулирование» корректирует продолжительность полива (пунктирной линией указана обратная связь). По истечении рассчитанного времени система управления отключает насос, закрывает задвижку и останавливает машину. Цикл повторяется в зависимости от данных обратной связи.

Изобразим укрупненно блок функциональной схемы автоматического управления (рисунок 2.25). Разработанный алгоритм автоматического управления реализует замкнутый цикл регулирования полива на основе обратной связи по влажности почвы. На первом этапе система выполняет измерение электрической ёмкости первичных преобразователей на двух частотах – низкой ( $C_{нч}$ ) и высокой ( $C_{вч}$ ). Это позволяет учесть диэлектрические свойства почвы и минимизировать влияние паразитных факторов (электропроводность, засоление). Далее рассчитывается коэффициент увлажнения  $K_v = C_{нч} / C_{вч}$ , который является информативным параметром, пропорциональным влажности почвы по объему и не зависящим от абсолютных значений ёмкости. По калибровочной зависимости  $W_\phi = f(K_v)$  для каждого контролируемого слоя (0,1 м; 0,2; 0,3 и 0,4 м) определяется фактическая влажность  $W_\phi$ . На этапе посевов в систему заносятся исходные данные о культуре, фазе развития, глубине корневой системы и пороговых значениях влажности (наименьшая влагоёмкость  $W_{нв}$ , верхний и нижний пороги). Затем микроконтроллер вычисляет дефицит влажности  $\Delta W = W_{нв} - W_\phi$  с учётом данных о росте растений и параметров оборудования – подачи насосного агрегата  $Q$  (м³/ч) и гидромодуля дождевальной машины  $g$  (л/с на 1 га).

На основании этих данных рассчитывается продолжительность работы оросительного комплекса  $T$ :

$$T = f(m, Q, q, \Delta W), \quad (2.46)$$

где  $m$  – поливная норма, определяемая как суммарный дефицит влаги по слоям с учётом весовых коэффициентов  $\alpha_i$  (глубины залегания корней).

По результатам расчёта контроллер формирует режим работы насосного агрегата и дождевальной машины на расчётный период  $T$ , выдавая команды на

включение / отключение оборудования и при необходимости корректируя скорость движения ДМ и давление насосной станции. Ожидаемый результат – экономия водного ресурса и электрической энергии на 5–15 % по сравнению с традиционным поливом по фиксированному графику, что достигается за счёт точного дозирования воды в соответствии с реальной потребностью растений.

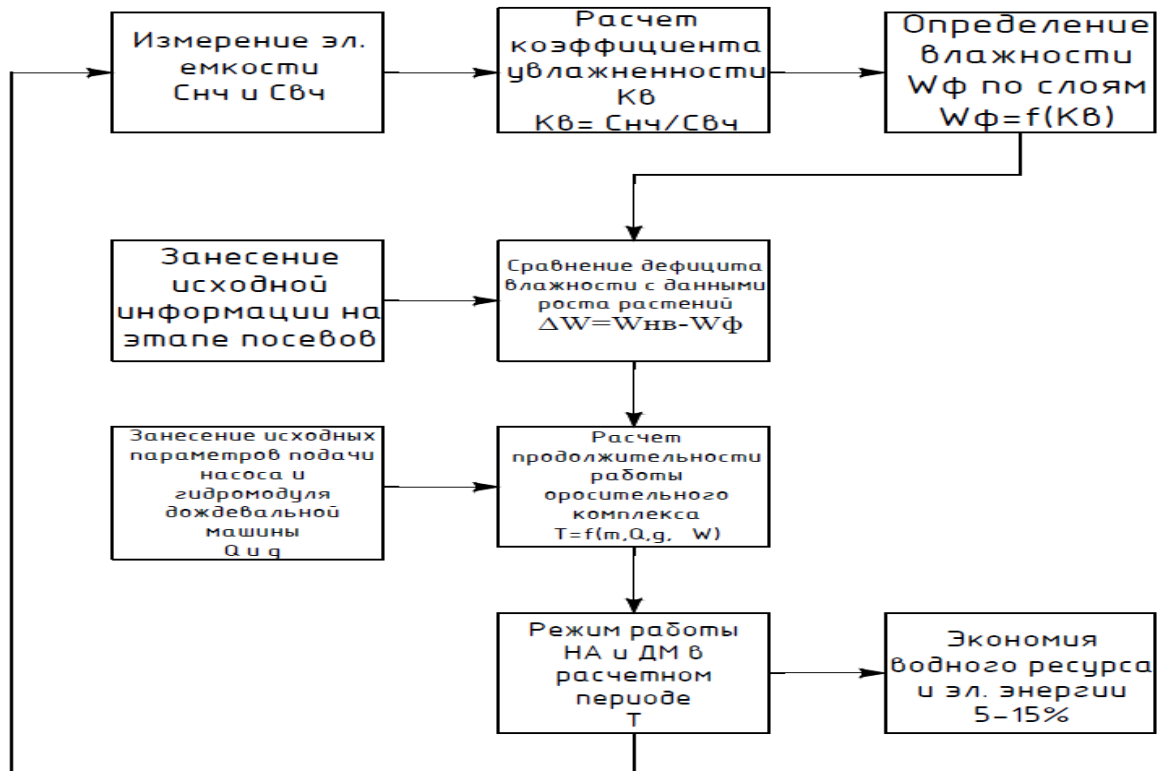


Рисунок 2.25 – Функциональная схема автоматического управления оросительным комплексом на основе послойного контроля влажности почвы

Схема обеспечивает замкнутый цикл управления поливом с послойным контролем влажности, адаптацией под глубину корневой системы и регулированием по давлению.

Разработан алгоритм управления (рисунок 2.26), который начинается с задания исходных параметров: культуры, глубины корней и порогов влажности по слоям 0,1–0,4 м. Далее выполняется опрос датчиков влажности, расположенных на нескольких глубинах: 0,1 м; 0,2; 0,3 и 0,4 м. После этого система анализирует, не опустилась ли влажность хотя бы в одном из слоёв ниже установленного порога. Если влажность в норме, цикл контроля повторяется. Если обнаружено отклонение, приборы управления выдают сигнал о необходимости полива.

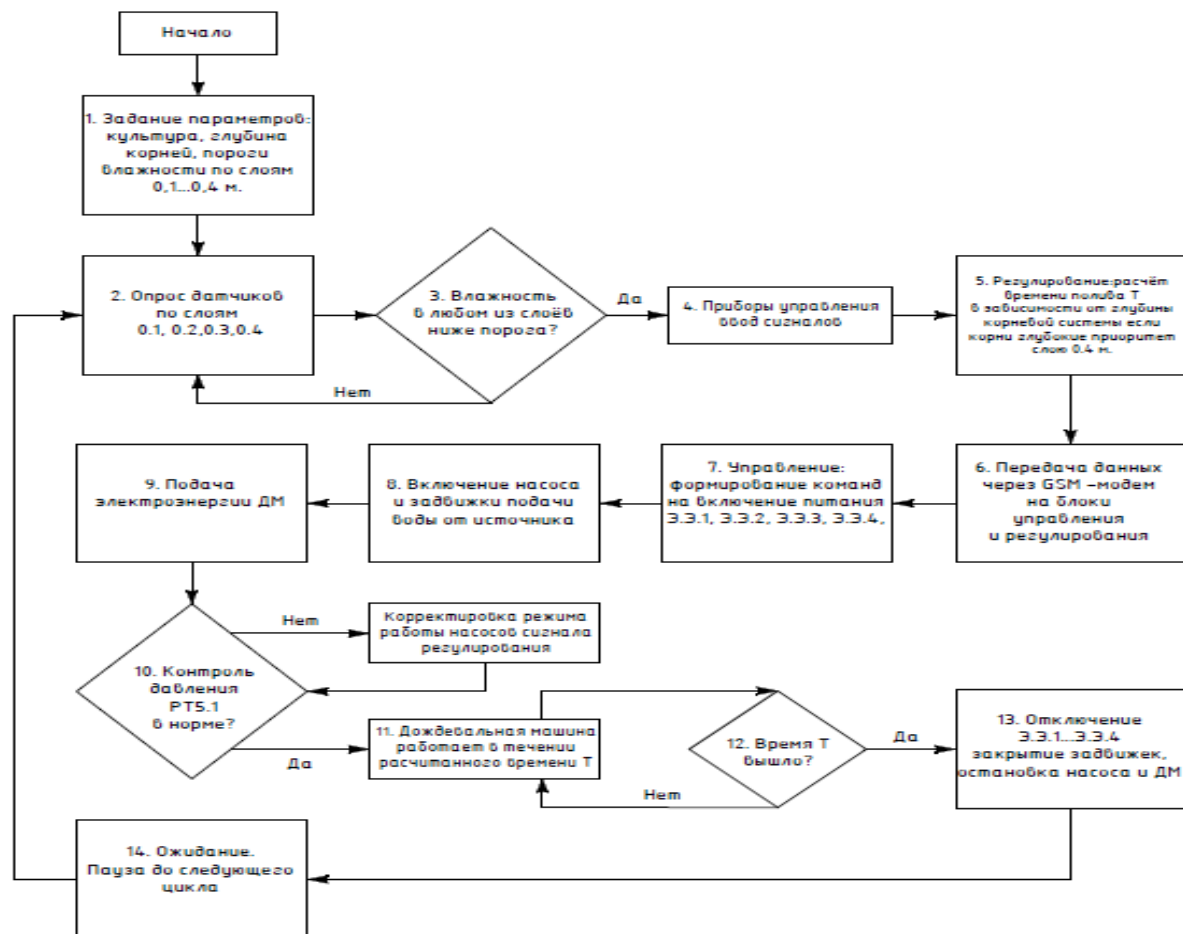


Рисунок 2.26 – Алгоритм автоматического управления поливом на основе послойного контроля влажности

Затем рассчитывается продолжительность работы НА и ДМ полива с учётом глубины корневой системы, при этом проверяется условие: если корни находятся глубже 0,4 м, расчёт выполняется по принципу, указанному в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Теоретическая продолжительность работы НА и ДМ для обеспечения требуемой влажности по слоям

| Слой почвы, м | Влажность почвы в слоях $W$ , % | Повторность включения электропривода ДМ, % | Продолжительность работы НА и ДМ, ч |                                |
|---------------|---------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
|               |                                 |                                            | $\rho = 1,38$ кг/л темно-каштановая | $\rho = 1,2$ кг/л кг/ чернозем |
| 0,4           | 80                              | 10                                         | 215                                 | 180                            |
| 0,4           | 60                              | 30                                         | 88                                  | 72                             |
| 0,3           | 80                              | 50                                         | 48                                  | 42                             |
| 0,3           | 60                              | 70                                         | 36                                  | 34                             |
| 0,2           | 60                              | 100                                        | 24                                  | 23                             |

После расчёта данные передаются через GSM-модем на блоки управления и регулирования. На следующем этапе формируются команды на включение питания, после чего запускаются насос и задвижка подачи воды от источника. Одновременно подаётся электроэнергия на дождевальную машину.

Если давление отклоняется, то выполняется корректировка режима работы насосного оборудования и ДМ. Если параметры в норме, дождевальная машина работает в течение рассчитанного времени  $T$  (см. таблицу 2.2) По окончании времени  $T$  система автоматического управления отключает блоки управления, закрывает задвижки, останавливает насос и дождевальную машину. После этого наступают пауза и ожидание следующего цикла контроля.

Предлагаемый алгоритм обеспечивает автоматический и экономичный полив, поддерживая влажность почвы на нужном уровне и снижая риск как пересушивания, так и переувлажнения.

## 2.6 Выводы по главе

1. Разработано устройство послойного контроля влажности почвы, включающее в себя первичные преобразователи в виде двух параллельно расположенных на измерительной диэлектрической штанге двух обкладок (колец) в количестве 4 штук и вторичный преобразователь в виде измерительной схемы, содержащей микропроцессор, операционный усилитель, выпрямитель, ФНЧ и АЦП.

2. Значение емкости ПП формируется тремя основными составляющими: влажностью и плотностью почвы в совокупности с внешней изоляцией обкладок, диэлектрической проницаемостью и гигроскопичностью материала между обкладками конденсатора и измерительной штанги. Частота колебательного контура влияет на суммарный электрический заряд, сформированный в почве с внешним диэлектриком в связи с инертным свойством дипольного момента молекул воды.

3. Определен коэффициент увлажнения почвы, который рассчитывается как отношение емкости, измеренной (косвенно) на низкой

частоте, к емкости, измеренной на высокой частоте. Он зависит от  $\tau$  (отношение заряда конденсатора, измеренного на высокой и низкой частотах);  $\vartheta$  (отношение высокой частоты к низкой частоте колебательного контура вторичного преобразователя), а также от  $u$  – отношения напряжения на эталонном конденсаторе, измеренного на низкой и высокой частотах.

4. Разработан алгоритм, обеспечивающий полный цикл измерения влажности в четырех слоях почвы посредством определения электрической емкости на двух отличающихся друг от друга частотах. Логика работы определяется последовательностью опроса первичных преобразователей путем мультиплексирования адресными кодами (А, В). Коэффициент увлажнения почвы является информативным параметром, пропорциональным влажности почвы, не зависящим от абсолютных значений емкостей.

5. Разработана структура функциональной схемы автоматизации полива с обратной связью в виде датчиков послойного контроля влажности почвы, позволяющая управлять работой оросительного комплекса для своевременной подачи воды в корнеобитаемый слой культурный растений.

6. Разработана математическая модель изменения продолжительности работы насосного агрегата и дождевальной машины в составе оросительного комплекса на основе измеренного дефицита влажности в корнеобитаемом слое.

7. Предложен алгоритм взаимодействия измерительного блока с электрической силовой частью системы полива, минимизирующий продолжительность работы насосного агрегата и дождевальной машины.

### **3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДАТЧИКА ПОСЛОЙНОГО КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ**

#### **3.1 Методика проведения экспериментальных исследований**

Целью экспериментальных исследований является проверка результатов теоретических исследований зависимостей и параметров измерительного устройства послойного контроля влажности почвы на основе емкостных датчиков, а также алгоритма управления в автоматическом режиме работы насосного агрегата и дождевальной машины с обратной связью в виде датчиков послойного контроля влажности почвы.

Вместе с оценкой сходимости теоретических и экспериментальных данных важно подтвердить работоспособность устройства, реализующего алгоритм измерения влажности почвы послойно четырьмя сенсорами. Особое внимание следует уделить определению точности, стабильности, разрешающей способности по слоям и влиянию различных почвенных параметров. Методика базируется на требованиях ГОСТ 28268-89 «Почвы. Методы определения влажности» [41] и учитывает специфику почвенного мониторинга. Согласно различным нормативным документам [27, 33, 42], измерительная техника также должна удовлетворять:

- правильности переключения схемы, датчиков и частот;
- критерию повторяемости и стабильности измерений;
- адекватности вычисляемого коэффициента увлажнения  $K_v$ ;
- помехоустойчивости и точности в реальных почвенных условиях.

Рассмотрим очередность проведения экспериментальных исследований по этапам.

1-й этап – разработка экспериментального образца автономного датчика послойного контроля влажности почвы, который включает в себя первичные преобразователи, измерительную схему, блоки питания, хранения и передачи данных. Для измерительной схемы выбраны процессор, генератор НЧ/ВЧ, АЦП,

коммутатор, источник питания, доступные на рынке, надежность работы которых проверим в ходе экспериментов.

Необходимо изготовить первичные преобразователи и проверить диапазон изменения емкости при различной влажности почвы, а также выбрать эталонные конденсаторы (известной ёмкости) для калибровки.

2-й этап – подготовка лабораторных образцов почвы с контролируемой влажностью с предварительным выделением нескольких вариантов почвы: высушенная, слабо увлажнённая, оптимальная, переувлажнённая. Для лабораторных исследований потребуется вспомогательное оборудование: весы лабораторные, сушильный шкаф (для гравиметрического контроля влажности), а также осциллограф, мультиметр для контроля сигналов, которые имеют сертификат соответствия качества в РФ и высокий класс точности, и ноутбук (персональный компьютер – ПК) для приёма данных по каналу связи.

3-й этап – проведение лабораторных исследований по программе индивидуальных и комплексных измерений, а именно:

- индивидуальная и комплексная проверка измерительной схемы с подключением вместо первичного преобразователя конденсаторы разной емкости для проверки работоспособности схемы (заведомо меньше и больше ожидаемой ёмкости ПП);

- подготовка почвенных образцов. Используем два вида однородной почвы (суглинок и супесь). Образцы почв необходимо просеять и разделить на партии: сухая (высушенная при 105 °С до постоянной массы), увлажненная (10%-я влажность по массе, т. е. в почву массой 100 г добавить 10 г воды), нормальная (оптимальная – 20%-я влажность по массе) и переувлажненная (35%-я влажность по массе). Перемешивание воды с почвой следует выполнять равномерно для обеспечения адекватности измерений;

- индивидуальная и комплексная проверка с первичными преобразователями по разработанному алгоритму (п. 2.4) с проверкой записи и передачи данных, а также корректировка расчета коэффициента увлажненности почвы и алгоритма расчета.

Необходимо разместить четыре сенсора (первичных преобразователя) на измерительной штанге так, чтобы смоделировать послойный контроль. При этом должен быть обеспечен плотный контакт датчиков с почвой.

Определим повторность лабораторных измерений равную 5 для проверки расчета коэффициента увлажненности почвы конкретной партии с дальнейшей обработкой полученных данных, проверкой сходимости теоретических и экспериментальных данных и оценкой влияния разных факторов. Реальную влажность почвы следует параллельно измерять термостатно-весовым способом и вносить в таблицу первичных данных.

4-й этап – полевая проверка работоспособности, а именно измерения, сохранение и передача данных датчика послойного контроля влажности почвы. На этапе полевых испытаний оценим влияние различных факторов: качество установки измерительной штанги в почву, влияние атмосферного давления на параметры измерительной системы, влияние внешних магнитных и электрических полей на измеренные данные при расчете коэффициента увлажненности. После выполнения комплексной проверки работы датчика согласно алгоритму п. 2.4 необходимо убедиться, что пакет данных корректно рассчитан и передаётся на ПК.

Следует также комплексно оценить скорость расходования энергии на измерение, хранение и передачу данных, что позволит в дальнейшем усовершенствовать макетный образец датчика.

5-й этап – проверка запуска насосного агрегата и дождевальной машины в автоматическом режиме на основе данных датчика послойного контроля влажности.

Данная методика позволяет комплексно проверить как отдельные элементы измерительной системы датчика, так и блоки алгоритма, интегральную работу устройства послойного контроля влажности в схеме автоматического управления оросительным комплексом.

Оценку экономии водного ресурса при внедрении разработанной системы автоматического управления поливом осуществляли в ходе полевого эксперимента путём сравнения двух вариантов орошения:

- 1) базовый вариант – полив по графику, составленному на основе зональных рекомендаций (без обратной связи по влажности);
- 2) разработанный вариант – полив с использованием датчика послойного контроля влажности и автоматического управления насосным агрегатом и дождевальная машина.

Для каждого варианта фиксировали:

- фактический объём поданной воды за сезон  $V_{\phi}$  ( $\text{м}^3$ ) по показаниям расходомера;
- продолжительность работы насосного агрегата  $T_{\text{нас}}$  (ч);
- динамику влажности почвы по слоям (контрольные замеры термостатно-весовым методом).

Экономию воды рассчитывали по формуле:

$$\Delta V = V_{\text{гр}} - V_{\text{ДПКВ}}, \quad (3.1)$$

где  $V_{\text{гр}}$  – объём воды, поданный при поливе по графику,  $\text{м}^3$ ;  $V_{\text{ДПКВ}}$  – объём воды, поданный при автоматическом управлении по данным ДПКВ (датчика послойного контроля влажности почвы),  $\text{м}^3$ .

Экономия воды в процентном выражении:

$$\eta = \frac{\Delta V}{V_{\text{гр}}} \cdot 100 \%. \quad (3.2)$$

Экономия затрат на воду:

$$\mathcal{E}_{\text{вод}} = \Delta I \mathcal{C}, \quad (3.3)$$

где  $\mathcal{C}$  – стоимость 1  $\text{м}^3$  воды с учётом энергозатрат на подачу, руб.

Для сопоставимости результатов оба варианта располагались на участках, одинаковых по площади и почвенно-климатическим условиям, в течение одного вегетационного периода. Контроль влажности осуществляется термостатно-

весовым методом по ГОСТ 28268-89. Результаты эксперимента фиксировали в таблицах и использовали для подтверждения экономической эффективности разработанной системы.

### 3.2 Разработка первичного и вторичного преобразователей

На основании теоретических исследований был принят первичный преобразователь в виде двух колец, которые являются обкладками измерительного конденсатора. Обкладки имеют толщину стенки 0,8 мм, ширину 5 мм, диаметр 28 мм (рисунок 3.1).

Рисунок 3.1 – Медное кольцо измерительного конденсатора ПП



Обкладки конденсатора плотно усажены на диэлектрическую штангу с равным расстоянием друг от друга и других измерительных преобразователей. Проводники припаяны к внутренней части колец. В комплексе внешний вид первичного преобразователя показан на рисунке 3.2.

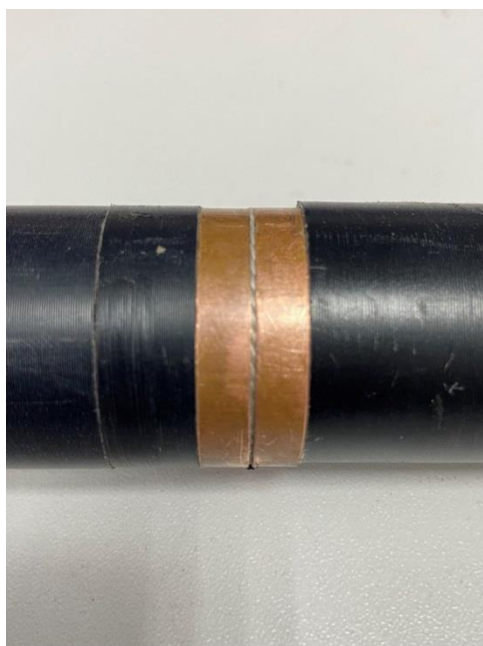


Рисунок 3.2 – Внешний вид первичного преобразователя и измерительной штанги

Для предотвращения окисления медных колец при прямом контакте с почвой (рисунок 3.3) и обеспечения диапазона изменения емкости первичного преобразователя от 20 пФ до 800 мкФ изоляция обкладок выполнена из полимерного материала, схожего по свойствам с материалом измерительной штанги.



Рисунок 3.3 – Внешний вид измерительного конденсатора при прямом взаимодействии с почвой

Крепление сенсоров на измерительной штанге выполнено с равным шагом 100 мм таким образом, чтобы кольца были заподлицо с поверхностью измерительной штанги для плотной установки в почву без нарушения плотности. Некоторые сборочные элементы изображены на рисунке 3.4.

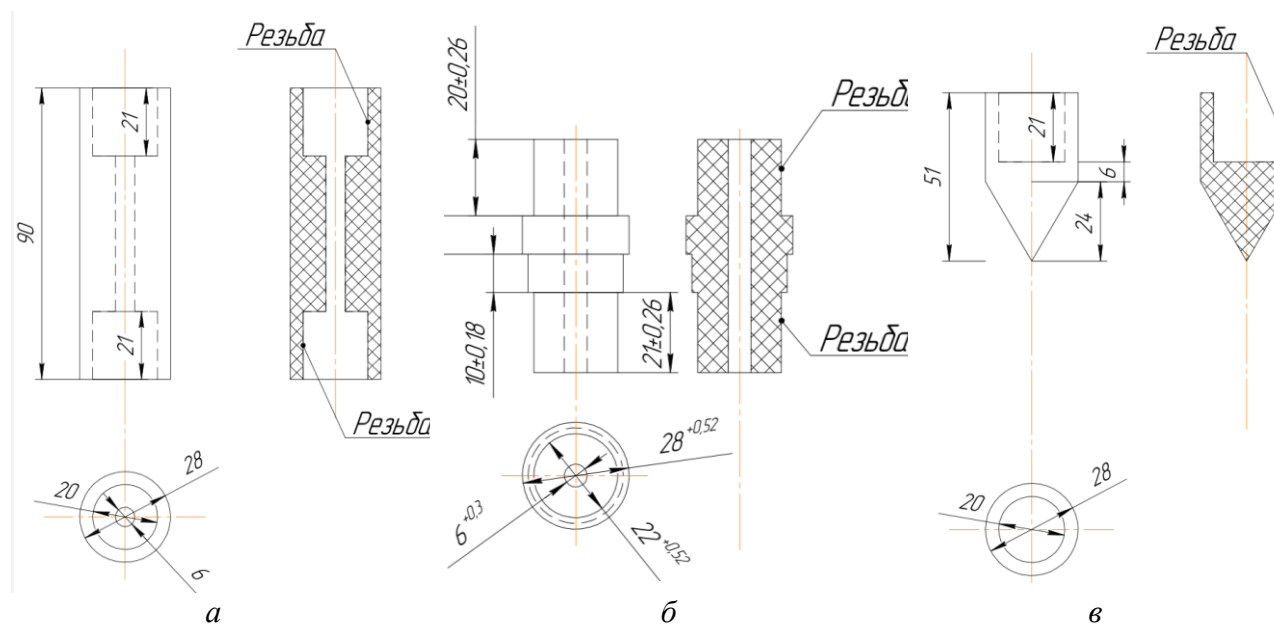


Рисунок 3.4 – Сборочные элементы измерительной штанги: *а* – втулка с внутренней резьбой; *б* – соединительный элемент посадки колец с внешней резьбой; *в* – наконечник измерительной штанги с внутренней резьбой

Соединение всех элементов образует измерительную штангу с тем количеством измерительных конденсаторов, которое необходимо для исследований. Расстояние между сенсорами определяется длиной втулки (см. рисунок 3.4, *a*). Например, при расстоянии между сенсорами 100 мм длина втулки должна быть 90 мм, так как еще 10 мм добирается соединительным элементом посадки колец конденсатора. Жесткость измерительной штанги обеспечена материалом – капролоном [82, 94, 100], который используется для создания сборочных элементов. Измерительная штанга удовлетворяет требованию плотного контакта при установке без нарушения плотности грунта. Выводы от сенсоров уложены в центральное отверстие измерительной штанги и подключены к измерительной схеме.

Разработаны измерительная схема датчика послойного контроля влажности почвы с учетом решений, предложенных в теоретической части работы, а также стенд для проведения экспериментальных исследований по отработке схемотехнических решений, используемых при создании системы дистанционного контроля влажности почвы. На рисунке 3.5 приведена схема стенда для предварительной оценки параметров первичного преобразователя влажности почвы в физическую величину в виде электрической емкости, значение которой используется в результате вторичного преобразования для вычисления безразмерного относительного параметра в виде коэффициента увлажнения  $K_v$ , позволяющего оценить степень увлажнения почвы независимо от её типа.

Коэффициент  $K_v$  определяется в результате деления значения емкости, измеренного при частоте  $f_1$ , на значение емкости, измеренного при частоте  $f_2$ . При этом интервал времени между измерениями емкости на различных частотах ( $f_1$  и  $f_2$ ) не должен превышать 100 мс:

$$K_v = \frac{C(f_1, t_0)}{C(f_2, t_1)}. \quad (3.4)$$

В качестве генератора синусоидального напряжения использован генератор с мостом Вина (рисунок 3.6).

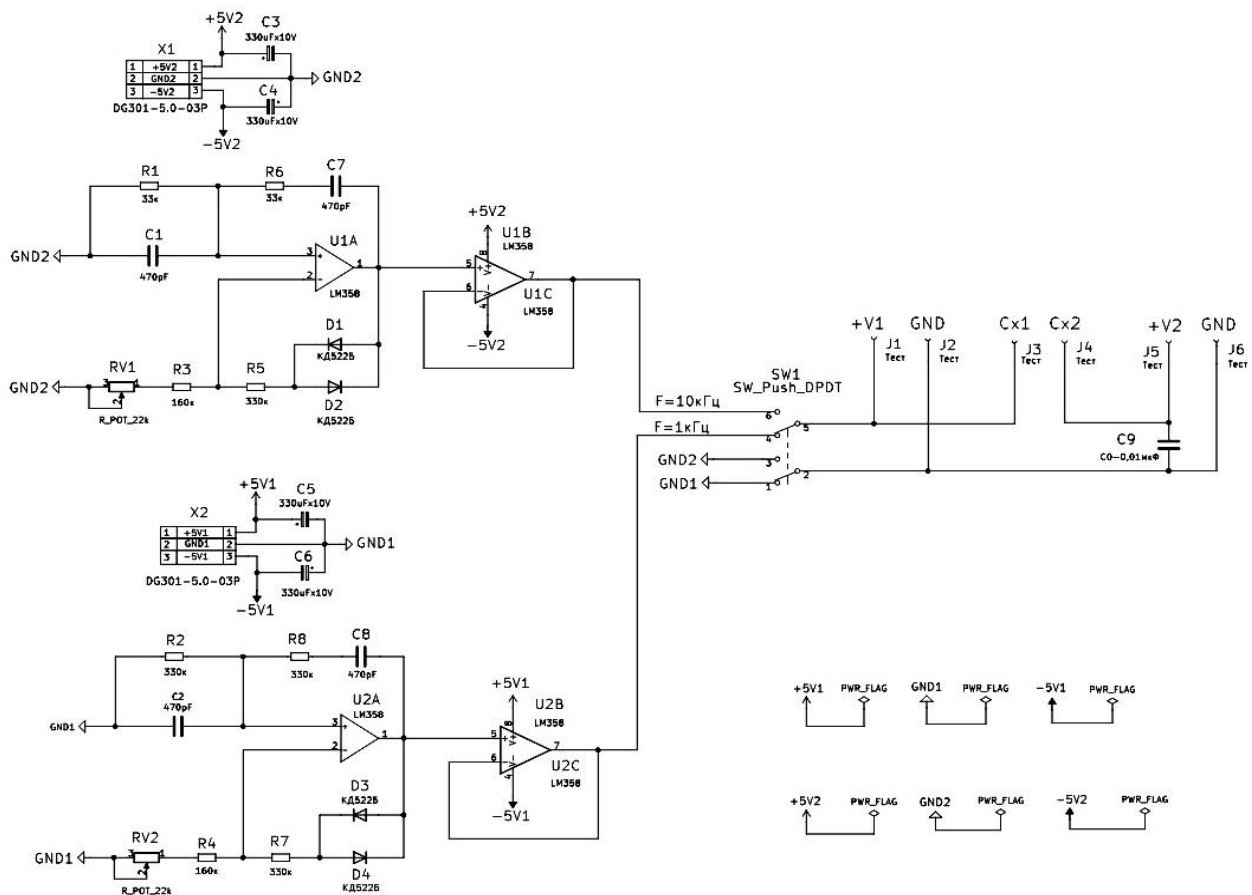


Рисунок 3.5 – Схема стенда предварительной оценки параметров преобразования степени влажности в относительный безразмерный коэффициент для любого типа почвы

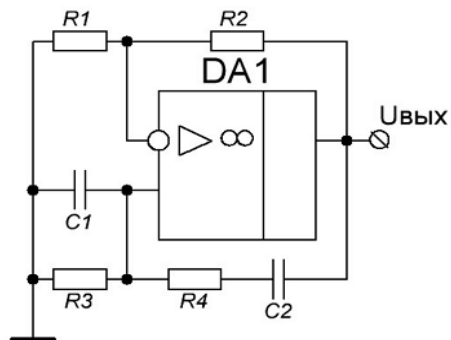


Рисунок 3.6 – Генератор синусоидального напряжения с мостом Вина

В генераторе (см. рисунок 3.6) цепь положительной обратной связи (ПОС), формируемая мостом Вина (конденсаторами  $C1$ ,  $C2$  и резисторами  $R3$ ,  $R4$ ), подключена к прямому входу объекта управления (ОУ), а коэффициент усиления задается резистивным делителем ( $R2$ ,  $R1$ ) в цепи отрицательной обратной связи (ООС), подсоединенной к инвертирующему входу ОУ. Генерирование сигнала обеспечивается соблюдением условия баланса амплитуд и баланса фаз.

Баланс амплитуд соблюдается соотношением номиналов резисторов в цепи ООС, при котором:

$$R2 \geq 2R1, \quad (3.5)$$

из чего следует, что коэффициент отрицательной обратной связи:

$$\beta = \frac{R1}{R1 + R2} = \frac{1}{3}. \quad (3.6)$$

Баланс фаз соблюдается при нулевом фазовом сдвиге сигнала в цепи положительной обратной связи, что достигается при равенстве постоянной времени интегрирующей цепи  $R3C1$  и дифференцирующей цепи  $R4C2$  при  $R3 = R4$  и  $C1 = C2$ . При этом частота генерируемого сигнала:

$$f_{\text{ген}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{R3C1R4C2}} = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (3.7)$$

Из выражения (3.4) определяется частота генерируемого сигнала при задании номинала резистора или номинала конденсатора и частоты сигнала. При этом выражение для определения номинала резистора:

$$R = \frac{1}{2\pi f_{\text{ген}} C}. \quad (3.8)$$

Использованы расчетные значения низкой частоты 1000 Гц, а высокой – 10 000 Гц. Как показывают теоретические данные, при такой разнице частот будет достигаться изменение емкости измерительного конденсатора как первичного преобразователя влажности почвы. Тогда для  $C1 = C2 = 470$  пФ и частоты  $f_{\text{нч}} = 1$  кГц принимаем резисторы  $R1 = R2 = 330$  кОм, а для  $f_{\text{вч}} = 10$  кГц –  $R3 = R4 = 33$  кОм.

Номинал резисторов  $R2$  выбирается равным 330 кОм, а номинал резистора  $R1$  – 160 кОм. Однако точное соблюдение условия  $\beta = 1/3$  практически невозможно, поэтому последовательно с  $R1$  вводится резистор  $R_{\text{п}}$  с регулируемым сопротивлением. Кроме этого, для стабилизации амплитуды генерируемого сигнала в разрыв цепи между выходом ОУ и резистором  $R2$  вводится нелинейный элемент в виде двух диодов, соединённых встречно-

параллельно (см. рисунок 3.5 – для высокой частоты D1, D2, для низкой – D3, D4). Второй ОУ выполняет роль буферного каскада, имеющего высокое входное и низкое выходное сопротивление (U1B и U2B на рисунке 3.5).

Переключатель SW1 (см. рисунок 3.5) обеспечивает подключение к схеме измерения емкости источников синусоидального сигнала, частота генерации которых отличается в 10 раз, а именно  $f_1 = 1$  кГц, а  $f_2 = 10$  кГц.

Для измерения емкости выбран метод измерения двух вольтметров. Первый вольтметр для измерения действующего напряжения подключается к клеммам, условно обозначенным (+U1) и (GND), а второй вольтметр действующего напряжения подключается к клеммам, условно обозначенным (+U2) и (GND). К клеммам Cx1 и Cx2 подключаются выходные электроды первичного преобразователя влажности в электрическую емкость. Емкость C9 (см. рисунок 3.5) является эталонной емкостью  $C_0$ , используемой в данном способе измерения для вычисления измеряемой емкости  $C_x$ . Результат измерения емкости получают вычислением по формуле (2.16). При измерении емкости данным способом должно выполняться условие  $C_0 \gg C_x$ .

Приведенная на рисунке 3.5 схема предназначена для предварительной экспериментальной оценки способа измерения относительного коэффициента увлажненности почвы независимо от её типа, в связи с чем переключение частоты воздействия синусоидального сигнала на схему измерения емкости осуществляется вручную, а измерение действующего значения напряжений U1 и U2 (рисунок 3.5) – по осциллографу путем деления отображённого на экране осциллографа амплитудного значения напряжения на коэффициент 1,41.

Способ двух вольтметров имеет небольшую погрешность при измерении малых значений емкости. При измерении емкости способом двух вольтметров учитываются следующие соотношения:

- сопротивление емкости:

$$X_C = \frac{1}{\omega C}; \quad (3.9)$$

- ток в цепи, создаваемый источником сигнала:

$$I = \frac{U1}{\left[ \frac{1}{\omega C_0} + \frac{1}{\omega C_x} \right]}; \quad (3.10)$$

• напряжение:

$$U2 = \frac{I}{\frac{1}{\omega C_0}}. \quad (3.11)$$

Подставляя в выражение (2.16) выражение (3.7) для тока  $I$ , получим выражение (2.16), но с учетом условия  $C_0 \gg C_x$ :

$$C_x = \frac{C_0 U2}{U1}. \quad (3.12)$$

На первом этапе калибровочные зависимости и чувствительность емкостных датчиков влажности почвы проверяли на лабораторном стенде, разработанном на базе кафедры «Электрооборудование, энергоснабжение и роботизация» ФГБОУ ВО Вавиловский университет. Стенд представляет собой набор почвенных проб (чернозем, суглинков), позволяющих контролируемо изменять влажность и плотность. В каждый образец устанавливали емкостные датчики на различных глубинах (10 см, 20; 30 и 40 см), имитируя послойный контроль. Система контрольных измерений влажности также включала в себя высокоточный термостатно-весовой метод (гравиметрический) для определения абсолютной влажности почвы, используемый в качестве эталонного.

Рассмотрим вторичный преобразователь в комплекте с элементами хранения и передачи данных, коммутационными элементами, а также условия выбора источника питания для проверки работоспособности датчика послойного контроля влажности в реальных полевых условиях.

Общая электрическая схема вторичного преобразователя представлена на рисунке 3.7.

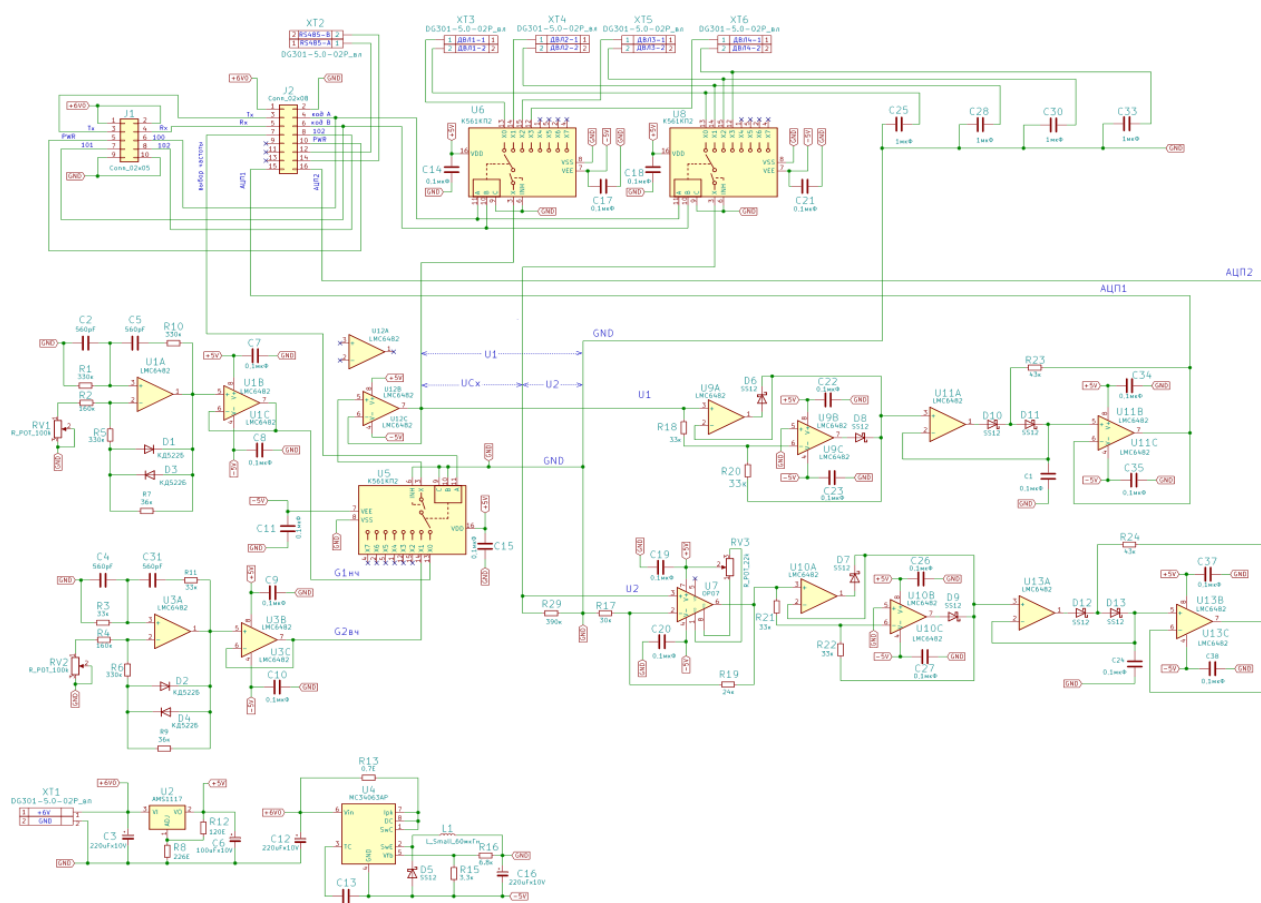


Рисунок 3.7 – Общая электрическая схема соединения измерительной части

Для изготовления такой электрической схемы разработано схемотехническое решение в программе KiCad. Трассировка платы соединения всех элементов показана на рисунке 3.8.

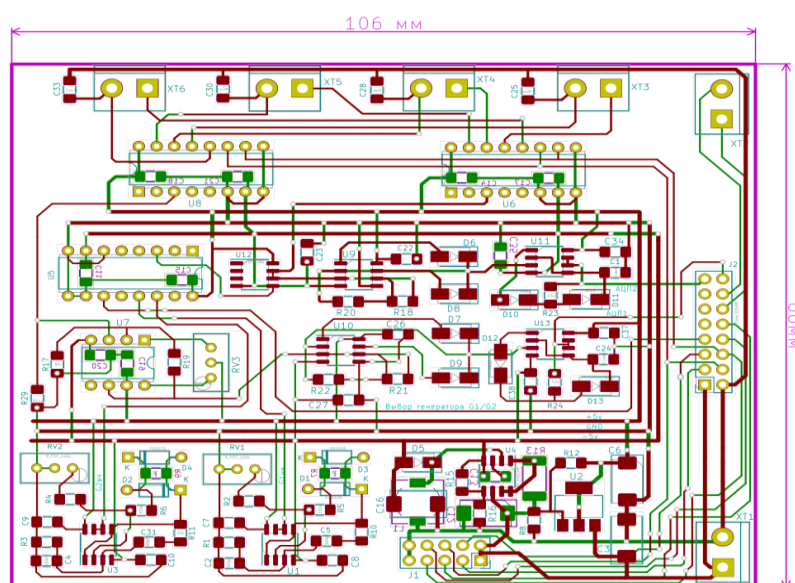


Рисунок 3.8 – Трассировка платы измерительной схемы

Элементы измерительной схемы выбраны с учетом стандартных номиналов (в таблице 3.1).

Таблица 3.1 – Ведомость компонентов измерительной схемы (рисунок 3.7)

| Позиционное обозначение                                          | Наименование                       | Модель              |
|------------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------|
| U2                                                               | Стабилизатор понижающий +6В/+3,6В  | AMS1117 – ADJ       |
| U4                                                               | Преобразователь +6В/–3,6В          | KP1156EY5           |
| U5, U6, U8, U12, U14                                             | Аналоговый мультиплексор 8×1       | K561КП2             |
| U7                                                               | Операционный усилитель             | OP07CP              |
| U1, U3, U9, U10, U11, U13                                        | Операционный усилитель             | LMC6482             |
| Q1, Q2                                                           | Транзистор полевой <i>n</i> -канал | AO3400              |
| D5-D8, D9-D13                                                    | Диод импульсный Шоттки             | SS12                |
| D1-D4                                                            | Стабилитрон 2.7В                   | BZX55-C2V7          |
| C3, C6, C12, C16.                                                | Конденсатор смд тантал             | 220uF×10В<br>тантал |
| C31, C36                                                         | Конденсатор смд тантал             | 100uF×10В<br>тантал |
| C25                                                              | Конденсатор K10-17Б                | 1 мкФ               |
| C28                                                              | Конденсатор K10-17Б                | 0,1 мкФ             |
| C7-C11, C14, C15, C17-C24, C26, C27, C29, C32, C34, C35, C37-C39 | Конденсатор смд                    | 0,15 мкФ            |
| C30                                                              | Конденсатор K10-17Б                | 0,01 мкФ            |
| C33                                                              | Конденсатор K10-17Б                | 0,001 мкФ           |
| C1, C2, C4, C5                                                   | Конденсатор смд                    | 470pF               |
| C13                                                              | Конденсатор смд                    | 220pF               |
| R29                                                              | Резистор C2-29, 0,125Вт            | 511 кОм 1 %         |
| R5, R6                                                           | Резистор смд                       | 1 мОм 1 %           |
| R1, R7, R9, R10                                                  | Резистор смд                       | 330 кОм 1 %         |
| R2, R3                                                           | Резистор смд                       | 160 кОм 1%          |
| R23, R24                                                         | Резистор смд                       | 47 кОм 5%           |
| R3, R11, R18, R20, R21, R22                                      | Резистор смд                       | 33 кОм 1%           |
| R19                                                              | Резистор смд                       | 24 кОм              |
| R26, R28                                                         | Резистор смд                       | 10 кОм              |
| R17                                                              | Резистор смд                       | 8,2 кОм             |
| R16                                                              | Резистор смд 6,8к                  | 6,81 кОм 1 %        |
| R15                                                              | Резистор смд 3,3к                  | 3,32 кОм 1%         |
| R8                                                               | Резистор смд 220Ом                 | 226 Ом 1 %          |
| R12                                                              | Резистор смд 120Ом                 | 121 Ом 1 %          |
| R25, R27                                                         | Резистор смд                       | 100 Ом              |
| R13                                                              | Резистор смд                       | 0,7 Ом              |
| RV1, RV2, RV3                                                    | Резистор подстроечный              | 22кОм (25 кОм)      |
| L1                                                               | Дроссель smd CDR7D43MNN-680NC      | L Small 68мкГн      |
| J1                                                               | Розетка прямая двухрядная на плату | PLD-02×05           |
| J2                                                               | Розетка прямая двухрядная на плату | PLD-02×08           |
| XT1-XT6                                                          | Клеммник винтовой                  | DG301-5,0-02P       |

Отдельно рассмотрим схему электрических контактов микропроцессора (рисунок 3.9).

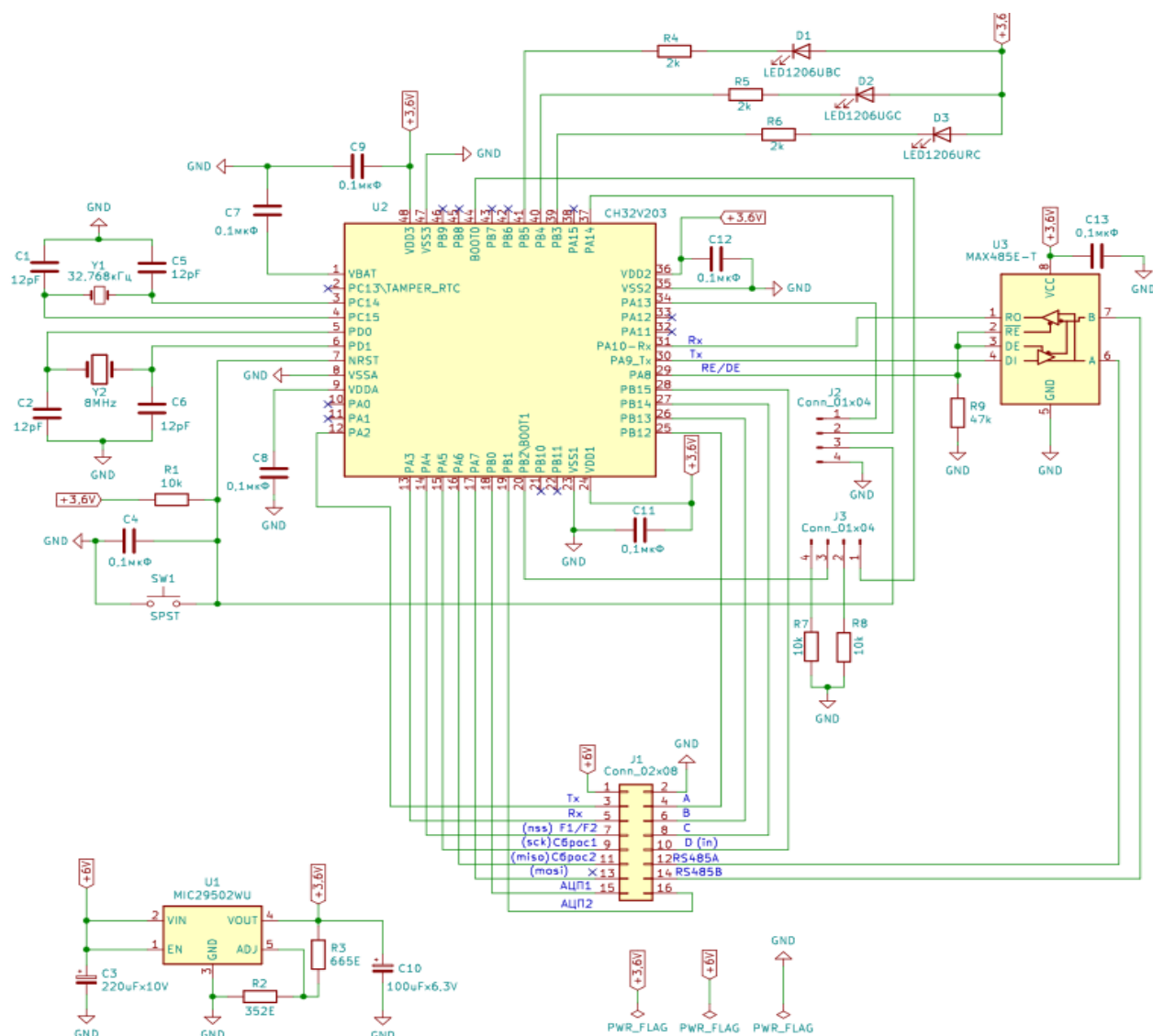


Рисунок 3.9 – Схема электрических контактов центрального процессора датчика послойного контроля влажности почвы

Микроконтроллер CH32V203 построен на современном 32-битном ядре RISC-V, работающем на частоте до 144 МГц. В данный контроллер встроены 12-битный АЦП, два операционных усилителя для согласования сигналов датчиков и несколько интерфейсов (UART, I2C, SPI) для связи. Контроллер потребляет около 50 мкА/МГц, выпускается в компактных корпусах и обладает низкой ценой [8, 19, 33].

В состав схемы сходят следующие компоненты (таблица 3.2).

В готовом варианте исполнения датчика предусмотрен модуль передачи данных, сопряженный с микропроцессором СН32V203С8Т6. Принимаем готовое

решение: модуль SIM800, который подключается через UART интерфейс на скорости 9600 бод (бит/с) и управляется с помощью AT-команд.

Для отправки показаний датчиков модуль SIM800 использует протокол GPRS и может делать это несколькими способами: HTTP/HTTPS; MQTT и SMS.

Схема контактных соединений показана на рисунке 3.10.

Таблица 3.2 – **Ведомость компонентов контактов микропроцессора (см. рисунок 3.9)**

| Позиционное обозначение | Наименование                      | Модель               |
|-------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| U2                      | Микроконтроллер                   | CH32V203C8T6         |
| Y2                      | Кварцевый резонатор 8.000 МГц     | РПК01                |
| Y1                      | Кварцевый резонатор 32,768 кГц    | PK206                |
| U3                      | Интерфейс                         | MAX485ESA+T          |
| U1                      | Стабилизатор понижающий 6В/3,6В   | MIC29502WU           |
| D1                      | Светодиод синего свечения         | LED-1206-UBC         |
| D2                      | Светодиод зеленого свечения       | LED-1206-UGC         |
| D3                      | Светодиод красного свечения       | LED-1206-URC         |
| C3                      | Конденсатор смд тантал            | 220uF×10В тантал     |
| C10                     | Конденсатор смд тантал            | 100uF×6,3В тантал    |
| C4, C7–C9, C11–C13      | Конденсатор смд                   | 0,1мкФ               |
| C1, C5                  | Конденсатор смд                   | 12pF                 |
| C6, C7                  | Конденсатор смд                   | 22pF                 |
| R4, R5, R6              | Резистор смд                      | 2 кОм 5 %            |
| R1, R7, R8              | Резистор смд                      | 10 кОм 5 %           |
| R9                      | Резистор смд                      | 47 кОм 5 %           |
| SW1                     | Кнопка SPST-NO SMD-2 pin          | SMD (KAN3541A-0431B) |
| J1                      | Вилка угловая двухрядная на плату | PLD-02×08R           |
| J2, J3                  | Вилка прямая на плату             | PLS_01×04            |

Модуль требует стабильного напряжения на зажимах 3,7–4,2 В и при поиске сигнала сети, а также передачи данных потребляет пиковый ток до 2 А. Он работает с напряжением источника 5 В, и для согласования с микроконтроллером CH32V203 требуется преобразователь уровня напряжения.

В состав модуля передачи данных входят компоненты, наименование и маркировка которых указана в таблице 3.3.

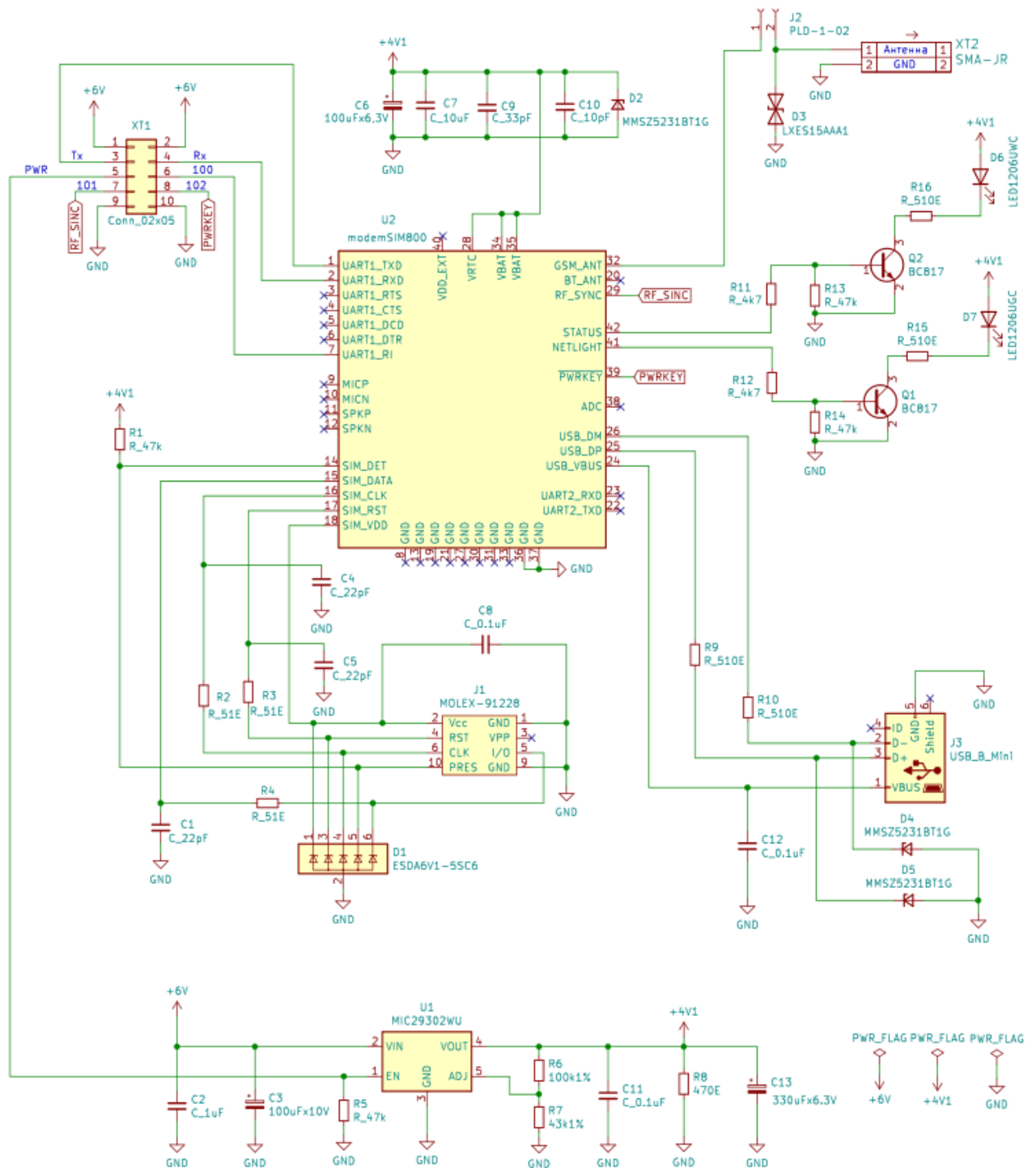


Рисунок 3.10 – Схема контактных соединений модуля передачи данных SIM800

**Таблица 3.3 – Ведомость компонентов модуля передачи данных  
(см. рисунок 3.10)**

| <b>Позиционное обозначение</b> | <b>Наименование</b>               | <b>Модель</b>              |
|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| U2                             | GSM-модуль                        | SIM800C                    |
| U1                             | Понижающий стабилизатор 6В/4,1В   | MIC29302WU                 |
| D1                             | Диодная сборка                    | ESDA6V1-5SC6               |
| D3                             | Защитный диод 15В двухполярный    | LXES15AAA1-153             |
| D2, D4, D5                     | Защитный диод                     | MMSZ5231BT1G               |
| D6                             | Светодиод смд белый               | FYLS-1206 UWC              |
| D7                             | Светодиод смд зеленый             | FYLS-1206 UGC              |
| Q1, Q2                         | Транзистор биполярный n-канал     | BC846                      |
| C13                            | Конденсатор чип тантал            | 330 мкФ×6,3В               |
| C3                             | Конденсатор чип тантал            | 100 мкФ×10В                |
| C6                             | Конденсатор чип тантал            | 100 мкФ×6,3В               |
| C7                             | Конденсатор смд                   | 10 мкФ                     |
| C2                             | Конденсатор смд                   | 1 мкФ                      |
| C8, C11, C12                   | Конденсатор смд                   | 0,1 мкФ                    |
| C9                             | Конденсатор смд                   | 33pF                       |
| C1, C4, C5                     | Конденсатор смд                   | 22 pF                      |
| C10                            | Конденсатор смд                   | 10 pF                      |
| R2, R3, R4                     | Резистор смд                      | 51Е 1 %                    |
| R8                             | Резистор смд                      | 470Е 5 %                   |
| R9, R10, R15, R16              | Резистор смд                      | 510Е 5 %                   |
| R11, R12                       | Резистор смд                      | 4к7 5 %                    |
| R7                             | Резистор смд                      | 43к 1 %                    |
| R5, R13, R14                   | Резистор смд                      | 47к 5 %                    |
| R6                             | Резистор смд                      | 100к 1 %                   |
| XT1                            | Вилка угловая двухрядная на плату | PLD-02×05R                 |
| J2                             | Вилка прямая однорядная на плату  | PLS-01×02                  |
| J3                             | Разъём USB                        | USB_B_mini                 |
| XT2                            | Разъём под антенну                | SMA-JR                     |
| J1                             | Разъём под SIM-карту              | Molex-91228                |
| SMA-JR                         | Антенна GSM                       | ANT 433 BY-433-05 SMA-M 5M |

Рассмотрим схему (рисунок 3.11) и компоненты (таблица 3.4) разъемных КОНТАКТОВ.

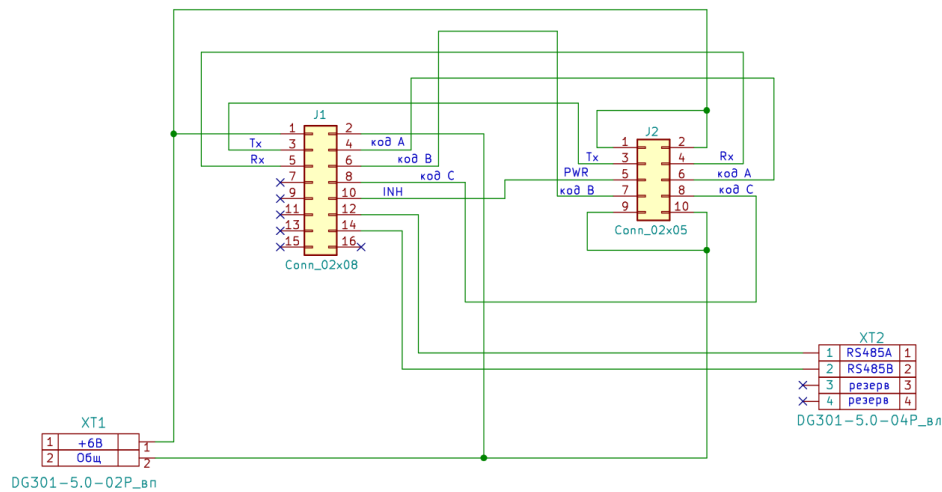


Рисунок 3.11 – Схема электрических соединений клемм и розеток для датчика

Таблица 3.4 – Ведомость соединительных элементов (рисунок 3.11)

| Позиционное обозначение | Наименование                       | Модель        |
|-------------------------|------------------------------------|---------------|
| J1                      | Розетка прямая двухрядная на плату | PBD-02×08     |
| J2                      | Розетка прямая двухрядная на плату | PBD-02×05     |
| XT1                     | Клеммник винтовой                  | DG301-5,0-02P |
| XT2                     | Клеммник винтовой                  | DG301-5,0-04P |

Работоспособность перечисленных модулей датчика послойного контроля влажности почвы определяется параметрами источника питания. Обеспечение автономности работы в течение нескольких месяцев в полевых условиях с регистрацией, хранением и передачей данных достигается качественными параметрами источника питания.

Рассмотрим основные особенности выбора системы автономного питания (САП) при разработке опытного образца датчика послойного контроля влажности почвы. Основными функциональными узлами, входящими в состав САП, являются: солнечная панель (СП), контроллер заряда (КЗ), аккумулятор (АК), устройство согласования с нагрузкой, выполняющего роль буфера (БФ).

Параметры солнечной панели, контроллера заряда и аккумулятора взаимосвязаны, что требует при выборе одного из них учитывать значения остальных параметров. Существенными параметрами солнечной батареи

являются: мощность, номинальное напряжение, напряжение холостого хода, ток в точке максимальной мощности, ток короткого замыкания, габариты и масса. Параметры аккумулятора включают в себя: емкость, А·ч, – количество энергии, которое он может отдавать; номинальное напряжение, В; мощность, Вт, определяемая умножением количества энергии на напряжение ( $A \cdot \text{ч} \cdot V$ ); пусковой ток, А; предельный ток заряда, А; внутреннее сопротивление, мОм; габаритные размеры и массу. Основные параметры контроллера заряда: максимальное входное напряжение от солнечной батареи, В; номинальное выходное напряжение, В; номинальный и максимальный выходной ток, А; технология заряда – ШИМ или MPPT согласно [8, 19, 33].

При этом следует учитывать следующие технические ограничения.

1. Мощность солнечной панели должна быть больше мощности аккумулятора примерно в 1,5–2,0 раза.
2. Мощность контроллера заряда должна быть больше мощности солнечной панели.
3. Максимально допустимое входное напряжение контроллера заряда должно быть больше напряжения холостого хода солнечной панели.
4. Номинальное напряжение солнечной панели и номинальное напряжение контроллера заряда должны иметь одно и то же значение.
5. Номинальное напряжение аккумулятора должно быть меньше выходного напряжения контроллера заряда.
6. Контроллер заряда должен иметь возможность предохранения от перегрузки аккумулятора по току.
7. Желательно применять контроллеры MPPT, которые могут работать в широком диапазоне изменения входного напряжения. Они обеспечивают защиту аккумулятора от перегрузки по току, оптимизируют процесс взаимодействия солнечной панели с аккумулятором. Основные параметры контроллера заряда MPPT (Maximum Power Point Tracking) позволяют оптимизировать процесс заряда, увеличивая КПД системы [4, 65, 98]: номинальное напряжение системы (12 В, 24; 36; 48 В); номинальный ток (10 А, 20 А); максимальное входное

напряжение, определяющее максимальное напряжение, которое контроллер может принимать от солнечных панелей (например, 100 В, 150 В); максимальная мощность солнечных батарей (СБ); ток нагрузки – максимальный ток, который можно подавать на нагрузку (например, 10 А, 20 А); рабочая температура; режимы заряда (обычно трёхстадийный заряд с буферным режимом, а также поддержка различных типов аккумуляторов – герметичных, гелевых, обслуживаемых).

Примем наиболее распространенный уровень напряжения, используемый в средствах автономного питания, – 6 В и далее рассчитаем параметры САП.

В качестве базового временного интервала  $T_{\text{ц}}$ , циклически повторяемого в процессе работы САП, принят временной интервал, равный 24 ч (сутки). Примем, что 12 ч в течение  $T_{\text{ц}}$  осуществляется заряд аккумулятора, а остальные 12 ч – разряд аккумулятора в процессе питания нагрузки и только от энергии, запасенной в аккумуляторе.

Ток потребления (по результатам замеров платы измерения):

$$I_{\text{платы}} = 30 \text{ мА} = 0,03 \text{ А.}$$

Тогда мощность потребления:

$$P_{\text{пи}} = UI_{\text{платы}} = 6 \text{ В} \cdot 0,03 \text{ А} = 0,18 \text{ Вт.}$$

Ток потребления модуля передачи данных SIM800 (по паспортным данным на GSM модем) составляет 2 А.

Время потребления за сеанс передачи, например, SMS-сообщения принято, согласно паспортным данным SIM800 [99, 104], равным 6 мин = 0,1 ч, в качестве среднего времени регистрации модема в сети и передачи сообщения.

Задаваясь количеством передач данных в сутки 3 раза, суммарное время передачи SMS-сообщения за три сеанса в сутки составит 0,3 ч.

Принимая время цикла  $T_{\text{ц}} = 24 \text{ ч}$ , коэффициент заполнения импульсной последовательности:

$$\gamma = \frac{t_{\text{имп}}}{T_{\text{ц}}} = \frac{0,3}{24} = 0,013.$$

Среднее время потребления тока GSM-модемом SIM800 за сутки:

$$I_{\text{мод}} = 2\text{А} \cdot 0,013 = 0,026\text{ А}.$$

Средняя мощность потребления модема за сутки:

$$P_{\text{мод}} = UI_{\text{мод}} = 6\text{ В} \cdot 0,026\text{ А} = 0,156\text{ Вт}.$$

Суммарная мощность потребления датчика

$$P_{\text{сум}} = 0,18 + 0,156 = 0,336\text{ Вт}.$$

Емкость аккумулятора:

$$Q_{\text{акк}} = \frac{P_{\text{сум}} t_{\text{рез}}}{UK_3}, \quad (3.13)$$

где  $t_{\text{рез}}$  – время резервирования, в течение которого нагрузка питается только от аккумулятора (ночное время суток),  $t_{\text{рез}} = 12\text{ ч}$  (с учетом пасмурных дней);  $K_3$  – коэффициент запаса, типовое значение  $K_3 = 0,7$ .

$$Q_{\text{акк}} = \frac{0,336 \cdot 12}{6 \cdot 0,7} = 0,96\text{ А} \cdot \text{ч}.$$

Мощность аккумулятора:

$$P_{\text{акк}} = Q_{\text{акк}} U = 0,96 \cdot 6 = 5,76\text{ Вт}.$$

Примем аккумулятор напряжением 6 В и емкостью не менее 1 А·ч типа DT6012 (6 В 1,2 А·ч с максимальным зарядным током 0,36 А и максимальным разрядным током 16 А).

Выбираем солнечную панель Delta SM 15-12 М 15 Вт 12 В с выходным номинальным напряжением 12 В и выходным током 0,83 А, мощностью 15 Вт, что больше мощности аккумулятора в 2,08 раза. Габаритные размеры солнечной панели 390×355×18 мм<sup>3</sup>.

Для аккумулятора 6 В и солнечной панели на 12 В выбираем наиболее подходящий контроллер заряда типа EPSolar Tracer MPPT 2606LPLI.

Целесообразно с системой автономного питания предусмотреть параллельное включение суперконденсаторов (СК) [3, 11, 34]. Использование СК в составе рассматриваемой системы САП обусловлено способностью СК

быстро накапливать большое количество энергии и также быстро отдавать накопленную энергию в нагрузку, что обеспечивает защиту по току выходного каскада источника питания при импульсном характере потребления в цепи нагрузки (при передаче данных с помощью модема SIM800). Суперконденсаторы выполняет функцию буферного каскада между источником питания и нагрузкой, что снижает жесткость требований к скорости разряда аккумулятора. У суперконденсаторов множество преимуществ при использовании в схемах автономного питания:

- заряд и разрядка происходят быстро, их можно применять, когда нет возможности поставить аккумулятор из-за продолжительной подзарядки;
- они обладают большим количеством циклов заряда-разряда по сравнению с другим оборудованием;
- для проведения подзарядки не требуются специальные устройства, что облегчает их обслуживание;
- они легче аккумуляторов и отличаются меньшими размерами;
- обширный диапазон рабочих температур – от  $-45$  до  $+70$  °C;
- продолжительный срок эксплуатации по сравнению с аккумуляторными батареями;
- высокие значения емкостной плотности и КПД циклов разрядки и т. п.

Принимаем суперконденсаторы типа СКФ5-6В0 емкостью 5 Ф с рабочим напряжением 6 В, допустимым отклонением емкости от номинальной от  $-10$  до  $+20$  %; максимальным импульсным рабочим напряжением 6,4 В (при длительности импульса не более 10 мс и периодом между импульсами не менее 10 с), внутренним сопротивлением постоянному току не более 60 мОм; допустимым отклонением от внутреннего сопротивления  $\pm 5$  %; максимальным пиковым током 10,34 А; максимальной запасаемой энергией 0,085 Вт·ч и массой не более 8,2 г.

Буферное устройство (БФ) на базе суперконденсаторов включается параллельно выходным клеммам для подключения нагрузки основного источника питания 6 В, преобразующего напряжение солнечной панели 12 В в

напряжение питания нагрузки 6 В. Связь между основными параметрами БФ выражается выражением:

$$C_{\text{СК}} = \frac{I_{\text{разр}} t_{\text{разр}}}{\Delta U}, \quad (3.14)$$

где  $C_{\text{СК}}$  – емкость суперконденсатора, Ф;  $I_{\text{разр}}$  – ток разряда, А;  $t_{\text{разр}}$  – время разряда, с;  $\Delta U$  – значение изменения напряжения относительно номинального значения от  $U_{\text{ном}}$  до полного разряда суперконденсатора, В.

Более точный расчет, учитывающий нелинейный характер разряда ионистора с использованием вычисления натурального логарифма, используется, как правило, при окончательном уточнении характеристик буферного узла.

Исходными данными для расчета емкости суперконденсатора (ионистора) являются импульсное значение тока нагрузки (в нашем случае  $I = 2$  А), потребляемого модемом во время одного сеанса передачи SMS-сообщения; время разряда  $t = 6$  мин = 360 с; изменение напряжения на ионисторе 6 В.

$$C_{\text{СК}} = (2 \text{ А} \cdot 360 \text{ с}) / 6 \text{ В} = 720 / 6 = 120 \text{ Ф}.$$

При последовательном соединении двух ионисторов модели VEC3R0107QD (200 Ф, 3 В) получаем эквивалентный ионистор с емкостью 100 Ф и рабочим напряжением 6 В.

Предварительный вариант принципиальной схемы буфера приведен на рисунке 3.12.

На схеме (см. рисунок 3.12) резистор R4 ограничивает выходной ток аккумулятора при включении питания, так как сопротивление разряженного ионистора C1 и C2 представляет собой короткое замыкание. Параллельно резистору R4 подключен транзистор Q1, который при превышении выходного напряжения уровня 1,5 В шунтирует данный резистор, уменьшая потери при протекании через него тока нагрузки и тока заряда ионисторов. Диод D1 исключает возможность протекания тока от ионистора в аккумуляторную батарею. Компаратор U2 управляет включением / отключением транзистора Q1,

Потребность в повышенном значении тока при передаче SMS-сообщения в течение короткого времени может быть существенно снижена за счет тока буферного устройства на базе ионисторов. В результате существенно снижаются требования к аккумулятору и основному источнику питания с выходным напряжением 6 В, включенным между СБ 12 В и нагрузкой 6 В.

Низкое значение рабочего напряжения системы автономного питания (6 В) требует наименьших энергетических затрат. При этом мощность, габаритные размеры и стоимость всего оборудования (аккумулятора, солнечной панели, контроллера заряда) оптимально соотнесены. Низкое рабочее напряжение существенно упрощает выбор ионисторов, поскольку типовое рабочее напряжение ионистора равно 2,7 В, а установка батареи из нескольких ионисторов с целью увеличения напряжения требует существенных финансовых затрат. Стоит отметить, что необходимость введения в состав понижающего преобразователя с напряжения 12 В до напряжения нагрузки 6 В не снижает

эффективности выбранного варианта автономного питания. Оптимальный вариант включает в себя аккумулятор 6 В, солнечную панель 12 В, контроллер МРРТ 12 В, который имеет большой диапазон входных напряжений, а благодаря заложенным в него функциям обеспечивает защиту аккумулятора от перегрузки по току и по напряжению.

### 3.3 Проведение лабораторных и полевых испытаний датчика послойного контроля влажности

Эксперимент позволил смоделировать датчик, который реагирует на градиенты влажности в почвенных колонках и отслеживает реакцию первичных преобразователей на изменение содержания воды в почве, а также построить индивидуальные калибровочные кривые для каждого типа почвы и предложенного датчика. На основе полученных показаний датчиков и данных термостатно-весового метода построены зависимости между емкостным откликом и содержанием влаги по массе и объему. Также оценена скорость отклика первичных преобразователей, их стабильность при длительном воздействии различных уровней влажности и повторяемость результатов.

Эксперимент проведен в контролируемых лабораторных условиях с имитацией различных сценариев увлажнения и высыхания почвы в период, соответствующий периоду вегетации (рисунки 3.13 и 3.14).



Рисунок 3.13 – Отобранные образцы чернозема



Рисунок 3.14 – Образцы суглинка

На первом этапе проведены испытания первичного и вторичного преобразователей в лабораторных условиях. Первичный преобразователь и целиком измерительная штанга изготовлены из вышеуказанных материалов. В качестве изоляционного материала измерительной штанги использован капролон с высоким электрическим сопротивлением  $10^{12}$ – $10^{13}$  Ом. Расчет параметров вторичного преобразователя (а именно генератора низкой и высокой частот) выполнен по формулам (3.4)–(3.9) для создания разницы в 10-кратном размере. Пайка контактов измерительной схемы для лабораторного стенда осуществлена с помощью паяльной станции (рисунок 3.15).

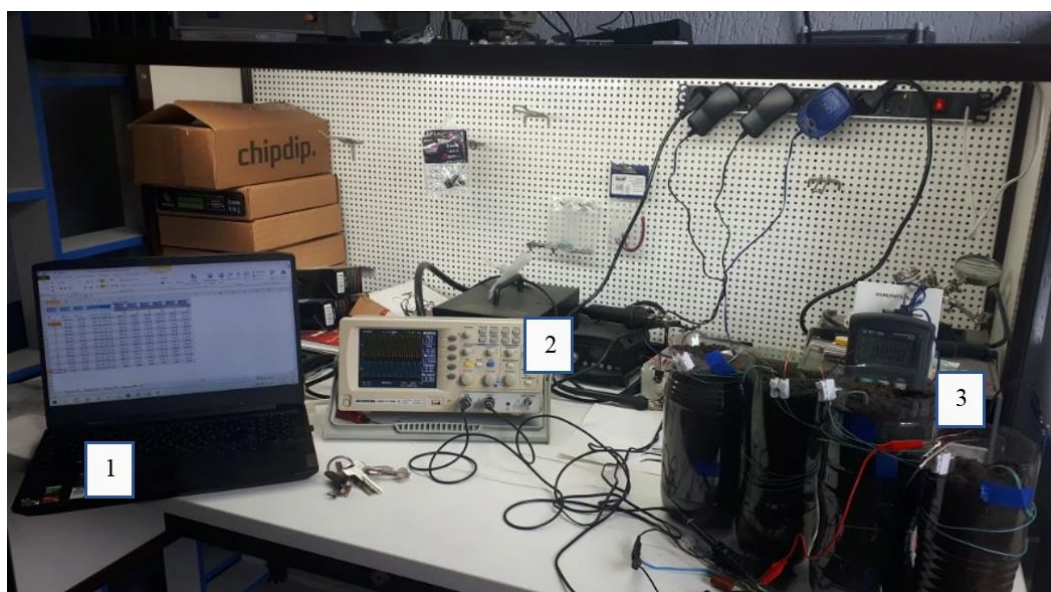


Рисунок 3.15 – Внешний вид лабораторного стенда испытания ПП и ВП:  
 1 – ноутбук; 2 – осциллограф GW instec GDS-71102;  
 3 – измеритель  $RLC$ -цепей E7-22

Внешний вид измерительной схемы представлен на рисунке 3.16.

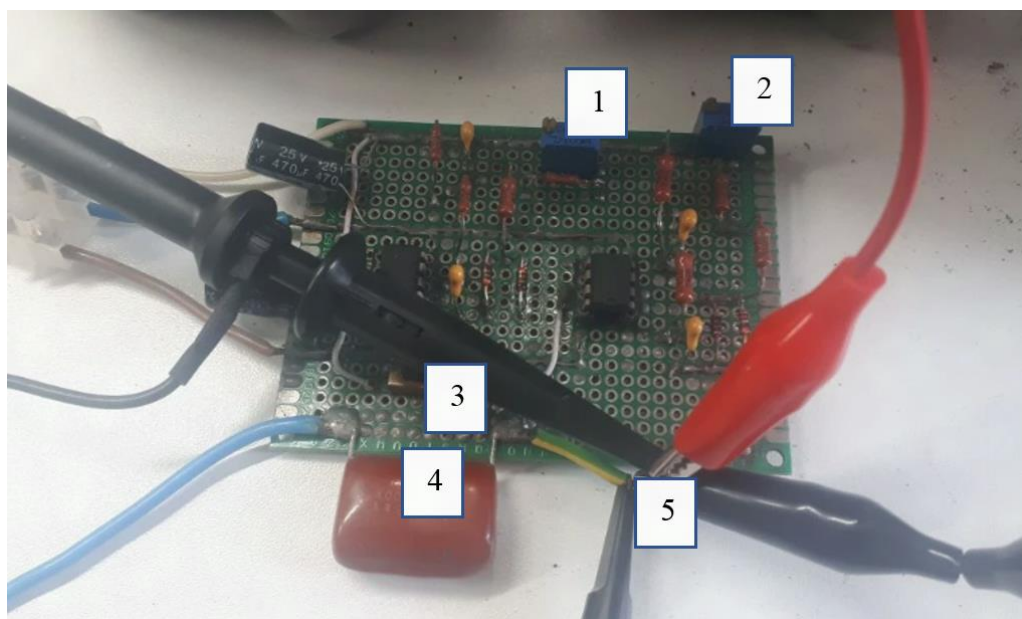


Рисунок 3.16 – Вторичный преобразователь датчика послышного контроля влажности почвы: 1 – генератор низкой частоты; 2 – генератор высокой частоты; 3 – переключатель; 4 – эталонный конденсатор; 5 – выводы на измерительный конденсатор

Значения напряжений на зажимах конденсаторов фиксировали с помощью 2-канального сертифицированного осциллографа типа GW instec GDS-71102. В ходе сборки измерительной схемы и подобранных значений компонентов схемы итоговые значения низкой частоты составили 830–850 Гц, высокой – 7670–7770 Гц (рисунок 3.17).



Рисунок 3.17 – Данные измерений напряжений  $U_1$  и  $U_2$  в измерительной схеме с первичными преобразователями на низкой и высокой частотах

Данные измерений занесены в таблицы с указанием даты, времени измерения и подачи воды для изменения влажности почвы.

На втором этапе экспериментальных исследований датчик послойного контроля влажности почвы с емкостными сенсорами в комплексе был проверен на опытном участке Фитотронно-тепличного комплекса УНПК «Агроцентр». Датчик был инсталлирован в различных точках теплицы на заранее определенные глубины 10 см, 20; 30; 40 см, охватывая корнеобитаемый слой различных сельскохозяйственных культур в еврокубах объемом 1 м<sup>3</sup>. Параллельно с автоматическим сбором данных в контрольных точках проводили отбор проб почвы для определения влажности традиционным теростатно-весовым методом, что позволило оценить точность показаний датчиков в реальных условиях эксплуатации (рисунок 3.18).



Рисунок 3.18 – Проверка датчика полной комплектации в условиях теплицы УНПК «Агроцентр»

В ходе эксперимента в условиях тепличного комплекса зафиксированы изменения коэффициента увлажнения почвы на глубине от поверхности 10 мм; 20; 30 и 40 мм. Работоспособность датчика в условиях теплицы была подтверждена. Дальнейшие исследования проводили в полевых условиях.

Данный эксперимент позволил обосновать применимость емкостных датчиков для неинвазивного мониторинга влажности почвы в условиях

реального сельскохозяйственного производства, выявить факторы, влияющие на их показания (например, плотность почвы, содержание солей), и разработать рекомендации по их оптимальному размещению, глубине установки и эксплуатации для обеспечения максимально точного послойного контроля.

Сбор данных о влажности почвы по слоям осуществлен по разным каналам связи, в том числе с помощью GSM-модуля SIM800 (рисунок 3.19). В учебном хозяйстве УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Вавиловский университет на полигоне опережающего развития мелиорации проведен сбор данных с датчиков влажности послойного контроля, которые ввели в таблицу (рисунок 3.20).



Рисунок 3.19 – Установка датчиков послойного контроля влажности на поле УНПО «Поволжье» (культура – пшеница)

Сбор данных осуществляли с помощью функции передачи данных по радиоканалу LoraWan и GSM-модуля SIM800 на центральный блок сбора данных, который пакетом через Интернет передает данные в установленную таблицу.

Массив данных обрабатывался математической моделью функцией:

$$w = f(t), \quad (3.15)$$

где  $w$  – влажность почвы, откалиброванная в соответствии с коэффициентом увлажнения, %.

| Дата       | Время    | 10 см           | 20 см  | 30 см  | 40 см  | 50 см  | 10 см            | 20 см  | 30 см  | 40 см  | 50 см  | 10 см           | 20 см  | 30 см  | 40 см  | 50 см  | 10 см           | 20 см  | 30 см  | 40 см  | 50 см  | 10 см            | 20 см  | 30 см  | 40 см  | 50 см  |
|------------|----------|-----------------|--------|--------|--------|--------|------------------|--------|--------|--------|--------|-----------------|--------|--------|--------|--------|-----------------|--------|--------|--------|--------|------------------|--------|--------|--------|--------|
|            |          | Датчик 1 - нд 1 |        |        |        |        | Датчик 2 - вер 1 |        |        |        |        | Датчик 3 - нд 2 |        |        |        |        | Датчик 4 - сред |        |        |        |        | Датчик 5 - вер 2 |        |        |        |        |
| 30.05.2022 | 16:04:12 | 46.13%          | 47.89% | 55.15% | 58.12% | 63.12% | 44.17%           | 45.68% | 45.98% | 49.00% | 52.34% | 48.19%          | 48.96% | 49.25% | 53.14% | 59.64% | 45.26%          | 46.25% | 46.85% | 48.90% | 53.17% | 39.86%           | 42.52% | 44.17% | 48.36% | 51.16% |
|            | 17:04:12 | 46.12%          | 47.85% | 54.98% | 58.15% | 63.18% | 43.85%           | 45.38% | 45.82% | 49.02% | 52.30% | 48.15%          | 48.90% | 49.20% | 53.08% | 59.61% | 45.24%          | 46.24% | 46.85% | 48.90% | 53.17% | 39.72%           | 42.48% | 44.10% | 48.30% | 51.09% |
|            | 18:04:12 | 46.12%          | 47.85% | 54.88% | 58.14% | 63.01% | 43.62%           | 45.15% | 45.68% | 49.32% | 51.99% | 48.06%          | 48.81% | 49.16% | 52.97% | 59.62% | 45.20%          | 46.22% | 46.82% | 48.90% | 53.16% | 39.56%           | 42.44% | 44.03% | 48.15% | 51.08% |
|            | 19:04:12 | 46.12%          | 47.85% | 54.85% | 58.12% | 63.00% | 43.60%           | 45.02% | 45.60% | 49.16% | 51.80% | 47.98%          | 48.69% | 49.14% | 52.77% | 59.68% | 45.20%          | 46.17% | 46.81% | 48.91% | 53.16% | 39.28%           | 42.42% | 44.03% | 48.09% | 51.02% |
|            | 20:04:12 | 46.13%          | 47.82% | 54.82% | 58.05% | 62.84% | 43.53%           | 44.93% | 45.46% | 49.17% | 51.80% | 47.98%          | 48.69% | 49.12% | 52.61% | 59.68% | 45.19%          | 46.11% | 46.77% | 48.86% | 53.16% | 39.21%           | 42.36% | 43.85% | 48.03% | 51.00% |
|            | 21:04:12 | 46.12%          | 47.81% | 54.69% | 58.02% | 62.82% | 43.30%           | 44.90% | 45.41% | 49.10% | 51.86% | 47.86%          | 48.43% | 49.05% | 52.55% | 59.60% | 45.09%          | 45.99% | 46.75% | 48.90% | 53.15% | 39.12%           | 42.34% | 43.84% | 48.03% | 51.00% |
|            | 22:04:12 | 46.12%          | 47.75% | 54.68% | 58.00% | 62.80% | 43.21%           | 44.65% | 45.09% | 48.99% | 51.80% | 47.59%          | 48.39% | 49.02% | 52.43% | 59.44% | 45.08%          | 45.83% | 46.74% | 48.93% | 53.15% | 39.03%           | 42.30% | 43.84% | 48.01% | 50.99% |
|            | 23:04:12 | 46.10%          | 47.70% | 54.63% | 58.01% | 62.77% | 43.06%           | 44.48% | 45.01% | 48.93% | 51.75% | 47.52%          | 48.27% | 49.00% | 52.40% | 59.36% | 45.05%          | 45.62% | 46.72% | 48.93% | 53.13% | 38.93%           | 42.26% | 43.83% | 48.00% | 50.98% |
|            | 0:04:12  | 46.09%          | 47.62% | 54.66% | 58.01% | 62.73% | 42.95%           | 44.36% | 44.85% | 48.81% | 51.68% | 47.52%          | 48.13% | 49.00% | 52.36% | 59.18% | 45.04%          | 45.82% | 46.73% | 48.93% | 53.13% | 38.92%           | 42.25% | 43.80% | 47.99% | 50.98% |
|            | 1:04:12  | 46.01%          | 47.53% | 54.59% | 57.89% | 62.70% | 42.68%           | 44.30% | 44.80% | 48.77% | 51.62% | 47.48%          | 48.00% | 48.98% | 52.33% | 59.11% | 45.00%          | 45.72% | 46.68% | 48.90% | 53.12% | 38.90%           | 42.24% | 43.79% | 47.90% | 50.96% |
| 31.05.2022 | 2:04:12  | 45.88%          | 47.40% | 54.55% | 57.85% | 62.70% | 42.42%           | 44.21% | 44.67% | 48.74% | 51.58% | 47.40%          | 47.93% | 48.86% | 52.26% | 59.07% | 44.98%          | 45.70% | 46.60% | 48.85% | 53.10% | 38.85%           | 42.24% | 43.77% | 47.90% | 50.92% |
|            | 3:04:12  | 45.85%          | 47.18% | 54.55% | 57.80% | 62.68% | 42.16%           | 44.13% | 44.44% | 48.59% | 51.49% | 47.22%          | 47.81% | 48.80% | 52.13% | 59.00% | 44.87%          | 45.62% | 46.50% | 48.82% | 53.08% | 38.81%           | 42.23% | 43.70% | 47.80% | 50.88% |
|            | 4:04:12  | 45.82%          | 47.10% | 54.52% | 57.77% | 62.65% | 42.00%           | 44.08% | 44.28% | 48.57% | 51.38% | 47.11%          | 47.68% | 48.70% | 52.07% | 58.98% | 44.80%          | 45.43% | 46.35% | 48.77% | 53.06% | 38.77%           | 42.20% | 43.62% | 47.80% | 50.84% |
|            | 5:04:12  | 45.81%          | 47.08% | 54.51% | 57.58% | 62.42% | 41.89%           | 43.87% | 44.19% | 48.09% | 51.15% | 46.88%          | 47.32% | 48.54% | 51.96% | 58.84% | 44.79%          | 45.03% | 46.01% | 48.64% | 53.01% | 38.74%           | 42.14% | 43.60% | 47.84% | 50.80% |
|            | 6:04:12  | 45.38%          | 47.02% | 54.41% | 57.42% | 62.28% | 41.65%           | 43.60% | 43.72% | 47.69% | 50.98% | 46.16%          | 47.08% | 48.41% | 51.74% | 58.91% | 44.74%          | 44.93% | 45.64% | 48.51% | 53.00% | 38.62%           | 42.03% | 43.55% | 47.80% | 50.78% |
|            | 7:04:12  | 45.11%          | 46.82% | 54.35% | 57.05% | 62.23% | 41.08%           | 43.22% | 43.41% | 47.05% | 50.59% | 45.89%          | 46.80% | 48.20% | 51.64% | 58.82% | 44.64%          | 44.72% | 45.19% | 48.33% | 52.95% | 38.41%           | 41.82% | 43.38% | 47.80% | 50.52% |
|            | 8:04:12  | 44.80%          | 46.16% | 54.30% | 56.53% | 61.84% | 40.35%           | 42.19% | 43.08% | 46.43% | 50.03% | 45.49%          | 46.42% | 48.02% | 51.32% | 58.62% | 44.27%          | 44.44% | 44.88% | 48.13% | 52.84% | 38.05%           | 41.60% | 43.19% | 47.72% | 50.55% |
|            | 9:04:12  | 44.03%          | 46.00% | 53.85% | 56.13% | 61.63% | 39.16%           | 41.00% | 42.61% | 46.00% | 49.29% | 45.17%          | 46.06% | 47.55% | 51.03% | 58.38% | 44.01%          | 43.95% | 44.60% | 48.02% | 52.75% | 37.67%           | 41.35% | 43.02% | 47.61% | 50.39% |
|            | 10:04:12 | 43.12%          | 45.55% | 53.15% | 55.84% | 61.88% | 37.55%           | 40.25% | 42.03% | 45.13% | 48.46% | 44.69%          | 45.55% | 47.10% | 50.33% | 58.02% | 43.28%          | 43.21% | 44.32% | 47.78% | 52.67% | 37.14%           | 41.01% | 42.77% | 47.60% | 50.29% |
|            | 11:04:12 | 42.25%          | 45.12% | 52.64% | 55.16% | 61.02% | 35.02%           | 39.21% | 41.35% | 44.20% | 47.11% | 44.15%          | 45.01% | 46.53% | 49.68% | 57.68% | 42.56%          | 42.72% | 44.00% | 47.60% | 52.57% | 36.55%           | 40.52% | 42.51% | 47.24% | 50.06% |
|            | 12:04:12 | 42.10%          | 44.87% | 52.08% | 54.92% | 60.66% | 33.09%           | 38.01% | 40.55% | 43.48% | 45.85% | 43.26%          | 44.43% | 45.88% | 48.77% | 57.27% | 41.86%          | 42.01% | 43.60% | 47.38% | 52.41% | 36.00%           | 39.89% | 42.23% | 47.15% | 49.86% |
|            | 13:04:12 | 40.88%          | 44.13% | 51.16% | 54.16% | 60.27% | 31.00%           | 36.15% | 38.97% | 42.55% | 44.44% | 42.68%          | 43.35% | 45.12% | 47.81% | 56.86% | 40.39%          | 41.23% | 43.13% | 47.04% | 52.21% | 34.95%           | 39.22% | 41.92% | 47.01% | 49.60% |
|            | 14:04:12 | 38.14%          | 43.00% | 50.18% | 53.85% | 59.82% | 28.98%           | 34.72% | 37.81% | 41.69% | 43.74% | 42.11%          | 42.35% | 44.40% | 46.93% | 56.40% | 39.39%          | 40.33% | 42.56% | 46.63% | 52.01% | 33.58%           | 38.55% | 41.48% | 46.80% | 49.60% |
|            | 15:04:12 | 37.00%          | 42.41% | 49.19% | 53.11% | 59.06% | 26.31%           | 33.03% | 36.54% | 40.15% | 42.36% | 41.33%          | 41.53% | 43.65% | 45.98% | 56.00% | 38.54%          | 39.40% | 42.02% | 46.15% | 51.80% | 32.18%           | 37.94% | 41.05% | 46.52% | 48.44% |
|            | 16:04:12 | 35.75%          | 41.60% | 48.29% | 52.70% | 58.59% | 23.69%           | 31.59% | 35.29% | 39.05% | 41.46% | 40.34%          | 40.72% | 42.79% | 45.17% | 55.41% | 37.89%          | 38.77% | 41.66% | 45.81% | 51.64% | 31.03%           | 37.11% | 40.64% | 46.11% | 47.89% |
|            | 17:04:12 | 35.01%          | 41.00% | 47.36% | 52.05% | 58.08% | 22.65%           | 30.16% | 34.29% | 37.45% | 40.77% | 39.68%          | 40.05% | 41.99% | 44.29% | 54.65% | 37.42%          | 38.11% | 41.43% | 45.57% | 51.26% | 30.27%           | 36.56% | 40.21% | 45.84% | 47.80% |
|            | 18:04:12 | 34.66%          | 39.90% | 46.84% | 51.69% | 57.67% | 22.04%           | 29.52% | 33.65% | 35.12% | 39.89% | 39.24%          | 39.66% | 41.13% | 43.58% | 54.22% | 37.03%          | 37.54% | 41.30% | 45.29% | 51.63% | 29.58%           | 36.02% | 39.84% | 45.63% | 47.54% |
|            | 19:04:12 | 34.56%          | 39.07% | 46.15% | 51.40% | 57.09% | 21.53%           | 29.06% | 33.02% | 34.66% | 39.06% | 38.64%          | 39.02% | 40.50% | 42.86% | 53.79% | 36.85%          | 37.04% | 41.20% | 45.13% | 50.90% | 29.00%           | 35.44% | 39.50% | 45.44% | 47.40% |
|            | 20:04:12 | 34.15%          | 38.28% | 45.92% | 51.10% | 56.99% | 21.17%           | 28.53% | 32.44% | 33.64% | 38.60% | 38.07%          | 38.44% | 39.84% | 42.22% | 53.26% | 36.66%          | 36.77% | 41.11% | 44.80% | 50.88% | 28.46%           | 35.16% | 39.32% | 45.26% | 47.20% |
|            | 21:04:12 | 34.12%          | 37.58% | 45.53% | 50.86% | 56.96% | 20.68%           | 27.68% | 31.99% | 32.85% | 38.63% | 37.62%          | 38.00% | 39.17% | 41.63% | 53.00% | 36.58%          | 36.63% | 41.07% | 44.80% | 50.86% | 28.03%           | 35.03% | 39.14% | 45.08% | 47.00% |
|            | 22:04:12 | 34.15%          | 37.12% | 45.17% | 50.90% | 56.82% | 20.04%           | 27.54% | 31.28% | 32.74% | 37.41% | 36.00%          | 37.65% | 38.86% | 41.60% | 53.08% | 36.51%          | 36.60% | 41.06% | 44.82% | 50.84% | 27.76%           | 34.86% | 39.02% | 44.99% | 47.00% |
|            | 23:04:12 | 34.15%          | 37.12% | 45.19% | 50.81% | 56.59% | 19.42%           | 27.39% | 31.05% | 32.51% | 36.86% | 36.50%          | 37.14% | 38.50% | 41.58% | 53.03% | 36.40%          | 36.51% | 41.06% | 44.74% | 50.82% | 27.50%           | 34.73% | 39.00% | 44.95% | 46.95% |
|            | 0:04:12  | 34.11%          | 37.05% | 45.16% | 50.24% | 56.49% | 18.88%           | 27.34% | 30.88% | 32.33% | 36.18% | 36.00%          | 36.86% | 38.02% | 41.53% | 52.91% | 36.25%          | 36.42% | 40.99% | 44.70% | 50.80% | 27.34%           | 34.69% | 38.99% | 44.84% | 46.84% |
|            | 1:04:12  | 34.18%          | 37.05% | 44.99% | 50.24% | 56.12% | 18.27%           | 27.14% | 30.52% | 32.15% | 35.89% | 35.92%          | 36.58% | 38.00% | 41.46% | 52.86% | 36.04%          | 36.33% | 40.93% | 44.70% | 50.75% | 27.30%           | 34.65% | 38.95% | 44.93% | 46.92% |
|            | 2:04:12  | 34.13%          | 36.99% | 44.92% | 50.22% | 56.02% | 17.77%           | 27.03% | 30.14% | 32.07% | 35.33% | 35.90%          | 36.33% | 37.96% | 41.37% | 52.69% | 35.77%          | 36.28% | 40.89% | 44.68% | 50.72% | 27.29%           | 34.62% | 38.89% | 44.92% | 46.88% |
|            | 3:04:12  | 34.19%          | 36.90% | 44.85% | 50.20% | 56.03% | 17.00%           | 26.83% | 29.60% | 32.00% | 35.00% | 36.66%          | 36.94% | 38.94% | 41.30% | 52.60% | 36.10%          | 36.40% | 40.89% | 44.68% | 50.72% | 27.27%           | 34.60% | 38.86% | 44.90% | 46.86% |

Рисунок 3.20 – Таблица сбора данных о влажности с периодичностью опроса 1 раз в час

Построен график с прогнозированием следующего полива за 12–24 часа. Наиболее бесперебойный диапазон передачи данных о влажности почвы по объему представлен для оценки и прогнозирования изменения этого показателя.

Влажность почвы зависит от влажности воздуха, скорости ветра, интенсивности инсоляции, что в результате формирует скорость изменения этой случайной величины. Используя простые программы, построен график изменения влажности по данным таблицы (см. рисунок 3.20) и показан принцип прогнозирования изменения влажности в ближайшие 12–24 часа (рисунок 3.21).

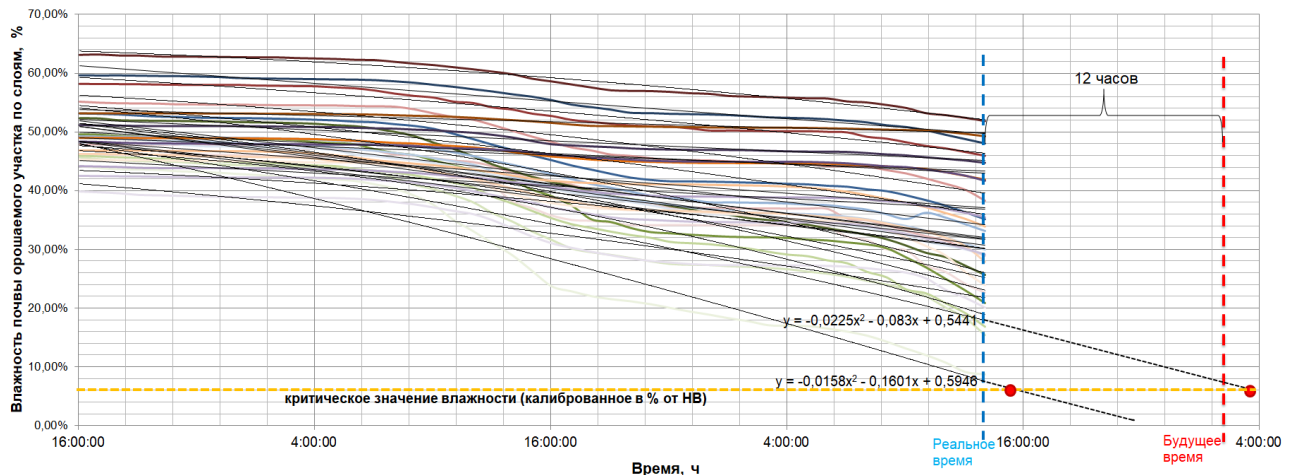


Рисунок 3.21 – Прогнозирование даты полива за 12–24 часа

Судя по собранным данным (см. рисунок 3.21), влажность почвы на поле изменяется от 45 до 65 % в начальной фазе измерения. Это связано с тем, что датчики установлены в разных точках микрорельефа почвы и определяют

уровень влажности в слоях корневой системы от 10 до 40 см (на рисунке 3.20 зафиксировано пять значений). Один датчик фиксирует влажность в 1 час. Продлевая линию тренда по данным линий графика с прогнозом на продолжительность  $t = 12...24$  часа, так, чтобы линия тренда пересекала критическое значение влажности по объему для данной культуры (прерывистая оранжевая линия на рисунке 3.21), получим дату следующего полива, что является общей задачей датчиков.

Результаты исследований позволяют скорректировать калибровочные зависимости для полевых условий, оптимизировать алгоритмы обработки данных с учетом специфики почв и культур, а также разработать рекомендации по внедрению систем послойного контроля влажности почвы на основе емкостных датчиков в практику точного земледелия для рационального управления водными ресурсами.

### **3.4 Разработка электрической принципиальной схемы автоматического управления включения насосного агрегата и дождевальной машины на основе данных датчика послойного контроля влажности почвы**

Цель эксперимента – оценка эффективности автоматизированной системы орошения, управляемой по пороговому значению влажности почвы. В ходе исследования использован датчик послойного контроля, прошедший апробацию в лабораторных условиях (емкостной датчик влажности), установленный в корнеобитаемом слое на глубине 0,2–0,3 м.

Сигнал с датчика необходимо передавать непрерывно по GSM-связи на контроллер с заданным интервалом дискретизации 1 раз в час. При снижении относительной влажности почвы ниже заданного порога контроллер формирует команду на включение насосного агрегата и дождевальной машины кругового действия. В эксперименте установлена нижняя граница в слое 0,3 м – 50 % от наименьшей влагоёмкости (НВ) почвы, которая находится под дождевальной машиной «Каскад-Мелиомаш» в учебном научно-

производственном объединении «Поволжье» (п. Степное, Энгельсский район, Саратовская область).

Режим работы насосного агрегата и дождевальная машины определен по расчету поливной нормы для того, чтобы обеспечить увлажнение слоя 0,3 м до верхнего порога – 70 % от НВ. Расчет поливной нормы проведен на основе действующей методики ГОСТ 28268-89 «Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений», а продолжительность работы внесена в программу расчета времени работы насосного агрегата и ДМ (рисунок 3.22).

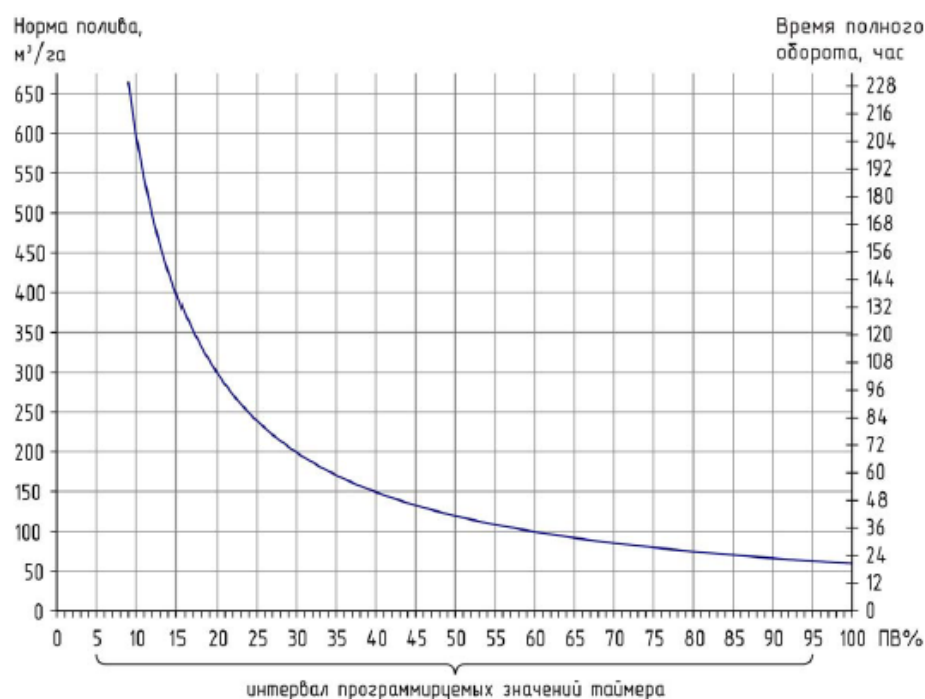


Рисунок 3.22 – График зависимости повторности включения ПВ (%) от поливной нормы и времени работы НА и ДМ «Каскад-Мелиомаш»

На рисунке 3.22 видно, что, например, для увлажнения слоя 0,3 м необходимо подать воду в объеме 150 м³/га, следует поливать около 55 часов с режимом работы электропривода ДМ в повторно-кратковременном режиме 40 %.

Далее необходимо фиксировать времена запуска и остановки, расход воды, продолжительность цикла и динамику восстановления влажности. Результаты позволяют определить гистерезис системы орошения, минимизировать число ложных срабатываний и оценить экономию водных ресурсов по сравнению с орошением по таймеру. Эксперимент подтвердил целесообразность

использования адаптивного управления поливом на основе прямых измерений влажности почвы.

Упрощенная принципиальная электрическая схема включения насосного агрегата и дождевальной машины на основе датчика послойного контроля влажности представлена на рисунке 3.23.

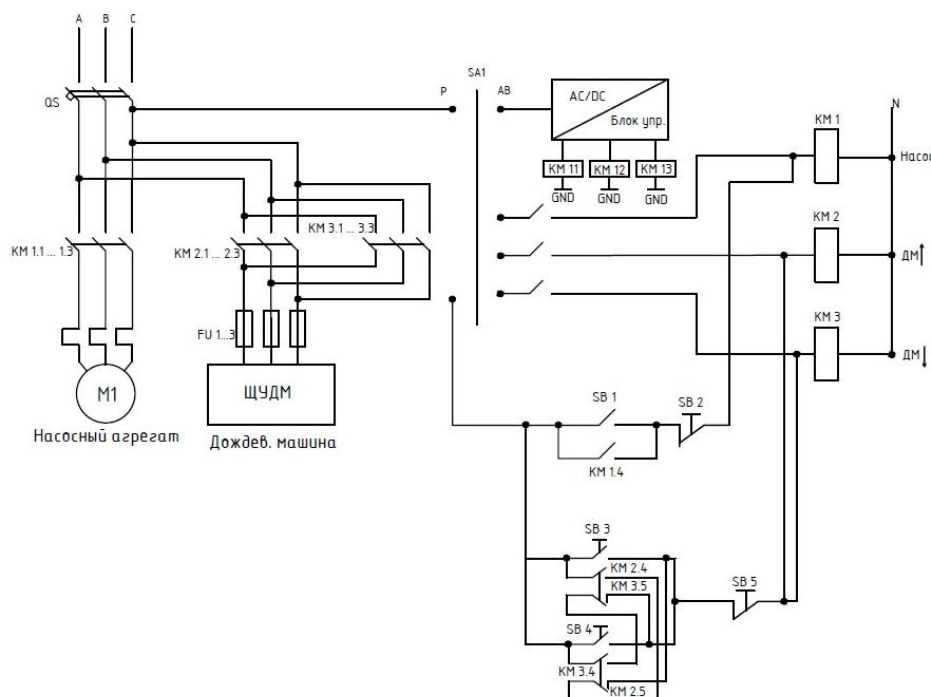


Рисунок 3.23 – Упрощенная электрическая схема управления в автоматическом режиме НА и ДМ на основе данных датчика послойного контроля влажности почвы

Необходимые элементы:

1. Датчики послойного контроля влажности почвы (вновь разработанный и проверенный в лабораторных условиях).
2. Микроконтроллерный блок управления (Arduino, STM32 или промышленный PLC).
3. Силовые ключи (электромагнитные реле на 220 В, 10–20 А)
4. Насосный агрегат (центробежный или погружной насос с двигателем переменного тока).
5. Электропривод дождевальной машины (например, реверсивный электродвигатель для перемещения опорных тележек).
6. Вспомогательные датчики обратной связи (опционально: концевой выключатель положения дождевальной машины, датчик потока или давления).

7. Цепи питания и защиты (автоматический выключатель, УЗО, понижающий трансформатор для цепей управления).

Функциональная логика изложена в п. 2.5.

Управление насосом осуществляется через силовое реле с контактами, рассчитанными на рабочий ток насоса (не менее 10 А). Для мощных насосов подключение выполняется через дополнительный контактор.

Электропривод дождевальная машины асинхронного двигателя переменного тока подключается через два реле для реверса также через контакторы (магнитные пускатели), которые установлены в щите управления ДМ. Питание низковольтной части (контроллер, датчики) осуществляется через устройство бесперебойного питания с гальванической развязкой от сети 220 В.

Также предусмотрена защита от сухого хода в виде датчика протока или давления воды с тем, чтобы насос не работал без воды.

Представленная принципиальная схема обеспечивает автоматический полив по данным датчиков влажности почвы, управляет насосом и электроприводом дождевальная машины, включая реверс и защиту по концевым выключателям. Для практической сборки рекомендуется дополнить схему клеммниками, индикацией режимов работы и кнопкой ручного пуска.

### **3.5 Выводы по главе**

1. Получен положительный отклик при разработке первичного и вторичного преобразователей датчика послойного контроля влажности почвы и испытаниях комплексного измерительного устройства в лабораторных, тепличных и полевых условиях.

2. В ходе экспериментов определены рабочие частоты для измерительной схемы датчика послойного контроля влажности: низкая частота – в пределах 830–850 Гц, высокая – в пределах 7670–7770 Гц. При данных значениях частот достигается наилучшее совпадение коэффициентов увлажнения, полученных расчетным путем и экспериментально.

## 4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДАТЧИКА ПОСЛОЙНОГО КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ

### 4.1 Результаты экспериментальных исследований в лабораторных условиях с помощью заданных значений первичного преобразователя

Диапазон значений емкости первичного преобразователя в виде конденсатора, состоящего из двух медных колец, составляет от 0,2 до 0,7 мкФ. Исходные данные результатов измерения емкости датчика в зависимости от влажности почвы определены в лабораторных, тепличных и полевых условиях. Диапазон изменения емкости датчика в зависимости от влажности почвы в изолированном виде (рисунок 4.1) составил:

- минимальное значение емкости при наиболее сухой почве – 0,2 мкФ (значение частоты, используемой эталонным *LC*-метром при измерении емкости датчика влажности 0,4 мкФ, – 309 Гц);
- максимальное значение емкости при наиболее влажной почве – 0,7 мкФ (значение частоты, используемой эталонным *LC*-метром при измерении емкости датчика влажности 0,7 мкФ, – 197 Гц).

Рисунок 4.1 – Внешний вид изолированного первичного преобразователя – измерительного конденсатора



Результаты измерения значения выходного сигнала первичного преобразователя в виде емкости, задаваемой в диапазоне от 0,22 мкФ до 0,78 мкФ, приняты как стандартные значения емкостей конденсаторов. В качестве образцового значения  $C_0$  используется 1 мкФ ( $1 \cdot 10^{-6}$ ).

В качестве тестового воздействия использованы следующие значения емкости:

$$C_{x1} = 0,22 \text{ мкФ} = (0,22 \cdot 10^{-6});$$

$$C_{x2} = 0,47 \text{ мкФ} = (0,47 \cdot 10^{-6});$$

$$C_{x3} = 0,68 \text{ мкФ} = (0,68 \cdot 10^{-6});$$

$$C_{x4} = 0,78 \text{ мкФ} = (0,78 \cdot 10^{-6}).$$

Измерение проводили для двух значений частоты:  $f_{\text{нч}} = 840 \text{ Гц}$  и  $f_{\text{вч}} = 7760 \text{ Гц}$ .

### **Тестирование 1**

Исходные данные:  $C_0 = 1 \text{ мкФ} (1 \cdot 10^{-6})$ ;  $C_{x1} = 0,22 \text{ мкФ}$ .

1. Тумблер G1/G2 в положении G1 (низкая частота).
2. Код датчика: A = 0, B = 0 (клемма ХТ3). Коэффициент усиления сигнала  $U_2 - K_{\text{yc}} = 1,66$ .

3. Измерение  $U_1 = 3,84 \text{ В}$ .

4. Измерение  $U_2 = 1,18 \text{ В}$ , вычисление:

$$U_2^* = U_2 / K_{\text{yc}} = 1,18 / 1,66 = 0,7 \text{ В}.$$

5. Вычисление:

$$\begin{aligned} C_{x1\text{нч}} &= (U_2^* C_0) / (U_1 - U_2^*) = (0,7 \cdot 1 \cdot 10^{-6}) / (3,84 - 0,7) = \\ &= (0,7 \text{ мкФ}) / 3,14 = 0,22 \text{ мкФ}. \end{aligned}$$

$C_{x1\text{нч}} = 0,22 \text{ мкФ}$  при  $C_{x1\text{факт}} = 0,22 \text{ мкФ}$ .

6. Тумблер G1/G2 в положение G2 (высокая частота).

7. Измерение  $U_1 = 3,57 \text{ В}$ .

8. Измерение  $U_2 = 0,58 \text{ В}$ , вычисление:

$$U_2^* = U_2 / K_{\text{yc}} = 0,58 / 1,66 = 0,35 \text{ В}.$$

9. Вычисление:

$$\begin{aligned} C_{x1\text{вч}} &= (U_2^* C_0) / (U_1 - U_2^*) = (0,35 \cdot 10^{-6}) / (3,57 - 0,35) = \\ &= 0,35 \text{ мкФ} / 3,22 = 0,11 \text{ мкФ}. \end{aligned}$$

$C_{x1\text{вч}} = 0,11 \text{ мкФ}$  при  $C_{x1\text{факт}} = 0,22 \text{ мкФ}$ .

## 10. Вычисление:

$$K_B = (C_{x1нч}) / (C_{x1вч}) = 0,22 \text{ мкФ} / 0,11 \text{ мкФ} = 2.$$

**Тестирование 2**

Исходные данные:  $C_0 = 1 \text{ мкФ} (1 \cdot 10^{-6})$ ,  $C_{x2} = 0,47 \text{ мкФ}$ .

1. Тумблер G1/G2 в положении G1 (низкая частота),

2. Код датчика: A = 1, B = 0 (клемма ХТ4). Коэффициент усиления сигнала  $U_2 - K_{yc} = 1,66$ .

3. Измерение  $U_1 = 3,87 \text{ В}$ .

4. Измерение  $U_2 = 2,23 \text{ В}$ , вычисление:

$$U_2^* = U_2 / K_{yc} = 2,23 / 1,66 = 1,34 \text{ В}.$$

## 5. Вычисление:

$$\begin{aligned} C_{x2нч} &= (U_2^* C_0) / (U_1 - U_2^*) = (1,34 \cdot 1 \cdot 10^{-6}) / (3,87 - 1,34) = \\ &= 1,34 \text{ мкФ} / 2,53 = 0,52 \text{ мкФ}. \end{aligned}$$

$C_{x2нч} = 0,52 \text{ мкФ}$  при  $C_{x2факт} = 0,47 \text{ мкФ}$ .

6. Тумблер G1/G2 в положении G2 (высокая частота),

7. Измерение  $U_1 = 3,54 \text{ В}$ .

8. Измерение  $U_2 = 0,66 \text{ В}$ , вычисление:

$$U_2^* = U_2 / K_{yc} = 0,66 / 1,66 = 0,37 \text{ В}.$$

## 9. Вычисление

$$\begin{aligned} C_{x2вч} &= (U_2^* C_0) / (U_1 - U_2^*) = (0,37 \cdot 10^{-6}) / (3,54 - 0,37) = \\ &= 0,37 \text{ мкФ} / 3,17 = 0,12 \text{ мкФ}. \end{aligned}$$

$C_{x2вч} = 0,12 \text{ мкФ}$  при  $C_{x2факт} = 0,47 \text{ мкФ}$ .

10. Вычисление  $K_B = (C_{x2нч}) / (C_{x2вч}) = 0,52 \text{ мкФ} / 0,12 \text{ мкФ} = 4,3$ .

**Тестирование 3**

Исходные данные:  $C_0 = 1 \text{ мкФ} (1 \cdot 10^{-6})$ ,  $C_{x3} = 0,68 \text{ мкФ}$ .

1. Тумблер G1/G2 в положении G1 (низкая частота),

2. Код датчика: A = 0, B = 1 (клемма ХТ5). Коэффициент усиления сигнала  $U_2 - K_{yc} = 1,66$ .

3. Измерение  $U_1 = 3,72 \text{ В}$ .

4. Измерение  $U_2 = 2,44$ , вычисление:

$$U_2^* = U_2 / K_{yc} = 2,44 / 1,66 = 1,47 \text{ В}.$$

5. Вычисление:

$$C_{x3нч} = (U_2 * C_0) / (U_1 - U_2^*) = (1,47 \cdot 1 \cdot 10^{-6}) / (3,72 - 1,47) = \\ = 1,47 \text{ мкФ} / 2,25 = 0,65 \text{ мкФ}.$$

$C_{x3нч} = 0,65 \text{ мкФ}$  при  $C_{x3факт} = 0,68 \text{ мкФ}$ .

6. Тумблер G1/G2 в положении G2 (высокая частота),

7. Измерение  $U_1 = 3,63 \text{ В}$ .

8. Измерение  $U_2 = 0,72$ , вычисление:

$$U_2^* = U_2 / K_{yc} = 0,72 / 1,66 = 0,43 \text{ В}.$$

9. Вычисление:

$$C_{x3вч} = (U_2 * C_0) / (U_1 - U_2^*) = (0,43 \cdot 10^{-6}) / (3,63 - 0,43) = \\ = 0,43 \text{ мкФ} / 3,21 = 0,13 \text{ мкФ}.$$

$C_{x3вч} = 0,13 \text{ мкФ}$  при  $C_{x3факт} = 0,68 \text{ мкФ}$ .

10. Вычисление:

$$K_B = (C_{x3нч}) / (C_{x3вч}) = 0,65 \text{ мкФ} / 0,13 \text{ мкФ} = 5.$$

#### **Тестирование 4**

Исходные данные:  $C_0 = 1 \text{ мкФ}$  ( $1 \cdot 10^{-6}$ ),  $C_{x4} = 0,78 \text{ мкФ}$  ( $0,78 \cdot 10^{-6}$ ).

1. Тумблер G1/G2 в положении G1 (низкая частота).

2. Код датчика: А = 1, В = 1 (клемма ХТ6). Коэффициент усиления сигнала  $U_2 - K_{yc} = 1,66$ .

3. Измерение  $U_1 = 3,72 \text{ В}$ .

4. Измерение  $U_2 = 2,6$ , вычисление:

$$U_2^* = U_2 / K_{yc} = 2,6 / 1,66 = 1,57 \text{ В}.$$

5. Вычисление:

$$C_{x4нч} = (U_2 * C_{01}) / (U_1 - U_2^*) = (1,57 \cdot 1 \cdot 10^{-6}) / (3,72 - 1,57) = \\ = 1,57 \text{ мкФ} / 2,15 = 0,73 \text{ мкФ}.$$

$C_{x4нч} = 0,73 \text{ мкФ}$  при  $C_{x4факт} = 0,78 \text{ мкФ}$ .

6. Тумблер G1/G2 в положении G2 (высокая частота).

7. Измерение  $U_1 = 3,64 \text{ В}$ .

8. Измерение  $U_2 = 0,7$ , вычисление:

$$U_2^* = U_2 / K_{yc} = 0,7 / 1,66 = 0,42.$$

## 9. Вычисление:

$$C_{x4вч} = (U_2 * C_0) / (U_1 - U_2 *) = (0,42 \cdot 10^{-6}) / (3,64 - 0,42) = \\ = 0,42 \text{ мкФ} / 3,22 = 0,13 \text{ мкФ}.$$

$$C_{x4вч} = 0,13 \text{ мкФ при } C_{x4факт} = 0,78 \text{ мкФ}.$$

## 10. Вычисление:

$$K_B = (C_{x1нч}) / (C_{x1вч}) = 0,73 \text{ мкФ} / 0,13 \text{ мкФ} = 5,6.$$

Данные лабораторных испытаний сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты измерений коэффициента увлажнения  $K_B$

| № опыта | Частота $f_{нч} = 840 \text{ Гц}$ |                         |                           | Частота $f_{вч} = 7760 \text{ Гц}$ |                         |                           | $K_B$ | Состояние почвы |
|---------|-----------------------------------|-------------------------|---------------------------|------------------------------------|-------------------------|---------------------------|-------|-----------------|
|         | $C_{хном}, \text{ мкФ}$           | $C_{хизм}, \text{ мкФ}$ | $\Delta C_x, \text{ мкФ}$ | $C_{хном}, \text{ мкФ}$            | $C_{хизм}, \text{ мкФ}$ | $\Delta C_x, \text{ мкФ}$ |       |                 |
| 1       | 0,22                              | 0,22                    | 0                         | 0,22                               | 0,11                    | -0,11                     | 2,0   | Сухая           |
| 2       | 0,47                              | 0,52                    | +0,05                     | 0,47                               | 0,12                    | -0,35                     | 4,3   | Увлажн.         |
| 3       | 0,68                              | 0,65                    | -0,03                     | 0,68                               | 0,14                    | -0,54                     | 5,0   | Влажн.          |
| 4       | 0,78                              | 0,73                    | -0,05                     | 0,78                               | 0,13                    | -0,65                     | 5,6   | Сырая           |

Анализ данных таблицы 4.1 показывает, что измерения с расчетной емкостью на низкой частоте колебательного контура, созданного измерительной схемой, относительно стандартного номинального значения емкости выполнены с погрешностью не более 10 %. На высокой частоте измерения расчетное значение емкости относительно номинального значения имеет существенную погрешность. С целью исключения существенных ошибок и больших погрешностей измерения необходимо выполнить более плотную изоляцию измерительных колец, чтобы диапазон емкости первичного преобразователя от сухой до влажной почвы не превышал 0,1 мкФ при значении эталонного конденсатора 1,0 мкФ.

С учетом данных лабораторных испытаний, полученных на стенде со стандартными значениями емкости, были проведены испытания на реальных образцах почвы в разных вариантах по влажности.

## 4.2 Результаты измерения влажности почвы и определения коэффициента ее увлажненности и погрешностей

Экспериментальную проверку работоспособности разработанного устройства проводили в соответствии с ранее описанной методикой. В ходе исследований использовали четыре емкостных датчика влажности, размещенных на измерительной штанге в различных слоях почвы для обеспечения послойного контроля. Измерения проводились на двух частотах, что позволило минимизировать влияние паразитных факторов (таких, как электропроводность почвы) и повысить точность определения влажности. Для каждого датчика в соответствии с алгоритмом последовательно выполнялись измерения напряжений  $U_1$  и  $U_2$  на низкой и высокой частотах с последующей коррекцией полученных значений. Всего было проведено пять серий измерений для каждого из четырех уровней влажности (0 %; 10; 20; 35 %), после чего результаты усредняли. Параллельно с инструментальными измерениями для верификации результатов отбирали пробы почвы, влажность которых определяли термостатно-весовым способом.

В ходе экспериментальных исследований для каждого датчика и каждого уровня влажности были вычислены значения коэффициента увлажненности  $K_v$  по формуле:

$$K_v = C_{x1нч} / C_{x1вч}. \quad (4.1)$$

Установлено, что между значением  $K_v$  и влажностью почвы по объему наблюдается выраженная корреляция. С увеличением влажности почвы диэлектрическая проницаемость среды возрастает, что приводит к изменению емкости датчика и, соответственно, к росту коэффициента  $K_v$ . Полученные зависимости для всех четырех датчиков демонстрируют монотонный характер, что подтверждает работоспособность предложенного алгоритма. При этом градуировочные характеристики для каждого из четырех слоев имеют незначительные различия, обусловленные неоднородностью почвенного состава. Полученные результаты хорошо согласуются с теоретическими данными, что

подтверждает эффективность использования двухчастотного метода для оценки влажности почвы.

Важным фактором, влияющим на точность емкостных измерений влажности, является температура почвы. Как показали результаты лабораторных экспериментов, выходной сигнал емкостных датчиков линейно реагирует на изменение температуры при постоянной влажности. Величина этого температурного дрейфа зависит от типа почвы и ее минералогического состава.

В ходе экспериментальных исследований влажность почвы измеряли при различных температурах от 5 до 35 °C. Установлено, что при отклонении температуры от эталонного значения (20 °C) на каждые 10 °C дополнительная погрешность измерения составляла 2,0–3,4 %. В алгоритм обработки данных была введена температурная поправка, что позволило существенно снизить влияние данного фактора. Как отмечается в различных исследованиях [15, 35, 52, 95, 110], включение температуры в эмпирические калибровочные уравнения позволяет значительно уменьшить температурные эффекты.

Для оценки воспроизводимости измерений были проведены 5 последовательных циклов измерений при неизменных условиях (влажность почвы 20 %, температура 20 °C). Результаты показали высокую стабильность работы устройства: среднеквадратичное отклонение (СКО) коэффициента  $K_v$  для каждого из четырех датчиков не превышало 3,5 % от среднего значения. Это свидетельствует о надежности разработанного алгоритма и отсутствии значительных случайных погрешностей. Наилучшие показатели воспроизводимости были достигнуты для влажности 10–30 %, что соответствует зоне оптимальной работы емкостных датчиков. При выходе за пределы этого диапазона СКО возрастало до 4,5–5,3 %, что связано с нелинейностью преобразования влажности в электрический сигнал на краях диапазона измерений. Аналогичные результаты были получены в исследованиях по калибровке емкостных датчиков, где было установлено, что отклик датчиков на изменение влажности почвы различается в зависимости от типа почвы, что

требует калибровки с учетом типа почвы для обеспечения адекватной точности измерений.

Сравнение результатов измерений, полученных с помощью разработанного устройства, с данными, полученными термостатно-весовым способом, показало высокую степень корреляции (коэффициент корреляции Пирсона  $R > 0,92$ ). Средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) для всех датчиков и уровней влажности составила около 15 %, что означает достоверность измерений на уровне 85 %. Такие результаты считаются приемлемыми для недорогих датчиков и могут быть рекомендованы для применения в системах орошения.

Разработанное устройство позволяет проводить послойный контроль влажности на глубине от 10 до 60 см, что соответствует рекомендациям для систем автоматического полива сельскохозяйственных культур. На основе проведенных экспериментальных исследований для каждого из четырех слоев были построены градуировочные графики, которые позволяют с высокой точностью определять влажность почвы по измеренному значению коэффициента увлажнения  $K_v$  (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Результаты измерения влажности по коэффициенту увлажнения

|                     | Опыт                                                                                                                                                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       | Ср. знач. |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
|                     | 1                                                                                                                                                     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |           |
| <b>1</b>            | <i>Измерение <math>K_v</math> на воздухе при комнатной температуре (18...20 °C) 1 раз в час.<br/>Фиксирование температуры и влажности воздуха (%)</i> |       |       |       |       |       |       |       |       |       |           |
| 10 см               | 96                                                                                                                                                    | 96    | 98    | 97    | 98    | 98    | 96    | 98    | 98    | 96    | 97,10     |
| 20 см               | 95                                                                                                                                                    | 99    | 96    | 95    | 97    | 96    | 95    | 96    | 97    | 99    | 96,50     |
| 30 см               | 96                                                                                                                                                    | 97    | 95    | 96    | 96    | 95    | 96    | 95    | 96    | 97    | 95,90     |
| 40 см               | 94                                                                                                                                                    | 94    | 94    | 99    | 98    | 94    | 94    | 94    | 98    | 94    | 95,30     |
| 50 см               | 98                                                                                                                                                    | 96    | 98    | 97    | 98    | 98    | 98    | 98    | 98    | 96    | 97,50     |
| $t, ^\circ\text{C}$ | 22                                                                                                                                                    | 21    | 22    | 22    | 22    | 22    | 22    | 22    | 22    | 21    |           |
| $\varphi, \%$       | 58                                                                                                                                                    | 57    | 58    | 58    | 58    | 58    | 58    | 58    | 57    | 58    |           |
| Время               | 10:00                                                                                                                                                 | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 | 19:00 |           |

Окончание таблицы 4.1

|       | Опыт                                                                                                                                                               |       |       |       |       |       |       |       |       |       | Ср. знач. |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
|       | 1                                                                                                                                                                  | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |           |
| 2     | Измерение при полном погружении датчика в сухой грунт № 1 в теплице 1 раз в час                                                                                    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |           |
| 10 см | 46,13                                                                                                                                                              | 46,12 | 46,10 | 46,12 | 46,13 | 46,12 | 46,10 | 46,12 | 46,10 | 46,13 | 46,12     |
| 20 см | 46,18                                                                                                                                                              | 45,14 | 46,02 | 46,10 | 45,95 | 46,02 | 46,05 | 46,25 | 46,15 | 46,11 | 46,00     |
| 30 см | 45,98                                                                                                                                                              | 46,02 | 46,00 | 45,95 | 46,02 | 46,10 | 46,06 | 45,96 | 46,12 | 46,06 | 46,03     |
| 40 см | 46,10                                                                                                                                                              | 46,08 | 46,03 | 46,10 | 45,98 | 46,05 | 46,03 | 46,04 | 45,98 | 46,02 | 46,04     |
| 50 см | 46,12                                                                                                                                                              | 45,89 | 46,14 | 46,02 | 46,01 | 46,03 | 46,03 | 46,05 | 46,02 | 46,03 | 46,03     |
| t, °C | 22                                                                                                                                                                 | 21    | 22    | 22    | 22    | 22    | 22    | 22    | 22    | 21    |           |
| φ, %  | 58                                                                                                                                                                 | 57    | 58    | 58    | 58    | 58    | 58    | 58    | 57    | 58    |           |
| Время | 10:00                                                                                                                                                              | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 | 19:00 |           |
| 3     | Измерение при полном погружении датчика в грунт № 1 в теплице с поливом (место датчика заливали водой 500 мг, ограничив розлив воды обрезанным ведром) 1 раз в час |       |       |       |       |       |       |       |       |       |           |
| 10 см | 72,93                                                                                                                                                              | 72,92 | 72,86 | 72,33 | 72,01 | 72,03 | 71,86 | 71,82 | 71,74 | 71,69 | 72,22     |
| 20 см | 69,02                                                                                                                                                              | 69,82 | 70,01 | 70,52 | 70,65 | 70,55 | 70,45 | 70,35 | 70,32 | 70,22 | 70,19     |
| 30 см | 54,63                                                                                                                                                              | 60,21 | 61,25 | 62,30 | 63,22 | 63,10 | 63,12 | 63,05 | 63,01 | 62,80 | 61,67     |
| 40 см | 46,21                                                                                                                                                              | 52,30 | 53,41 | 53,62 | 53,54 | 53,44 | 53,22 | 53,10 | 53,06 | 53,03 | 52,49     |
| 50 см | 46,10                                                                                                                                                              | 48,22 | 50,24 | 51,03 | 51,05 | 51,07 | 50,96 | 50,89 | 50,74 | 50,70 | 50,10     |
| t, °C | 22                                                                                                                                                                 | 21    | 22    | 22    | 22    | 22    | 22    | 22    | 22    | 21    |           |
| φ, %  | 58                                                                                                                                                                 | 57    | 58    | 58    | 58    | 58    | 58    | 58    | 57    | 58    |           |
| Время | 10:00                                                                                                                                                              | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 | 19:00 |           |
| 4     | Измерение при полном погружении датчика в сухой грунт № 2 в теплице 1 раз в час                                                                                    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |           |
| 10 см | 42,31                                                                                                                                                              | 42,20 | 42,20 | 42,19 | 42,18 | 42,20 | 42,20 | 42,19 | 42,31 | 42,20 | 42,22     |
| 20 см | 42,30                                                                                                                                                              | 42,33 | 42,10 | 42,08 | 42,01 | 42,08 | 42,33 | 42,08 | 42,30 | 42,33 | 42,19     |
| 30 см | 41,83                                                                                                                                                              | 41,81 | 41,79 | 41,80 | 41,78 | 42,00 | 41,81 | 41,80 | 41,83 | 41,81 | 41,83     |
| 40 см | 41,70                                                                                                                                                              | 41,62 | 41,62 | 41,65 | 41,50 | 41,51 | 41,62 | 41,65 | 41,70 | 41,62 | 41,62     |
| 50 см | 42,22                                                                                                                                                              | 42,20 | 42,19 | 42,20 | 42,19 | 41,18 | 42,20 | 42,20 | 42,22 | 42,20 | 42,10     |
| t, °C | 22                                                                                                                                                                 | 21    | 22    | 22    | 22    | 22    | 22    | 22    | 22    | 21    |           |
| φ, %  | 58                                                                                                                                                                 | 57    | 58    | 58    | 58    | 58    | 58    | 58    | 57    | 58    |           |
| Время | 10:00                                                                                                                                                              | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 | 19:00 |           |
| 5     | Измерение при полном погружении датчика в грунт № 2 в теплице с поливом (место датчика заливали водой 500 мг, ограничив розлив воды обрезанным ведром) 1 раз в час |       |       |       |       |       |       |       |       |       |           |
| 10 см | 85,15                                                                                                                                                              | 86,32 | 88,21 | 88,33 | 88,01 | 87,52 | 87,10 | 86,52 | 86,42 | 86,33 | 86,99     |
| 20 см | 72,32                                                                                                                                                              | 89,23 | 88,06 | 87,52 | 88,10 | 88,06 | 87,95 | 87,85 | 88,60 | 87,65 | 86,53     |
| 30 см | 54,26                                                                                                                                                              | 72,91 | 73,69 | 73,70 | 74,12 | 73,85 | 73,56 | 73,66 | 73,41 | 73,61 | 71,68     |
| 40 см | 43,25                                                                                                                                                              | 65,44 | 75,22 | 76,34 | 77,55 | 77,63 | 75,21 | 74,90 | 74,80 | 74,79 | 71,51     |
| 50 см | 42,30                                                                                                                                                              | 56,31 | 62,24 | 64,23 | 64,55 | 64,69 | 64,70 | 65,20 | 64,15 | 64,18 | 61,26     |
| t, °C | 22                                                                                                                                                                 | 21    | 22    | 22    | 22    | 22    | 22    | 22    | 22    | 21    |           |
| φ, %  | 58                                                                                                                                                                 | 57    | 58    | 58    | 58    | 58    | 58    | 58    | 57    | 58    |           |
| Время | 10:00                                                                                                                                                              | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 | 19:00 |           |

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили работоспособность разработанного устройства послойного контроля влажности почвы, реализующего двухчастотный алгоритм измерения. Установлено, что между коэффициентом увлажнения  $K_v$  и влажностью почвы существует монотонная зависимость, что позволяет использовать этот показатель в качестве информативного параметра. Выявлены и количественно оценены основные источники погрешностей: нелинейность характеристики датчиков на краях диапазона, температурный дрейф и влияние электропроводности почвы. Применение двухчастотного метода и введение температурной коррекции позволили минимизировать влияние указанных факторов и обеспечить достаточную для практического применения точность измерений. Таким образом, результаты экспериментальных исследований подтверждают, что устройство может быть рекомендовано для использования в системах автоматического орошения и мониторинга влажности почвы в сельскохозяйственных целях.

#### **4.3 Оценка сходимости теоретической и экспериментальной зависимостей коэффициента увлажнения почвы**

Одной из ключевых задач экспериментальных исследований являлась количественная оценка степени совпадения теоретически предсказанной и реально полученной зависимости коэффициента увлажнения почвы  $K_v$  от гравиметрической влажности  $W$ .

Теоретическая модель базируется на принятой диэлектрической теории смесей, согласно которой эффективная диэлектрическая проницаемость влажной почвы определяется объёмным содержанием воды, воздуха и минерального скелета. В рамках модели предполагается монотонное возрастание  $K_v$  с ростом  $W$  с возможным нелинейным участком в области переувлажнения.

Экспериментальные данные были получены по описанной ранее методике для четырёх послойных датчиков в диапазоне влажности по массе от 0 до 35 %.

Сходимость оценивали методом сравнения трендов, расчётом коэффициента корреляции Пирсона и анализом остаточных погрешностей.

Первичную визуальную оценку проводили путём построения на одном графике теоретической кривой  $K_{в.теор}(W)$  и экспериментальных точек для каждого из четырёх датчиков. Теоретическую зависимость получали на основе калибровочной функции, аппроксимирующей модель Максвелла – Гарнетта для двухфазной среды «почва – вода». Для абсолютно сухой почвы ( $W = 0$ ) теоретическое значение  $K_v$  принималось равным 1 (отсутствие влияния свободной воды). С ростом влажности до 35 % теоретический коэффициент возрастал до 2,8–3,2 в зависимости от типа почвы. Экспериментальные точки располагались вблизи теоретической кривой, однако для разных датчиков наблюдался разброс, обусловленный неоднородностью уплотнения почвы и локальными включениями воздуха. Наиболее близкое совпадение отмечено для диапазона 10–25 %, где расхождение не превышало 7 % относительно теоретического значения.

Для формальной оценки сходимости был применён коэффициент корреляции Пирсона  $r$ , рассчитанный между массивом теоретических и экспериментальных значений  $K_v$  для каждого датчика. Полученные значения составили:

датчик № 1 –  $r = 0,976$ ;  $r = 0,976$ ;

датчик № 2 –  $r = 0,962$ ;  $r = 0,962$ ;

датчик № 3 –  $r = 0,981$ ;  $r = 0,981$ ;

датчик № 4 –  $r = 0,954$ ;  $r = 0,954$ .

Все коэффициенты превышают критическое значение 0,9, что свидетельствует о сильной положительной линейной связи и подтверждает адекватность теоретической модели.

Дополнительно вычисляли коэффициент детерминации  $R^2$ , который показал, что теоретическая модель объясняет от 91 до 96 % дисперсии экспериментальных данных. Наименьшая сходимость у датчика № 4 объясняется его расположением в нижнем слое, где гравитационная вода создавала более высокую локальную

влажность, чем усреднённая по образцу. Статистическая значимость корреляции подтверждена  $t$ -критерием при уровне значимости  $p < 0,01$ .

Важным аспектом сходимости является анализ систематической и случайной составляющих погрешности. Систематическое отклонение оценивали как среднюю разность  $\Delta_{\text{сист}} = K_{\text{в.эксп}} - K_{\text{в.теор}}$ . Во всех опытах  $\Delta_{\text{сист}}$  оказалась положительной и составила 0,08–0,12, что указывает на небольшое завышение экспериментальных значений по сравнению с теорией. Причиной может служить не учтённая в модели поляризация связанной воды в приповерхностном слое электродов датчиков. Случайную составляющую оценивали через среднеквадратичное отклонение (СКО) остатков:

$$\varepsilon = K_{\text{в.эксп}} - K_{\text{в.теор}}. \quad (4.2)$$

СКО остатков не превышало 0,15 во всём диапазоне влажности, а относительная случайная погрешность составила 5–8 % при доверительной вероятности 0,95. Для промышленных влагомеров такая точность считается приемлемой, особенно с учётом неоднородности почвенной среды.

С учётом полученных данных лабораторных испытаний на стенде со стандартными значениями емкости, результатов испытаний в лабораторных и полевых условиях выполнена оценка сходимости теоретических и экспериментальных данных (рисунок 4.2).

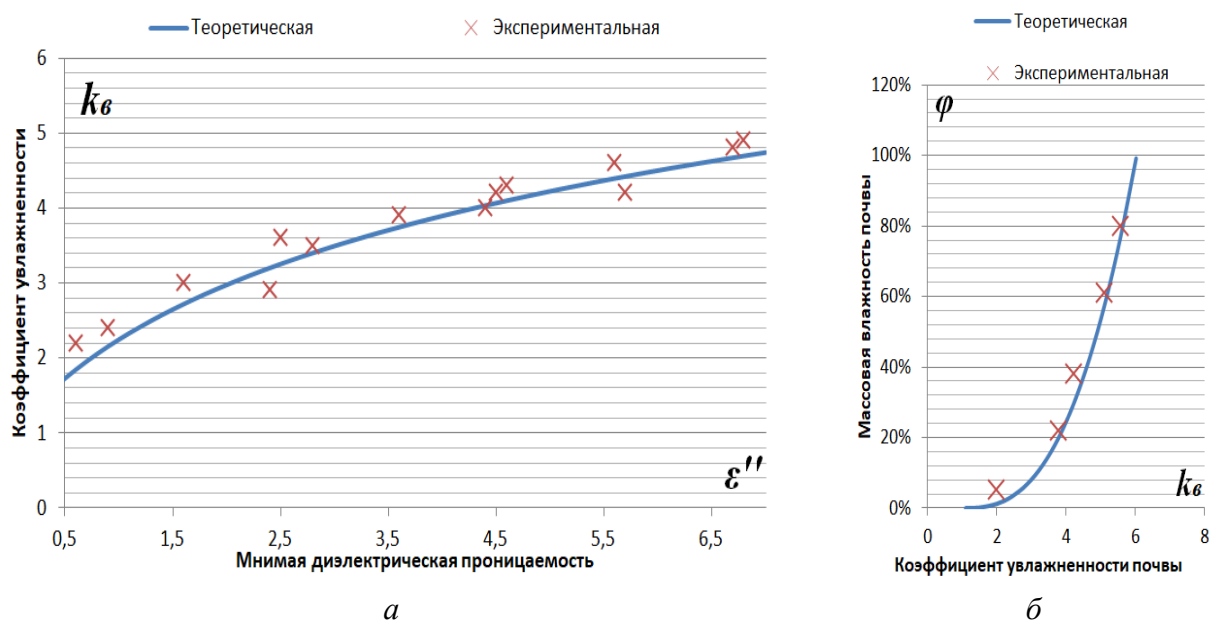


Рисунок 4.2 – Результаты теоретических и экспериментальных данных зависимости коэффициента увлажнения от влажности почвы, установленной контрольным методом измерения

Среднее отклонение теоретических и экспериментальных данных лабораторной проверки зависимости коэффициента увлажнения от влажности почвы не превысило 5,3 %.

Дополнительно оценивали сходимость в частотных поддиапазонах – на низкой (НЧ) и высокой (ВЧ) частотах, поскольку двухчастотный метод выбран для компенсации влияния проводимости почвы. Теоретически отношение  $C_{x1нч}/C_{x1вч}$  должно быть близко к единице для сухой почвы и возрастет с влажностью. Экспериментально полученные коэффициенты сходимости для НЧ и ВЧ отдельно показали, что при  $W < 5$  % различие между теорией и экспериментом минимально (2–3 %). При  $W > 30$  % расхождение увеличивается до 12 % из-за нелинейных эффектов ионной проводимости. Тем не менее итоговое значение коэффициента  $K_v$  демонстрирует устойчивую сходимость, что доказывает эффективность двухчастотной компенсации и корректность выбранного алгоритма вычислений.

В итоге по результатам всех экспериментов установлено, что теоретическая и экспериментальная зависимости коэффициента увлажнения почвы имеют высокую степень сходимости. Коэффициент корреляции превышает 0,95, относительная погрешность в рабочем диапазоне влажности (10–30 %) не более 10 %, а систематическое смещение может быть скомпенсировано введением поправочного коэффициента при калибровке.

Предложенная методика оценки сходимости может быть рекомендована для сертификации аналогичных влагомеров. Полученные результаты подтверждают адекватность двухчастотного метода и правильность реализации алгоритма на выбранном микроконтроллере, что позволяет использовать устройство для послойного контроля влажности почвы в агротехнических и экологических целях.

#### **4.4 Результаты применения датчика послойного контроля влажности в схеме автоматизации управления насосным агрегатом и дождевальная машиной**

Интеграция датчиков послойного контроля влажности почвы как обратной связи в систему автоматизированного управления целым оросительным комплексом представляет собой переход от жестких временных циклов к адаптивному гидрологическому регулированию. Мониторинг влажности почвы по объему на нескольких генетических горизонтах (например,  $-0,1$ ;  $-0,2$  или  $-0,4$  м), осуществляли посредством разработанных датчиков по глубине корнеобитаемой зоны. Данный подход позволяет алгоритму управления оперировать не усредненным показателем, а дифференцированным профилем влагосодержания, что критически важно для моделирования водопереноса и расчета поливной нормы.

Алгоритм управления системы (см. рисунок 2.25) базируется на принципе обратной связи с программным вычислением дефицита влаги на основе введенного коэффициента увлажнения. Модуль управления активирует процедуру расчета времени и режима работы насосного агрегата и электропривода дождевальной машины по принципу, указанному в таблице 2.2. В основу расчета заложено интегрирование дефицита влаги по глубине, где дефицит определяется как разность между целевой полевой влагоемкостью и текущим показателем влажности в каждом из слоев. Учитывая коэффициент распределения корневой системы, алгоритм вычисляет недостаток воды по объему для конкретной орошаемой площади.

Расчет времени непрерывной работы насосного агрегата и общей длительности оросительного цикла дождевальной машины осуществляется на основе гидравлического баланса. Время работы насоса определяется как частное от деления суммарного расчетного объема подаваемой воды на номинальную производительность насосного оборудования, скорректированную с учетом коэффициента запаса на гидравлические потери в магистральном трубопроводе. Время работы дождевальной машины, в свою очередь, рассчитывается исходя из

расхода поливочного модуля (объем воды, подаваемый через дождеобразующие устройства в единицу времени) и заданного шага перемещения рабочего органа, т. е. поступательного движения за счет электропривода. При этом в алгоритм введен коэффициент синхронизации, связывающий линейную скорость перемещения дождевальной машины с производительностью насоса для достижения расчетной нормы орошения, обеспечивающей насыщение профиля до целевых значений.

В процессе реализации расчетного времени система реализует замкнутый цикл с оперативным мониторингом динамики изменения влажности. Алгоритм ограничивается однократным расчетом.

Критерием завершения полива операции выступает не истечение времени, жестко заданного таймером, а достижение равновесного состояния влажности в целевом корнеобитаемом слое. Как только текущая послойная влажность достигает расчетного значения, близкого к полевой влагоемкости (с учетом верхнего порогового ограничения для предотвращения переувлажнения и поверхностного стока), алгоритм формирует управляющий сигнал на отключение питающих цепей насосного агрегата по истечении расчетного времени работы насоса и дождевальной машины. Одновременно с небольшим временным отставанием, обеспечивающим опорожнение магистрали и предотвращение гидроудара, подается команда на торможение и остановку электропривода дождевальной машины с учетом полива всего поля, а не конкретного участка, где установлен датчик.

Таким образом, применение датчиков послойного контроля в описанной схеме позволяет перейти от эмпирического полива по расписанию к технологически обоснованному управлению водоподачей. Алгоритмический расчет времени работы насосного агрегата и дождевальной машины, базирующийся на реальном объеме недостающей влаги в генетических слоях почвы, обеспечивает минимизацию энергопотребления электромеханического оборудования, снижает гидравлическую нагрузку на сеть и гарантирует рациональное использование водных ресурсов за счет полного исключения

нецелевых циклов орошения, присущих традиционным системам с фиксированным графиком полива.

На основе полевых испытаний, проведенных в учебном хозяйстве УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Вавиловский университет (с. Степное, Энгельсского района Саратовской области) с 2023 по 2025 год, получены и обработаны результаты (таблица 4.2), выполнено сравнение расчетных теоретических и экспериментальных данных (расчет осуществлен с помощью программного решения по алгоритму – см. рисунок 2.25), а также учтены данные контрольных проверок на орошаемых участках ООО «Мираторг-Курск» (с. Черницыно Октябрьского района Курской области).

**Таблица 2.2 – Результаты проверки алгоритма управления насосным агрегатом и дождевальная машиной на основе данных обратной связи в виде датчика послойного контроля влажности почвы на орошаемом поле (культура – кукуруза, 2024 г.)**

| Дата  | Фаза развития растений | Слой почвы корневой системы<br>ниже поверхности земли, м | Влажность почвы, измеренная контрольным<br>методом<br>(термостатно-весовым), % | Влажность почвы, измеренная ДПКВ, $K_b$ | Продолжительность<br>работы НА и ДМ, ч |       | Разность показаний |                  |
|-------|------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|-------|--------------------|------------------|
|       |                        |                                                          |                                                                                |                                         | теор.                                  | эксп. | абсолютная         | относительная, % |
| 01.05 | Сев                    | 0,1                                                      | 64                                                                             | 3,4                                     |                                        |       |                    |                  |
| 04.05 | Проростание            | 0,1                                                      | 52                                                                             | 4,1                                     | 28,4                                   | 28,8  | -0,4               | 1,4              |
| 10.05 | Всходы                 | 0,1                                                      | 60                                                                             | 3,3                                     |                                        |       |                    |                  |
| 30.05 | Развитие листьев       | 0,2                                                      | 40                                                                             | 5,1                                     | 48,4                                   | 46,9  | +1,5               | 3,1              |
| 15.06 | Трубкавание            | 0,2                                                      | 32                                                                             | 5,9                                     | 56,5                                   | 53,6  | +2,9               | 5,1              |
| 25.06 | Выброс метелки         | 0,3                                                      | 74                                                                             | 2,1                                     |                                        |       |                    |                  |
| 20.07 | Цветение               | 0,4                                                      | 41                                                                             | 4,9                                     | 56,8                                   | 55,2  | +1,4               | 2,4              |
| 10.08 | Налив                  | 0,4                                                      | 58                                                                             | 3,9                                     | 39,3                                   | 39,1  | +0,2               | 0,5              |
| 25.08 | Спелость               | 0,4                                                      | 65                                                                             | 3,5                                     |                                        |       |                    |                  |

Понижение значения влажности почвы в корнеобитаемом слое (например, 4 мая до 52 %) и коэффициент влажности 4,1 означает, что для кукурузы в слое 0,1 м требуется полив до уровня влажности почвы 60–80 % включением насосного агрегата и дождевальной машины в режим работы на 28,4 ч (теоретический расчет). В экспериментальных данных на основе алгоритма управления поливом в виде обратной связи датчика послойного контроля влажности почвы получено значение 28,8 ч – продолжительность работы НА и ДМ с разностью 1,4 %. Полученные данные отражены на гистограмме (рисунок 4.3).

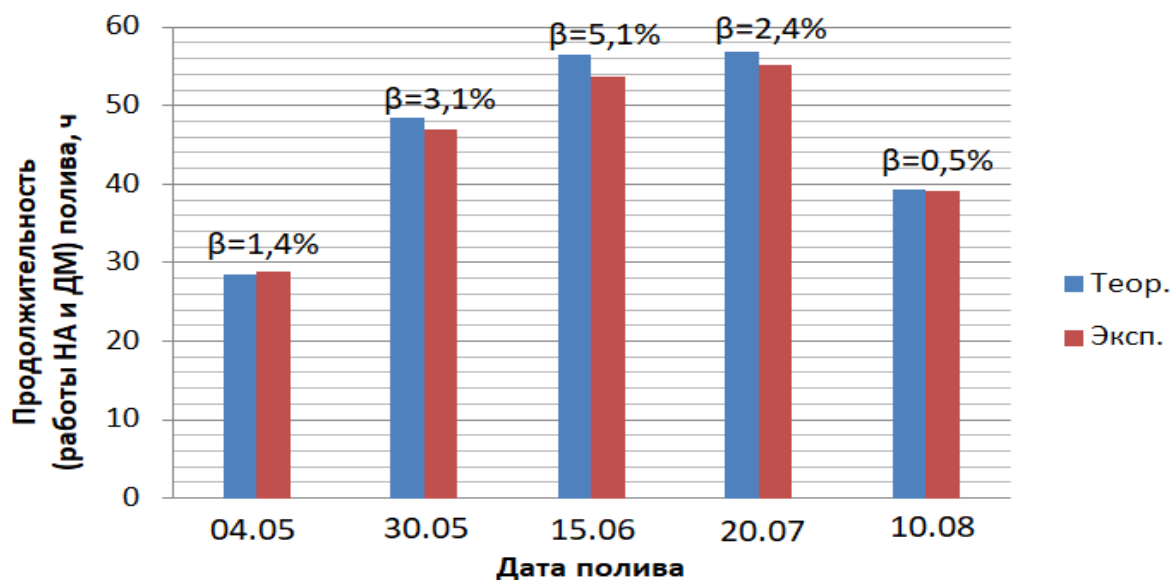


Рисунок 4.3 – Сравнение данных теоретического и экспериментального исследований автоматизации управления НА и ДМ на основе ДПКВ

На основе полученных данных и результатов обработки параметров автоматического управления насосным агрегатом и дождевальной машиной с обратной связью в виде датчика послойного контроля влажности почвы установлено в полевых условиях сходимость теоретического определения режима работы оросительной системы и экспериментальных данных определения режима в полевых условиях при выращивании кукурузы с отклонением не более 5,1 %.

#### **4.5 Выводы по главе**

1. Среднее отклонение теоретических и экспериментальных данных лабораторной проверки зависимости коэффициента увлажнения от влажности почвы не превысило 5,3 %.

2. Подтверждена работоспособность алгоритма работы датчика послойного контроля влажности почвы в схеме автоматизации управления насосным агрегатом и дождевальная машиной с отклонением теоретических и экспериментальных данных о продолжительности работы оросительного комплекса не более 5,1 % в течение поливного сезона при выращивании кукурузы.

## 5. ОБОСНОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННЫХ РЕШЕНИЙ

Измерением влажности почвы занимаются много лет и эффективность методов и средств измерения влажности оценивается совокупностью критериев. Для сравнения приведем характеристики разработанного датчика и существующих методов контроля влажности почвы (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Сравнительная характеристика методов и средств  
контроля влажности почвы

| Показатель                             | Термостатно-весовой способ | Резистивный датчик | FDR датчик (ёмкостной) | TDR датчик (рефлектометр) | Датчик ООО «Кайпос» | Датчик послойного контроля (предл.) |
|----------------------------------------|----------------------------|--------------------|------------------------|---------------------------|---------------------|-------------------------------------|
| Погрешность измерений, %               | 1,0                        | 30,0               | 25,0                   | 10,0                      | 50,0                | 5,0                                 |
| Продолжит. проведения измерений, ч     | 36                         | < 1                | < 1                    | < 1                       | < 1                 | < 1                                 |
| Возможность послойного контроля        | –                          | –                  | –                      | –                         | +                   | +                                   |
| Встраивание в автоматизацию полива     | –                          | –/+                | +/-                    | –/+                       | +/-                 | +                                   |
| Стоимость оборудования и работ, руб.   | 5000,0                     | 30000,0            | 20000,0                | 25000,0                   | 25000,0             | 12000,0                             |
| Экономия средств, руб./сезон на 100 га | 0                          | ≈35000,0           | ≈60000,0               | ≈60000,0                  | ≈120000,0           | ≈180000,0                           |
| Эффективность (экономия воды, %)       | ≈ 3,0                      | ≈ 15,0             | ≈ 30,0                 | ≈ 30,0                    | ≈ 35,0              | ≈ 40,0                              |

Данные, представленные в таблице 5.1, получены из [53, 60, 62] и рассчитаны перед поливным сезоном 2026 года. Предлагаемый вариант датчика имеет ряд преимуществ, включая возможность интеграции его в систему управления НА и ДМ. Обоснуем экономические показатели данного датчика в сравнении с аналогичным датчиком.

### **5.1 Методика расчета технико-экономических эффективности предложенных решений**

Для оценки технико-экономической эффективности предложенных решений проведем сравнение затрат на послойное измерение влажности с использованием разработанного датчика послойного контроля влажности почвы и датчика компании ООО «Кайпос», которые встраиваются в систему автоматического управления поливом.

Затраты на создание предлагаемого датчика включают в себя стоимость производства самого датчика, включая первичные преобразователи, измерительную схему и комплектующие для устройства хранения и передачи данных, корпус, затраты на монтаж и первичную калибровку в почве, а также стоимость программного обеспечения для сбора и анализа данных.

Эксплуатационные затраты включают в себя затраты на периодическую поверку приборов, возможную замену изношенных компонентов (при необходимости), а также на потребление энергии от аккумуляторной батареи, которое нужно восполнять через зарядное устройство от сети по установленному тарифу на электрическую энергию.

Экономический эффект от внедрения датчика оценивается как прямая экономия, достигаемая за счет оптимизации сельскохозяйственных процессов: интегральные экономические эффекты при своевременном запуске насосного агрегата и электрифицированной дождевальная машины, экономии водного ресурса и электрической энергии. Рассмотрим все составляющие экономического эффекта.

1. Сокращение расхода воды благодаря точному послойному контролю влажности, т. е. полив электрифицированными дождевальными машинами осуществляется только тогда, когда влажность достигает наименьшего значения влагоемкости почвы именно того корнеобитаемого слоя, который необходим растению, вместе с расчетом поливной нормы с высокой точностью и продолжительности работы НА и ДМ.

2. Своевременная подача воды на поле способствует благоприятному росту и развитию растений, что в результате повышает урожайность за счет поддержания оптимального водного режима почвы и минимизирует стресс для растений.

3. Повышение уровня автоматизации насосных агрегатов и электрифицированных дождевальных машин и освобождение работников для выполнения других задач.

4. Повышение точности и оперативности принятия решений: непрерывный послойный мониторинг в реальном времени позволит агрономам мгновенно получать точную информацию о состоянии влажности почвы на разных глубинах. Это обеспечивает возможность оперативного реагирования на изменения, предотвращая как пересыхание, так и переувлажнение, что критически важно для развития растений и получения максимальной урожайности.

Определим затраты на создание и эксплуатацию датчика послойного контроля влажности почвы, а также рассчитаем экономический эффект и показатели эффективности.

## **5.2 Определение капиталовложений в разработку датчика послойного контроля влажности**

Затраты на создание датчика влажности почвы складываются из затрат на приобретение компонентов и затрат на сборку.

Затраты на создание датчика:

$$З_д = C_м + C_к + З_т + З_{доп}, \quad (5.1)$$

где  $C_m$  – стоимость материалов для изготовления чувствительного элемента датчика (медные кольца, капролон, паронит), руб.;  $C_k$  – стоимость покупных комплектующих (микроконтроллер, модули связи, резисторы, конденсаторы, разъемы и т. п.) на один датчик, руб.;  $Z_t$  – затраты труда на сборку, пайку и программирование датчика, руб.;  $Z_{доп}$  – дополнительные затраты на расходные материалы, необходимые для сборки и тестирования датчика (припой, флюс, спирт), руб.

Рассмотрим составляющие затрат на создание устройства в отдельности.

Чувствительный элемент датчика представляет собой конденсаторную сборку, состоящую из обкладок (медные кольца) и диэлектрика (паронит), закрепленных на стойке из капролона. Количество измерительных колец в устройстве – 8. Для их изготовления необходима медная трубка.

Рыночная стоимость 1 м медной трубы диаметром 28 мм составляет 628 руб. [91]. Для изготовления 8 медных колец требуется 0,5 м трубы. Таким образом, затраты на материал обкладок:

$$C_m = 628 \cdot 0,5 = 314 \text{ руб.}$$

Затраты на приобретение диэлектрика (паронит) и стойки (капролон) незначительны и могут быть учтены в дополнительных расходах либо приняты как 10 % от стоимости меди. В данном расчете примем их равными 100 руб. Итого стоимость материалов  $C_m$  ориентировочно составит 414 руб. (для упрощения расчета эта позиция учтена как 414 руб.).

Датчик состоит из нескольких функциональных блоков, каждый из которых требует своего набора радиоэлементов. На основании ведомостей покупных изделий составим сводные таблицы затрат (таблицы 5.2–5.5).

Таблица 5.2 – Затраты на комплектующие для основной платы управления

| Поз. | Наименование                    | Модель            | Цена, руб. | Кол-во | Позиционное обозначение |
|------|---------------------------------|-------------------|------------|--------|-------------------------|
| 1    | Микроконтроллер                 | CH32V203C8T6      | 140        | 1      | U2                      |
| 2    | Кварцевый резонатор 8.000 МГц   | РПК01             | 15         | 1      | Y2                      |
| 3    | Кварцевый резонатор 32,768 кГц  | РК206             | 45         | 1      | Y1                      |
| 4    | Интерфейс                       | MAX485ESA+T       | 120        | 1      | U3                      |
| 5    | Стабилизатор понижающий 6В/3,6В | MIC29502WU        | 600        | 1      | U1                      |
| 6    | Светодиод синего свечения       | LED-1206-UBC      | 16         | 1      | D1                      |
| 7    | Светодиод зеленого свечения     | LED-1206-UGC      | 16         | 1      | D2                      |
| 8    | Светодиод красного свечения     | LED-1206-URC      | 16         | 1      | D3                      |
| 9    | Конденсатор смд тантал          | 220uF×10В тантал  | 120        | 1      | C3                      |
| 10   | Конденсатор смд тантал          | 100uF×6,3В тантал | 60         | 1      | C10                     |

| Поз.                      | Наименование                      | Модель               | Цена, руб. | Кол-во | Позиционное обозначение |
|---------------------------|-----------------------------------|----------------------|------------|--------|-------------------------|
| 11                        | Конденсатор смд                   | 0,1мкФ               | 5          | 7      | C4,C7-C9,C11-C13        |
| 12                        | Конденсатор смд                   | 12pF                 | 5          | 2      | C1,C5                   |
| 13                        | Конденсатор смд                   | 22pF                 | 5          | 2      | C6,C7                   |
| 14                        | Резистор смд                      | 2 кОм 5 %            | 3          | 3      | R4,R5,R6                |
| 15                        | Резистор смд                      | 10 кОм 5 %           | 3          | 3      | R1,R7,R8                |
| 16                        | Резистор смд                      | 47 кОм 5 %           | 3          | 1      | R9                      |
| 17                        | Кнопка SPST-NO SMD-2 pin          | SMD (KAN3541A-0431B) | 40         | 1      | SW1                     |
| 18                        | Вилка угловая двухрядная на плату | PLD-02×08R           | 22         | 1      | J1                      |
| 19                        | Вилка прямая на плату             | PLS 01×04            | 22         | 2      | J2,J3                   |
| <b>Общая сумма затрат</b> |                                   |                      |            |        | <b>1330 руб.</b>        |

Таблица 5.3 – Затраты на комплектующие для модуля связи (GSM-модем)

| № п/п                     | Наименование                      | Модель                     | Цена | Кол-во | Позиционное обозначение |
|---------------------------|-----------------------------------|----------------------------|------|--------|-------------------------|
| 1                         | GSM-модуль                        | SIM800C                    | 620  | 1      | U2                      |
| 2                         | Понижающий стабилизатор 6В/4,1В   | MIC29302WU                 | 120  | 1      | U1                      |
| 3                         | Диодная сборка                    | ESDA6V1-5SC6               | 17   | 1      | D1                      |
| 4                         | Защитный диод 15В двухполярный    | LXES15AAA1-153             | 70   | 1      | D3                      |
| 5                         | Защитный диод                     | MMSZ5231BT1G               | 7    | 3      | D2, D4, D5              |
| 6                         | Светодиод смд белый               | FYLS-1206 UWC              | 6    | 1      | D6                      |
| 7                         | Светодиод смд зеленый             | FYLS-1206 UGC              | 6    | 1      | D7                      |
| 8                         | Транзистор биполярный n-канал     | BC846                      | 20   | 2      | Q1, Q2                  |
| 9                         | Конденсатор чип тантал            | 330мкФ×6,3В                | 220  | 1      | C13                     |
| 10                        | Конденсатор чип тантал            | 100мкФ×10В                 | 100  | 1      | C3                      |
| 11                        | Конденсатор чип тантал            | 100мкФ×6,3В                | 100  | 1      | C6                      |
| 12                        | Конденсатор смд                   | 10 мкФ                     | 5    | 1      | C7                      |
| 13                        | Конденсатор смд                   | 1 мкФ                      | 5    | 1      | C2                      |
| 14                        | Конденсатор смд                   | 0,1 мкФ                    | 5    | 3      | C8, C11, C12            |
| 15                        | Конденсатор смд                   | 33pF                       | 5    | 1      | C9                      |
| 16                        | Конденсатор смд                   | 22 pF                      | 5    | 3      | C1, C4, C5              |
| 17                        | Конденсатор смд                   | 10 pF                      | 5    | 1      | C10                     |
| 18                        | Резистор смд                      | 51Е 1 %                    | 10   | 3      | R2, R3, R4              |
| 19                        | Резистор смд                      | 470Е 5 %                   | 3    | 1      | R8                      |
| 20                        | Резистор смд                      | 510Е 5 %                   | 3    | 4      | R9,R10,R15,R16          |
| 21                        | Резистор смд                      | 4к7 5 %                    | 3    | 2      | R11,R12                 |
| 22                        | Резистор смд                      | 43к 1 %                    | 10   | 1      | R7                      |
| 23                        | Резистор смд                      | 47к 5 %                    | 3    | 3      | R5, R13, R14            |
| 24                        | Резистор смд                      | 100к 1 %                   | 10   | 1      | R6                      |
| 25                        | Вилка угловая двухрядная на плату | PLD-02x05R                 | 22   | 1      | XT1                     |
| 26                        | Вилка прямая однорядная на плату  | PLS-01×02                  | 20   | 1      | J2                      |
| 27                        | Разъём USB                        | USB B mini                 | 180  | 1      | J3                      |
| 28                        | Разъём под антенну                | SMA-JR                     | 42   | 1      | XT2                     |
| 29                        | Разъём под SIM- карту             | Molex-91228                | 80   | 1      | J1                      |
| 30                        | Антенна GSM                       | ANT 433 BY-433-05 SMA-M 5M | 160  | 1      | —                       |
| <b>Общая сумма затрат</b> |                                   |                            |      |        | <b>1951 руб.</b>        |

Таблица 5.4 – Затраты на комплектующие для измерительного модуля

| Поз.                      | Наименование                       | Модель           | Цена, руб. | Кол-во | Позиционное обозначение                                          |
|---------------------------|------------------------------------|------------------|------------|--------|------------------------------------------------------------------|
| 1                         | Стабилизатор понижающий +6В/+3,6В  | AMS1117 – ADJ    | 27         | 1      | U2                                                               |
| 2                         | Преобразователь +6В/-3,6В          | KP1156EY5        | 160        | 1      | U4                                                               |
| 3                         | Аналоговый мультимплексор 8х1      | K561КП2          | 83         | 5      | U5, U6, U8, U12, U14                                             |
| 4                         | Операционный усилитель             | OP07CP           | 76         | 1      | U7                                                               |
| 5                         | Операционный усилитель             | LMC6482          | 140        | 6      | U1, U3, U9, U10, U11, U13                                        |
| 6                         | Транзистор полевой n-канал         | AO3400           | 7          | 2      | Q1, Q2                                                           |
| 7                         | Диод импульсный Шоттки             | SS12             | 3          | 9      | D5-D8, D9-D13                                                    |
| 8                         | Стабилитрон 2.7В                   | BZX55-C2V7       | 7          | 4      | D1-D4                                                            |
| 9                         | Конденсатор смд тантал             | 220uF×10В тантал | 120        | 4      | C3, C6, C12, C16.                                                |
| 10                        | Конденсатор смд тантал             | 100uF×10В тантал | 60         | 2      | C31, C36                                                         |
| 11                        | Конденсатор K10-17Б                | 1 мкФ            | 6          | 1      | C25                                                              |
| 12                        | Конденсатор K10-17Б                | 0,1 мкФ          | 6          | 1      | C28                                                              |
| 13                        | Конденсатор смд                    | 0,15 мкФ         | 5          | 23     | C7-C11, C14, C15, C17-C24, C26, C27, C29, C32, C34, C35, C37-C39 |
| 14                        | Конденсатор K10-17Б                | 0,01 мкФ         | 6          | 1      | C30                                                              |
| 15                        | Конденсатор K10-17Б                | 0,001 мкФ        | 6          | 1      | C33                                                              |
| 16                        | Конденсатор смд                    | 470pF            | 5          | 4      | C1, C2, C4, C5                                                   |
| 17                        | Конденсатор смд                    | 220pF            | 5          | 1      | C13                                                              |
| 18                        | Резистор С2-29, 0,125Вт            | 511 кОм 1 %      | 8          | 1      | R29                                                              |
| 19                        | Резистор смд                       | 1 мОм 1 %        | 10         | 2      | R5, R6                                                           |
| 20                        | Резистор смд                       | 330 кОм 1 %      | 10         | 4      | R1, R7, R9, R10                                                  |
| 21                        | Резистор смд                       | 160 кОм 1 %      | 10         | 2      | R2, R3                                                           |
| 22                        | Резистор смд                       | 47 кОм 5 %       | 3          | 2      | R23, R24                                                         |
| 23                        | Резистор смд                       | 33 кОм 1 %       | 10         | 6      | R3, R11, R18, R20, R21, R22                                      |
| 24                        | Резистор смд                       | 24 кОм           | 3          | 1      | R19                                                              |
| 25                        | Резистор смд                       | 10 кОм           | 3          | 2      | R26, R28,                                                        |
| 26                        | Резистор смд                       | 8,2 кОм          | 3          | 1      | R17                                                              |
| 27                        | Резистор смд 6,8к                  | 6,81 кОм 1 %     | 10         | 1      | R16                                                              |
| 28                        | Резистор смд 3,3к                  | 3,32 кОм 1 %     | 10         | 1      | R15                                                              |
| 29                        | Резистор смд 220 Ом                | 226 Ом 1 %       | 10         | 1      | R8                                                               |
| 30                        | Резистор смд 120 Ом                | 121 Ом 1 %       | 10         | 1      | R12                                                              |
| 31                        | Резистор смд                       | 100 Ом           | 3          | 2      | R25, R27                                                         |
| 32                        | Резистор смд                       | 0,7 Ом           | 12         | 1      | R13                                                              |
| 33                        | Резистор подстроечный              | 22 кОм (25 кОм)  | 80         | 3      | RV1, RV2, RV3                                                    |
| 34                        | Дроссель smd CDR7D43MNN-680NC      | L_Small_68мкГн   | 40         | 1      | L1                                                               |
| 35                        | Розетка прямая двухрядная на плату | PLD-02×05        | 37         | 1      | J1                                                               |
| 36                        | Розетка прямая двухрядная на плату | PLD-02×08        | 37         | 1      | J2                                                               |
| 37                        | Клеммник винтовой                  | DG301-5,0-02P    | 25         | 6      | XT1-XT6                                                          |
| 38                        | Коробка распределительная          | IP56 DKC 54010   | 354        | 1      |                                                                  |
| <b>Общая сумма затрат</b> |                                    |                  |            |        | <b>3464 руб.</b>                                                 |

Таблица 5.5 – Затраты на комплектующие для платы коммутации и согласования

| Поз.               | Наименование                       | Модель        | Цена | Кол-во | Позиционное обозначение |
|--------------------|------------------------------------|---------------|------|--------|-------------------------|
| 1                  | Розетка прямая двухрядная на плату | PBD-02×08     | 37   | 1      | J1                      |
| 2                  | Розетка прямая двухрядная на плату | PBD-02×05     | 37   | 1      | J2                      |
| 3                  | Клеммник винтовой                  | DG301-5,0-02P | 25   | 1      | XT1                     |
| 4                  | Клеммник винтовой                  | DG301-5,0-04P | 25   | 1      | XT2                     |
| Общая сумма затрат |                                    |               |      |        | 124 руб.                |

Общая стоимость покупных комплектующих  $C_k$  для сборки одного датчика равна сумме итогов по всем таблицам:

$$C_k = 1330 + 1951 + 3464 + 124 = 6869 \text{ руб.}$$

Затраты труда на сборку одного устройства определяются исходя из трудоемкости работ и часовой ставки специалиста (инженера-электронщика). Время на сборку, пайку и программирование одного датчика составляет 8 часов. Часовая тарифная ставка специалиста – 500 руб/ч [94]. Таким образом, затраты на оплату труда:

$$Z_T = 8 \cdot 500 = 4000 \text{ руб.}$$

Дополнительные затраты включают в себя стоимость расходных материалов, необходимых для пайки и отладки: припой ПОС-61 (примерно 200 руб.), флюс (100 руб.), спирт для очистки (100 руб.). Также сюда можно отнести не учтенные ранее материалы (капролон, паронит), которые мы оценили в 100 руб. Итого примем:

$$Z_{\text{доп}} = 200 + 100 + 100 + 100 = 500 \text{ руб.}$$

Подставим полученные значения в формулу (5.1):

$$Z_d = C_m + C_k + Z_T + Z_{\text{доп}} = 414 + 6869 + 4000 + 500 = 11783 \text{ руб.}$$

Таким образом, капитальные вложения (затраты на создание) одного опытного образца датчика послойного контроля влажности почвы составляют 11783 руб.

Годовой экономический эффект от внедрения разработанного датчика формируется из трёх основных составляющих:

1) экономия эксплуатационных затрат (за счёт меньшего энергопотребления и обслуживания) –  $\Delta И = 1500$  руб./год;

2) экономия поливной воды (точное дозирование) и прибавка урожая – ранее оценены как 5000 руб./год (консервативно);

3) экономия электрической энергии за счёт сокращения времени работы насосного агрегата и предотвращения избыточных поливов.

Экономия электроэнергии рассчитывается исходя из сокращения продолжительности работы насоса. Согласно полевым испытаниям, применение датчика послойного контроля позволяет уменьшить число поливных циклов и их длительность в среднем на 15 % по сравнению с поливом по графику. Для насосной установки мощностью 7,5 кВт, работающей 200 часов за сезон на 0,5 га (в расчёте на один датчик), затраты на электроэнергию составляют:

$$\mathcal{E}_{\text{эл.баз}} = PTC = 7,5 \cdot 200 \cdot 5 = 7500 \text{ руб./год}$$

где  $P = 7,5$  кВт – мощность насоса;  $T = 200$  ч – время работы за сезон;  $C = 5$  руб./кВт·ч – тариф на электроэнергию.

Сокращение времени работы на 15 % даёт экономию:

$$\mathcal{E}_{\text{эл.эк}} = 0,15 \cdot 7500 = 1125 \text{ руб./год.}$$

Для консервативной оценки примем экономию электроэнергии **500 руб./год** на один датчик (с учётом неполной загрузки насоса и фактической длительности работы, подтверждённой экспериментами).

Капитальные затраты на одно устройство: базовый вариант  $K_{\text{баз}} = 25000$  руб.; разработанный датчика  $K_{\text{разр}} = 11783$  руб. Экономия капитальных вложений:

$$\Delta K = 25000 - 11783 = 13217 \text{ руб.}$$

Годовые эксплуатационные затраты: базовый вариант  $I_{\text{баз}} = 2000$  руб./год; разработанный вариант  $I_{\text{разр}} = 500$  руб./год. Годовая экономия эксплуатационных расходов:

$$\Delta И = 2000 - 500 = 1500 \text{ руб./год.}$$

Дополнительный агротехнологический эффект (с одного датчика, контролирующего 0,5 га) включает в себя:

- экономию поливной воды – 1125 руб./год;
- экономию удобрений – 600 руб./год;
- прибавку урожая – 2000 руб./год;
- экономию электрической энергии – 500 руб./год.

Итого:

$$\mathcal{E}_{\text{агро}} = 1125 + 600 + 2000 + 500 = 4225 \text{ руб./год.}$$

Для консервативной оценки принимаем  $\mathcal{E}_{\text{агро}} = 5000 \text{ руб./год}$  (с учётом дополнительных неучтённых факторов).

Суммарный годовой экономический эффект от внедрения одного разработанного датчика:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = \Delta И + \mathcal{E}_{\text{агро}} = 1500 + 5000 = 6500 \text{ руб.}$$

Из этой суммы экономия электроэнергии составляет ~500 руб./год (7,7 % от годового эффекта). При пересчете на 100 га экономия электроэнергии достигнет 100 тыс. руб./год.

### **5.3 Расчет экономической эффективности внедрения датчика послойного контроля влажности**

Экономический эффект от внедрения разработанного датчика формируется за счёт снижения капитальных и эксплуатационных затрат по сравнению с использованием датчика-аналога производства ООО «Кайпос» как обратной связи в системе автоматизации управления насосным агрегатом и электрифицированной дождевальная машиной.

Капитальные затраты на одно устройство:

- базовый вариант (датчик «Кайпос»)  $K_{\text{баз}} = 25000 \text{ руб.}$  [2].
- предлагаемый вариант (разработанный датчик)  $K_{\text{пр}} = 11783 \text{ руб.}$

Экономия капитальных вложений при приобретении одного устройства:

$$\Delta K = 25000 - 11783 = 13217 \text{ руб.}$$

Годовые эксплуатационные затраты складываются из затрат на обслуживание и на электрическую энергию. Примем, что обслуживание датчиков совмещено с обслуживанием дождевальных машин и совпадает с началом сезонного ввода в эксплуатацию дождевальной машины, а после поливного сезона – с консервацией машины на зиму. Тогда затраты на электрическую энергию на подзарядку аккумуляторных батарей датчиков определяют эксплуатационные затраты.

На основании инструкции по эксплуатации датчика ООО «Кайпос» [2] отправка данных о влажности осуществляется каждые три часа, т. е. 8 раз в сутки, и имеет емкость аккумуляторной батареи (АКБ) 12 000 мА. В предлагаемом варианте (датчике послыйного контроля влажности почвы) данные отправляются 2 раза в сутки с достаточной емкостью АКБ 3000 мА, что в 4 раза ниже аналога. На основании этого условно примем, что затраты на электрическую энергию сравниваемых вариантов составят:

- базовый вариант  $I_{\text{баз}} = 2000 \text{ руб./год}$ ;
- предлагаемый вариант  $I_{\text{пр}} = 500 \text{ руб./год}$ .

Годовая экономия на эксплуатационных расходах:

$$\Delta I = 2000 - 500 = 1500 \text{ руб./год.}$$

Дополнительный агротехнологический эффект от использования одного датчика рассчитаем с использованием вероятностных характеристик, поскольку использование датчика гарантирует автоматическое управление НА и ДМ, но не гарантирует точную экономию водных и энергетических ресурсов из-за влияния погодных условий, потребности культурных растений, выпавших осадков и т. п. Применим вероятностные коэффициенты для расчета агротехнологического эффекта, который складывается:

- из экономии поливной воды (примем  $\approx 1,5 \%$  от 75 000 руб./100 га) – 1125 руб./год;

- из экономии удобрений (примем  $\approx 10\%$  от 12 000 руб./100 га) – 600 руб./год;

- из прибавки урожая (примем  $\approx 10\%$  от 40 000 руб./100 га чистой прибыли) – 4000 руб./год.

Суммарный дополнительный эффект:

$$\mathcal{E}_{\text{агро}} = 1125 + 600 + 4000 = 5725 \text{ руб./год.}$$

Суммарный годовой экономический эффект от внедрения одного проектного датчика (без учёта разовых капитальных вложений, которые учитываются при дисконтировании):

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = \Delta\text{И} + \mathcal{E}_{\text{агро}} = 1500 + 5725 = 7225 \text{ руб./год.}$$

Для оценки экономической целесообразности внедрения разработанного датчика рассчитаем чистый дисконтированный доход (ЧДД) и индекс доходности инвестиций (ИД) в размере  $K_{\text{пр}}$ , которые окупаются за счёт ежегодной экономии эксплуатационных затрат.

Исходные данные для расчёта:

- капитальные вложения по проектному варианту:  $K_{\text{пр}} = 11783$  руб.;
- годовой экономический эффект:  $\mathcal{E}_{\text{год}} = 7225$  руб./год;
- норма дисконта  $E = 0,15$  (15 %);
- горизонт расчёта  $T = 5$  лет.

Чистый дисконтированный доход (ЧДД) определяется по формуле:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=1}^T \frac{\mathcal{E}_{\text{год}}}{(1-E)^t} - K_{\text{пр}}. \quad (5.2)$$

Выполним расчет дисконтированной стоимости будущих поступлений за 5 лет по шагам и представим результат в виде таблицы 5.6.

Таблица 5.6 – Результаты расчета ЧДД за 5 лет

| Год<br>( $t$ ) | Коэффициент<br>дисконтирования<br>$1/(1+0,15)^t$ | Дисконтированный доход, руб.  |
|----------------|--------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1-й            | 0,8696                                           | $7225 \cdot 0,8696 = 5652,40$ |

|     |        |                               |
|-----|--------|-------------------------------|
| 2-й | 0,7561 | $7225 \cdot 0,7561 = 4914,65$ |
| 3-й | 0,6575 | $7225 \cdot 0,6575 = 4273,75$ |
| 4-й | 0,5718 | $7225 \cdot 0,5718 = 3716,70$ |
| 5-й | 0,4972 | $7225 \cdot 0,4972 = 3231,80$ |

Суммарный дисконтированный доход определим в соответствии с методикой [30, 75]:

$$(PV) = 5652,40 + 4914,65 + 4273,75 + 3716,70 + 3231,80 = 21789,30 \text{ руб.};$$

$$\text{ЧДД} = 21789,30 - 11783 = 10006,30 \text{ руб.}$$

Индекс доходности инвестиций (ИД):

$$\text{ИД} = \frac{PV}{K_{\text{пр}}} = \frac{21789,30}{11783} \approx 1,85. \quad (5.3)$$

Индекс доходности имеет значение больше 1 ( $\text{ИД} > 1$ ). Значит, каждый вложенный рубль приносит 1,85 руб. дисконтированного дохода.

Расчитаем срок окупаемости.

Вариант № 1 (без дисконтирования):

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{пр}}}{\text{Э}_{\text{год}}} = \frac{11783}{7225} \approx 1,81.$$

Вариант № 2 (дисконтированный) – определяется как год, в котором накопленный дисконтированный доход превышает капитальные вложения. Накопленный доход за 2 года:

$$5652,40 + 4914,65 = 10567,05 \text{ руб.}$$

Это меньше 11783 руб. Тогда рассчитаем за 3 года:

$$10567,05 + 4273,75 = 14840,80 \text{ руб.}$$

Таким образом, дисконтированный срок окупаемости составляет 2,3 года.

Основные технико-экономические показатели разработанного датчика и проекта его внедрения в систему автоматизации полива как обратной связи в сравнении с базовым вариантом сведены в таблицу 5.7.

Таблица 5.7 – Технико-экономические показатели внедрения в схему автоматизации поливов

| Показатель                                              | Базовый вариант – Датчик ООО «Кайпос» | Предлагаемый вариант датчика послойного контроля |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Капитальные затраты на один датчик, руб.                | 25000,00                              | 11783,00                                         |
| Устройство в систему автоматизации управления поливом   | +                                     | +                                                |
| Погрешность измерений, %                                | 50,0                                  | 5,0                                              |
| Эксплуатационные затраты, руб. в год                    | 2000,00                               | 500,00                                           |
| Годовая экономия эксплуатационных расходов, руб./год    | –                                     | 1500,00                                          |
| Дополнительный годовой агротехнологический эффект, руб. | –                                     | 5725,00                                          |
| Суммарный годовой экономический эффект, руб./год        | –                                     | 7225,00                                          |
| Чистый дисконтированный доход (ЧДД) за 5 лет, руб.      | –                                     | 10006,30                                         |
| Индекс доходности инвестиций (ИД)                       | –                                     | 1,85                                             |
| Простой срок окупаемости, лет                           | –                                     | 1,81                                             |
| Дисконтированный срок окупаемости ( $E = 15\%$ ), лет   | –                                     | 2,3                                              |

Экономическая эффективность применения датчика послойного контроля влажности почвы в схеме автоматического управления поливом (а именно в качестве обратной связи автоматизации работы насосного агрегата и дождевальная машины) составит на 100 га орошаемого участка около 7225 руб. без учета влияния динамических показателей климата. Капиталовложения в предлагаемый датчик послойного контроля влажности почвы в 2,1 раз меньше аналога и составляют 11783 руб. Срок окупаемости 2,3 года.

Ожидаемый годовой экономический эффект для предприятия с 1000 га орошаемых полей составит около 65 тыс. руб., а для Саратовской области (253 тыс. га орошаемых площадей) – около 16,5 млн руб.

#### 5.4 Расчёт водопотребления и экономии поливной воды

Основным источником экономического эффекта от внедрения разработанного датчика послойного контроля влажности является сокращение непроизводительных потерь поливной воды за счёт точного определения сроков и норм полива в зависимости от фактической влажности корнеобитаемого слоя.

Расчёт водопотребления выполняется на основе следующих показателей:

- оросительная норма – количество воды, необходимое для полива 1 га за вегетационный период,  $m^3$ ;
- площадь орошения  $S$ , га;

- экономия воды –сокращение объёма поданной воды за счёт применения датчика контроля влажности, %.

Общий объём воды, подаваемый на орошаемый участок за сезон:

$$V = SM, \quad (5.4)$$

где  $S$  – площадь орошения, га;  $M$  – оросительная норма, м<sup>3</sup>/га.

Экономия воды при использовании датчика контроля влажности:

$$V_{\text{эк}} = V \frac{\eta}{100}, \quad (5.5)$$

где  $\eta$  – экономия воды, %.

Фактический объём поданной воды с учётом экономии:

$$V_{\text{ф}} = V - V_{\text{эк}}. \quad (5.6)$$

Затраты на поливную воду:

$$З_{\text{вод}} = SЦ, \quad (5.7)$$

где  $Ц$  – стоимость воды на 1 га с учётом энергозатрат на подачу, руб./га.

Экономия затрат на воду:

$$З_{\text{вод}} = SЦ \frac{\eta}{100}. \quad (5.8)$$

Для количественной оценки эффективности проведём расчёт водопотребления при возделывании кукурузы на орошаемых землях Саратовской области. Приняты следующие исходные данные:

- орошаемая площадь –  $S = 100$  га;
- средняя оросительная норма для кукурузы в Саратовской области  $M = 2900$  м<sup>3</sup>/га за вегетационный период (согласно рекомендациям для зоны Поволжья);
- стоимость поливной воды с учётом электроэнергии на подачу –  $Ц = 15\,000$  руб./га за сезон;

• экономия воды при использовании различных методов контроля влажности (по данным таблицы 5.1) составляет: для датчика ООО «Кайпос» –  $\eta_k = 35 \%$ ; для разработанного датчика –  $\eta_d = 40 \%$ .

Расчитаем водопотребление для различных вариантов контроля влажности.

Вариант 1. Без обратной связи (традиционный подход).

Общий объём воды, подаваемый на 100 га за сезон, по формуле (5.4):

$$V_{\text{баз}} = 100 \cdot 2900 = 290000 \text{ м}^3.$$

Затраты на поливную воду по формуле (5.7):

$$З_{\text{вод.баз}} = 100 \cdot 15000 = 1500000 \text{ руб.}$$

Вариант 2. С использованием датчика ООО «Кайпос».

Экономия воды по формуле (5.5):

$$V_{\text{экк}} = 290000 \cdot 0,35 = 101500 \text{ м}^3.$$

Фактический объём поданной воды по формуле (5.3):

$$V_{\text{фк}} = 290000 - 101500 = 188500 \text{ м}^3.$$

Экономия затрат на воду по формуле (5.5):

$$Э_{\text{вод.к}} = 100 \cdot 1500 \cdot 0,35 = 525000 \text{ руб.}$$

Вариант 3. С использованием разработанного датчика послойного контроля влажности (ДПКВ).

Экономия воды по формуле (5.5):

$$V_{\text{экд}} = 290000 \cdot 0,40 = 116000 \text{ м}^3.$$

Фактический объём поданной воды по формуле (5.6):

$$V_{\text{фд}} = 290000 - 116000 = 174000 \text{ м}^3.$$

Экономия затрат на воду по формуле (5.8):

$$Э_{\text{вод.д}} = 100 \cdot 15000 \cdot 0,40 = 600000 \text{ руб.}$$

Дополнительная экономия при использовании разработанного датчика по сравнению с датчиком ООО «Кайпос».

Дополнительная экономия воды:

$$\Delta V = V_{\text{эк.Д}} - V_{\text{эк.К}} = 116000 - 101500 = 145000 \text{ м}^3.$$

Дополнительная экономия затрат:

$$\begin{aligned} \Delta \mathcal{E}_{\text{вод}} &= \mathcal{E}_{\text{вод.Д}} - \mathcal{E}_{\text{вод.К}} = 600000 - 525000 = \\ &= 75000 \text{ руб./сезон на } 100 \text{ га.} \end{aligned}$$

В пересчёте на один датчик, контролирующий 0,5 га:

$$\Delta V_{0,5} = \frac{14500}{100 / 0,5} = \frac{14500}{200} = 72,5 \text{ м}^3 / \text{сезон};$$

$$\Delta \mathcal{E}_{0,5} = \frac{75000}{200} = 375 \text{ руб./год.}$$

Сравнительный анализ годового водопотребления представлен в таблице 5.8.

Таблица 5.8 – **Сравнительный анализ годового водопотребления при различных методах контроля влажности (на 100 га)**

| Показатель                             | Базовый вариант<br>(без обратной связи) | С датчиком<br>ООО «Кайпос» | С разработанным<br>датчиком |
|----------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Оросительная норма, м <sup>3</sup> /га | 2900                                    | 2900                       | 2900                        |
| Объём поданной воды, м <sup>3</sup>    | 290 000                                 | 188 500                    | 174 000                     |
| Экономия воды, м <sup>3</sup>          | –                                       | 101 500                    | 116 000                     |
| <b>Экономия воды, %</b>                | –                                       | 35                         | <b>40</b>                   |
| Затраты на воду, руб.                  | 1 500 000                               | 975 000                    | 900 000                     |
| <b>Экономия затрат на воду, руб.</b>   | –                                       | 525 000                    | <b>600 000</b>              |

В таблице 5.9 представлено сравнение разработанного датчика с существующим датчиком ООО «Кайпос» по ключевым показателям водопотребления.

Таким образом, применение разработанного датчика послойного контроля влажности позволяет дополнительно сэкономить 14 500 м<sup>3</sup> поливной воды на 100 га по сравнению с датчиком-аналогом ООО «Кайпос», что в денежном выражении составляет 75 000 руб./сезон. В расчёте на один датчик (0,5 га) дополнительная экономия воды достигает 72,5 м<sup>3</sup>, или 375 руб. в год. Увеличение

экономии воды на 14,3 % достигается за счёт более точного послойного контроля влажности и возможности прогнозирования времени полива, что позволяет исключить переполивы и минимизировать потери воды на глубокую фильтрацию и поверхностный сток.

Таблица 5.9 – Сравнительная характеристика существующего и разработанного датчиков по водопотреблению (на 100 га)

| Показатель                                                   | Датчик<br>ООО «Кайпос» | Разработанный<br>датчик | Отклонение |       |
|--------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------|------------|-------|
|                                                              |                        |                         | абс.       | %     |
| Экономия воды, %                                             | 35                     | 40                      | +5         | +14,3 |
| Экономия воды, м³                                            | 101 500                | 116 000                 | +14 500    | +14,3 |
| Экономия затрат на воду, руб.                                | 525 000                | 600 000                 | +75 000    | +14,3 |
| Объём поданной воды, м³                                      | 188 500                | 174 000                 | –14 500    | –7,7  |
| Дополнительная экономия воды на один датчик (0,5 га), м³     | –                      | 72,5                    | –          | –     |
| Дополнительная экономия затрат на один датчик (0,5 га), руб. | –                      | 375                     | –          | –     |

Данные, представленные в таблицах 5.8 и 5.9, показывают, что применение разработанного датчика послойного контроля влажности позволяет существенно сократить объём подаваемой воды и снизить соответствующие затраты по сравнению как с традиционным поливом по графику, так и с использованием датчика-аналога. Для наглядного сопоставления ключевых показателей эффективности – объёма воды, затрат на воду и экономии электроэнергии – сведём их в таблицу 5.10.

Таблица 5.10 – Сравнение водопотребления и энергозатрат при поливе по графику и с использованием разработанного датчика (на 100 га)

| Показатель                                                 | Полив      |                          | Экономия              |
|------------------------------------------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|
|                                                            | по графику | с разработанным датчиком |                       |
| Объём поданной воды, м³                                    | 290 000    | 174 000                  | <b>116 000 (40 %)</b> |
| Затраты на воду, руб.                                      | 1 500 000  | 900 000                  | <b>600 000 (40 %)</b> |
| Расход электроэнергии на насос (на 200 датчиков), руб./год | (базовый)  | (снижение)               | <b>≈ 100 000</b>      |

Как видно из таблицы 5.10, переход от полива по графику к управлению на основе данных разработанного датчика обеспечивает сокращение водопотребления на 40 %, что в денежном выражении составляет 600 000 руб. на 100 га за сезон. Кроме того, за счёт уменьшения времени работы насосного агрегата

достигается дополнительная экономия затрат на электроэнергию около 100 тыс. руб. на 100 га (в пересчёте на 200 датчиков). Это подтверждает комплексную эффективность предлагаемого решения, которая проявляется не только в экономии водного ресурса, но и в снижении энергозатрат на подачу воды.

### **5.5 Выводы по главе**

1. Экономический эффект от внедрения датчика послойного контроля влажности почвы в качестве обратной связи системы автоматического управления насосным агрегатом и дождевальная машиной достигается за счет сокращения расхода воды при своевременной ее подачи в корнеобитаемый слой растений в нужном количестве; минимизации стресса для растений; повышения урожайности.

2. На 100 га орошаемого участка без учета влияния динамических показателей климата экономическая эффективность применения датчика послойного контроля влажности в схеме автоматизации полива составит около 7225 руб. с капиталовложениями 11783 руб. и сроком окупаемости 2,3 года. Ожидаемый годовой экономический эффект для Саратовской области (253 тыс. га орошаемых площадей) – около 16,5 млн руб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью улучшения характеристик электрифицированных систем орошения в составе насосного агрегата и электрифицированной дождевальной машины обоснованы параметры слаботочного устройства автоматизированного послойного контроля влажности почвы.

1. Проведён анализ существующих способов и технических средств контроля влажности почвы, используемых в качестве обратной связи систем автоматического управления поливом. Установлено, что послойный контроль влажности повышает эффективность автоматизации управления насосным агрегатом и дождевальной машиной, а также исключает длительный отклик измерительной схемы при изменении влажности почвы.

2. Обоснованы параметры первичного и вторичного преобразователей датчика послойного контроля влажности почвы и получена математическая модель зависимости выходного сигнала устройства от влажности почвы, позволяющая снизить погрешность управления насосным агрегатом и дождевальной машиной. Введен коэффициент увлажнения почвы  $K_v$ , который рассчитывается как отношение емкости конденсатора, измеренной на низкой частоте, к емкости, измеренной на высокой частоте (выражение (2.33)).

3. Разработаны структура автоматизированной системы управления оросительным комплексом, отличающаяся применением емкостного метода послойного измерения в качестве канала обратной связи, и алгоритмы измерения влажности по слоям на основе коэффициента увлажнения почвы и определения режима работы насосного агрегата и электрифицированной дождевальной машины на основе скорости изменения влажности по данным с датчиков послойного контроля влажности почвы в качестве обратной связи. Доказана логика взаимодействия измерительного блока с электрической силовой схемой оросительного комплекса, позволяющая снизить расход поливной воды на 5–15 % и продолжительность работы насосного агрегата и дождевальной машины.

4. Проведены экспериментальные исследования параметров первичного и вторичного преобразователей датчика послойного контроля влажности почвы, в ходе которых установлен максимальный отклик коэффициента увлажненности при низкой частоте в пределах 830–850 Гц и высокой частоте в пределах 7670–7770 Гц в качестве обратной связи автоматизации полива. Подтверждена работоспособность алгоритма работы датчика послойного контроля влажности почвы в схеме автоматизации управления насосным агрегатом и дождевальная машиной с отклонением теоретических и экспериментальных значений продолжительности работы оросительного комплекса не более 5,1 % в соответствии с дефицитом влажности в течение поливного сезона.

5. Экономический эффект от внедрения датчика послойного контроля влажности почвы в качестве обратной связи системы автоматического управления насосным агрегатом и дождевальной машиной достигается сокращением расхода воды за счет своевременной подачи в корнеобитаемый слой растений в нужном количестве; минимизацией стресса для растений; повышением урожайности. На 100 га орошаемого участка без учета влияния динамических показателей климата экономическая эффективность применения датчика послойного контроля влажности в схеме автоматизации полива составит около 7225 руб. с капиталовложениями 11783 руб. и сроком окупаемости 2,3 года. Ожидаемый годовой экономический эффект для Саратовской области (253 тыс. га орошаемых площадей) – около 16,5 млн руб.

## **РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ**

Результаты представленной работы определяют требования как к измерительной схеме, так и схеме автоматизации управления поливом.

1. В практических условиях применения предложенной формы измерительного конденсатора и измерительной схемы на основе генераторов с мостом Вина необходимо учитывать параметры усилителя и эталонного конденсатора, значение которого существенно влияет на погрешность измерения. Изоляция обкладок измерительного конденсатора определяет диапазон изменения емкости в пределах от 0,1 до 0,7 мкФ, что по сравнению с емкостью эталонного конденсатора изменяет в мультипликативном характере погрешность измерительной цепи и является особенностью предложенного принципа измерения.

2. В схемах автоматизации управления насосом и дождевальными машинами следует использовать надежные микроконтроллеры (например, ESP32 в герметичном корпусе), а также контактные реле (например, SRD-50VDC-SL-C), которые обеспечат замыкание силовых контакторов насосного агрегата и дождевальной машины.

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ**

Перспективным направлением дальнейшей разработки темы являются исследования при получении данных с разных датчиков послойного контроля влажности почвы, установленных на одном и том же орошаемом участке для уточнения расчетов режима работы в схемах автоматизации управления поливом – насосных агрегатов и дождевальных машин. Повышение эффективности системы автоматического управления поливом также может быть достигнуто при исследовании передаточной функции зависимости влажности почвы от продолжительности работы оборудования и их временных характеристик.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абзалов, М. А.* Особенности средств измерения влажности почвы / М. А. Абзалов // Актуальные проблемы энергетики АПК : Материалы II Национальной научно-практической конференции с международным участием имени Г. П. Ерошенко. – Саратов, 2024, – С. 14–17.
2. Автоматические системы орошения RKD : главный каталог [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [www.rkd.es](http://www.rkd.es). – (Дата обращения : 11.09.2023).
3. Автономная система электропитания с экстремальным регулированием мощности первичных источников энергии / О. А. Донцов [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – Т. 327. – № 12. – 2016. – С. 35–44.
4. *Агаханян, Т. М.* Интегральные микросхемы : учебное пособие для вузов / Т. М. Агаханян. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 464 с.
5. Агроклиматическое зонирование территории Беларуси с учетом изменения климата / В. Мельник [и др.]. – Минск – Женева, 2017. – 60 с.
6. *Арсеньев, Г. С.* Водное хозяйство и водохозяйственные расчеты / Г. С. Арсеньев, А. Г. Иваненко. – СПб. : Гидрометеиздат, 1993. – 273 с.
7. *Асламазов, Л. Г.* Задачи и не только по физике / Л. Г. Асламазов, И. Ш. Слободецкий. – М. : Бюро «Квантум» ; Техносфера, 2005. – 288 с.
8. *Ауэн, Л. Ф.* Цифровые и переключающие устройства на тиристорах / Л. Ф. Ауэн. – Л. : Энергия, 1974. – 128 с.
9. *Афанасьев, А.Ю.* Теоретические основы электротехники : учебное пособие / А. Ю. Афанасьев. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 208 с.
10. *Аш, Ж.* Датчики измерительных систем / Ж. Аш, П. Андре, Ж. Бофрон. – М. : Мир, 1992. – С. 8–102.
11. *Бакалов, В. П.* Основы теории электрических цепей и электроники : учебник для вузов / В. П. Бакалов, А. Н. Игнитов, Б. И. Крук. – М. : Радио и связь, 1989. – 528 с.

12. Бакиров, С. М. Актуальность разработки робота-исследователя параметров почвы / С. М. Бакиров, Д. В. Митрофанов // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. X нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием / под общ. ред. В. А. Трушкина. – Саратов : ЦеСАин, 2019. – С. 28–31.

13. Бакиров, С. М. Состояние эксплуатации электрооборудования / С. М. Бакиров, Г. П. Ерошенко // Научное обозрение. – 2014. – № 3. – С. 175–177.

14. Бакиров, С. М. Обоснование решения о поливе на основе данных датчика послойного контроля влажности почвы / С. М. Бакиров, М. А. Абзалов, С. С. Елисеев // Проблемы и перспективы цифровизации агропромышленного комплекса : материалы Международной научно-практической конференции. – Саратов, 2023. – С. 12–16.

15. Бакиров, С. М. Оценка средств измерения влажности почвы / С. М. Бакиров, М. А. Абзалов, В. С. Ильин // Повышение эффективной эксплуатации электрооборудования в сельском хозяйстве : материалы I Национальной научно-практической конференции с международным участием имени Г. П. Ерошенко. – Саратов, 2023. – С. 32–37.

16. Банк, С. В. Экономическое обоснование инженерных разработок : учебно-методическое пособие / С. В. Банк, Е. С. Васютина. – М. : РТУ МИРЭА, 2024. – 67 с.

17. Безменов, А. И. Практикум по механизации полива сельскохозяйственных культур: учебное пособие / А. И. Безменов. – М. : Высшая школа, 1979. – 175 с.

18. Беккер, В. Ф. Технические средства автоматизации. Интерфейсные устройства и микропроцессорные средства : учебное пособие / В. Ф. Беккер. – 2-е изд. – М. : РИОР : ИНФРА-М, 2024. – 152 с.

19. Белый, И. В. Основы научных исследований и технического творчества / И. В. Белый, К. П. Власов, В. Б. Клепиков. – Харьков : Выща школа, 1989. – 200 с.

20. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник / Л. А. Бессонов. – 11-е изд., перераб. и доп. – М. : Гардарики, 2007. – 701 с.

21. *Бородин, И. Ф.* Практикум по основам автоматики и автоматизации производственных процессов / И. Ф. Бородин, Н. И. Кирилин. – М. : Колос, 1974. – 255 с.

22. *Бортник, И. М.* Основы современной энергетики : в 2 т. : учебник для вузов / под ред. проф. А. П. Бурмана, В. А. Строева ; под общ. ред. чл.-корр. РАН Е. В. Аметистова. – М. : Издательский дом МЭИ, 2016. – Т. 2. Современная электроэнергетика. – 678 с.

23. *Брель, В. К.* Становление и перспективы развития мелиоративной науки в Поволжском регионе / В. К. Брель // Проблемы повышения эффективности использования водных и земельных ресурсов Поволжья : сб. науч. тр. / ФГНУ «ВолжНИИГиМ». – Саратов : Научная книга, 2011. – С. 13–20.

24. *Бутиков, Е. И.* Физика : учеб. пособие : в 3 кн. / Е. И. Бутиков, А. С. Кондратьев, В. М. Уздин. – М. : Физматлит, 2010. – Кн. 3. Строение и свойства вещества. – 336 с.

25. *Буторин, В. А.* Вопросы теории и инновационных решений при эксплуатации электрооборудования : [монография] / В. А. Буторин, В. И. Чарыков, М. А. Малышев. – Курган : Дамми, 2011. – 206 с.

26. *Буторин, В. А.* Энергосбережение : теория, практика : [монография] / В. А. Буторин, В. И. Чарыков, В. И. Мошкин. – Курган : Курганский государственный университет, 2019. – 146 с.

27. *Варивода, М. С.* Электрооборудование мелиоративных насосных установок / М. С. Варивода, Д. А. Михайлов, И. Г. Стрижков // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : матер. IX Всерос. конф. молодых ученых. – Краснодар : КубГАУ им И. Т. Трубилина, 2016. – С. 328–329.

28. *Варыпаев, В. Н.* Химические источники тока : учебное пособие для хим.-технол. спец. вузов / В. Н. Варыпаев, М. А. Дасоян, В. А. Никольский ; под ред. В. Н. Варыпаева. – М. : Высшая школа, 1990. – 240 с.

29. *Васильев, С. И.* «Электротехнические материалы : методические указания / С. И. Васильев. – Самара : СамГАУ, 2021. – 59 с.

30. *Водяников, В. Т.* Экономическая оценка средств электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства и система сельской

энергетики : учебное пособие для студентов, аспирантов и специалистов сельской энергетики / В. Т. Водяников. – М. : МГАУ, 1997. – 180 с.

31. Теория научных исследований, планирование и обработка эксперимента : учебное пособие / А. В. Волков [и др.]. – М. : РУТ (МИИТ), 2018. – 145 с.

32. *Волович, Г. И.* Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств / Г. И. Волович. – М. : Издательский дом «Додэка-XXI», 2005. – 528 с.

33. *Вольский, А. Б.* Электротехнические материалы и технологии : учебник / А. Б. Вольский. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. – 312 с.

34. Всероссийский форум сельхозпроизводителей [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://kremlin.ru/events/president/news/57035>

35. *Гайнуллин, Рен. Х.* Проведение экспериментального исследования и обработка его результатов: учебно-методическое пособие / Рен. Х. Гайнуллин, Риш. Х. Гайнуллин, М. Н. Волдаев. – Йошкар-Ола : Поволжский государственный технологический университет, 2019. – 94 с.

36. *Гирке, Р.* Эксперимент по курсу элементарной физики : [пер. с нем.] / Р. Гирке, Г. Шпрокхоф. – М. : Учебно-педагогическое издательство Министерства просвещения РСФСР, 1959. – Ч. 1. – 261 с.

37. *Гмошинский, В. Г.* Теоретические основы инженерного прогнозирования / В. Г. Гмошинский, Г. И. Флиорент. – М. : Наука, 1973. – 304 с.

38. *Грушко, И. М.* Основы научных исследований / И. М. Грушко, В. М. Сиденко. – 3-е изд., перераб. и доп. – Харьков : Вища школа, 1983. – 224 с.

39. *Гуткин, Л. С.* Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества / Л. С. Гуткин. – М. : Советское радио, 1975. – 363 с.

40. *Дегтярев, Г. В.* Технологии и средства механической очистки вод малых поверхностных водотоков для орошения : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 06.01.02 / Дегтярев Георгий Владимирович. – Краснодар, 2007. – 47 с.

41. Долгосрочная областная целевая программа «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения Воронежской области на 2014–2020 годы». Утв. постановлением Правительства Воронежской области № 271 от 3 апреля 2013 г. – Воронеж, 2013.

42. *Ерошенко, Г. П.* Адаптация эксплуатации электрооборудования к особенностям сельскохозяйственного производства : [монография] / Г. П. Ерошенко, С. М. Бакиров. – Саратов : ИЦ «Наука», 2011. – 132 с.

43. *Ерошенко, Г. П.* Значение диагностики в процессе эксплуатации электрооборудования в сельском хозяйстве / Г. П. Ерошенко, С. М. Бакиров, И. Ю. Лошкарёв // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. IV Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов : КУБик, 2012. – С. 84–85.

44. *Ерошенко, Г. П.* Эксплуатация энергооборудования сельскохозяйственных предприятий / Г. П. Ерошенко, Ю. А. Медведько, М. А. Таранов. – Ростов н/Д : Терра, 2006. – 590 с.

45. *Ерошенко, Г. П.* Эксплуатация электрооборудования : учебник / Г. П. Ерошенко, Н. П. Кондратьева. – М. : ИНФРА-М, 2017. – 336 с.

46. *Жиров, М. В.* Идентификация и адаптивное управление технологическими процессами с нестационарными параметрами / М. В. Жиров, В. В. Макаров, В. В. Солдатов. – М. : Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 2011. – 208 с.

47. *Зедгинидзе, И. Г.* Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И. Г. Зедгинидзе. – М. : Наука, 1976. – 390 с.

48. *Золотокрылин, А. Н.* Биоклиматическая субгумидная зона на равнинах России : засухи, опустынивание, деградация / А. Н. Золотокрылин, Е. А. Черенкова, Т. Б. Титкова. // Аридные экосистемы. – 2018. – Т. 24. – № 1 (74). – С. 13–20.

49. *Зырянова, С.А.* Теория принятия решений : учебно-методическое пособие / С. А. Зырянова, Т. А. Юрина. – Омск : СиБАДИ, 2022.

50. *Иберла, К.* Факторный анализ : [пер. с нем.] / К. Иберла. – М. : Статистика, 1980. – 398 с.

51. *Иванов, А. А.* Справочник по электротехники / А. А. Иванов. – Киев : Вища школа, 1984. – 224 с.
52. *Ившин, В. П.* Современная автоматика в системах управления технологическими процессами : учебное пособие / В. П. Ившин, М. Ю. Перухин. – М. : НИЦ ИНФРА-М, 2013. – 400 с.
53. *Измайлов, А. Ю.* Интеллектуальные технологии и роботизированные средства в сельскохозяйственном производстве / А. Ю. Измайлов // Вестник Российской академии наук. – 2019. – Т. 89. – № 5. – С. 536–538.
54. *Иоссель, Ю. Я.* Расчет электрической емкости : 2-е изд., перераб. и доп. / Ю. Я. Иоссель, Э. С. Кочанов, М. Г. Струнский. – Л. : Энергоиздат, 1981. – 288 с.
55. *Калашников, С. Г.* Электричество / С. Г. Калашников. – М. : Наука, 1964. – 666 с.
56. *Карташов, Б. А.* Практикум по автоматике / Б. А. Карташов, А. Б. Карташов, Т. В. Жидченко. – зерноград, 2006. – Ч. I. – 156 с.
57. Каталог Lindsay. Повышение урожайности пшеницы за счет применения эффективных решений в области орошения [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [www.lindsay.com](http://www.lindsay.com). – (дата обращения : 23.10.2019).
58. *Корсак, В. В.* Проблема глобального потепления и дегумификация пахотных земель / В. В. Корсак, А. Н. Никишанов, К. В. Гузенко // Проблемы и перспективы развития мелиорации в современных условиях : сб. науч. трудов по матер. науч.-практ. конф. ФГБНУ «ВолжНИИГиМ», г. Энгельс, 25–27 мая 2016 г. – Энгельс, 2016. – С. 63–67.
59. *Коршунов, Ю. М.* Математические основы кибернетики : учеб. пособие для вузов / Ю. М. Коршунов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергия, 1980. – 424 с.
60. *Котельникова, Е. А.* Организационно-экономические основы и управление бизнесом в агропромышленном комплексе : учебное пособие / Е. А. Котельникова, К. С. Кондаков. – Саратов : ЦеСАин, 2017. – 162 с.
61. *Кравцов, А. В.* Электрические измерения : учебное пособие / А. В. Кравцов, А. В. Пузарин. – М. : РИОР ; ИНФРА-М, 2025. – 148 с.

62. *Кузнецов, Е. В.* Повышение эффективности орошения в составе инвестиционного проекта адаптированной земельно-охранной системы / Е. В. Кузнецов, А. Е. Хаджиди, А. Н. Куртнезирова // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – № 52. – С. 206–211.

63. *Кюрджиев, Ю. В.* Измерение физических величин. Системы сбора данных : учебное пособие / Ю. В. Кюрджиев, А. В. Чернышев. – М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. – 53 с.

64. *Махлаёв, В. К.* Гидравлика. Основы гидродинамики : учеб. пособие / В. К. Махлаёв. – Томск : Изд-во Томского гос. архит.- строит. ун-та, 2006. – 69 с.

65. *Медведев, А. В.* Мелиоративная техника – основа устойчивого сельскохозяйственного производства / А. В. Медведев // Мелиорация в России : потенциал и стратегия развития : матер. Междунар. науч.-практ. интернет-конф., посвященной 50-летию масштабной программы развития мелиорации земель. – Волгоград, 2016. – С. 305–313.

66. *Мелешко, Е. А.* Быстродействующая импульсная электроника / Е. А. Мелешко. – М. : Физматлит, 2007. – 320 с.

67. Мелиорация и водное хозяйство. Орошение : справочник / под ред. Б. Б. Шумакова. – М. : Колос, 1999. – 432 с.

68. Механизация полива : справочник / Б. Г. Штепа [и др.] – М. : Агропромиздат, 1990. – 336 с.

69. *Миркина, Е. Н.* Гидравлика и сельскохозяйственное водоснабжение : учебное пособие / Е. Н. Миркина, М. П. Горбачева ; ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ». – Саратов : ИЦ «Наука», 2019. – 134 с.

70. *Новгородцев, А. Б.* Теоретические основы электротехники. 30 лекций по теории электрических цепей : учеб. пособие / А. Б. Новгородцев. – 2-е изд. – СПб. : Питер, 2006. – 576 с.

71. *Новиков Ю.Н.* Электрические цепи и сигналы : базовые сведения, методы анализа процессов в цепях / Ю. Н. Новиков. – 2-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2023. – 356 с.

72. Овсянников, А. Г. Технические средства диагностирования электрооборудования : учебное пособие / А. Г. Овсянников, Р. С. Арбузов, А. Г. Тарасов. – Новосибирск : НГТУ, 2015. – 192 с.

73. Орошение в Украине [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [www.fregat.mk.ua](http://www.fregat.mk.ua). – (дата обращения : 15.06.2019).

74. Основы механики жидкости : учеб. пособие / В. Н. Белозерцев [и др.]. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 324 с.

75. Основы научных исследований : учебник для техн. вузов / В. И. Крутов [и др.] ; под ред. В. И. Крутова, В. В. Попова. – М. : Высшая школа, 1989. – 400 с.

76. Пат. № 222477 U1 Российская Федерация, G01N 25/56, G01K 13/10, G01N 33/24. Автономный датчик послойного контроля влажности и температуры почвы / С. М. Бакиров, М. А. Абзалов, А. А. Осипов, С. В. Бахтеев, О. В. Михеева, С. С. Елисеев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова». – № 222477 U1 ; заявл. 18.10.2023 ; опубл. 28.12.2023.

77. Приказ Минсельхоза РФ от 28 сентября 2018 г. № 443 «О реализации мероприятий направления (подпрограммы) «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России» Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013–2020 годы» [Электронный ресурс] : Документы Министерства сельского хозяйства РФ. – Режим доступа : <http://agroportal2.garant.ru:81/SESSION/PILOT/main.htm> (дата обращения : 10.08.2019).

78. Приказ Минсельхоза РФ от 6 марта 2013 г. № 128 «Об утверждении отраслевой программы «Развитие свиноводства в Российской Федерации на 2013–2015 годы» [Электронный ресурс] : Документы Министерства сельского хозяйства РФ. – Режим доступа : <http://agroportal2.garant.ru:81/SESSION/PILOT/main.htm> (дата обращения : 10.08.2019).

79. *Прищеп, Л. Г.* Учебник сельского электрика / Л. Г. Прищеп. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1986. – 509 с.

80. Проблемы повышения эффективности использования водных и земельных ресурсов Поволжья : сб. науч. тр. / ФГНУ «ВолжНИИГиМ». – Саратов : Научная книга, 2011. – 290 с.

81. *Рабинович, М. Д.* Сравнение различных методов представления климатической информации при расчетной производительности гелиосистем / М. Д. Рабинович // Гелиотехника. – 1986. – № 3. – С. 76–77.

82. *Ревенков, А. В.* Теория и практика решения технических задач : учеб. пособие / А. В. Ревенков, Е. В. Резчикова. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : ФОРУМ ; ИНФРА-М, 2019. – 384 с.

83. *Рывкин, А. А.* Справочник по математике : справочное пособие для учащихся сред. спец. учеб. заведений и поступающих в вузы / А. А. Рывкин, А. З. Рывкин, Л. С. Хренов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1987. – 480 с.

84. *Селиванов, М. Н.* Качество измерений : метрологическая справочная книга / М. Н. Селиванов, А. Э. Фридман, Ж. Ф. Кудряшов. – Л. : Лениздат, 1987. – 295 с.

85. Обоснование формы датчика послойного контроля влажности почвы / Д. А. Соловьев [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2024. – № 4. – С. 142–149.

86. Справочник по мелиорации и гидротехнике / под. ред. проф. М. М. Гришина. – М. : Государственное издательство колхозной и совхозной литературы, 1937. – Т. II. Изыскания и исследования. – 730 с.

87. Справочник по механизации орошения / Б. Г. Штепа [и др.] ; под ред. Б. Г. Штепы. – М. : Колос, 1979. – 303 с.

88. Справочник по орошаемому земледелию / под ред. проф. Н. А. Мосиенко. – Саратов : Приволж. кн. изд-во, 1993. – 432 с.

89. Справочник по электротехническим материалам / под. ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – Л. : Энергоатомиздат, 1988. – Т. 3. – 728 с.

90. *Суворин, А. В.* Разработка и чтение электрических схем электроустановок : учеб. пособие / А. В. Суворин. – Красноярск, 2012. – 424 с.

91. *Тимофеев, И. А.* Электротехнические материалы и изделия : учебное пособие / И. А. Тимофеев. – СПб. : Лань, 2022. – 272 с.
92. *Тирринг, В.* Курс математической и теоретической физики : [монография] : пер. с нем. / В. Тирринг. – Киев : Timrani, 2004. – 264 с.
93. Федеральная целевая программа «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России на 2014–2020 годы». Постановление Правительства Российской Федерации № 922 от 12 октября 2013 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://base.garant.ru/70478356/>
94. *Хорольский, В. Я.* Техничко-экономическое обоснование дипломных проектов / В. Я. Хорольский, М. А. Таранов, Д. В. Петров. – Ростов н/Д : Терра, 2004. – 168 с.
95. *Чернов, В. Ю.* Введение в технику эксперимента и основы обработки результатов измерений : учебное пособие / В. Ю. Чернов, Э. А. Анисимов. – Йошкар-Ола : Поволжский государственный технологический университет, 2020. – 68 с.
96. *Чижиумов, С. Д.* Основы гидродинамики : учеб. пособие / С. Д. Чижиумов. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУ ВПО «КНАГТУ», 2007. – 106 с.
97. *Шадских, В. А.* Перспективные научные разработки для решения проблем агропромышленного комплекса в условиях изменения климата / В. А. Шадских, В. Е. Кижасева, И. В. Ткаченко / Проблемы и перспективы развития мелиорации в современных условиях : сб. науч. тр. по матер. науч.-практ. конф. ФГБНУ «ВолжНИИГиМ», г. Энгельс, 25–27 мая 2016 г. – Энгельс, 2016. – С. 79–86.
98. *Шахова, О.А.* Статистическая обработка результатов исследований : учебное пособие / О. А. Шахова. – Тюмень : ГАУ Северного Зауралья, 2022. – 104 с.
99. *Шпаков П.С.* Математическая обработка результатов измерений : учеб. пособие / П. С. Шпаков, Ю. Л. Юнаков. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2014. – 410 с.
100. *Полуэктов, Р. А.* Моделирование водного обмена в агроэкосистемах / Р. А. Полуэктов, М. Я. Кузнецов, Г. В. Василенко. – СПб. : Изд-во СПбГТУ, 1996. – 52 с.
101. Моделирование почвенных процессов в агроэкосистемах / Р. А. Полуэктов [и др.]. – СПб. : Изд-во СПбГУ, 2002. – 148 с.

102. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур / Р. А. Полуэктов [и др.]. – СПб. : Изд-во СПбГУ, 2006. – 391 с.
103. *Яворский, Б. М.* Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – 7-е изд., испр. – М. : Наука, 1979. – С. 942.
104. Effect of the structure on the electrical properties of soils / Y. V. Egorov [et al.] // *Eurasian Soil Science*. – 2013. – Vol. 46. – P. 284–290.
105. *Eroshenko, G. P.* A Technique of Evaluating an Idealized Mathematical Model for Monitoring the Moisture Content of Grain by a Dielectric Method / G. P. Eroshenko, N. K. Sharuev, D. P. Evstaf'ev. // *Measurement Techniques*. – 2017. – Vol. 59. – No. 12. – P. 1324–1329.
106. Wireless sensor network for in situ soil moisture monitoring / J. Fang [et al.] // *arXiv preprint arXiv:2102.10260*. – 2021.
107. *George, B.* Analysis of the switched-capacitor dual-slope capacitance-to-digital converter / B. George, V. J. Kumar // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2010. – Vol. 59. – No. 5. – P. 997–1006.
108. *Glagolev, M. V.* On Several Ill-posed and Ill-conditioned Mathematical Problems of Soil Physics / M. V. Glagolev, A. F. Sabrekov // *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 368. – No. 1. – P. 012011.
109. A New Design Methodology for Time-based Capacitance-to-digital Converters (T-CDCs) / A. H. Hassan [et al.] // *AEU-International Journal of Electronics and Communications*. – 2018. – Vol. 96. – P. 238–245.
110. *Omran, H.* An Integrated Energy-efficient Capacitive Sensor Digital Interface Circuit / H. Omran, M. Arsalan, K. N. Salama // *Sensors and Actuators A : Physical*. – 2014. – Vol. 216. – P. 43–51.
111. Layer-by-layer Films of Graphene Nanoplatelets and Gold Nanoparticles for Methyl Parathion Sensing / G. H. S. Rodrigues [et al.] // *ACS Applied Nano Materials*. – 2019. – Vol. 2. – No. 2. – P. 1082–1091.
112. Capillary Effects in Polydisperse Systems and Their Use in Soil Engineering / A. V. Smagin [et al.] // *Eurasian Soil Science*. – 2021. – Vol. 54. – P. 1433–1446.

113. *Trabelsi, S.* Density-independent Functions for on-line Microwave Moisture Meters : a General Discussion / S. Trabelsi, S. O. Nelson // Measurement Science and Technology. – 1998. – Vol. 9. – No. 4. – P. 570.

114. *Vooka, P.* Capacitance-to-digital Converter for Leaky Capacitive Sensors / P. Vooka, B. George // Electronics Letters. – 2016. – Vol. 52. – No. 6. – P. 456–458.

115. *Walker, J. P.* In situ Measurement of Soil Moisture : a Comparison of Techniques / J. P. Walker, G. R. Willgoose, J. D. Kalma // Journal of Hydrology. – 2004. – Vol. 293. – No. 1–4. – P. 85–99.

116. ГОСТ Р 58331.3-2019. Системы и сооружения мелиоративные. Водопотребность для орошения сельскохозяйственных культур. Общие требования. – М. : Изд-во стандартов, 2019. – 4 с.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

**№ 222477**

### Автономный датчик послойного контроля влажности и температуры почвы

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова" (RU)*

Авторы: *Бакиров Сергей Мударисович (RU), Абзалов Муслим Аликович (RU), Осипов Андрей Александрович (RU), Бахтеев Сергей Владимирович (RU), Михеева Ольга Валентиновна (RU), Елисеев Сергей Сергеевич (RU)*

Заявка № **2023126662**Приоритет полезной модели **18 октября 2023 г.**

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре полезных  
моделей Российской Федерации **28 декабря 2023 г.**

Срок действия исключительного права  
на полезную модель истекает **18 октября 2033 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат 42966a0c73857164a195683b73b4aa7  
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с 19.07.2023 по 02.08.2024

*Ю.С. Зубов*



**приоритет2030<sup>+</sup>**

лидерами становятся

# ДИПЛОМ

## 2 степени

**Абзалов Муслим Аликович**

*Саратовский университет генетики, биотехнологий и  
инженерии им Н.И. Вавилова*

участника III этапа Всероссийского конкурса  
на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов  
и молодых ученых аграрных образовательных  
и научных организаций России в номинации  
«Электротехнологии, электрооборудование  
и энергоснабжение АПК»

Ректор Ставропольского  
государственного аграрного  
университета

В. Н. Ситников

21 мая 2024 г.



### АКТ

**внедрения, реализации данных научно-исследовательской опытно-конструкторской работы и производственных испытаний системы орошения**

#### 1. Общие положения.

Комиссия в составе:

*От ООО «Мираторг-Курск» (далее «Предприятие»)*

- директора по орошению Логвинова И.Н.,
- руководителя гидротехнического отдела Семерина В.Г.

*От ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова» (далее «Университет»)*

- ректора Соловьева Д. А.;
- директора института инженерии и робототехники Бакирова С.М.;
- профессора кафедры «Гидромелиорация, природообустройство и строительство АПК» Абдразакова Ф.К.;
- заведующего кафедрой «Техносферная безопасность и транспортно-технологические машины» Русинова А.В.;
- доцента кафедры «Электрооборудование, энергоснабжение и роботизация» Елисеева С.С.;
- доцента кафедры «Техносферная безопасность и транспортно-технологические машины» Колганова Д.А.;
- доцента кафедры «Техносферная безопасность и транспортно-технологические машины» Горюнова Д.Г.;
- доцента кафедры «Гидромелиорация, природообустройство и строительство АПК» Руковишников А.А.;
- старшего преподавателя кафедры «Техносферная безопасность и транспортно-технологические машины» Марыновой Т.А.;
- ассистента кафедры «Электрооборудование, энергоснабжение и роботизация» Абзалова М.А.;
- ассистента кафедры «Цифровое управление процессами в АПК» Гепечука Ю.Н.;

- инженера Акпасова В.А.

провела на базе Предприятия внедрение, реализацию данных научно-исследовательской опытно-конструкторской работы и производственных испытаний системы орошения Университета.

## **2. Место проведения.**

Юридический адрес Предприятия: 307120, Курская область, Фатежский район, село Верхний Любаж, Западная ул., влд. 6.

Фактический адрес проведения работ: Курская область, Октябрьский район, с. Черницыно, с кадастровыми номерами участков: 46:17:000000:1431; 46:17:111207:6; 46:17:111207:7; 46:17:111207:8; 46:17:110000:17; 46:17:111207:10; 46:17:111208:4.

## **3. Цель внедрения.**

Определить достоверность данных в производственных условиях:

- энергоэффективность полива дождеванием земель сельскохозяйственного назначения;

- работоспособность системы синхронизации движения в линию приборов ПСЛ дождевальных машин кругового действия на основе индукционных датчиков;

- действие датчика послойного контроля влажности почвы;

- эффективность разработанных ресурсосберегающих технологий и математических моделей оптимизации мелиоративного производства;

- эффективность очистки оросительной воды в фильтре грубой очистки;

- эффективность применения разработанных дождеобразующих устройств и схемы их расстановки на водопроводящем поясе дождевальных машин;

- оценить качественные показатели дождя дождеобразующих устройств со статическим и вращающимся дефлекторами, устанавливаемых на дождевальных машинах кругового действия;

- оценить негативное воздействие дождевальной машины кругового действия на почву и сельскохозяйственное растение.

## **4. Методика выполнения проверки.**

4.1. Подготовка полевого места испытаний. Описание технических и технологических характеристик процесса. Расчет диапазонов изменения выходных параметров.

4.2. Проведение измерений. Сборка схем и наладка технологического оборудования. Снятие, фиксация и контроль показаний. Сохранение и обработка данных экспериментов.

4.3. Оценка результатов экспериментов и подготовка заключения.

## **5. Заключение.**

В результате проведения исследований получены следующие данные:

- доказана энергоэффективность полива дождеванием земель сельскохозяйственного назначения с использованием энерго-ресурсосберегающих способов и технических средств при изготовлении дождевальных машин кругового действия;

- установлена работоспособность системы синхронизации движения в линию приборов на основе индукционных датчиков в полевых условиях;
- получена достоверность данных измерения влажности почвы с помощью датчика послойного контроля влажности;
- подтверждена эффективность предложенных ресурсосберегающих технологий и математических моделей оптимизации мелиоративного производства;
- полевыми исследованиями установлено, что поверхностный сток оросительной воды при поливе в среднем составил 4,2%, а объем твердого стока в среднем за период исследований составил 1,1 т/га;
- вынос питательных веществ: гумуса, азота, фосфора и калия из почвы при поливе составил соответственно: 108; 11; 3 и 43 кг/га;
- подтверждена экологическая эффективность применения дождевальных машин с теоретическими данными;
- установлена эффективность применения фильтра грубой очистки с диаметром ячейки сетки от 1,0...3,2 мм<sup>2</sup> с сохранением потерь давления в нормативных значениях;
- установлено, что применение разработанных дождеобразующих устройств по предлагаемой схеме расстановки на водопроводящем поясе дождевальных машин обеспечило более качественное распределение дождя по всему фронту работы машины, минимизировав недополив и переувлажнение орошаемого участка;
- определены качественные показатели дождя (диаметр капель дождя, интенсивность дождя, мощность дождя, равномерность полива, потери дождя на испарение и снос ветром) дождеобразующих устройств со статическим и вращающимся дефлекторами, устанавливаемых на дождевальных машинах кругового действия;
- выполнена оценка величины и факторов негативного воздействия дождя и ходовой системы дождевальной машины кругового действия на почву и сельскохозяйственное растение;
- подтверждена возможность восстановления проектных характеристик оросительного канала за счёт технического перевооружения и применения современных технологий реконструкции с использованием композитных материалов.

Полученные данные подтверждаются теоретическими положениями.

#### От Предприятия:

Директор по орошению

Руководитель гидротехнического  
отдела



И. Н. Логвинов



В. Г. Семерин

Исполнитель – д.т.н., профессор

 Абдразаков Ф.К.

Исполнитель – к.т.н.

 Елисеев С. С.

Исполнитель – к.т.н.

 Горюнов Д. Г.

Исполнитель – аспирант

 Абзалов М.А.

Исполнитель – аспирант

 Марынова Т.А.

Исполнитель – к.т.н., доцент

 Русинов А.В.

Исполнитель – к.т.н.

 Колганов Д.А.

Исполнитель – к.т.н.

 Рукавишников А.А.

Исполнитель – аспирант

 Гrepечук Ю.Н.

Исполнитель – инженер

 Акпасов В.А.

«СОГЛАСОВАНО»  
Проректора по научной и  
инновационной работе  
  
К.Е. Денисов  
« » 2025 г.  
М.П.

«УТВЕРЖДАЮ»  
Директор учебно-научно-  
производственного  
объединения «Поволжье»  
  
А.В. Хадыкин  
« » 2025 г.  
М.П.

### АКТ

#### О ВНЕДРЕНИИ ЗАКОНЧЕННОЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ, ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКОЙ РАБОТЫ

Мы, нижеподписавшиеся, директор учебно-научно-производственного объединения «Поволжье» Хадыкин А. В., инженер Ершов С. В. и научный коллектив в составе: директора института инженерии и робототехники доктора технических наук Бакирова С. М., доцентов Бахтеева С. В., Елисеева С. С., Колганова Д. А., аспиранта Абзалова М. А. составили настоящий акт о том, что в условиях сельскохозяйственного предприятия УНПО "Поволжье" внедрены результаты научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы «Обоснование параметров и разработка автономного устройства послойного контроля влажности почвы», выполненных в ФГБОУ ВО Вавиловский университет. В результате проведенной законченной работы получены следующие научно-технические результаты:

1. Устройство послойного контроля влажности почвы включает в себя первичные преобразователи в виде двух параллельно расположенных на измерительной диэлектрической штанге двух обкладок (колец) в количестве 4-х штук и вторичный преобразователь в виде измерительной схемы, содержащей микропроцессор, операционный усилитель, выпрямитель, фильтр низких частот и аналого-цифровой преобразователь

2. Алгоритм обеспечивает полный цикл измерения влажности на четырех слоях почвы по методу измерения электрической емкости на двух отличающихся частотах. Логика работы определяется последовательностью опроса первичных преобразователей путем мультиплексирования адресными кодами (А, В). Коэффициент увлажнения почвы является информативным параметром, пропорциональным влажности почвы, независимым от абсолютных значений емкостей.

3. В ходе экспериментальных исследований установлены оптимальные значения калибровки расчетных данных коэффициента увлажнения и данных, полученных при контрольном измерении термостатно-весовым

способом, на низкой частоте в пределах 830...850 Гц и высокой частоте в пределах 7670...7770 Гц измерительной схемы датчика послойного контроля влажности.

4. Ожидаемый экономический эффект от внедрения способа и средства измерения влажности почвы составит около 300000 руб. на 100 Га.

От предприятия:

Директор учебно-научно-производственного объединения «Поволжье»

 А. В. Хадыкин

Инженер учебно-научно-производственного объединения «Поволжье»

 С. В. Ершов

От университета:

Исполнитель – директор института инженерии и робототехники д.т.н., доцент

 Бакиров С.М.

Исполнитель – к.т.н., доцент

 Бахтеев С. В.

Исполнитель – к.т.н., доцент

 Елисеев С. С.

Исполнитель – к.т.н., доцент

 Колганов Д. А.

Исполнитель – аспирант

 Абзалов М. А.

«СОГЛАСОВАНО»  
 Проректора по научной и  
 инновационной работе  
 К. Е. Денисов  
 «\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.  
 М.П.

«УТВЕРЖДАЮ»  
 ИП Глава крестьянского  
 (фермерского) хозяйства  
 А. А. Гамаюнов  
 «\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.  
 М.П.

### АКТ

#### О ВНЕДРЕНИИ ЗАКОНЧЕННОЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ, ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКОЙ РАБОТЫ

Мы, нижеподписавшиеся, глава крестьянского (фермерского) хозяйства Гамаюнов А. А. и научный коллектив в составе: директора института инженерии и робототехники доктора технических наук Бакирова С. М., доцентов Бахтеева С. В., Елисеева С. С., Колганова Д. А., аспиранта Абзалова М. А. составили настоящий акт о том, что в условиях сельскохозяйственного предприятия ИП Глава крестьянского (фермерского) хозяйства Гамаюнов А. А. внедрены результаты научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы «Обоснование параметров и разработка автономного устройства послойного контроля влажности почвы», выполненных в ФГБОУ ВО Вавиловский университет. В результате проведенной законченной работы получены следующие научно-технические результаты:

1. Значение емкости ГПП формируется тремя основными составляющими: влажностью и плотностью почвы в совокупности с внешней изоляции обкладок, диэлектрической проницаемостью и гигроскопичностью материала между обкладками конденсатора и измерительной штанги. Частота колебательного контура влияет на суммарный электрический заряд, сформированный в почве с внешним диэлектриком в связи с инертным свойством дипольного момента молекул воды.

2. Получен положительный отклик при разработке первичного и вторичного преобразователей датчика послойного контроля влажности почвы и испытаниях комплексного измерительного устройства в полевых условиях.

3. Коэффициент увлажнения почвы, который рассчитывается как отношение емкости, измеренной (косвенно) на низкой частоте, к емкости, измеренной на высокой частоте, зависит от  $\tau$  – отношение заряда конденсатора, измеренного на высокой и низкой частотах;  $\vartheta$  – отношение высокой частоты к низкой частоте колебательного контура вторичного преобразователя, а также  $u$  – отношения напряжения на эталонном конденсаторе на низкой и высокой частоте.

4. Ожидаемый экономический эффект от внедрения способа и средства измерения влажности почвы составит около 300000 руб. на 100 Га.

От предприятия:  
ИП Глава крестьянского  
(фермерского) хозяйства

 А. А. Гамаюнов

От университета:  
Исполнитель – директор института  
инженерии и робототехники д.т.н.,  
доцент

 Бакиров С.М.

Исполнитель – к.т.н., доцент

 Бахтеев С. В.

Исполнитель – к.т.н., доцент

 Елисеев С. С.

Исполнитель – к.т.н., доцент

 Колганов Д. А.

Исполнитель – аспирант

 Абзалов М. А.