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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Саратов 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологий и инженерии им. Н. И. Вавилова».

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент
Бакиров Сергей Мударисович

Официальные оппоненты: **Белов Александр Анатольевич,** доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории электрофизического воздействия на сельскохозяйственные объекты и материалы, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр «ВИМ»

Вострухин Александр Витальевич, кандидат технических наук, научный сотрудник учебно-научной лаборатории автоматизированных систем и коммерческого учета электрической энергии, ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет»

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет».

Защита состоится «___» _____ 2026 года в ___ часов на заседании диссертационного совета 35.2.035.03 на базе ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии им. Н. И. Вавилова» по адресу: 410056, г. Саратов, ул. Советская, 60, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии им. Н. И. Вавилова» и на сайте: http://www. vavilovsar.ru

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 410012, г. Саратов, пр. Петра Столыпина, зд. 4, ст. 3, ученому секретарю диссертационного совета 35.2.035.03, e-mail: chekmarev.v@yandex.ru

Автореферат разослан «_____» _____2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета **Василий Васильевич Чекмарев**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 насосных станций и электрифицированных дождевальных машин определены графиком полива посевов, построенным на основе климатических зон. Анализ графиков показал, что они не совпадают с реальной влагообеспеченностью почвы. Фактический межполивной период отличается в 1,7–3,3 раза от планируемого из-за изменения реальной влажности почвы.

Обратная связь в системах автоматизации осуществляется разными средствами измерения влажности. Самым достоверным является термостатно-весовой метод, но его продолжительность составляет от 12 до 36 часов, за которые влажность в поле может измениться многократно. Оперативные электрические методы (резистивные, ёмкостные, рефлектометрические) имеют ограничения по точности и долговечности. Послойный контроль влажности в корнеобитаемом слое (0,1–0,4 м) критичен для культур с глубокой корневой системой (кукуруза, соя). Однако существующие датчики при установке нарушают плотность грунта, что приводит к грубым погрешностям. 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.

Таким образом, разработка устройства послойного контроля влажности, устанавливаемого без нарушения плотности почвы и обеспечивающего высокую чувствительность по слоям, является актуальной задачей. Использование такого устройства в качестве обратной связи позволит объективно оценивать влажность и минимизировать время работы насосов и дождевальных машин.

Основанием для данной работы, являющейся продолжением комплекса работ по созданию, совершенствованию и эксплуатации 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 И. П. Ананьев, Л. Н. Кошкин, Н. Ф. Рыжко, А. А. Роде, Р. Дж. Хэнкс, Дж. Л. Ашкрофт, М. А. Берлинер, В. Ю. Шишмарёв. Исследованиям зависимостей электрических параметров измерительных устройств в разных влагосодержащих средах посвящены работы таких ученых, как А. В. Вострухин, Е. А. Вахтина, Т. А. Филимонова, Н. К. Шаруев, Д. П. Евстафьев. Общие вопросы многофункциональных измерительных систем отражены в работах Ю. Б. Томашевского, С. М. Бакирова, В. А. Каргина, И. П. Ананьева, А. А. Белова, Р. А. Полуэктова 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 параметров 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 автоматизированной системы полива.
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 автоматизированной системы полива.

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 дождевальной машины);

• разработанный алгоритм взаимодействия измерительного блока с электросиловой частью автоматизированной системы полива, 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 для целей 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 и полевых условиях, в 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 увлажненности 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 автоматизированной системы полива (насосным агрегатом и дождевальной 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 национальных 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 4 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснованы актуальность решаемой научной задачи, научная новизна, практическая значимость, поставлена цель, сформулированы задачи исследований, научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту.

В **первой главе** ***«Анализ способов автоматического управления поливом и средств измерения влажности почвы. Постановка цели и задач»*** выполнена оценка режимов орошения полевых культур, проведён анализ современных способов и технических средств измерения влажности почвы, а также выявлены особенности измерения этого показателя.

Решение о назначении полива сельскохозяйственных культур во многом зависит от данных о фактическом состоянии влажности почвы. Существующие графики полива, построенные на основе климатических зон, не учитывают реальную влагообеспеченность, что приводит к нерациональному использованию водных и энергетических ресурсов (рис. 1). Проведён анализ нормативных документов, в частности ГОСТ Р 58331.3-2019, который показывает, что оросительные нормы для Саратовской области существенно различаются в зависимости от почвенно-климатических условий правого и левого берегов Волги (рис. 2).

Типовая функциональная схема автоматизированной системы орошения, иллюстрирующая состав и взаимосвязи основных элементов (кран, фильтр, ёмкость, продувочный узел, автоматика насоса, насос, гидрант для ручного полива, контроллер, электромагнитные клапаны, дождеватели, капельная трубка, погодный датчик), представлена на рис. 3.

Как видно из схемы (см. рис. 3), в существующей конфигурации отсутствует обратная связь по влажности почвы, что не позволяет реализовать адаптивное управление поливом в зависимости от фактической влагообеспеченности корнеобитаемого слоя. Контроллер получает информацию только от погодного датчика, а данные о влажности почвы отсутствуют, что является существенным недостатком существующих систем.

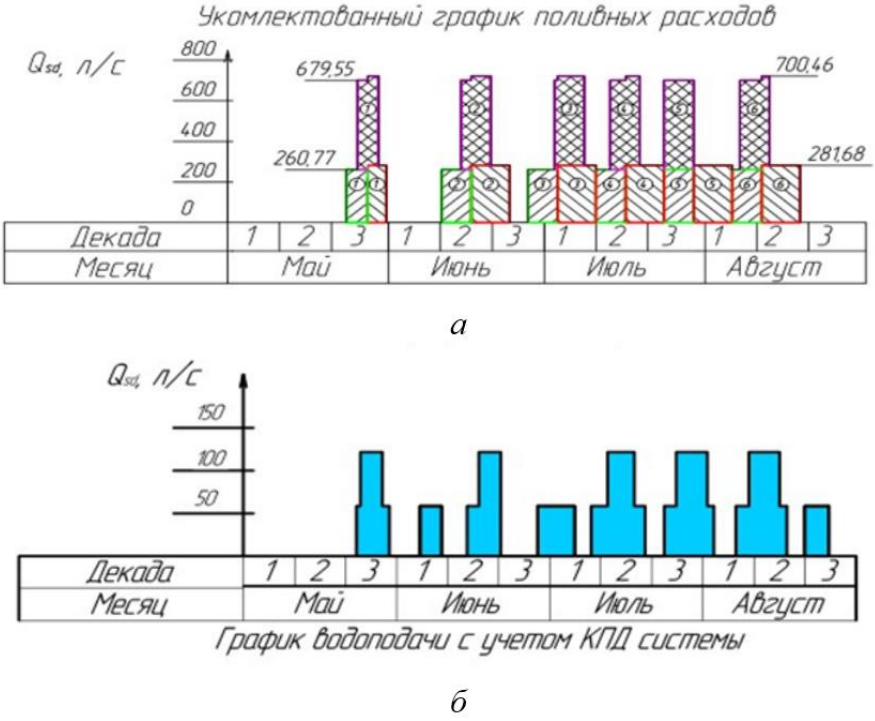


Рисунок 1 – График поливов: *а* – поочередный полив; *б* – полив одной очереди

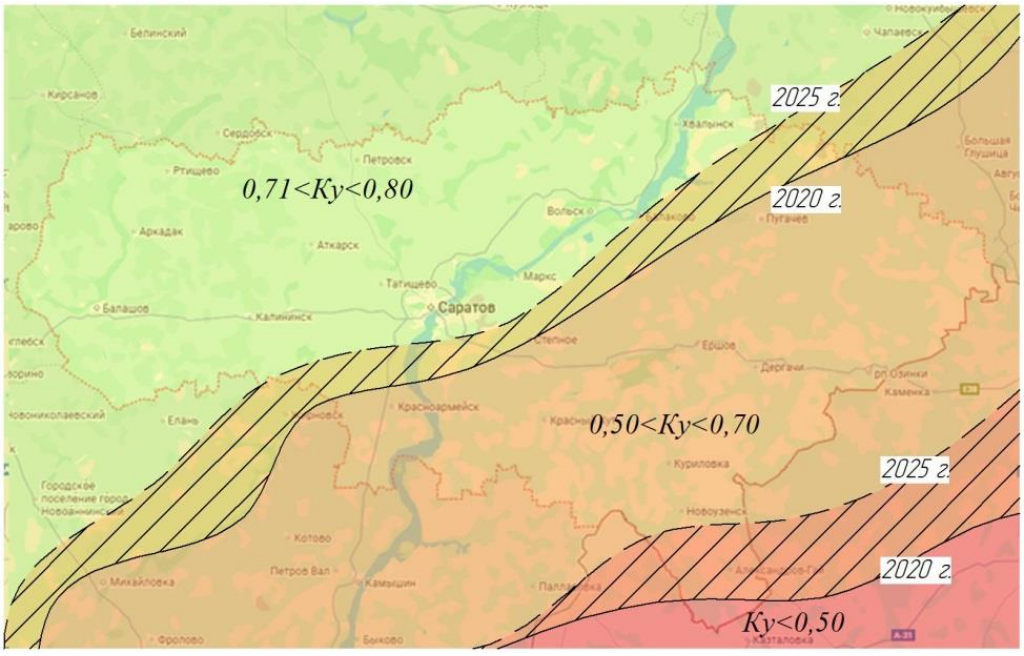


Рисунок 2 – Изменение коэффициента увлажнения Саратовской области (2020–2025 гг.)

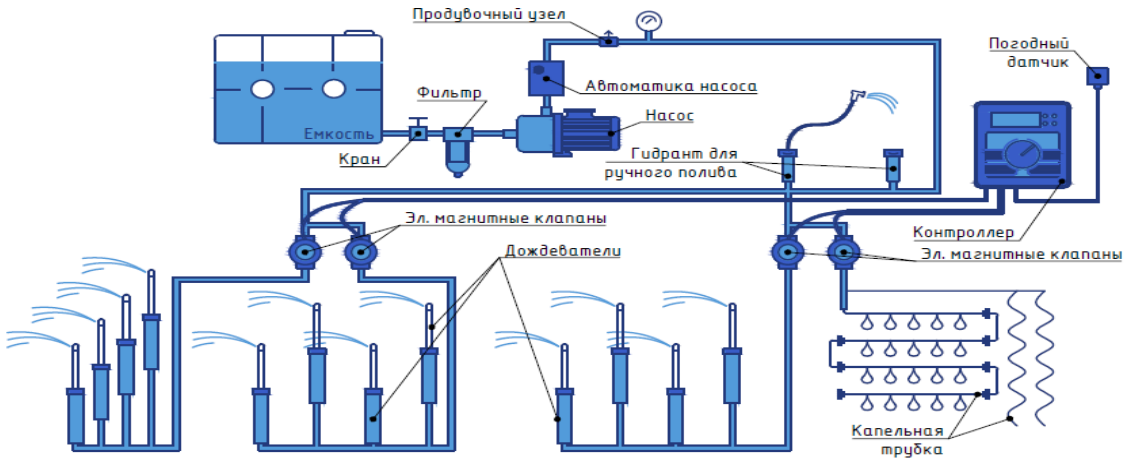


Рисунок 3 – Типовая функциональная схема автоматизированной системы орошения

Принцип измерения диэлектрической проницаемости и, соответственно, влажности является самым простым и экономически целесообразным для непрерывного контроля. Однако существующие приборы послойного контроля имеют недостатки по чувствительности глубинных слоёв почвы.

Из рис. 4 следует, что на глубине 30 см не происходит изменение влажности, хотя в период с 2.06 по 18.06 выпадали осадки или осуществлялся полив. При этом контрольная проверка влажности термостатно-весовым методом показала другие результаты. При сравнении результатов измерений видно, что данные существенно расходятся. Это связано с погрешностью способа измерения влажности, основанного на измерении диэлектрической проницаемости.

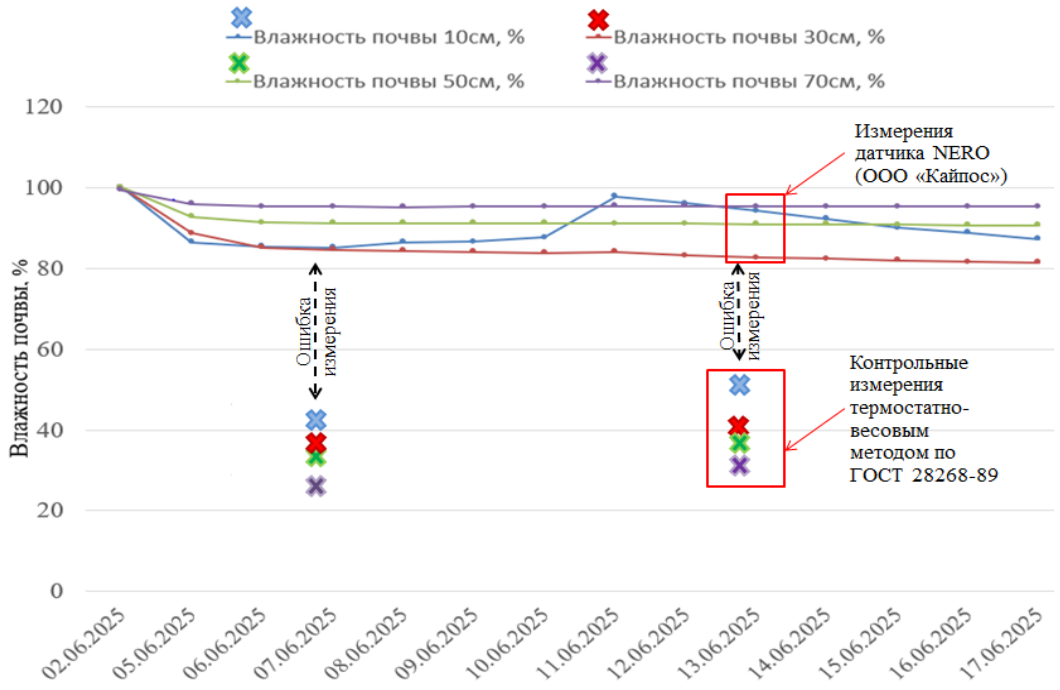


Рисунок 4 – Показания датчика послойного контроля влажности (ООО «Статус Агро») и контрольные измерения теростатно-весовым методом

Во **второй главе** ***«Теоретическое обоснование устройства послойного контроля влажности почвы»*** описан объект исследования,

теоретически обоснованы параметры первичного и вторичного преобразователей, разработаны функциональная схема и алгоритм работы измерительного устройства послойного контроля влажности, а также функциональная схема и алгоритм автоматизированной системы полива на основе данных датчика послойного контроля влажности.

В начале теоретического исследования описаны характеристики датчика в виде системы взаимодействующих сред. Интенсивность изменения влажности почвы также зависит от свойств почвы. Блок-схема объекта исследования представлена на рис. 5.

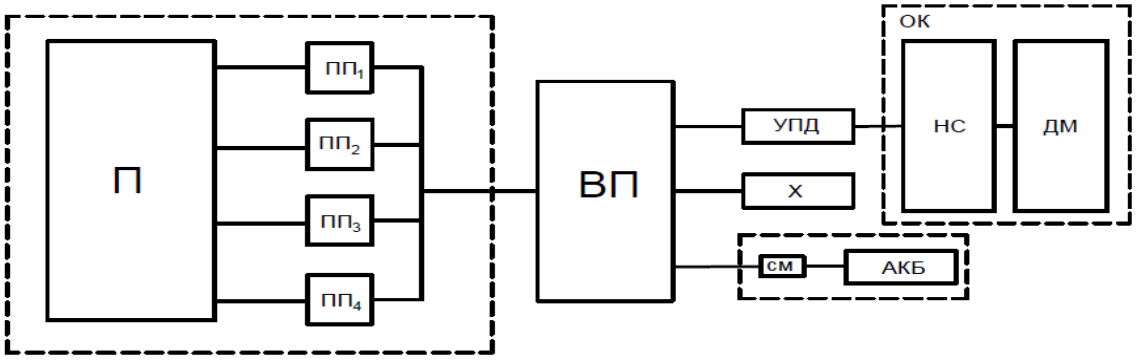
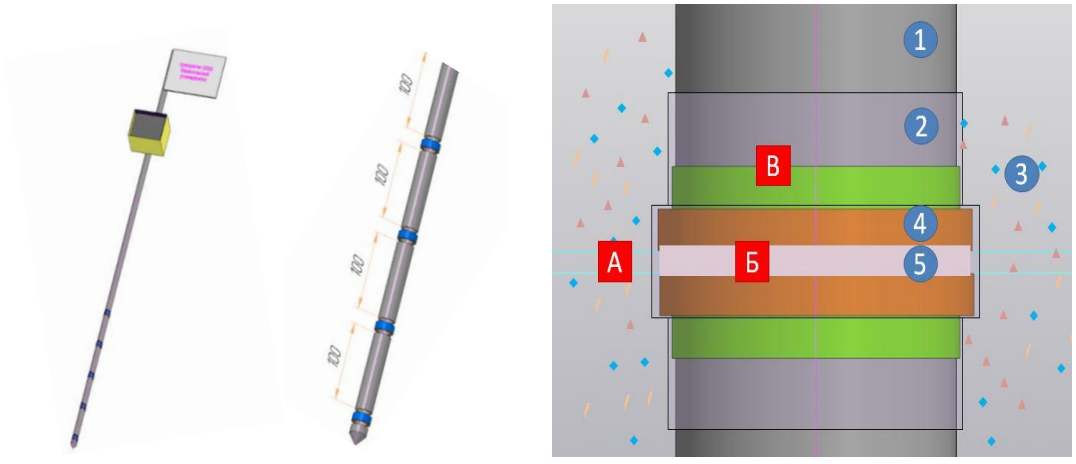


Рисунок 5 – Блок-схема объекта исследования: ОК – оросительный комплекс; НС – насосная станция; ДМ – дождевальная машина; УПД – устройство передачи данных; Х – устройство хранения данных; СМ – солнечный модуль; Э – энергоснабжение; АКБ – аккумуляторная батарея; ВП – вторичный преобразователь; ПП1… ПП4 – первичные преобразователи; П –почва

Форма датчика была принята такой, чтобы четыре сенсора располагались на расстоянии 0,1 м друг от друга (рис. 6). В качестве первичного преобразователя использован электрический конденсатор, состоящий из двух обкладок, расположенных на расстоянии 0,5 мм друг от друга (рис. 6, *в*).



а *б* *в*

Рисунок 6 – Модель датчика послойного контроля влажности:
а – общий вид датчика; *б* – расположение сенсоров каждые 100 мм в части заглубления;
в – модель первичного преобразователя и основных влияющих на него факторов:
1 – измерительная штанга; *2* – изоляция обкладок от внешней среды (почва);
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

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

$$C = C_{\text{А}} + C_{\text{Б}} + C_{\text{В}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{А}}$ – емкость, зависящая от диэлектрической проницаемости почвы (рисунок 5, *в*); $C_{\text{Б}}$ – емкость, зависящая от диэлектрической проницаемости диэлектрика между обкладками; $C_{\text{В}}$ – ёмкость, зависящая от диэлектрической проницаемости стойки (при условии, что стойка выполнена из диэлектрика).

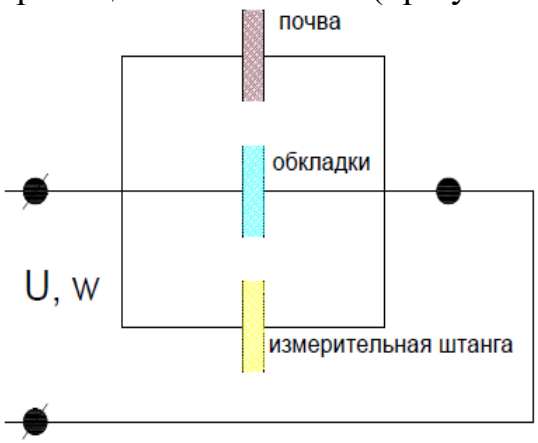


Рисунок 7 – Модель эквивалентного конденсатора, принятого в теоретическом исследовании

Модель эквивалентного конденсатора для формы ПП представлена на рис. 7.

Для повышения точности измерения примем диэлектрики между обкладками, выполненные из двух медных колец, и измерительной штанги с высоким электрическим сопротивлением, чтобы при изменении влажности существенное изменение емкости эквивалентного конденсатора ПП других элементов не влияло на значение. Это позволит добиться более точной корреляции данных.

Изоляция обкладок *2* (см. рис. 6, *в*) служит для снижения деградации медных колец и выполняет функцию исключения прямого влияния неоднородности грунта вокруг датчика. При изменении влажности в почве на емкость ПП будет влиять суммарная проницаемость почвы и изоляции *2* вокруг обкладок (взаимодействие *А* на рис. 6, *в*).

С учетом особенностей сред (см. рис. 6) мгновенную емкость в момент времени *t* запишем:

$$c(t) = \int_{d_{\text{А}}=d_k}^{2l+d_k} \frac{1}{\omega\sqrt{\frac{\rho_{\text{А}}^2 d^2}{k_{\text{А}}^2} - \frac{\omega^2 \varepsilon_{\text{А}}^{"2}}{\varepsilon_0^2}}} dd_{\text{А}} + \frac{1}{\omega\sqrt{\frac{\rho_{\text{Б}}^2 d_{\text{Б}}^2}{k_{\text{Б}}^2} - \frac{\omega^2 \varepsilon_{\text{Б}}^{"2}}{\varepsilon_0^2}}} + \int_{d_{\text{В}}=d_{\text{Б}}}^{2r+d_{\text{Б}}} \frac{1}{\omega\sqrt{\frac{\rho_{\text{В}}^2 d^2}{k_{\text{В}}^2} - \frac{\omega^2 \varepsilon_{\text{В}}^{"2}}{\varepsilon_0^2}}} dd_{\text{В}}, \quad (2)$$

где d – расстояние между обкладками, м; k – площади взаимодействия обкладок, м^2; ε – диэлектрическая проницаемость среды, Ф/м; ρ – плотность материала, кг/м^3; l – длина взаимодействующих обкладок в среде А, м; ω – угловая частота, рад/с.; r – длина взаимодействующих обкладок в среде В, м.

Графическая зависимость емкости от частоты колебательного контура измерительной цепи носит гиперболический характер. Покажем данную зависимость для разных форм ПП (рис. 8).

Из рис. 8 видно, что при высокой частоте колебательного контура емкость ниже, чем при низкой. Данную зависимость используем для установления оптимальной частоты колебательного контура при измерении влажности.

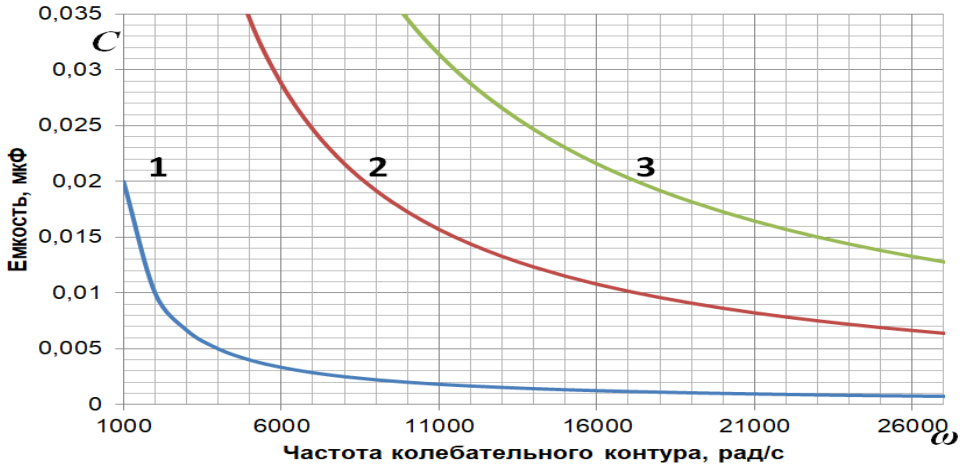


Рисунок 8 – Зависимость емкости первичного преобразователя разной формы от частоты колебательного *RLC*-контура при одинаковых условиях: насыщение влагой, удельное электрическое сопротивление почвогрунта, расстояние между обкладками

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

$$q = q_x = q_0, \tag{3}$$

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

Выразим формулу (3) через значения вольтметров U_1 и U_2 (рис. 9):

$$U_1 C_{экв} = U_x C_x = U_2 C_0, \tag{4}$$

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

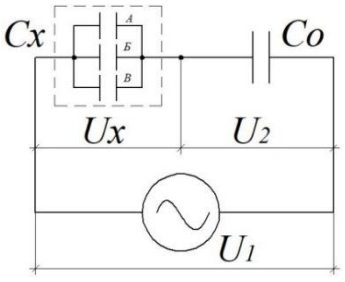


Рисунок 9 – Полная эквивалентная схема

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

$$U_1 \frac{C_x C_0}{C_x + C_0} = C_x (U_1 - U_2) = C_0 U_2. \tag{5}$$

Из формулы (5) получим:

$$C_x = \frac{U_2 C_0}{U_1 - U_2}, \tag{6}$$

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

Анализ схемы вторичного преобразователя (см. рис. 9) и выражения (6) показывает, что соотношения емкости эталонного и измерительного

конденсаторов, а также напряжения генератора U_1 требуется выбирать так, чтобы отклик изменения емкости был максимально чувствительным.

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.

Используя эффект высокого дипольного момента молекул воды и схему вторичного преобразователя с двумя генераторами высокой и низкой частоты, введем критерий увлажненности $K_в$ как отношение емкости на измерительном конденсаторе при низкой частоте f_1 к емкости измерительного конденсатора, измеренного при высокой частоте f_2. Данный критерий определим по формуле:

$$K_в = \frac{C_{x\text{нч}}}{C_{x\text{вч}}} = \frac{C_{x1}(f_1)}{C_{x2}(f_2)}, \tag{7}$$

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

Преобразуем выражение (7) с учетом выражения (6):

$$K_в = \frac{U_{2.1}(U_1 - U_{2.2})}{(U_1 - U_{2.1})U_{2.2}}, \tag{8}$$

где $U_{2.1}$ – напряжение на эталонном конденсаторе при низкой частоте f_1, 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 (8) с учетом напряжения на измерительном конденсаторе:

$$K_в = \frac{U_{2.1}U_{x2}}{U_{2.2}U_{x1}}, \tag{9}$$

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:

$$u \approx \frac{U_{2.1}}{U_{2.2}}. \tag{10}$$

Тогда коэффициент увлажненности почвы:

$$K_в = u\frac{U_{x2}}{U_{x1}}. \tag{11}$$

Напряжение на измерительном конденсаторе изменяется в зависимости от мнимой диэлектрической проницаемости (влажности почвы). Используем при расчете коэффициента увлажненности почвы выражение для расчета напряжения:

$$K_{\text{в}} = u\frac{\sqrt[f_2]{\frac{\rho_{\text{г}}^2 d^2}{k^2} - \frac{\varepsilon''^2 2\pi f_2^2}{\varepsilon_0^2} Q_2}}{\sqrt[f_1]{\frac{\rho_{\text{г}}^2 d^2}{k^2} - \frac{\varepsilon''^2 2\pi f_1^2}{\varepsilon_0^2} Q_1}}, \tag{12}$$

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

Примем допущение, что низкая и высокая частоты колебательного контура отличаются в ϑ раз:

$$\vartheta = f_2 / f_1, \tag{13}$$

где ϑ – 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 τ раз от заряда, накопленного на высокой частоте:

$$\tau = Q_2 / Q_1. \tag{14}$$

Обозначив

$$A = \frac{\rho_{\text{г}}^2 d^2}{k^2}, \tag{15}$$

получим коэффициент увлажненности почвы с учетом выражений (13) и (14):

$$K_{\text{в}} = u\vartheta\tau\frac{\sqrt{A - \frac{\varepsilon''^2 2\pi f_2^2}{\varepsilon_0^2}}}{\sqrt{A - \frac{\varepsilon''^2 2\pi f_1^2}{\varepsilon_0^2}}}. \tag{16}$$

Вариация параметров выражения (16) в пределах натуральных чисел позволяет использовать теорию математического подобия функции коэффициента увлажненности почвы и ее зависимости от мнимой диэлектрической проницаемости и, соответственно, влажности почвы. Использовав принцип математического подобия, коэффициент увлажненности почвы (рис. 10):

$$K_{\text{в}} = 1 + \vartheta\tau u \ln(1 + \varepsilon''). \tag{17}$$

Обратная теоретическая зависимость влажности почвы при различном коэффициенте увлажненности:

$$\varphi = \sigma \frac{(K_{\text{в}} - 1)^e}{(u\tau\vartheta)^e}, \qquad (18)$$

где σ – коэффициент пропорциональности (устанавливается эмпирически).

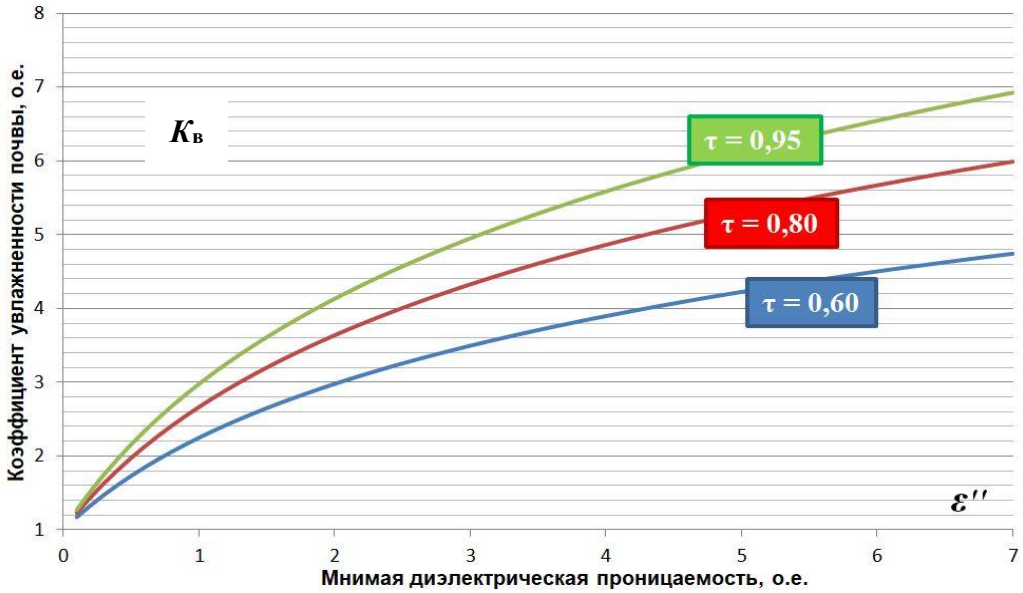


Рисунок 10 – Теоретическая зависимость коэффициента увлажненности от мнимой диэлектрической проницаемости при условиях ϑ = 10, *u* = 0,5

Графическая зависимость выражения (18) показана на рис. 11.

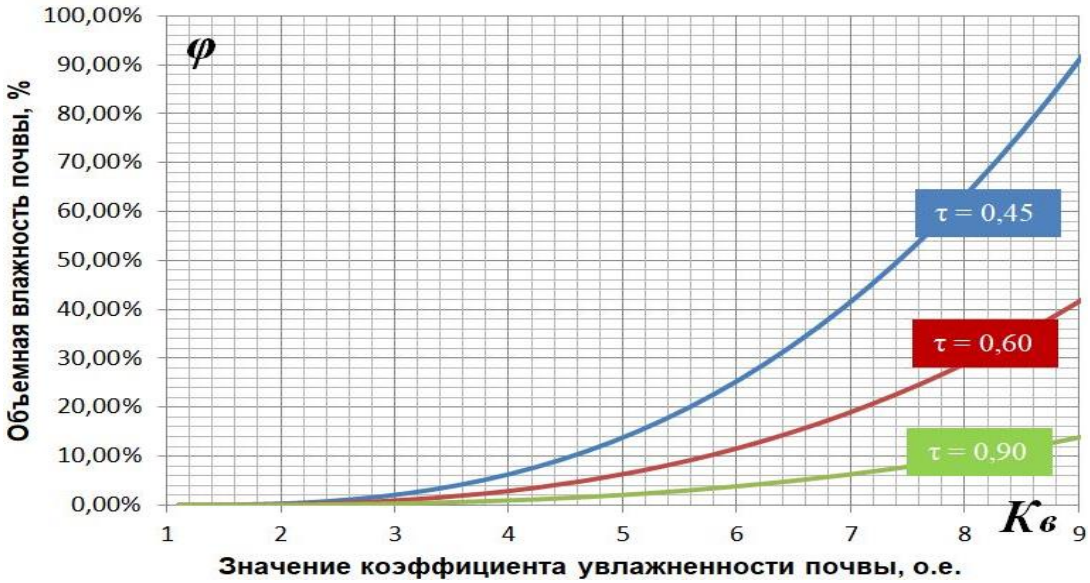


Рисунок 11 – Теоретическая зависимость влажности почвы от значения коэффициента увлажненности при разных отношениях заряда τ, отношении высокой частоты к низкой ϑ =10 и отношении напряжений на эталонном конденсаторе *u* = 0,9

Как видно из рис. 10 и 11, на коэффициент увлажненности почвы существенное влияние оказывает значение отношения накопленного заряда на

измерительном конденсаторе при низкой и высокой частотах. Если τ составляет от 0,5 до 0,6, то коэффициент увлажненности имеет наилучший отклик при соответствующей влажности почвы.

Точность данных о влажности почвы необходима для определения режима работы оборудования оросительного комплекса с тем, чтобы восполнить дефицит влаги. Включение оросительного комплекса, который состоит из насосного агрегата (НА) и дождевальной машины (ДМ), в автоматическом режиме выполним по обратной связи в виде датчика послойного контроля влажности (при снижении влажности ниже порога – наименьшей влагоемкости почвы). В таких системах, как правило, существует инерционное запаздывание на время подготовки машины и снижения влажности в слоях почвы ниже критического уровня.

Воспользуемся основными положениями теории прогнозирования состояния в будущем. Пуск НА и ДМ должен происходить с упреждением в соответствии со скоростью изменения влажности почвы. С опросом показаний датчика формируется база данных скорости изменения влажности по слоям во времени, которая определяется по формуле:

$$v_i(t_k) = \frac{W_i(t_k) - W_i(t_{k-1})}{T_{\text{оп}}}, \tag{19}$$

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:

$$t_{\min}(t_k) = \min\left\{t_{\text{pred},1}(t_k), t_{\text{pred},2}(t_k), t_{\text{pred},3}(t_k), t_{\text{pred},4}(t_k)\right\}, \tag{20}$$

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 – каждый дискретный момент времени, который вычисляется как прогнозное время изменения влажности до порогового значения для каждого слоя и принятия решения о поливе, $t_k = kT_s$.

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

$$W_i(t_k) + v_i t_{\text{pred},i} = W_{\text{low},i} \rightarrow t_{\text{pred},i} = \frac{W_{\text{low},i} - W_i(t_k)}{v_i}. \tag{21}$$

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

На основании скорости изменения влажности 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 (рис. 12).

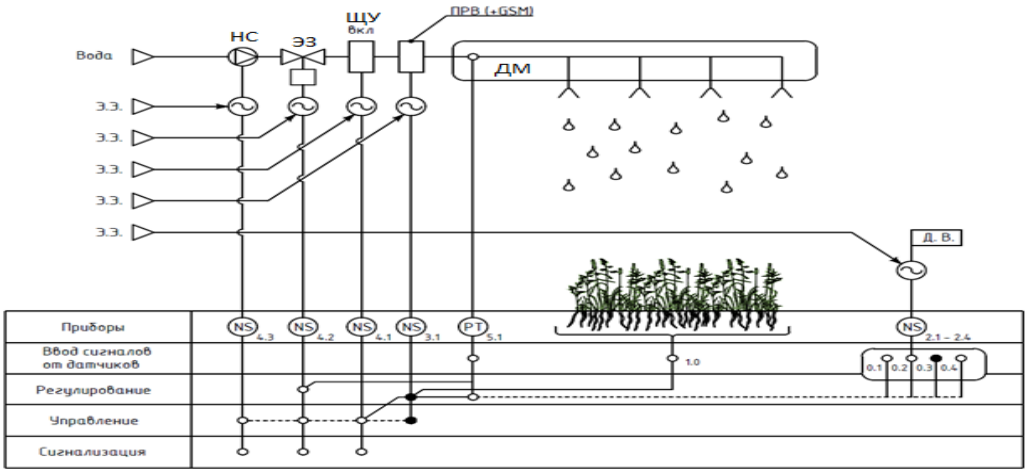


Рисунок 12 – Функциональная схема автоматизации полива с обратной связью на основе данных датчика послойного контроля влажности почвы: НС – насосная станция; ЭЗ – электрозадвижка (клапан); ЩУ – щит управления; ДМ – дождевальная машина; ДВ – датчик влажности; ПРВ – программируемое реле времени; ЭЭ – подключение к источнику электрической энергии

Функциональная схема автоматизации (см. рис. 12) построена на основе данных, получаемых с датчика влажности. В соответствии с корнеобитаемым слоем в зависимости от фазы роста растений определяли влажность на глубине. Например, на рис. 12 в слое 0,3 м влажность почвы снизилась до критического значения. Сигнал о низкой влажности поступает по сотовой связи (GSM) в блоки «Регулирование» и «Управление». Информация через GSM-модем передается на блок процентного реле времени для выбора режима работы насосной станции и дождевальной машины так, чтобы вода от водоема через насосную станцию и дождевальную машину дошла до корнеобитаемого слоя растений на 0,3 м.

Алгоритм автоматического управления (рис. 13) 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 увлажнённости $K_в = C_{нч} / C_{вч}$, который является информативным параметром, пропорциональным объёмной влажности почвы и не зависящим от абсолютных значений ёмкости. По калибровочной зависимости $W_ф = f(K_в)$ для каждого контролируемого слоя (0,1 м; 0,2; 0,3 и 0,4 м) определяется фактическая влажность $W_ф$. 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 $\Delta W = W_{НВ} - W_ф$ с учётом данных о росте растений и параметров оборудования – подачи насосного агрегата Q ($м^3/ч$) и гидромодуля дождевальной машины g (л/с на 1 га).

На основании этих данных рассчитывается продолжительность работы автоматизированной системы полива. По результатам расчёта контроллер формирует режим работы насосного агрегата и дождевальной машины на расчётный период T.

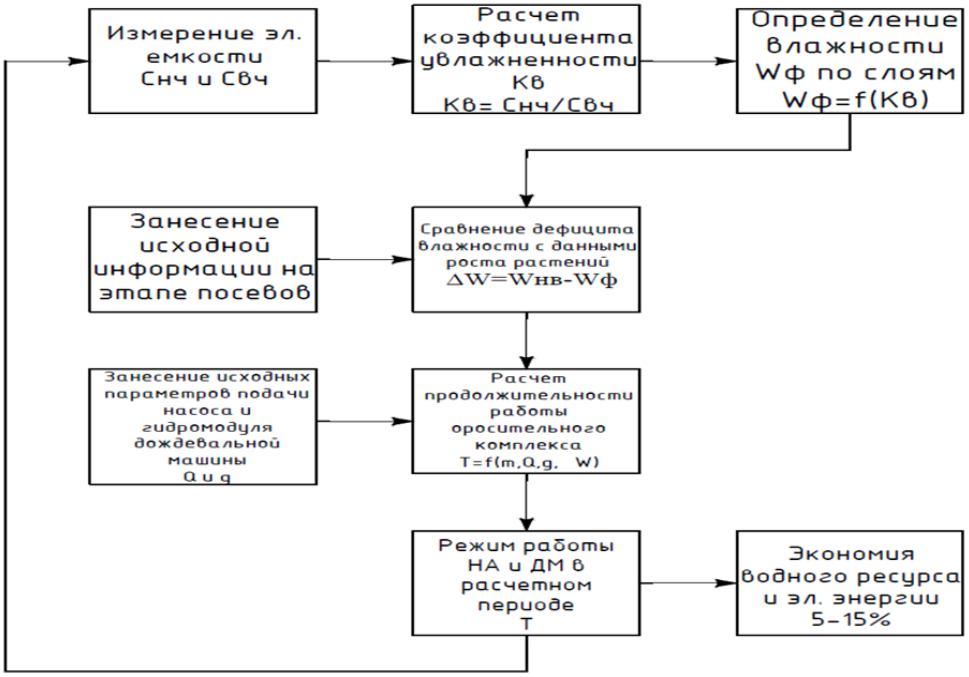


Рисунок 13 – Функциональная схема автоматического управления автоматизированной системы полива на основе послойного контроля влажности почвы

Таким образом, схема (см. рис. 13) обеспечивает замкнутый цикл управления поливом с послойным контролем влажности, адаптацией под глубину корневой системы и регулированием по давлению.

В **третьей главе *«Методика экспериментальных исследований датчика послойного контроля влажности почвы»*** описаны методика проведения эксперимента, конструкция первичного и вторичного преобразователей; проведение лабораторных и полевых испытаний в схеме автоматизации полива.

Первичный преобразователь выполнен в виде двух колец, которые являются обкладками измерительного конденсатора, толщина стенки кольца 0,8 мм, ширина 5 мм, диаметр 28 мм. В комплексе внешний вид первичного преобразователя показан на рис. 14.



а *б* *в*

Рисунок 14 – Внешний вид: *а* – измерительной штанги; *б*, *в* – измерительного конденсатора соответственно без изоляции и с изоляцией

В качестве изоляционного материала измерительной штанги использован капролон с высоким сопротивлением $10^{12}…10^{13}$ Ом. При разработке вторичного преобразователя использована схема Вина (рис. 15).

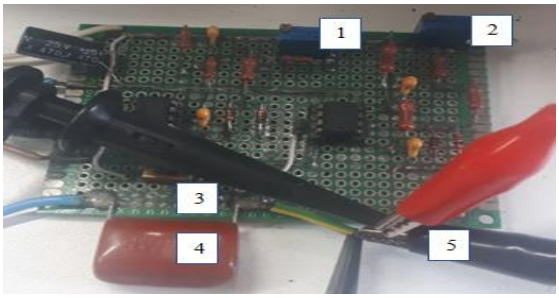


Рисунок 15 – Вторичный преобразователь датчика послойного контроля влажности почвы (1 – генератор низкой частоты; 2 – генератор высокой частоты; 3 – переключатель; 4 – эталонный конденсатор; 5 – выводы на измерительный конденсатор)

Общий вид лабораторного стенда испытания датчика послойного контроля влажности почвы показан на рис. 16.

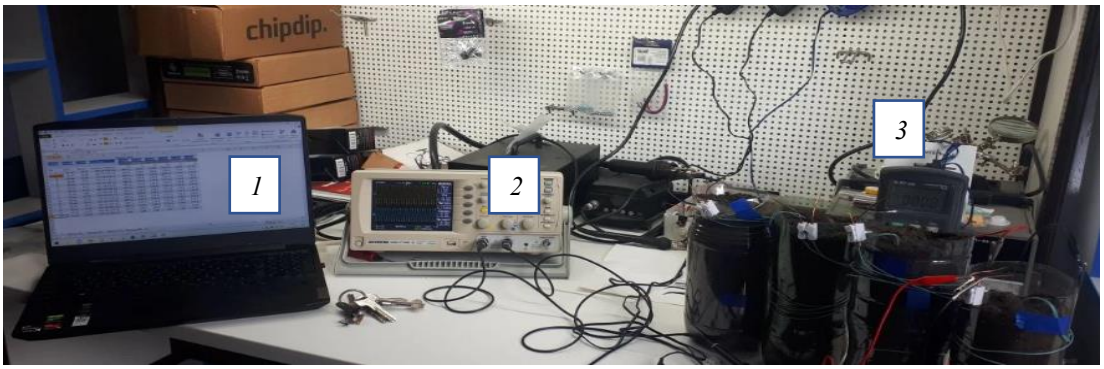


Рисунок 16 – Внешний вид лабораторного стенда испытания ПП и ВП: *1* – ноутбук; *2* – осциллограф GW instec GDS-71102; *3* – измеритель RLC цепей E7-22

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 частоты – 7670…7770 Гц (рис. 17).



а *б*

Рисунок 17 – Данные измерений напряжений U_1 и U_2 в измерительной схеме с первичными преобразователями на низкой (*а*) и высокой (*б*) частотах

Заданные параметры датчика послойного контроля влажности почвы подтверждены в лабораторных условиях на всех образцах почвогрунтов с одинаковой степенью корреляции.

Проверку датчика в полевых условиях осуществляли в схеме автоматического управления дождевальной машиной и питающего насосного агрегата. Система автоматического управления с обратной связью в виде датчика имеет несколько уровней (рис. 18).

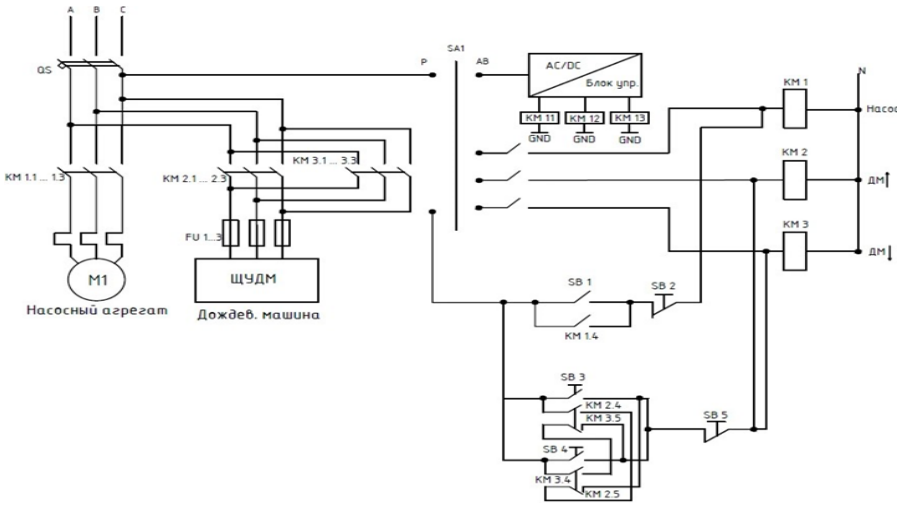


Рисунок 18 – Упрощенная электрическая схема управления в автоматическом режиме НА и ДМ на основе данных датчика послойного контроля влажности почвы

На основе данных о влажности в конкретном корнеобитаемом слое и алгоритма расчета режима полива осуществлялся автоматический полив насосом и дождевальной машиной.

В **четвертой главе *«Обработка результатов экспериментальных исследований датчика послойного контроля влажности почвы»*** описаны результаты эксперимента, выполнена статическая обработка полученных данных и проведена оценка сходимости результатов исследования.

Анализ экспериментальных данных показал, что сравнительные измерения с расчетной емкостью на низкой частоте колебательного контура, созданного измерительной схемой, относительно стандартного номинального значения емкости выполнены с погрешностью не более 10 %. Диапазон емкости первичного преобразователя от сухой до влажной почвы не превышает 0,1 мкФ при значении эталонного конденсатора 1,0 мкФ. Сравнение полученных данных приведено в табл. 1.

Таблица 1 – **Результаты измерений коэффициента увлажненности $K_в$**

№ опыта	Частота $f_{нч}$ = 840 Гц			Частота $f_{вч}$ = 7760 Гц			$K_в$	Состояние почвы
	$C_{хном}$	$C_{хизм}$	ΔC_x	$C_{хном}$	$C_{хизм}$	ΔC_x		
1	45 пФ	44 пФ	1 пФ	45 пФ	28 пФ	17 пФ	**2,0**	Сухая
2	107 пФ	114 пФ	-7 пФ	107 пФ	32 пФ	75 пФ	**4,3**	Увлажн.
3	890 пФ	867 пФ	23 пФ	890 пФ	67 пФ	823 пФ	**5,0**	Влажн.
4	3290 пФ	3105 пФ	185 пФ	3290 пФ	205 пФ	3085 пФ	**5,6**	Сырая

Среднее отклонение теоретических и экспериментальных данных лабораторной проверки зависимости коэффициента увлажненности по влажности почвы не превысило 5,3 %.

Интеграция датчиков послойного контроля влажности почвы как обратной связи в систему автоматизированного управления системой полива представляет собой переход от жестких временных циклов к адаптивному гидрологическому регулированию.

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 (табл. 2). Осуществлено сравнение расчетных

теоретических и экспериментальных данных (расчет с помощью программного решения по алгоритму рис. 12), а также данных, полученных при контрольных проверках на орошаемых участках ООО «Мираторг-Курск» (с. Черницыно Октябрьского района Курской области).

Таблица 2 – **Результаты проверки алгоритма управления насосным агрегатом и дождевальной 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 ниже поверх. земли, м	Влажность почвы, изм. контрольным методом (термостат.-вес.) на слоях, %	Влажность почвы, изм. ДПКВ, $К_в$	Продолжительность работы НА и ДМ, ч		Разность показаний	
					теор.	эксп.	абс., ч	отн., %
01.05	Сев	0,1	64	3,4				
04.05	Прорастание	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	Трубкование	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 м	58	3,9	39,3	39,1	+0,2	0,5
25.08	Спелость	0,4 м	65	3,5				

Согласно теоретическому расчету, до влажности почвы 60–80 % продолжительность работы насосного агрегата и дождевальной машины должна составлять 28,4 ч. По данным эксперимента этот показатель составил 28,8 ч, т. е. разница 1,4 %. Сравнение данных теоретического и экспериментального исследований представлено на рис. 19.

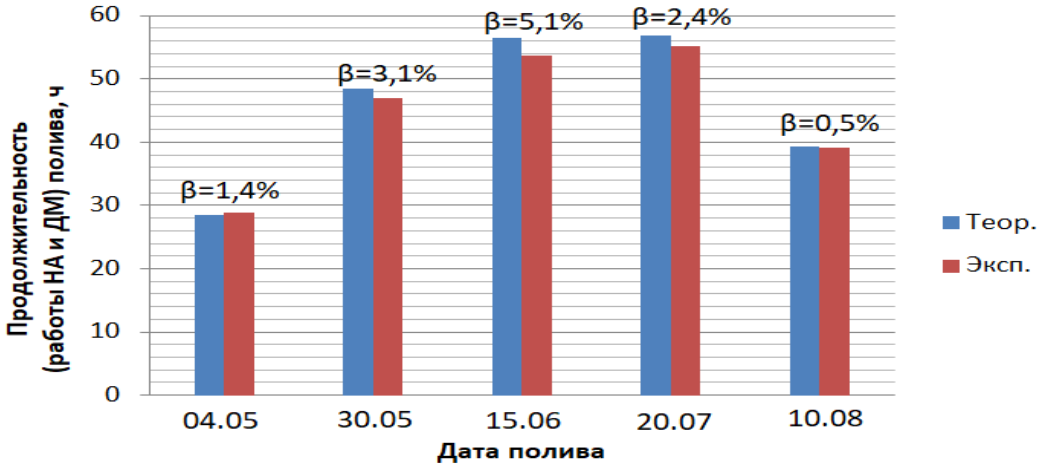


Рисунок 19 – Гистограммы сравнения данных теоретического и экспериментального исследований автоматизации управления НА и ДМ на основе ДПКВ

Сходимость результатов теоретического определения режима работы оросительной системы и экспериментальных данных при выращивании кукурузы составила не более 5,1 %.

В **пятой главе** ***«Обоснование экономической эффективности предложенных решений»*** выполнен расчет экономической эффективности внедрения датчика послойного контроля влажности почвы.

В табл. 3 представлена сравнительная характеристика существующих методов и средств контроля влажности почвы и предлагаемого с помощью разработанного датчика.

Таблица 3 – **Сравнительная характеристика методов и средств контроля влажности почвы**

Критерий	Термостатно-весовой метод	Резистивный датчик	FDR датчик (ёмкостной)	TDR датчик (рефлекто-метр)	Датчик ООО «Кайпос»	**Датчик послойного контроля (разраб.)**
Погрешность измерений (%)	1,0	30,0	25,0	10,0	50,0	5,0
Срок проведения изм., 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	0,0	≈ 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

Основные технико-экономические показатели разработанного датчика и его внедрения в систему автоматизации полива как обратной связи по сравнению с базовым вариантом приведены в табл. 4.

Таблица 4 – **Технико-экономические показатели внедрения разработанного датчика в схему автоматизации поливов**

Показатель	Базовый вариант – датчик ООО «Кайпос»	Разработанный вариант датчика послойного контроля
Капитальные затраты на один датчик, руб.	25000,00	11783,00
Погрешность измерений, %	50,0	5,0
Эксплуатационные затраты, руб./год	2000,00	500,00
Годовая экономия эксплуатационных расходов, руб./год	–	1500,00
Дополнительный годовой агротехнологический эффект (экономия воды и энергии), руб./год	–	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
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

дождевальной машины, составит около 7225 руб. на 100 га орошаемого участка без учета влияния динамических показателей климата.

Таблица 5 – **Сравнительная характеристика по водопотреблению существующего и разработанного датчиков (на 100 га)**

Показатель	Датчик ООО «Кайпос»	Разработанный 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 на один датчик (0,5 га): вода, м³	–	72,5	–	–
Дополнительная экономия на один датчик (0,5 га): затраты, руб.	–	375	–	–

Как видно из табл. 5, применение разработанного датчика послойного контроля влажности позволяет дополнительно сэкономить 14 500 м³ 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 м³ (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. 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) составит 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, исключающий 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 увлажненности почвы $К_в$, который рассчитывается как отношение емкости конденсатора, измеренной на низкой частоте, к емкости, измеренной на высокой частоте – выражение (17).

3. Разработаны структура автоматизированной системы управления поливом , отличающаяся применением емкостного метода послойного измерения в качестве канала обратной связи и алгоритмы измерения влажности по слоям на основе коэффициента увлажненности 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 дождевальной 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 ее 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 существенного 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, что является особенностью предложенного принципа измерения.

2. В схемах автоматизации управления насосом и дождевальной машиной 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 с целью получения 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 будет достигаться при исследовании передаточной функции зависимости влажности почвы от продолжительности работы оборудования и их временных характеристик.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1. Обоснование формы датчика послойного контроля влажности почвы / Д. А. Соловьев, С. М. Бакиров, Д. А. Колганов, **М. А. Абзалов** // Аграрный научный журнал. – 2024. – № 4. – С. 142–149.

2. Анализ принципа измерения влажности ёмкостным способом / **М. А. Абзалов**, С. М. Бакиров, Т. А. Широбокова, С. С. Елисеев // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. – 2026. – № 1(85). – С. 149–157.

3. Обоснование параметров режима секторного управления скоростью орошения электрифицированной дождевальной машиной кругового действия / С. М. Бакиров, С. С. Елисеев, А. И. Кадухин, **М. А. Абзалов** // Аграрный научный журнал. – 2026. – № 5. – С. 118–125.

4. Обоснование способа определения даты полива сельскохозяйственных культур / С. М. Бакиров, Д. А. Колганов, С. С. Елисеев, **М. А. Абзалов** // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2026. – № 3(87). – С. 493-498. – DOI 10.32786/2071-9485-2026-03-55. – EDN PHANRV.

5. Обоснование параметров системы автоматического управления поливом на основе послойного контроля влажности почвы / **М. А. Абзалов**, С. М. Бакиров, Ф. К. Абдразаков [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2026. – № 8. – С. 112-116. – DOI 10.28983/asj.y2026i8pp112-116. – EDN JNLUSO.

В патентах РФ

5. **Пат. на полезную модель** № 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». – № RU 222477 U1 ; заявл. 18.10.2023; опубл. 28.12.2023.

В сборниках научных трудов, материалах конференций и семинаров

6. ***Абзалов, М. А.*** Методика эксперимента проверки измерения влажности почвы в лабораторных условиях / М. А. Абзалов // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. III Национальной научно-практической конференции с международным участием имени Г. П. Ерошенко, Саратов, 18 апреля 2025 года. – Саратов : Сарат. гос. ун-т генетики, биотехнологии и инженерии им. Н. И. Вавилова, 2025. – С. 11–16. – EDN VMKLLZ.

7. ***Абзалов, М. А.*** Особенности средств измерения влажности почвы / М. А. Абзалов // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. II Национальной научно-практической конференции с международным участием имени Г. П. Ерошенко, Саратов, 25 апреля 2024 года. – Саратов : Сарат. гос. ун-т генетики, биотехнологии и инженерии им. Н. И. Вавилова, 2024. – С. 14–17. – EDN QSZZJH.

8. ***Абзалов, М. А.*** Методы измерения влажности почвы / М. А. Абзалов // Инновационное техническое обеспечение агропромышленного комплекса : научно-техническая конференция с международным участием имени А. Ф. Ульянова, Саратов, 17 октября 2024 года. – Саратов : ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова», 2024. – С. 8–12. – EDN KHAAZN.

9. *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 : матер. Международной научно-практической конференции, Саратов, 7 декабря 2023 года. – Саратов : Сарат. гос. ун-т генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова, 2023. – С. 12–16. – EDN PMFRIY.

10. *Бакиров, С. М.* Оценка средств измерения влажности почвы / С. М. Бакиров, **М. А. Абзалов**, В. С. Ильин // Повышение эффективной эксплуатации электрооборудования в сельском хозяйстве : матер. I Национальной научно-практической конференции с международным участием имени Г. П. Ерошенко, Саратов, 22 декабря 2023 года. – Саратов : Сарат. гос. ун-т генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова, 2023. – С. 32–37. – EDN VWYSVP.