

Московский экономический журнал. № 12. 2025

Moscow economic journal. No 12. 2025

Научная статья

Original article

УДК 631.34

doi: 10.55186/2413046X_2025_10_12_276

edn: FMUSMY

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПЕРСПЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ДОЖДЕВАЛЬНЫМИ
МАШИНAMI ТИПА «КУБАНЬ» НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-
ОПТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ**
**DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR A PROMISING
AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR KUBAN-TYPE SPRINKLER
MACHINES BASED ON FIBER-OPTIC TECHNOLOGIES**



Мищенко Николай Андреевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга» (140483 Московская обл., Коломенский район, пос. Радужный, 38), тел. 8(496)6-170-474, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6002-5202>, mishenko.nikolai@bk.ru.

MiShchenko Nikolai Andreevich, candidate of technical sciences, the Leading Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution «All-Russian Scientific Research Institute «Raduga» (Moscow Region, Kolomna District, settl. Raduzhny), tel. 8(496)6-170-474, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6002-5202>, mishenko.nikolai@bk.ru.

Аннотация. В статье рассматриваются актуальные проблемы и технические решения, связанные с модернизацией систем автоматики дождевальных машин фронтального типа (МДЭФ) и кругового (МДЭК) типа «Кубань».

Анализируются недостатки существующих систем, построенных по принципу «жесткой логики», главными из которых являются ограниченный функционал, низкая ремонтопригодность, высокая материалоемкость и недостаточная надежность. В качестве основного направления совершенствования предлагается переход на бесконтактную элементную базу с использованием волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) и микропроцессорной техники. Описана двухуровневая иерархическая структура системы автоматического управления (САУ), включающая центральный микрокомпьютер и распределенные системы управления тележками (СУТ). Детально проанализированы функциональные схемы управления движением и поливом, алгоритмы работы СУТ, включающие непрерывную диагностику и защиту исполнительных механизмов. Представлен инновационный подход к управлению качеством полива в прицентральной зоне с применением время-импульсного метода и пульсаторов. Доказано, что предлагаемые решения позволяют вывести эксплуатационные характеристики дождевальных машин на качественно новый уровень, соответствующий требованиям перспективных безоператорных технологий орошения, обеспечивают значительную экономию дефицитных материалов (меди), повышают надежность, ремонтопригодность и функциональные возможности оборудования.

Abstract. The article examines current problems and technical solutions related to the modernization of automation systems for front-type and circular-type "Kuban" sprinkler machines. The shortcomings of existing systems, built on the principle of "hard-wired logic", are analyzed; the main ones being limited functionality, low maintainability, high material consumption, and insufficient reliability. The transition to a non-contact component base using fiber-optic communication lines (FOCL) and microprocessor technology is proposed as the main direction for improvement. A two-level hierarchical structure of the automatic control system (ACS) is described, which includes a central microcomputer and distributed trolley

control systems (TCS). The functional diagrams for motion and irrigation control, as well as the operational algorithms of the TCS—including continuous diagnostics and protection of actuators—are analyzed in detail. An innovative approach to irrigation quality management in the central pivot area using a time-pulse method and pulsators is presented. It is proven that the proposed solutions make it possible to elevate the operational characteristics of sprinkler machines to a qualitatively new level, corresponding to the requirements of advanced operatorless irrigation technologies, ensure significant savings in scarce materials (copper), and increase the reliability, maintainability, and functionality of the equipment.

Ключевые слова: дождевальная машина, автоматизация, волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС), микропроцессорное управление, диагностика, бесконтактная автоматика, качество полива, система управления тележкой (СУТ)

Keywords: sprinkler irrigation machine, automation, fiber-optic communication line (FOCL), microprocessor control, diagnostics, contactless automation, irrigation quality, trolley control system (TCS)

Введение. Дождевальные машины типа «Кубань» являются ключевым элементом систем мелиорации в сельском хозяйстве России и стран СНГ. Их широкое распространение обусловлено возможностью орошения значительных площадей с минимальным использованием ручного труда. Однако, эксплуатируемые в настоящее время системы автоматизированного управления и защиты данных машин базируются на устаревшей элементной базе и принципах построения, что существенно ограничивает их потенциал. Современные требования к агротехнике, в частности, переход к «точечному» и адаптивному орошению, необходимость дистанционного управления группами машин, ужесточение норм ресурсо- и энергосбережения, выдвигают на первый план задачи коренной модернизации управляющего

комплекса. Существующие системы не обладают необходимой гибкостью, информативностью и надежностью для соответствия этим вызовам, что обуславливает необходимость проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) по созданию систем управления нового поколения.

Актуальность. Актуальность совершенствования автоматики дождевальных машин типа «Кубань» определяется комплексом факторов технического, экономического и технологического характера.

1. Ограничения существующих систем. Серийные системы управления построены по принципу «жесткой логики», где для каждого функционального действия (включение двигателя тележки, сигнал датчика) требуется отдельный физический канал связи – медная жила в кабеле. Такая архитектура не позволяет без существенных переделок расширять функционал, например, вводить избирательный полив, непрерывную диагностику с локализацией неисправностей или дистанционное групповое управление. Расчеты показывают, что для реализации расширенных функций в рамках традиционной схемы потребовалось бы около 500 дополнительных медных жил, что технически и экономически нецелесообразно.
2. Низкая надежность и ресурс. Контактная релейная автоматика имеет ограниченный ресурс (0,1–0,4 млн. включений). Учитывая, что число включений предпоследней тележки за сезон может достигать 500 000, ее выход из строя возможен уже после первого года эксплуатации. Это требует создания увеличенного запаса запасных частей (ЗИП) и приводит к росту эксплуатационных расходов.
3. Высокая материалоемкость. Использование многожильных медных кабелей значительного сечения приводит к перерасходу цветных металлов, в том числе остродефицитной меди.
4. Требования современной технологии орошения. Перспективные «безоператорные» технологии предполагают централизованное

автоматизированное управление групповой работой машин с программируемыми режимами полива, в том числе избирательного, с дифференциацией норм полива в зависимости от типа почвы и культуры на конкретном участке. Реализация этого невозможна без перехода на интеллектуальные, гибкие и информационно-насыщенные системы управления.

5. Проблема качества полива. Для машин кругового действия характерен значительный переполив вблизи центральной опоры из-за конструктивных ограничений на минимальное сечение водовыпусканых насадок (риск забивания частицами, содержащимися во взвешенном состоянии в поливной воде). Это снижает равномерность полива и надежность работы машины, требуя технического решения.

Таким образом, разработка новой системы автоматики является не просто локальным улучшением, а стратегической задачей, определяющей конкурентоспособность отечественной дождевальной техники на внутреннем и внешнем рынках.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является разработка научно-обоснованных технических предложений по созданию высокоэффективной, надежной и многофункциональной системы автоматизированного управления дождевальными машинами типа «Кубань» на основе современных волоконно-оптических и микропроцессорных технологий.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Обосновать переход с контактной релейной на бесконтактную электронную и процессорную элементную базу.
2. Разработать предложения по применению волоконно-оптического кабеля в качестве основной информационной линии связи для замены металлических проводников.

3. Разработать двухуровневую иерархическую структуру системы управления, включающую центральный пульт (САУ) и распределенные блоки управления на тележках (СУТ).
4. Проанализировать и предложить функциональные схемы управления движением машины и качеством полива.
5. Разработать алгоритмы работы СУТ, обеспечивающие синхронизацию движения, диагностику и защиту исполнительных механизмов.
6. Предложить технические решения для повышения равномерности полива, в частности, для зоны близи центральной опоры.
7. Оценить ожидаемый эффект от внедрения в части повышения надежности, ремонтопригодности, снижения материоемкости и расширения функциональных возможностей.

Материалы и методы исследования. В основу работы положены методы системного анализа, теории автоматического управления и проектирования радиоэлектронной аппаратуры. Исследование базируется на критическом анализе существующей конструкции и принципов работы серийных систем управления дождевальных машин «Кубань». Так же в исследовании используются фоновые библиотечные и архивные материалы ФГБНУ ВНИИ «Радуга», по вопросу создания и модернизации широкозахватных дождевальных машин кругового действия, на базе дождевальных машин типа «Кубань». В работе, использовали офисную программу MS Excel, для упрощения расчетов, систему автоматизированного проектирования Компас 3D версии 21, для создания схем и чертежей.

Были использованы следующие материалы:

- Техническая документация на дождевальные машины МДЭФ и МДЭК.
- Данные о надежности и ресурсе компонентов существующей автоматики.
- Сведения о физико-технических характеристиках волоконно-оптических кабелей (ВОК) и микропроцессорной техники.
- Результаты расчетов, подтверждающие необходимость перехода на ВОЛС.

Методология разработки новой системы включала:

1. Функционально-структурный подход: система была декомпозирована на подсистемы управления движением, поливом и диагностикой с четким определением функций и взаимосвязей.
2. Принцип иерархичности: предложена двухуровневая структура, где нижний уровень (СУТ) решает локальные задачи управления тележкой, а верхний уровень (САУ) осуществляет координацию всей машины и связь с внешним миром.
3. Применение моделирования: алгоритмы работы СУТ и зонирование углов изгиба трубопровода были проработаны на функциональном уровне, что позволило формализовать логику принятия решений.
4. Сравнительный анализ: проведено сравнение традиционных (медные кабели, реле) и перспективных (ВОЛС, бесконтактные пускатели) технических решений по критериям надежности, материалоемкости и функциональности.

Результаты исследования и их обсуждение

1. Разработка структуры системы управления.

В результате проведенного анализа была предложена двухуровневая иерархическая структура системы автоматического управления (САУ).

- Первый уровень – Система Управления Тележкой (СУТ). Это распределенный интеллектуальный блок, устанавливаемый на каждой опорной тележке. Его основная задача – локальное управление электродвигателем тележки на основе сигналов от датчиков изгиба (ДИ) и датчика движения (ДОЗ – одометрическое колесо). Контур управления представляет собой замкнутую систему: ДИ -> СУТ -> электродвигатель -> трубопровод -> ДИ.
- Второй уровень – Центральный пульт управления (САУ). На базе микрокомпьютера или микроконтроллера, расположенного на центральной опоре. Он осуществляет общее управление машиной, обработку информации

со всех СУТ по дуплексному волоконно-оптическому каналу, хранение программ полива, взаимодействие с дистанционным пультом управления (ПДУ) и реализацию функций группового управления.

Связь между уровнями осуществляется через врачающийся оптический переход и волоконно-оптический кабель (ВОК). Ключевое преимущество ВОК – передача всего объема управляющей и диагностической информации по одному оптическому волокну вместо сотен медных жил. Это обеспечивает:

- Резкое снижение материоемкости и массы кабеля.
- Повышение помехозащищенности и надежности связи.
- Существенное расширение пропускной способности канала.

2. Функциональная схема и алгоритм работы СУТ.

Система управления тележкой является ключевым элементом, обеспечивающим надежность и интеллектуальность всей системы. Ее информационные входы: сигналы от ДИ, ДОЗ и команды от центрального пульта САУ. Выходы: сигналы управления электродвигателем и диагностическая информация в САУ.

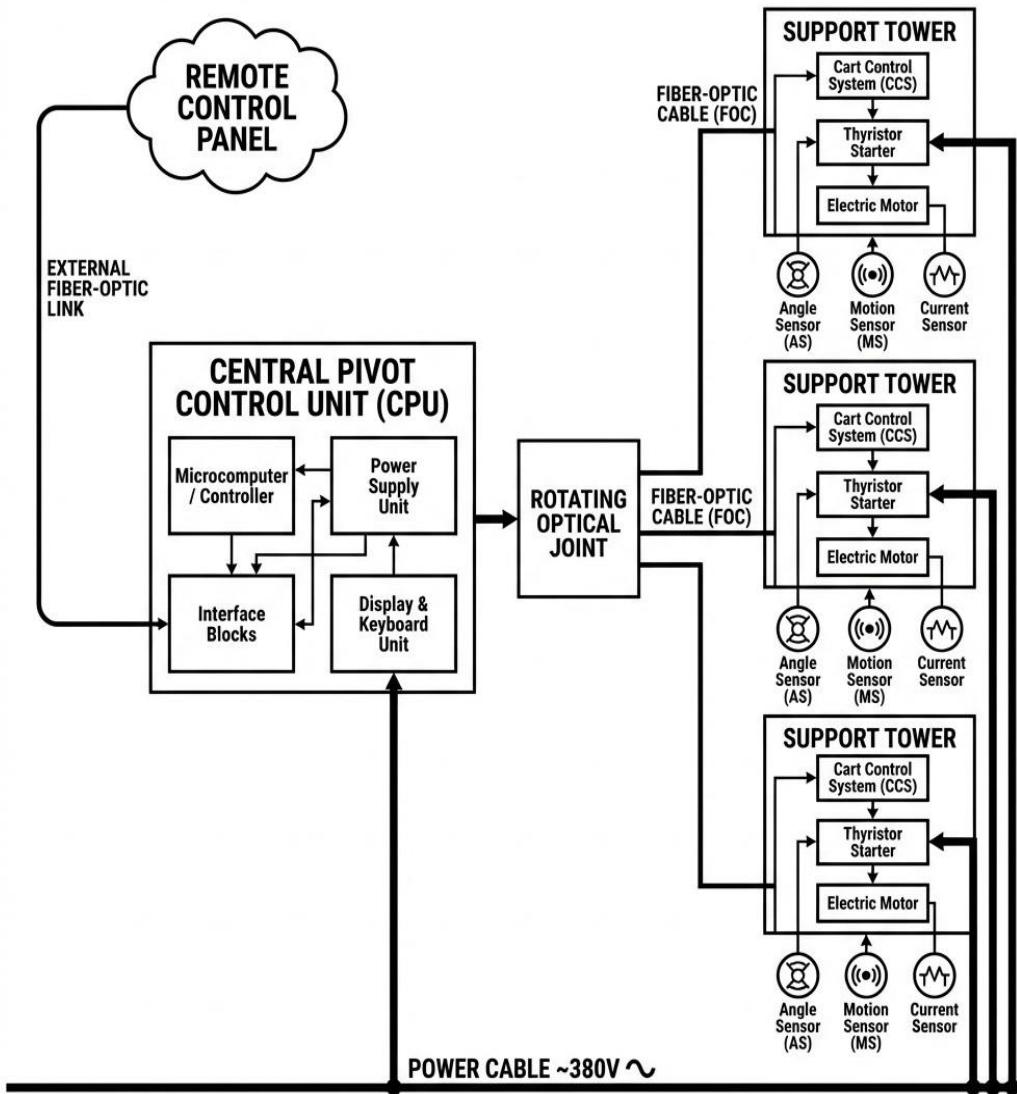


Рисунок 1. Двухуровневая иерархическая структура системы автоматического управления дождевальной машиной.

На (рис 1) приведена двухуровневая иерархическая структура системы автоматического управления дождевальной машиной. В центре-слева: «Центральная опора (САУ)», с перечислением компонентов: «Микрокомпьютер / Контроллер», «Блок питания», «Интерфейсные блоки», «Блок индикации и клавиатура». Далее через «Вращающийся оптический переход» идет связь через «Волоконно-оптический кабель (ВОЛС)». Эта связь идет с тремя идентичными блоками «Опорной тележки». Внутри каждого блока «Опорная тележка» размещены элементы системы

управления: «Система Управления Тележкой (СУТ)», «Тиристорный пускатель», «Электродвигатель». Снизу к блоку тележки подключены три датчика: «Датчик изгиба (ДИ)», «Датчик движения (ДОЗ)», «Датчик тока». Всю систему мониторит «Дистанционный пульт управления (ПДУ)», соединенный с «Центральной опорой (САУ)» по средствам «Внешней волоконно-оптической линии связи». Так же все элементы подключены к «Силовому кабелю ~380V», который соединяется с каждой из «Опорных тележек».

Предложен детальный алгоритм работы СУТ, включающий непрерывный диагностический контроль:

1. Контроль включения электродвигателя. После команды на запуск, таймер СУТ в момент t_1 фиксирует значение тока (через датчик тока). Если ток превышает уставку I_1 , формируется сигнал «Срабатывание тиристорного пускателя». В противном случае – «Отказ тиристорного пускателя».
2. Контроль нагрузки двигателя. В момент t_2 проверяется, находится ли ток в рабочем диапазоне ($I_1 < I < I_2$). Сигнал «Нагрузка двигателя в норме» позволяет продолжить работу.
3. Контроль исправности редуктора. При нормальной нагрузке и наличии сигнала от ДОЗ о вращении колеса формируется сигнал «Исправность редуктора». Отсутствие вращения при наличии тока свидетельствует о «Неисправности редуктора».
4. Контроль сцепления с грунтом (буксование). При исправном редукторе анализируется сигнал ДИ. Изменение угла изгиба свидетельствует о нормальном движении («Отсутствие буксования»). Если ДОЗ показывает вращение, а угол изгиба не меняется, формируется сигнал «Пробуксовка тележки».
5. Контроль сопротивления движению. При увеличении тока двигателя без признаков крена или буксования формируется сигнал «Сопротивление движению». Центральный пульт САУ, имея «карту поля» от предыдущих

проходов и данные от соседних тележек, принимает решение о продолжении работы или остановке.

Кроме того, введено зонирование углов изгиба α между секциями:

$\alpha = 0 \div 1^\circ$: Зона безразличия. Управляющие воздействия не производятся.

$\alpha = 2 \div 3^\circ$: Зона повышенного внимания. СУТ включает двигатель, САУ анализирует общую ситуацию.

$\alpha = 3 \div 4^\circ$: Зона управления с пульта. Включение двигателя возможно только по команде САУ.

$\alpha \geq \pm 4^\circ$: Зона аварийной остановки. Машина останавливается, ручной запуск возможен только на тележке.

Такой подход превращает систему управления в постоянно действующее диагностическое средство, предотвращающее развитие аварийных ситуаций.

3. Управление качеством полива для машин кругового действия.

Для решения проблемы переполива в прицентральной зоне предложен инновационный метод время-импульсного или широтно-импульсного управления. Вместо постоянной подачи воды на ближних к центру водовыпусках, на них устанавливаются управляемые клапаны-пульсаторы или гидромеханические пульсаторы.

Принцип работы заключается в периодическом включении ($t_{ик}$) и отключении ($t_{пк}$) подачи воды через насадки. Время включения/отключения рассчитывается таким образом, чтобы суммарная норма полива на ближнем участке (радиус R_k) сравнялась с нормой на удаленном участке (радиус R_i), где диаметр сопел насадок больше и риск забивания отсутствует. Это позволяет использовать на ближних водовыпусках насадки с большим диаметром сопла, обеспечивая надежность их работы и выравнивая общую равномерность полива по длине машины.

4. Сервисные и диагностические функции.

Предложенная система САУ1 предусматривает введение дополнительной сервисной программы для автоматического контроля сопротивления изоляции силовых цепей.

Алгоритм предполагает:

- Блокировку силового питания (~380 В).
- Последовательное подключение автоматического мегомметра к фазам силового кабеля и токоведущим частям тиристорных пускателей через специальные технологические разъемы.
- Контроль сопротивления изоляции как всего комплекса, так и каждого электродвигателя в отдельности (путем пошагового включения пускателей по команде по ВОЛС).

Данная функция может выполняться по расписанию (перед началом сезона, после работы) или по команде оператора, что позволяет прогнозировать и предотвращать отказы, связанные с ухудшением изоляции в условиях повышенной влажности.

Выводы

1. Проведенный анализ подтвердил техническую и экономическую несостоятельность дальнейшего развития систем автоматики дождевальных машин «Кубань» на базе принципов «жесткой логики» и медных кабелей связи.
2. В качестве основного направления модернизации предложен комплексный переход на бесконтактную элементную базу, микропроцессорные контроллеры и волоконно-оптические линии связи. Это позволяет решить ключевые проблемы: снизить материалоемкость (экономия меди), повысить надежность (ресурс бесконтактной автоматики до 10-15 тыс. часов, что при сезонной нагрузке 800 часов увеличивает срок службы до 18 лет) и расширить функциональные возможности.
3. Разработана и всесторонне обоснована двухуровневая иерархическая структура системы автоматического управления (САУ), которая

обеспечивает централизованный контроль, гибкость управления и возможность дистанционного управления группой машин.

4. Детально проработаны функциональные схемы и алгоритмы работы распределенных систем управления тележками (СУТ), которые не только синхронизируют движение, но и реализуют непрерывный диагностический контроль за состоянием электродвигателей, редукторов и сцепления с грунтом, существенно повышая эксплуатационную надежность.

5. Предложено техническое решение для повышения равномерности полива машин кругового действия путем внедрения время-импульсного управления подачей воды в прицентральной зоне с помощью пульсаторов.

6. Внедрение предлагаемой системы управления выводит дождевальную технику типа «Кубань» на качественно новый уровень, соответствующий мировым тенденциям в области автоматизации сельскохозяйственного производства, и обеспечивает ее конкурентоспособность на внутреннем и внешнем рынках. Реализация данного проекта является первым и критически важным этапом в создании перспективного поколения отечественной широкозахватной дождевальной техники.

Список источников

1. Мищенко, Н. А. Влияние параметров мостового агрегата на повышение экологичности полива и снижения деградационного воздействия на почву / Н. А. Мищенко // Экология и строительство. – 2024. – № 2. – С. 29-34. – DOI 10.35688/2413-8452-2024-02-005. – EDN ZAPLFG.ГОСТ Р 58891-2020. Машины дождевальные фронтальные. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2020. – 45 с.
2. Ayars, J.E. Subsurface drip irrigation in California—Here to stay? / J.E. Ayars, C.J. Phene, R.B. Hutmacher // Agricultural Water Management. – 2015. – Vol. 157. – P. 39-47. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.001>

3. Петров, А.С. Волоконно-оптические линии связи в системах мониторинга и управления агропромышленных объектов / А.С. Петров, И.М. Сидоров // Научное обозрение: технические науки. – 2021. – № 4. – С. 22-30.
4. Goyal, M.R. Microirrigation Engineering for Horticultural Crops: Policy Options, Scheduling, and Design / M.R. Goyal, V.M. Salokhe. – Apple Academic Press, 2018. – 322 p. <https://doi.org/10.1201/9781315365994>
5. Иванов, Д.В. Применение микроконтроллеров в системах автоматизации мобильных сельскохозяйственных агрегатов / Д.В. Иванов // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2019. – № 3(41). – С. 41-47
6. Evans, R.G. Precision Irrigation with Closed Loop Control / R.G. Evans, W.M. Iversen // Proceedings of the ASABE Annual International Meeting. – 2014. – Paper № 141914130. <https://doi.org/10.13031/aim.20141914130>
7. Смирнов, К.А. Диагностика технического состояния дождевальных машин на основе анализа виброакустических сигналов / К.А. Смирнов, Е.Л. Фролов // Тракторы и сельхозмашины. – 2020. – № 12. – С. 55-60.
8. Мищенко, Н. А. Перспективы развития многоцелевого использования многоопорных дождевальных машин / Н. А. Мищенко // Вестник мелиоративной науки. – 2024. – № 3. – С. 176-181. – EDN KEPRZH.
9. Нормы технологического проектирования систем орошения (НТП-АПК 1.10.10.001-03). Утверждены Минсельхозом России 30.06.2003. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2003. – 96 с.

References

1. Mishhenko, N. A. Vliyanie parametrov mostovogo agregata na povyshenie ekologichnosti poliva i snizheniya degradacionnogo vozdejstviya na pochvu / N. A. Mishhenko // Ekologiya i stroitelstvo. – 2024. – № 2. – S. 29-34. – DOI 10.35688/2413-8452-2024-02-005. – EDN ZAPLFG.GOST R 58891-2020. Mashiny dozhdeval`nye frontal`nye. Obshchie texnicheskie usloviya. – M.: Standartinform, 2020. – 45 s.

2. Ayars, J.E. Subsurface drip irrigation in California—Here to stay? / J.E. Ayars, C.J. Phene, R.B. Hutmacher // Agricultural Water Management. – 2015. – Vol. 157. – P. 39-47. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.001>
3. Petrov, A.S. Vologonno-opticheskie linii svyazi v sistemakh monitoringa i upravleniya agropromyshlennyyx obektov / A.S. Petrov, I.M. Sidorov // Nauchnoe obozrenie: texnicheskie nauki. – 2021. – № 4. – S. 22-30.
4. Goyal, M.R. Microirrigation Engineering for Horticultural Crops: Policy Options, Scheduling, and Design / M.R. Goyal, V.M. Salokhe. – Apple Academic Press, 2018. – 322 p. <https://doi.org/10.1201/9781315365994>
5. Ivanov, D.V. Primenenie mikrokontrollerov v sistemakh avtomatizacii mobilnyx sel'skoxozyajstvennyx agregatov / D.V. Ivanov // Avtomatizaciya i IT v energetike. – 2019. – № 3(41). – S. 41-47
6. Evans, R.G. Precision Irrigation with Closed Loop Control / R.G. Evans, W.M. Iversen // Proceedings of the ASABE Annual International Meeting. – 2014. – Paper № 141914130. <https://doi.org/10.13031/aim.20141914130>
7. Smirnov, K.A. Diagnostika texnicheskogo sostoyaniya dozhdevalnyx mashin na osnove analiza vibroakusticheskix signalov / K.A. Smirnov, E.L. Frolov // Traktory i sel'xoz mashiny. – 2020. – № 12. – S. 55-60.
8. Mishchenko, N. A. Perspektivy razvitiya mnogocelevogo ispol'zovaniya mnogoopornyyx dozhdevalnyx mashin / N. A. Mishchenko // Vestnik meliorativnoj nauki. – 2024. – № 3. – S. 176-181. – EDN KEPRZH.
9. Normy` texnologicheskogo proektirovaniya sistem orosheniya (NTP-APK 1.10.10.001-03). Utverzhdeny` Minsel'szom Rossii 30.06.2003. – M.: FGNU «Rosinformagrotex», 2003. – 96 s.

© Мищенко Н.А., 2025. Московский экономический журнал, 2025, № 12.