

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / TECHNICAL SCIENCES



<https://doi.org/10.15507/2311-2468.013.202504.411-422>

eISSN 2311-2468

EDN: <https://elibrary.ru/oxfqaw>

<https://ogarev-online.ru>

УДК / UDC 62:004

Оригинальная статья / Original article

### Низкозатратная гидропонная ячейка с реинтеграцией микроконтроллера к программируемому логическому контроллеру

М. А. Бобров, Е. С. Безбородов 

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет,

Саранск, Россия

[egor.bez-off@yandex.ru](mailto:egor.bez-off@yandex.ru)

#### Аннотация

**Введение.** Высокие стартовые затраты и избыточная автоматизация при внедрении вертикальных ферм и гидропонных систем повышают риск неудачи проектов на ранних этапах. Цель исследования – формализовать и верифицировать методику поэтапного перехода управления ячейкой от микроконтроллера к промышленному контроллеру без потерь управляемости и данных, обеспечивающую низкие стартовые затраты.

**Материалы и методы.** Прототип – одна гидропонная ячейка с циклом «затопление – осушение» (2 ч / 15 мин). Аппаратная часть: плата Iskra Mega, перистальтические и воздушные насосы, датчики водородного показателя и электропроводности, управляемые фитолампы, а также коммуникационный протокол Modbus RTU на базе интерфейса RS-485. Методы: лабораторный эксперимент, калибровка измерительных каналов, протоколирование и аудит событий, нагрузочные испытания шины связи, моделирование алгоритмов онлайн-перехвата и офлайн-миграции управляющих воздействий. Контуры поддержания водородного показателя и электропроводности реализованы на пропорционально-интегральных регуляторах с защитой от насыщения интегратора.

**Результаты исследования.** Результаты показали детерминированность расписания с ошибкой переключения фаз < 0,1 %. Время установления pH/EC – не более 12–15 мин, перерегулирование незначительное. Доля кадров, отвергнутых по CRC, – низкая. Онлайн-перехват осуществляется за миллисекунды без пропусков кадров. Офлайн-миграция корректно восстанавливает графики.

**Обсуждение и заключение.** Подтверждена работоспособность многоступенчатого перехода от микроконтроллера к общепромышленному исполнению. Шина синхронизации и адресная активация подпрограмм обеспечивают бесшовный переход и целостность данных. Экономически микроконтроллер оправдан при 1–3 ячейках; промышленные контроллеры – при 6–12 ячейках и более. Результаты исследования представляют практическую ценность для интеграторов автоматизированных систем управления технологическими процессами и разработчиков вертикальных ферм. Данные позволяют применять пошаговые процедуры онлайн- и офлайн-реинтеграции, учитывать требования к шине и адресации, а также использовать обоснованные критерии перехода к промышленному исполнению при масштабировании системы.

© Бобров М. А., Безбородов Е. С., 2025



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.



**Ключевые слова:** гидропоника, вертикальная ферма, реинтеграция управления, микроконтроллер, программируемый логический контроллер, затопление, осушение

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование.** Исследование выполнено при финансовой поддержке внутривузовского научного гранта в области гуманитарных, естественных и инженерно-технических наук ФГБОУ ВО "МГУ им. Н.П. Огарёва" 2025 года (Приоритет 2030).

**Для цитирования:** Бобров М. А., Безбородов Е. С. Низкозатратная гидропонная ячейка с реинтеграцией микроконтроллера к программируемому логическому контроллеру // Огарёв-online. 2025. Т. 13, № 4. С. 411–422. <https://doi.org/10.15507/2311-2468.013.202504.411-422>

## Low-cost Hydroponic Cell with Microcontroller Reintegration to Programmable Logic Controller

M. A. Bobrov, E. S. Bezborodov ✉

National Research Mordovia State University,  
Saransk, Russia  
[egor.bez-off@yandex.ru](mailto:egor.bez-off@yandex.ru)

### Abstract

**Introduction.** High start-up costs and excessive automation when implementing vertical farms and hydroponic systems increase the risk of project failure in the early stages. The aim of this study is to formalize and validate a stepwise methodology for transferring control of a hydroponic cell from a microcontroller to an industrial controller without loss of controllability or data, thereby maintaining low startup costs.

**Materials and Methods.** The prototype is a hydroponic cell operating a 2-hour/15-minute flood–drain cycle. The hardware includes an Iskra Mega microcontroller, peristaltic and air pumps, pH and electrical conductivity (EC) sensors, dimmable horticultural luminaires, and Modbus RTU over RS-485. Methods comprised laboratory experimentation, sensor calibration, event logging and auditing, stress testing of the communication bus, and modeling of online-takeover and offline-migration algorithms. pH/EC control loops were implemented with proportional-integral (PI) controllers using integrator anti-windup protection.

**Results.** The scheduling was deterministic, with phase-switching errors < 0.1 %. pH and EC settled within ≤12–15 minutes with low overshoot. The fraction of frames rejected by the CRC integrity check was low. The online takeover was executed within milliseconds without frame loss, while the offline migration correctly restored all monitoring trend plots.

**Discussion and Conclusion.** The feasibility of multi-stage transition from a microcontroller to industrial implementation is confirmed. The synchronization bus and address-based subroutine activation provide a seamless handover and preserve data integrity. Economically, the microcontroller is justified for 1–3 cells, whereas industrial controllers are preferable for ≥ 6–12 cells. The results are useful for industrial automation and control system (IACS) integrators and vertical-farm developers, offering step-by-step procedures for online/offline reintegration, requirements for bus/addressing, and criteria for transitioning to industrial implementation when scaling the system.

**Keywords:** hydroponics, vertical farming, control reintegration, microcontroller, programmable logic controller, flooding, drainage

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Funding.** The research was carried out with the financial support of the intra-university scientific grant in the field of humanities, natural, and engineering sciences of the Mordovia State University 2025 (Priority 2030).

For citation: Bobrov M.A., Bezborodov E.S. Low-cost Hydroponic Cell with Microcontroller Reintegration to Programmable Logic Controller. *Ogarev-online*. 2025;13(4):411–422. <https://doi.org/10.15507/2311-2468.013.202504.411-422>

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях ускоренного развития контролируемого земледелия и городского фермерства востребованы архитектуры управления, позволяющие начинать эксплуатацию гидропонной ячейки с низкозатратного решения и затем переходить к промышленному исполнению без перестройки или разрушения уже выстроенных процессов.

Научная проблема заключается в отсутствии формализованной и воспроизводимой процедуры поэтапной реинтеграции управления от микроконтроллера к программируемому логическому контроллеру (ПЛК). При этом важно обеспечить сохранение непрерывности цикла «затопление – осушение», устойчивость поддержания водородного показателя pH и электропроводности ЕС, а также целостность данных телеметрии.

Актуальность исследования определяется необходимостью снизить стартовые затраты и риски остановок при одновременном обеспечении проверяемого качества управления. Полученные результаты могут служить основой для проектирования масштабируемых систем управления в агротехнических приложениях, а также способствовать развитию соответствующей методологии.

Цель исследования – формализовать и экспериментально обосновать многоступенчатую архитектуру управления одной гидропонной ячейкой с встроенным механизмом реинтеграции, включающим онлайн-перехват и офлайн-миграцию.

Для достижения цели решались задачи: определение критериев переключения; разработка алгоритмов буферизации и пометки пропусков; реализация контуров поддержания водородного показателя и электропроводности на пропорционально-интегральных регуляторах; уточнение требований к интерфейсам и коммутации исполнительных устройств; выбор и обоснование метрик оценки устойчивости управления, непрерывности телеметрии и корректности переходов между платформами.

Таким образом, предложенный подход задает непрерывную траекторию развития системы управления: от низкозатратной микроконтроллерной конфигурации на этапе запуска до промышленного исполнения с использованием ПЛК, при котором сохраняется аналитическая целостность данных и обеспечивается контролируемое переключение управления между микроконтроллером и промышленным контроллером.

## ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Контролируемое земледелие и вертикальные фермы позиционируются как способ независимого от климата производства овощной продукции. Однако последние систематические обзоры и критические статьи фиксируют основную уязвимость: высокие капитало- и энергоемкость, в том числе обусловленные сложными системами управления и искусственным освещением, остаются главным фактором экономической нестабильности проектов.

Следовательно, на ранних этапах масштабирования нецелесообразно внедрять тяжелые промышленные автоматизированные решения [1–3]. Это смещает акцент исследований и внедрения в сторону стратегий постепенного (многоступенчатого) наращивания автоматизации и энергоэффективности вместо попытки сразу строить промышленную линию для малых мощностей [2; 3].

На этом фоне гидропоника остается базовой технологией контролируемого земледелия благодаря высокой управляемости корневой зоны и доказанной ресурсоэффективности. При корректной рециркуляции раствора потребление воды может снижаться на порядок (до ~ 90 %) по сравнению с грунтовым выращиванием, удобрений – на десятки процентов при сохранении стабильного качества продукции.

Описанные эффекты особенно выражены у быстрорастущих салатных культур, стандартизированных для валидации систем управления [4]. Вклад в конечный результат определяют режимы подачи/слива, а также состав раствора, т. е. точность и воспроизводимость управляющих алгоритмов [5; 6].

Для компактных модулей одним из наиболее изученных методов является периодическое затопление, которое чередует фазы питания и аэрации корней. Исследования по салату показывают, что грамотно подобранные частота и длительность циклов – от минут до десятков минут или часов (в зависимости от конструкции и культуры) – повышают биомассу и улучшают показатели качества при снижении рисков гипоксии. В то же время нарушение временной дисциплины ухудшает результаты [5; 7].

Таким образом, технологический успех прямо связан с корректной автоматизацией цикла: контролем уровней веществ и времени, защитой от перелива и т. д. [7].

Вопрос средств автоматизации в профильной литературе характеризуется поляризацией подходов. С одной стороны, экономичные микроконтроллерные (МК) платформы позволяют реализовать рабочие контуры измерения pH и электропроводности, перистальтического дозирования, планирования циклов полива и телеметрии – с достаточными для единичных ячеек точностью, надежностью и прозрачностью при отладке [8–10]. С другой – по мере роста парка модулей увеличиваются требования к отказоустойчивости, управляемости жизненным циклом программного обеспечения, верифицируемости логики и уровню промышленной интеграции. В этих условиях обоснован переход к ПЛК и системам диспетчерского контроля и сбора данных (Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA) [11; 12].

В итоге инженерная задача формулируется не как выбор между МК и ПЛК, а как проектирование траектории миграции от недорогих узлов к промышленному исполнению при достижении критических мощностей [2; 3; 11]. Ключ к такой миграции – изначально заложенная промышленная линия синхронизации и адресация на уровне технологической ячейки.

В тепличных системах широко используются протоколы Modbus RTU на базе RS-485 и, реже, на базе CAN для построения распределенного сбора данных и команд с последующей агрегацией в SCADA. Исследования подчеркивают, что RS-485 и CAN представляют собой стандартные проводные магистрали для тепличного мониторинга и управления [12].

В то же время IoT- (Internet of Things) и SCADA-системы успешно масштабируются до диспетчерского уровня [11]. Уже на стадии прототипа целесообразно предусматривать



линию синхронизации и уникальную адресацию ячейки, чтобы не блокировать последующую интеграцию [11; 12].

Тем не менее остается слабо разработанной область бесшовной или контролируемой миграции между классами контроллеров с сохранением управляемости и данных.

Теория резервирования ПЛК хорошо проработана для однородных архитектур, однако ее адаптация к неоднородной связке МК–ПЛК в контролируемом земледелии описана фрагментарно. Причем соответствующие решения представлены преимущественно на уровне SCADA/IoT-мониторинга, а не перехвата управления исполнительными механизмами [11; 12].

В связи с этим возникает следующая проблема: как обеспечить либо онлайн-перехват без потери управляемости цикла «затопление – осушение» и контуров регулирования pH/ЕС, либо офлайн-миграцию с буферизацией, счетчиком времени и маркировкой данных – при жестких временных ограничениях технологического процесса? [6; 7]

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

**Объект и условия эксперимента.** Объектом исследования является одна гидропонная ячейка вертикальной фермы с трехуровневым стеллажом. На каждом уровне размещены: один контейнер с системой периодического затопления; один воздушный насос для аэрации; одна управляемая фитолампа.

Режим ирригации в прототипе задан как 2 ч затопления / 15 мин осушения. Выбор периодической субиригации обусловлен ее доказанной эффективностью для салатных и овощных культур при соблюдении временной дисциплины [7; 13–15].

Температурно-влажностные условия поддерживались на уровне лабораторного помещения. Контроль окружающей среды не оптимизировался.

**Аппаратура и схемотехника.** Микроконтроллер Iskra Mega управляет перистальтическими насосами, релейными модулями, воздушными насосами и драйверами широтно-импульсной модуляции фитоламп, а также измеряет показатели – водородный pH, электропроводности ЕС и минерализации TDS. Выбор недорогого МК обоснован успешными примерами автоматизации теплиц и дистанционного мониторинга, описанными в рецензируемых публикациях [6; 10; 16].

Связь между ячейкой с МК-платформой и ПЛК осуществляется по интерфейсу RS-485 с присвоением уникального адреса ячейке для обеспечения масштабируемости. Стандартным вариантом проводной магистрали в тепличных системах RS-485 признан благодаря помехоустойчивости, простоте адресации и зрелости библиотек/оборудования [12], а распределенные IoT-архитектуры для гидро-/аквапоники на их основе описаны в ряде прикладных исследований [16].

Калибровка датчиков pH выполнялась по трем точкам с использованием буферов pH 4,00/7,00/11,01, ЕС – по стандартному раствору. Параметры сбора данных: частота опроса – 1 Гц; медианный фильтр – 5 с; усреднение для телеметрии – 10 с.

Автоматизированное поддержание pH/ЕС реализовано на основе дозирования малых импульсов с междозировочной задержкой. Методическая основа – архитектура автоматизированного управления pH и концентрация, верифицированная на салатных культурах [6].

Управление фитолампами осуществлялось посредством широтно-импульсной модуляции. Базовый фотопериод 16 ч света / 8 ч темноты принят в качестве контрольного режима для выращивания салата. Спектральные соотношения подобраны с учетом последних обзорных работ и экспериментальных данных по светокультуре салата [5; 17; 18].

В рамках настоящего исследования фотосценарии не оптимизировались: световой режим использовался как управляемая нагрузка для проверки алгоритмов синхронизации и реинтеграции.

**Методика реинтеграции.** Онлайн-переход осуществляется следующим образом.

1. Программируемый логический контроллер подключается к шине синхронизации состояния (RS-485/Modbus) и пассивно считывает все регистры ячейки, поддерживая текущее состояние системы.

2. Через аппаратный мультиплексор или коммутатор выходов ПЛК получает возможность взять на себя линии управления без разрыва технологического цикла.

3. Условие перехвата управления подразумевает совпадение фаз цикла, соблюдение временного допуска и проверку контрольной суммы состояний.

4. Триггер «миграция» обеспечивает бесшовный перевод исполнительных механизмов под управление ПЛК. При этом МК переходит в режим «только чтение». Метод базируется на известных схемах HSBY-резервирования.

Опишем офлайн-переход.

1. Микроконтроллер публикует в памяти концентратора или ПЛК последние  $n$  строк телеметрии, после чего включается счетчик времени отключенного состояния.

2. Микроконтроллер обесточивается и физически размыкается с исполнительными механизмами. Линии переподключаются к ПЛК с учетом физических различий в способах подключения между МК и ПЛК.

3. Программируемый логический контроллер сбрасывает триггер «миграция» и активирует подпрограмму только при поступлении пакетов с адресом конкретной ячейки.

4. В журнал SCADA вставляются дубликаты последней валидной строки для закрытия пробела в данных с пометкой «реинтеграция». Такой механизм предотвращает ложную аналитическую интерпретацию скачков на графиках мониторинга после перехода.

**Обоснование выбора методов.** Выбор одноячеечной установки с периодической субиригацией обусловлен необходимостью снижения числа внешних факторов, что позволяет выделить влияние архитектуры управления на стабильность циклов [5; 7; 13].

Применение недорогих МК в сочетании с интерфейсом RS-485 отвечает задаче начального этапа – обеспечению низкой стоимости внедрения при одновременной закладке промышленной линии интеграции [6; 12].

Тесты онлайн- и офлайн-реинтеграции базируются на академически обоснованных подходах к резервированию в ПЛК-системах [15] и позволяют валидировать траекторию миграции от МК к ПЛК в условиях жестких временных ограничений ирригации и дозирования.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проверена детерминированность расписания «затопление – осушение» при частоте записи состояний и меток времени 1 Гц. Оценка выполнялась по журналам МК и ПЛК. Выбор метрик и требование жесткой временной дисциплины обоснованы работами по субиригации салата, где частота и длительность циклов прямо влияют на рост и качество продукции [5; 15].

Для 72-часового прогона получены следующие показатели: средняя ошибка длительности фазы затопления – 2,1 с на 7 200 с (0,029 %); средняя ошибка длительности фазы осушения – 0,6 с на 900 с (0,067 %); 95-й перцентиль ошибок – 4,8 с для затопления и 1,7 с для осушения.

Во всех сериях экспериментов переполнений не зафиксировано; защита от перелива срабатывала корректно – по достижении верхнего уровня. Полученные величины ошибок лежат в диапазоне, достаточном для стабильной работы системы субиригации.

Исследованы контуры автоматического регулирования pH и ЕС, реализованные на пропорционально-интегральных регуляторах с перистальтическим дозированием. При ступенчатом возмущении по pH на уровне  $\pm 0,30$  от уставки и по ЕС на уровне  $+ 0,4$  мСм/см были зафиксированы параметры: время установления значения pH до допуска  $\pm 0,05$  составило не более 12 мин (при среднем значении 9,8 мин); максимальное перерегулирование по каналу pH достигло 0,08 единицы; время установления показателя ЕС до допуска  $\pm 0,1$  мСм/см не превысило 15 мин (при среднем 11,6 мин).

В ходе 48-часовой непрерывной работы системы дрейф уставок не был выявлен – контроль по буферным растворам осуществлялся один раз в сутки. Полученные профили сопоставимы с методикой [18].

На шине синхронизации RS-485 при скорости обмена 9 600 бит/с проводились измерения следующих параметров: частота кадров, процент ошибок целостности кадров по CRC (Cyclic Redundancy Check), наличие пропусков строк. За 106 кадров средний процент ошибок целостности составил 0,0006 %. Повторная передача данных оказалась успешной на 100 %, пропуски строк на стороне концентратора не выявлены. Результаты согласуются с ожидаемым поведением проводной шины в промышленных условиях [12].

Верифицированы алгоритм и схемотехника реинтеграции.

При онлайн-переходе на границе «конец затопления – начало нового затопления» средний разрыв в управлении выходами составил 3,4 мс. При этом пропуск управляющих импульсов не был зафиксирован, а контуры мониторинга и управления pH/ЕС продолжали функционировать без остановки.

При офлайн-переходе (частота мониторинга 1 Гц и время переключения 130 с) счетчик времени миграции зафиксировал 130 пропущенных строк, которые были заполнены дубликатами последней действительной записи. На графиках мониторинга ступеней не наблюдалось, поскольку строки были помечены как «реинтеграция».

Технико-экономическое сопоставление затрат на управление одной ячейкой и пакетом ячеек показало обоснованность ступенчатого перехода с МК-платформы на общепромышленную ПЛК-платформу. Так, на одну ячейку с МК-платформой в среднем потребуется 9 тыс. руб., с ПЛК-платформой – 79 тыс. руб.

Однако при масштабировании до 6 и больше ячеек с сохранением стоимости МК-платформы стоимость ПЛК-системы резко снижается – до 20 тыс. руб. Тогда построение фермы на ПЛК становится сопоставимо с точки зрения стоимости ячейки и эксплуатационной управляемости: единая SCADA-система, диагностика, стандартизация; что согласуется с выводами о дорогом старте промышленных решений без масштаба и выгоде стандартизации на больших установках [12].

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты подтверждают исходную гипотезу о целесообразности многоступенчатой траектории развития системы: старт на недорогом МК с последующей реинтеграцией в платформу ПЛК по мере роста числа ячеек.

В ходе исследования показана детерминированность цикла «затопление – осушение». Значения ошибок, вызванных переходом между платформами и сопутствующими задержками, лежат существенно ниже тех уровней, при которых в литературе фиксируется деградация роста/качества салата из-за нарушения временной дисциплины [5; 15]. Это означает, что даже на недорогом оборудовании возможно поддерживать режимы, соответствующие рекомендованным экспериментальным протоколам затопления – осушения [5; 15].

Контурные автоматического регулирования pH/ЕС на пропорционально-интегральных регуляторах обеспечили время установления не более 12–15 мин при малом перерегулировании и без дрейфа уставок на интервале 48 ч. Профиль переходных процессов соответствует практическим критериям для автоматизированного поддержания концентрации pH в гидропонике, описанным в прикладных работах [18]. Это подтверждает, что выбранная цифровая реализация пропорционально-интегрального регулирования адекватна медленным технологическим контурам pH/ЕС и совместима с недорогими перистальтическими насосами.

Испытания линии синхронизации RS-485 показали низкую долю кадров, отвергнутых по контролю целостности, и отсутствие потерь полезных кадров при повторном опросе в условиях промышленного шума. Это согласуется с рекомендациями и практикой применения проводных шин в тепличных системах [12]. Следовательно, закладывание линии синхронизации и уникальной адресации ячейки на этапе прототипа технически оправданно и не требует дорогостоящей инфраструктуры.

Анализ режимов реинтеграции показал, что при онлайн-переходе возможно сохранить управление и мониторинг без потерь и остановки. Реализация буферизации последних действительных  $n$  строк и счетчика времени миграции позволила сохранить аналитическую целостность данных и предотвратить ошибку системы управления из-за их потерь.

Технико-экономический анализ демонстрирует ожидаемый порог выгодности решения: при 1–3 ячейках МК-платформа позволяет минимизировать стартовые затраты и требования к персоналу; в диапазоне 6–12 ячеек промышленная реализация становится сопоставимой как по стоимости на одну ячейку, так и по уровню эксплуатационной управляемости.

Полученные данные согласуются с выводами об уязвимости промышленных решений на малых масштабах и выгоде стандартизации на больших установках [7; 12–14]. Таким образом,



подтверждается практическая значимость траектории старта на МК-платформе с переходом на общепромышленное исполнение при масштабировании как способа снизить риск повторения экономических неудач, отмеченных в обзорах по вертикальному земледелию [7; 13; 14].

Предложенная методика реинтеграции позволяет запускать малые фермы с минимальными затратами и созданием необходимых аппаратно-программных решений для будущего масштабирования. Планирование технических решений по реинтеграции на этапе проектирования позволит в дальнейшем минимизировать затраты на переход к общепромышленной платформе, так как она строится на базе методик безударного перехода и резервирования, имеющих унифицированные и распространенные практики.

Ограничения работы связаны со следующими обстоятельствами. Эксперименты проводились на единственной гидропонной ячейке в лабораторных условиях, что не позволяет оценить возможные потери данных и сложности при каскадном переходе, когда управление одновременно переводится на группу ячеек. В работе использовался лишь один тип промышленного контроллера конкретного производителя, поэтому вопросы кросс-платформенной применимости предложенной методики и ее интеграции в иные программно-аппаратные комплексы систем управления не исследовались. Кроме того, не проводились длительные полевые испытания в условиях реальной фермы, а также не изучалось влияние отказов связи и оборудования на качество реинтеграции.

В дальнейших исследованиях требуются верификация на многоячеечных стендах (не менее шести ячеек) с оценкой смешанных сценариев миграции, испытания устойчивости к электромагнитным воздействиям и инъекции отказов, а также формальная проверка логики переключения.

Перспективными направлениями являются: разработка адаптивных регуляторов водородного показателя и электропроводности с компенсацией дрейфа датчиков; исследование альтернативных шин и резервирования каналов связи; анализ кибербезопасности промышленных протоколов управления; создание цифрового двойника для прогнозирования рисков.

Отдельной важной задачей выступает технико-экономическое моделирование совокупной стоимости владения при разных траекториях масштабирования, включая сценарии управления освещением с учетом тарифов и норм по дневной световой дозе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Harbinson J., Taylor C. R. Perspectives on the Current State of Vertical Farming // EMBO Reports. 2025. Vol. 26, issue 16. P. 3982–3990. <https://doi.org/10.1038/s44319-025-00518-1>
2. Energy and Cost Analysis for a Crop Production in a Vertical Farm / A. Arcasi [ et al.] // Applied Thermal Engineering. 2024. Vol. 239. Article no. 122129. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122129>
3. Miserocchi L., Franco A. Benchmarking Energy Efficiency in Vertical Farming. Sustainable Energy // Thermal Science and Engineering Progress. 2024. Vol. 58. Article no. 103165. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.103165>
4. Nutrient Use in Vertical Farming: Optimal Electrical Conductivity and pH / H. Hosseini [et al.] // Horticulturae. 2021. Vol. 7, issue 9. Article no. 283. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7090283>
5. Improving Water Use Efficiency in Vertical Farming: Effects of Growing Systems, Far-Red Radiation and Planting Density on Lettuce Cultivation / L. Carotti [et al.] // Agricultural Water Management. 2023. Vol. 285. Article no. 108365. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108365>

6. Automated System to Control pH and Concentration of Nutrient Solution in Hydroponic Lettuce / D. S. Domingues [et al.] // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2012. Vol. 84. P. 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.02.006>
7. Ebb-and-Flow Subirrigation Strategies Increase Biomass and Nutrient Contents and Reduce Nitrate Levels in Lettuce / L. Yang [et al.] // *HortScience*. 2018. Vol. 53, issue 7. P. 1056–1063. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13065-18>
8. Sneineh A. A., Shabaneh A. A. A. Design of a Smart Hydroponics Monitoring System Using an ESP32 Microcontroller and the Internet of Things // *MethodsX*. 2023. Vol. 11. Article no. 102401. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102401>
9. SMART GROW – Low-Cost Automated Hydroponic System for Urban Farming / K. K. Y. Shin [et al.] // *HardwareX*. 2024. Vol. 17. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2023.e00498>
10. A Cost-Effective Embedded Platform for Greenhouse Environment Control and Remote Monitoring / R. L. Sumalan [et al.] // *Agronomy*. 2020. Vol. 10, issue 7. <https://doi.org/10.3390/agronomy10070936>
11. Soetedjo A., Hendrianti E. Development of an IoT-Based SCADA System for Monitoring of Plant Leaf Temperature and Air and Soil Parameters // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, issue 20. <https://doi.org/10.3390/app132011294>
12. Greenhouse Environment Dynamic Monitoring System / M. H. Liang [et al.] // *IFAC PapersOnLine*. 2018. Vol. 51, issue 17. P. 736–740. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.108>
13. Ferrarezi R. S., van Iersel M. W., Testezlaf R. Monitoring and Controlling Ebb-and-Flow Subirrigation with Sensors // *HortScience*. 2015. Vol. 50, issue 3. P. 447–454. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.50.3.447>
14. Ebb-and-Flow Subirrigation Improves Seedling Growth of Tomato / K. Wang [et al.] // *Agronomy*. 2022. Vol. 12, issue 2. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020494>
15. Sharma S., Kumar V. Reliability Estimation in a Two-Unit Hot Standby System Under Classical and Bayesian Inferential Framework // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*. 2025. <https://doi.org/10.1177/1748006X25136027>
16. Investigation on Environment Monitoring System for a Combined Hydroponic-Aquaculture Farm Based on IoT / S. Zhang [et al.] // *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. 2022. Vol. 32. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2021.06.006>
17. К вопросу о влиянии спектрального состава излучения на рост и развитие светокультуры салата при применении бытовых источников света / А. Б. Мышонков [и др.] // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2025. № 1. С. 101–104. <https://elibrary.ru/lrggia>
18. Liu J., van Iersel M. W. Far-Red Light Effects on Lettuce Growth and Morphology in Indoor Production Are Cultivar-Specific // *Plants*. 2022. Vol. 11, issue 20. <https://doi.org/10.3390/plants11202714>

## REFERENCES

1. Harbinson J., Taylor C.R. Perspectives on the Current State of Vertical Farming. *EMBO Reports*. 2025;26(16):3982–3990. <https://doi.org/10.1038/s44319-025-00518-1>
2. Arcasi A., Mauro A.W., Napoli G., Tariello F., Vanoli G.P. Energy and Cost Analysis for a Crop Production in a Vertical Farm. *Applied Thermal Engineering*. 2024;239:122129. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122129>
3. Miserocchi L., Franco A. Benchmarking Energy Efficiency in Vertical Farming. *Sustainable Energy. Thermal Science and Engineering Progress*. 2024;58:103165. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.103165>
4. Hosseini H., Mozafari V., Roosta H.R., Shirani H., van de Vlasakker P.C.H., Farhangi M. Nutrient Use in Vertical Farming: Optimal Electrical Conductivity and pH. *Horticulturae*. 2021;7(9):283. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7090283>
5. Carotti L., Pistillo A., Zauli I., Meneghello D., Martin M., Pennisi G. et al. Efficiency in Vertical Farming: Effects of Growing Systems, Far-Red Radiation and Planting Density on Lettuce Cultivation. *Agricultural Water Management*. 2023;285:108365. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108365>
6. Domingues D.S., Takahashi H.W., Camara C.A.P., Nixdorf S.L. Automated System to Control pH and Concentration of Nutrient Solution in Hydroponic Lettuce. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2012;84:53–61. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.02.006>
7. Yang L., Yang X., Zhao H., Huang D., Tang D. Ebb-and-flow Subirrigation Strategies Increase Biomass and Nutrient Contents and Reduce Nitrate Levels in Lettuce. *HortScience*. 2018;53(7):1056–1063. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13065-18>

8. Sneineh A.A., Shabaneh A.A.A. Design of a Smart Hydroponics Monitoring System Using an ESP32 Microcontroller and the Internet of Things. *MethodsX*. 2023;11:102401. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102401>
9. Shin K.K.Y., Tan P.P., Goh M.B.L., Chong C.J., Bolhassan N.A.B. SMART GROW – Low-Cost Automated Hydroponic System for Urban Farming. *HardwareX*. 2024;17. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2023.e00498>
10. Sumalan R.L., Stroia N., Moga D., Muresan V., Lodin A., Vintila T., et al. A Cost-Effective Embedded Platform for Greenhouse Environment Control and Remote Monitoring. *Agronomy*. 2020;10(7). <https://doi.org/10.3390/agronomy10070936>
11. Soetedjo A., Hendrianti E. Development of an IoT-Based SCADA System for Monitoring of Plant Leaf Temperature and Air and Soil Parameters. *Applied Sciences*. 2023;13(20). <https://doi.org/10.3390/app132011294>
12. Liang M.H., He Y.F., Chen L.J., Du S.F. Greenhouse Environment Dynamic Monitoring System. *IFAC PapersOnLine*. 2018;51(17):736–740. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.108>
13. Ferrarezi R.S., van Iersel M.W., Testezlaf R. Monitoring and Controlling Ebb-and-flow Subirrigation with Sensors. *HortScience*. 2015;50(3):447–454. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.50.3.447>
14. Wang K., Ali M.M., Pan K., Su S., Xu J., Chen F. Ebb-and-flow Subirrigation Improves Seedling Growth of Tomato. *Agronomy*. 2022;12(2). <https://doi.org/10.3390/agronomy12020494>
15. Sharma S., Kumar V. Reliability Estimation in a Two-Unit Hot Standby System Under Classical and Bayesian Inferential Framework. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*. 2025. <https://doi.org/10.1177/1748006X25136027>
16. Zhang S., Guo Y., Li S., Ke Z., Zhao H., Yang J. et al. Investigation on Environment Monitoring System for a Combined Hydroponic-Aquaculture Farm Based on IoT. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. 2022;32. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2021.06.006>
17. Myshonkov A.B., Abramov M.V., Tertychny M.S. et al. On the Issue of the Influence of the Spectral Composition of Radiation on the Growth and Development of Lettuce Light Culture Using Household Light Sources. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzh'ya*. 2025;(1):101–104. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/lrggia>
18. Liu J., van Iersel M.W. Far-Red Light Effects on Lettuce Growth and Morphology in Indoor Production Are Cultivar-Specific. *Plants*. 2022;11(20). <https://doi.org/10.3390/plants11202714>

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Бобров Максим Андреевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры электроники и электротехники Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5534-6346>, SPIN-код: 4888-1520, bobrovma92@mail.ru

**Безбородов Егор Сергеевич**, аспирант, преподаватель кафедры электроники и электротехники Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3506-1847>, SPIN-код: 4661-4167, egor.bez-off@yandex.ru

## ВКЛАД АВТОРОВ

М. А. Бобров – разработка концепции; разработка методологии; административное руководство исследовательским проектом; разработка программного обеспечения; написание рукописи – рецензирование и редактирование.

Е. С. Безбородов – формальный анализ; получение финансирования; проведение исследования; валидация результатов; написание черновика рукописи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 02.10.2025; одобрена после рецензирования 06.11.2025; принята к публикации 12.11.2025.

## ABOUT THE AUTHORS

**Maksim A. Bobrov**, Cand.Sci (Eng.), Associate Professor at the Chair of Electronics and Electrical Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5534-6346>, SPIN-code: 4888-1520, bobrovma92@mail.ru

**Egor S. Bezborodov**, Postgraduate Student, Lecturer at the Chair of Electronics and Electrical Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3506-1847>, SPIN-code: 4661-4167, egor.bez-off@yandex.ru

## CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

M. A. Bobrov – conceptualization; methodology; project administration; software; writing – review & editing.

E. S. Bezborodov – formal analysis; funding acquisition; investigation; validation; writing – original draft preparation.

The authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 02.10.2025; revised 06.11.2025; accepted 12.11.2025.