

РОМАНОВЕЦ МИХАИЛ МИХАЙЛОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ ДИНАМИЧЕСКОГО
ЛОКАЛЬНОГО СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ ПТИЧНИКОВ
С КЛЕТОЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ЦЫПЛЯТ-БРОЙЛЕРОВ**

Специальность: 4.3.2 Электротехнологии,
электрооборудование и энергоснабжение
агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на кафедре автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И. Ф. Бородина Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева)

Научный руководитель: **Шабает Евгений Адимович**
кандидат технических наук, доцент,
и.о. заведующего кафедрой, доцент кафедры
автоматизации и роботизации технологических
процессов имени академика И. Ф. Бородина
ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева

**Официальные
оппоненты:** **Широбокова Татьяна Александровна**
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры электротехники и автоматики
ФГБОУ ВО Удмуртский ГАУ

Смирнов Александр Анатольевич
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник, заведующий лабораторией светотехники
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет
им. Н. П. Огарёва»

Защита состоится 15.10.2026 в 15.00 на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел: 8 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Н. Н. Пуляев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Птицеводство является одной из передовых и наукоемких отраслей АПК России. Удельный вес мяса птицы в общем объеме мяса животных в стране составляет 44 %. Однако в последние годы наблюдается снижение темпов роста отрасли, и к настоящему времени выявился ряд задач, без решения которых дальнейшее устойчивое развитие птицеводства является затруднительным. В частности, существенно возросли издержки на импортозависимые компоненты, оборудование и используемые ресурсы, что в условиях невысокой рентабельности (по состоянию на 2025 г. около 12,7 %) снижает доступность продукции птицеводства для населения страны, оказывая негативное влияние на обеспечении продовольственной безопасности. В связи с этим требуется внедрение отечественных инновационных, энерго- и ресурсосберегающих технологий и оборудования, способствующих повышению эффективности птицеводства. К таким технологиям относятся современные цифровые системы управления параметрами микроклимата в птичнике, позволяющие в большей степени раскрыть генетический потенциал высокопродуктивных кроссов птицы. Важным фактором, влияющим на это, является искусственная световая среда.

В отечественном и мировом птицеводстве активно внедряются светодиодные системы освещения с цифровым управлением. По состоянию на 2022 г. светодиодное освещение использовали более 70 % птицеводческих предприятий России. При клеточном содержании сельскохозяйственной птицы особенно востребовано применение систем локального светодиодного освещения, в которых светильники небольшой мощности (до нескольких ватт) располагаются над кормушкой или над комовым желобом. По сравнению с общей системой люминесцентного освещения его применение позволяет повысить однородность поголовья, живую массу цыплят-бройлеров до 7,1 % и снизить потребление электроэнергии на освещение до трех раз и выше без негативного влияния на конверсию корма или ее небольшом улучшении. Перспективными с учетом современной концепции циркадно-эффективного освещения являются системы динамического (с изменяемыми параметрами освещения во времени) светодиодного освещения с изменяемыми световым потоком и спектральным составом, в том числе коррелированной цветовой температурой (КЦТ) оптического излучения локальных светодиодных светильников, позволяющие дополнительно повысить живую массу цыплят-бройлеров до 4,9 %, снизить показатель коэффициент конверсии корма до 6,0 %, уменьшить расходы потребляемой электроэнергии.

Содержание работы соответствует: целям стратегии развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов России (Распоряжение Правительства РФ от 08.09.2022 № 2567-р), приоритетам и перспективам стратегий научно-технологического развития Российской Федерации (Указы Президента РФ от 01.12.2016 № 642 и от 28.02.2024 № 145), направлению научно-исследовательской работы ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030». Отдельные исследования выполнялись при поддержке Фонда Содействия Инновациям (договор № 16230ГУ/2021).

Степень разработанности темы исследования. Существенный вклад в развитие техники и технологии искусственного освещения птичников внесли труды В. И. Фисинина, А. Ш. Кавтарашвили, Д. В. Гладина, Е. Н. Новоторова, Т. А. Ширококовой, Т. Р. Галлямовой, И. М. Новоселова, В. И. Трухачева, М. Ф. Зонova, В. В. Самойленко, В. С. Буярова, О. Ю. Коваленко, Ю. А. Журавлевой, Л. Ю. Юферева, А. А. Михалева, А. А. Бахарева, Н. В. Коняева, О. Н. Ястребовой и др., а также зарубежных ученых D. J. Aldridge, S. W. Kang, G. S. Archer, K. El-Sabrout, H. A. Olanrewaju и др. Работы представленных авторов в значительной мере способствовали повышению эффективности систем искусственного освещения в птицеводстве. Однако параметры и режимы работы цифровых систем динамического локального светодиодного освещения при клеточном содержании птицы остаются исследованными недостаточно.

Объект исследования: процесс искусственного освещения при содержании сельскохозяйственной птицы в клеточных батареях.

Предмет исследования: параметры и режимы цифровой системы динамического локального светодиодного освещения с изменяемыми световым потоком и КЦТ оптического излучения светильников при содержании цыплят-бройлеров в клеточных батареях.

Цель работы: разработать цифровую систему динамического локального светодиодного освещения, направленную на повышение продуктивности цыплят-бройлеров и снижение затрат на искусственное освещение при содержании птицы в клеточных батареях.

Задачи исследований:

1. Провести обзор и анализ параметров систем искусственного освещения, технологий и технических средств существующих систем локального светодиодного освещения при клеточном содержании птицы.

2. Уточнить модели изменений естественной освещенности и КЦТ солнечного света на земной поверхности в течение дня для управления параметрами системы динамического освещения.

3. Экспериментально исследовать и обосновать рациональные параметры и режимы работы элементов системы динамического локального светодиодного освещения птичников с клеточным содержанием цыплят-бройлеров.

4. Разработать структуру системы динамического локального светодиодного освещения птичников с плавно изменяемыми световыми потоками и КЦТ оптического излучения светильников и их электропитанием от высоковольтного многоканального светодиодного драйвера.

5. Разработать экспериментальный образец цифровой системы динамического локального светодиодного освещения птичников с клеточным содержанием цыплят-бройлеров.

6. Оценить технико-экономическую эффективность предлагаемой системы освещения.

Научную новизну работы составляют:

1. Уточненные математические модели изменений естественной освещенности и КЦТ солнечного света на земной поверхности в заданных географических координатах для управления параметрами системы искусственного динамического

освещения птичников.

2. Научно обоснованные параметры и режимы работы элементов системы цифровой системы динамического локального светодиодного освещения птичников с клеточным содержанием цыплят-бройлеров.

3. Математическая модель изменения КЦТ оптического излучения локального светильника от коэффициента заполнения управляющего ШИМ-сигнала прямыми токами светодиодов белого теплого и холодного света.

4. Компьютерные модели цифровых систем управления параметрами динамического локального светодиодного освещения в птичнике.

Теоретическую значимость работы составляют:

- уточненные математические зависимости изменений естественной освещенности и КЦТ солнечного света на земной поверхности в течении дня для заданных географических координат;

- способ локального динамического светодиодного освещения птичников с моделированием естественной световой среды;

- зависимость изменения КЦТ оптического излучения локального светильника от коэффициента заполнения управляющего ШИМ-сигнала прямыми токами светодиодов белого теплого и холодного света;

- структура цифровой системы динамического локального светодиодного освещения птичников для клеточного содержания сельскохозяйственной птицы с плавно изменяемыми световым потоком и КЦТ оптического излучения светильников и их электропитанием от высоковольтного многоканального светодиодного драйвера.

Практическая значимость работы заключается в разработке цифровой системы динамического локального светодиодного освещения птичников с клеточным содержанием цыплят-бройлеров, ее элементов (локального светодиодного светильника, высоковольтного многоканального светодиодного драйвера, платы управления, программ управления динамическим освещением) и способа освещения, позволяющих снизить капитальные затраты в систему освещения на 27,1 % и эксплуатационные издержки на 23,4 %, повысить живую массу птицы на 2,4–4,9 % и более.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач использовались: методы системного и математического анализа, методы моделирования и математической статистики; сведения из теории планирования экспериментальных исследований, электро- и светотехники, автоматического управления, оптики и колориметрии. Программирование цифровых управляющих устройств осуществлялось на языках программирования FBD, ST и Arduino C. Обработка опытных данных выполнялась с применением программ Microsoft Office Excel и Statistica. Компьютерное моделирование проводилось с использованием программного обеспечения SimInTech.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математические модели изменений естественной освещенности и КЦТ солнечного света для управления параметрами системы искусственного динамического освещения птичников с клеточным содержанием птицы.

2. Структура разработанной цифровой системы динамического локального

светодиодного освещения птичников с клеточным содержанием птицы.

3. Параметры локального светодиодного светильника системы динамического освещения птичников с клеточным содержанием цыплят-бройлеров.

4. Зависимость изменения КЦТ оптического излучения локального светильника от коэффициента заполнения управляющего ШИМ-сигнала прямыми токами светодиодов белого теплого и холодного света.

5. Компьютерные модели цифровой САР освещенности, систем программного управления освещенностью кормушки и КЦТ оптического излучения локальных светодиодных светильников, параметры цифрового ПИ-регулятора.

Степень достоверности. Результаты исследований, их достоверность, выводы и рекомендации, сформулированные в работе, подтверждаются необходимым объемом экспериментальных исследований; результатами математической обработки и статистического анализа опытных данных с применением современных программных средств; сходимостью теоретических положений с результатами экспериментальных исследований; апробациями результатов исследований; публикациями, патентами на изобретения и свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Апробация и реализация результатов. Основные результаты диссертационной работы доложены и одобрены на более чем 30 мероприятиях, в том числе: Всероссийской научной конференции, посвященной 155-летию со дня рождения академика М. Ф. Иванова, г. Москва, 2026 г; Международном научно-практическом семинаре «Чтения академика В.Н. Болтинского», г. Москва, 2026 г.; Международной научно-практической конференции «Энергообеспечение АПК», г. Москва, 2025 г.; Всероссийской научно-практической конференции «Инновационные аспекты современного сельского хозяйства», г. Зерноград, 2021, 2023 и 2025 гг; Международной научно-практической конференции «Приоритеты развития АПК в условиях цифровизации и структурных изменений национальной экономики», г. Санкт-Петербург, 2022 г.; Всероссийской научной конференции «Инновационное сельское хозяйство: от ресурсосберегающих до цифровых технологий», г. Зерноград, 2021, 2022 и 2025 гг; Международной конференции «Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production», г. Зерноград, 2020 г.

Результаты исследований и разработок внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева и производственную деятельность ООО «Птицефабрика «Элинар-Бройлер», а также представлены: на Международной выставке «АГРАВИЯ 2026», г. Москва, 2026 г; агропромышленной выставке «Золотая осень», г. Москва, 2025 г.; Международной выставке-форуме «AGROBRICS+», г. Москва, 2025 г.; Международных выставках «АГРОС» и «АГРОТЕХ», г. Москва, 2025 г.; выставке «Интерагромаш» и «Агротехнологии», г. Ростов-на-Дону, 2021 и 2022 гг. выставке-демонстрации достижений агробизнеса «День Донского поля», г. Зерноград, 2021 г.; отраслевом конкурсе «Создание и производство высокоэффективной сельскохозяйственной техники и внедрение прогрессивных ресурсосберегающих технологий», г. Москва, 2022 г. Конкурсные работы, включающие элементы диссертационного исследования, являются победителями программы «УМНИК» в 2020 г. и регионального этапа Всероссийского конкурса «Ты – инноватор» в 2022 гг.

Публикации. По материалам диссертации опубликована 21 работа, в том числе 9 научных статей в изданиях, рекомендованных ВАК России; две статьи, индексируемые в базах цитирования Scopus и Web of Science; два патента на изобретения и два свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 162 страницах, состоит из введения, пяти глав основной части, содержащей 52 рисунка, 15 таблиц, заключения, списка литературы, включающего 204 наименования, в том числе 49 на иностранных языках и двух приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены цель, объект и предмет исследования, сформулирована научная новизна, практическая и теоретическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Системы искусственного освещения в птицеводстве» рассмотрены основные механизмы фотобиологического воздействия видимого излучения на сельскохозяйственную птицу; проведен обзор и анализ литературных источников, посвященных влиянию режима и основных параметров освещения на поведение и показатели продуктивности сельскохозяйственной птицы, технологий искусственного электрического освещения при клеточном содержании птицы и технических средств систем локального светодиодного освещения птичников.

Фотобиологическое воздействие света на организм сельскохозяйственной птицы осуществляется через два основных пути: зрительный (ретинальный) и незрительный (экстраретинальный). Посредством возбуждения экстраретинальных фоторецепторов, расположенных в эпифизе и гипоталамусе, свет оказывает влияние на выработку мелатонина – гормона, регулирующего циркадные (суточные) ритмы. С концентрацией мелатонина в организме птицы тесно связана секреция кортизола, инсулиноподобного фактора роста-1, гонадотропных и других гормонов, определяющих ее жизнеспособность и продуктивность.

Циркадные ритмы эволюционно обусловлены циклическими изменениями параметров солнечного излучения на земной поверхности, что нашло отражение в современной концепции циркадно-эффективного освещения. Данная концепция базируется на гармонизации уровня освещенности и КЦТ источников искусственного света с физиологическими потребностями организма. В искусственных условиях содержания птицы несоответствие эндогенного (внутренних биоритмов) и экзогенного (влияния внешних факторов среды) компонентов циркадных ритмов способствует развитию десинхроза, что негативно сказывается на жизнеспособности поголовья, показателях продуктивности и благополучии птицы.

При выращивании цыплят-бройлеров как привило используют постоянные и прерывистые режимы освещения симметричного типа с уровнем освещенности от 5 до 20–40 лк, дифференцированные в зависимости от возраста птицы. В настоящее время для целей освещения наибольшее распространение на практике получили энергоэффективные светодиодные источники белого света. Оптическое излучение теплых оттенков (КЦТ около 3000 К) стимулирует репродуктивную функцию, в то время как холодный свет (КЦТ около 5500 К) способствует снижению активности и стресса, что положительно сказывается на приросте живой массы.

Плавное изменение уровня освещенности и КЦТ в течение светового периода с учетом динамики естественного солнечного света на земной поверхности позволяет создать благоприятную искусственную среду, минимизировать световой стресс и нормализовать поведенческие реакции птицы. Согласно данным исследований Центра передового опыта птицеводства внедрение таких режимов способствует увеличению живой массы цыплят-бройлеров в предубойном возрасте на 2,4–4,9 % и снижению расхода электроэнергии при одновременном сохранении или даже небольшом улучшении коэффициента конверсии корма.

Среди технологий искусственного освещения при клеточном содержании птицы наиболее эффективным признан способ локального светодиодного освещения, обеспечивающий высокую равномерность распределения освещенности на ярусах клеточной батареи, который по сравнению с общей системой на основе люминесцентных ламп позволяет увеличить живую массу цыплят-бройлеров до 7,1 % при снижении электропотребления примерно в три раза.

Однако в существующих системах локального светодиодного освещения отсутствует возможность плавного изменения КЦТ оптического излучения светильников, что ограничивает их биологическую эффективность. Использование для электропитания светильников напряжения до 48 В с индивидуальными линейными светодиодными драйверами (на базе микросхем LM317 и ее аналогов) в совокупности с большой протяженностью питающих линий в птичнике приводит к снижению КПД и увеличению капитальных затрат. В связи со сложностью практической реализации редкое применение находят современные цифровые системы точного поддержания параметров освещения с использованием ПИД-регуляторов с обратной связью по освещенности посредством датчиков, в частности, способствующие снижению расхода электроэнергии в птичнике до 10 %.

Целесообразным является плавное изменение светового потока от 0 до 100 % и КЦТ оптического излучения локального светодиодного светильника в диапазоне от 2700–3000 К до 5000–6500 К, а также применение многоканального высоковольтного светодиодного драйвера, позволяющего повысить КПД системы электропитания светильников на 16 % и выше и систем цифрового управления параметрами динамического освещения.

На основании проведенного анализа и сделанных выводов для достижения поставленной цели были сформулированы основные задачи исследований.

В второй главе «Теоретические положения разработки цифровой системы динамического локального светодиодного освещения» представлены аналитические исследования цифровой системы динамического локального светодиодного освещения птичников с клеточным содержанием птицы и ее отдельных элементов.

Математическое описание зависимости изменения суммарной естественной освещенности на земной поверхности в течении дня $E_S = f(t)$ в заданных географических координатах корректно определять через высоту h Солнца над горизонтом. В условиях ясного неба на равнинной местности КЦТ солнечного света (CCT_S) можно представить линейной зависимостью $CCT_S = f(E_S)$. При перпендикулярном падении солнечных лучей на контрольную поверхность для математического описания зависимостей $E_S = f(h)$ (в о.е.) и $CCT_S = f(E_S)$ могут использоваться следующие выражения:

$$E_S = \frac{1}{a} \ln \left\{ \frac{h}{h_{\text{MAX}}} (e^a - 1) + 1 \right\}; \quad (1)$$

$$CCT_S = bE_S + c, \quad (2)$$

где a – коэффициент по максимальной освещенности, о.е.; $h_{\text{MAX}} = 0 \dots 90^\circ$ – высота Солнца над горизонтом в момент верхней кульминации; b – коэффициент пропорциональности, К/о.е.; $c = 2000 \dots 2800$ К – коэффициент постоянной составляющей КЦТ.

Модели (1) и (2) применимы при условии, что все коэффициенты регрессии и зависимая переменная – положительные числа. Коэффициенты a , b , c требуют экспериментального уточнения их значений для заданных географических координат местности, времени и условий наблюдений.

Изменение КЦТ оптического излучения локального светодиодного светильника целесообразно выполнять путем аддитивного смешения световых потоков светоизлучающих диодов (СИД) белого теплого и холодного света с ШИМ-регулируемым их прямыми токами. При условии равенства абсолютных величин световых потоков СИД белого теплого и холодного КЦТ смеси их оптических излучений может быть вычислена методом Мака Ками с определением расчетного коэффициента n по выражению:

$$n = \frac{\left[\frac{x_W}{y_W} + k_{DWC} \left(\frac{x_C}{y_C} - \frac{x_W}{y_W} \right) \right] / \left[\frac{1}{y_W} + k_{DWC} \left(\frac{1}{y_C} - \frac{1}{y_W} \right) \right] - 0,332}{1 / \left[\frac{1}{y_W} + k_{DWC} \left(\frac{1}{y_C} - \frac{1}{y_W} \right) \right] - 0,1858}, \quad (3)$$

где x_W, y_W и x_C, y_C – координаты цветности СИД белого теплого и холодного света; k_{DWC} – коэффициент заполнения управляющего ШИМ-сигнала.

Коэффициент заполнения k_{DWC} определяется как:

$$k_{DWC} = k_{DC} = 1 - k_{WC}, \quad (4)$$

где k_{DC} и k_{DW} – коэффициенты заполнения ШИМ-сигналов прямого тока СИД белого холодного и теплого света.

С использованием метода Мака Ками и выражения (3) для светодиодов с номинальными КЦТ, равными 2700 и 5700 К, получена математическая модель зависимости изменения КЦТ локального светодиодного светильника (ΔCCT) для птичника от коэффициента заполнения k_{DWC} , имеющая вид:

$$\Delta CCT = b_2 k_{DWC}^2 + b_1 k_{DWC}, \quad (5)$$

где b_2, b_1 – коэффициенты регрессии, К.

Математическая модель (5) требует экспериментального уточнения коэффициентов регрессии на реальном светильнике.

Важной задачей при проектировании светодиодных светильников является обеспечение благоприятного температурного режима работы р-п перехода (активной области) СИД. Анализ методов показал, что для его определения удобно использовать экспериментальный косвенный метод, основанный на температурном изменении прямого падения напряжения на светодиоде в процессе его токового нагрева.

В ходе анализа электронных схем токовых зеркал для реализации высоковольтного многоканального светодиодного драйвера для птичника определено, что для стабилизации токов и ШИМ-управления световыми потоками СИД целесообразно использовать улучшенную схему простого «трехтранзисторного» токового зеркала. Допуская, что нагрузка во всех в каналах одинаковая, КПД светодиодного драйвера η_D можно определить, как:

$$\eta_D = \frac{P_H}{P_H + \Delta P_{DR}} = \frac{U_H(1 - \Delta U_H)I_H k_D}{(U_H - \Delta U_{DR})I_H k_D + \Delta P_{Y1}k_D + \Delta P_{Y0}(1 - k_D)}, \quad (6)$$

где P_H – мощность нагрузки одного канала драйвера, Вт; ΔP_{DR} – потери мощности во всей схеме драйвера в расчете один канал, Вт; U_H – прямое падение напряжения на нагрузке, В; ΔU_H – изменение падения напряжения на нагрузке, о.е.; ΔU_{DR} – падение напряжения в одном канале драйвера, В; I_H – ток нагрузки, А; k_D – коэффициент заполнения ШИМ-сигнала тока; ΔP_{Y1} и ΔP_{Y0} – потери в цепях управления в расчете на один канал для включенных ($k_D = 1$) и отключенных ($k_D = 0$) СИД соответственно, Вт.

Для оценки эффективности работы светодиодного драйвера требуется экспериментальное определение его параметров и характеристик.

Плавное управление уровнем освещенности кормушки для птицы и КЦТ оптического излучения локальных светодиодных светильников потребовало исследования цифровых систем программного управления параметрами динамического освещения в птичнике. С целью анализа качества регулирования и определения оптимальных параметров настройки регулятора методом компьютерного моделирования была составлена структурная схема цифровой системы автоматического регулирования (САР) освещенности, изображенная на рис. 1.

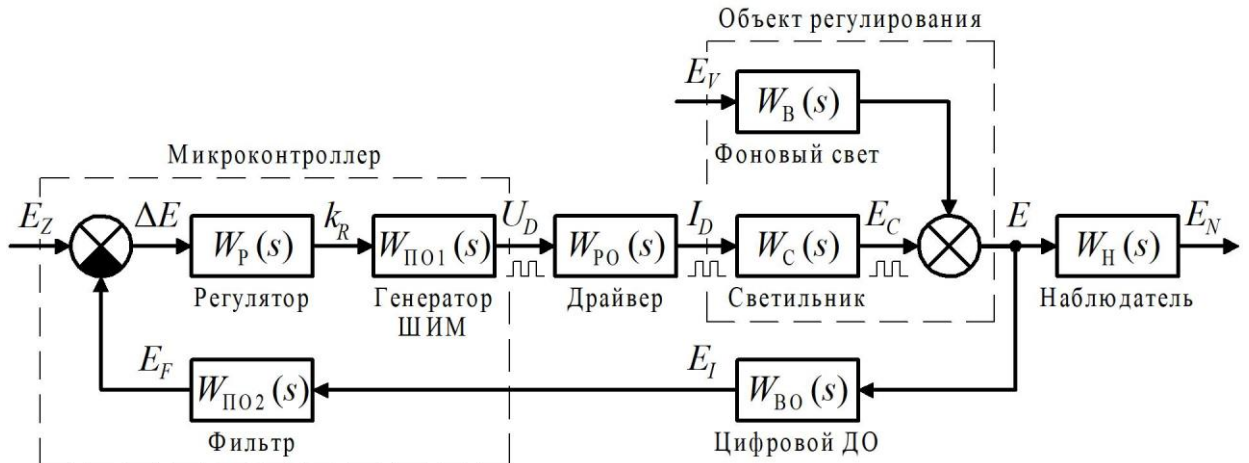


Рисунок 1 – Структурная схема цифровой САР освещенности

Объектом регулирования САР (рис. 1) является клетка для содержания цыплят-бройлеров, освещаемая локальным светодиодным светильником. Регулируемой величиной является освещенность E на дне кормушки для птицы.

Передаточная функция светильника $W_C(s)$ описывается выражением:

$$W_C(s) = k_{EW} + k_{EC}, \quad (7)$$

где k_{EW} и k_{EC} – коэффициенты передачи светодиодного светильника по каналу белого теплого и холодного света, лк/А.

Передаточная функция $W_B(s)$ объекта регулирования по возмущению (фоновая освещенность E_V) имеет вид:

$$W_B(s) = k_V, \quad (8)$$

где $k_V = 1$ – коэффициент передачи возмущающего воздействия.

Передаточная функция зрительного аппарата наблюдателя описывается как:

$$W_H(s) = 1/(T_{ZA}s + 1), \quad (9)$$

где $T_{ZA} = 0,05–0,20$ с – постоянная времени зрительного аппарата наблюдателя.

Математическое описание процесса измерения освещенности цифровым датчиком, выходной величиной которого является измеренная освещенности E_I , представлено выражением:

$$E_I = \frac{1}{\tau_{DO}} \int_0^{\tau_{DO}} E_i \Delta t_E, \quad (10)$$

где E_i – освещенность отдельного измерения в периоде интегрирования показаний датчика, лк; Δt_E – продолжительность преобразования измерений освещенности АЦП, с; τ_{DO} – продолжительность интегрирования, с.

Квантованием освещенности по уровню при высокой разрядности измерений АЦП датчика допустимо пренебречь. При низкой скорости передачи данных необходимо учитывать время τ_{ZDO} , затрачиваемое на обработку и передачу данных измерений освещенности по цифровому интерфейсу.

Освещенность E_F , сглаженная цифровым фильтром, равна:

$$E_F = E_{F0} + (E_I - E_{F0}) \Delta t_{MC} / T_F, \quad (11)$$

где E_{F0} – освещенность на выходе фильтра в предыдущем шаге вычислений, с; Δt_{MC} – период (шаг) выполнения цикла программы микроконтроллером, с; T_F – постоянная времени фильтра, с.

Регулирующий коэффициент k_R заполнения управляющего ШИМ-сигнала, при применении цифрового ПИ-регулятора, определяется как:

$$k_R = k_P (\Delta E + 1/T_I \int \Delta E \Delta t_{MC}), \quad (12)$$

где k_P – пропорциональный коэффициент передачи, 1/лк; T_I – постоянная времени интегрирования, с.

Напряжения на выходах генераторов ШИМ-сигналов U_D по каналу управления белым теплым и холодным светом зависят от амплитуды выходного напряжения, продолжительности импульсов и пауз сигналов. Продолжительности импульсов ШИМ-сигналов для каналов управления теплым t_{ONW} и холодным t_{ONC} светом, и их пауз t_{OFFW} и t_{OFFC} вычисляются как:

$$t_{ONW} = T/(k_R k_{DW}); \quad t_{ONC} = T/(k_R k_{DC}); \quad t_{OFFW} = T - t_{ONW}; \quad t_{OFFC} = T - t_{ONC}, \quad (13)$$

где T – продолжительность ШИМ-сигнала, с.

Коэффициенты k_{DW} и k_{DC} вычисляются через коэффициент заполнения управляющего ШИМ-сигнала (4) с использованием выражения (5). Дискретизация сигналов во времени определяется, исходя из их частоты и разрядности ЦАП.

Передаточные функции светодиодного драйвера по каналу теплого $W_{POW}(s)$ и холодного $W_{POW}(s)$ света при одинаковых амплитудах ШИМ-сигналов токов в каналах нагрузки равны:

$$W_{POW}(s) = W_{POC}(s) = k_{ID}, \quad (14)$$

где k_{ID} – коэффициент передачи светодиодного драйвера, А/В.

Анализ методов определения параметров регулятора показал, что для расчета параметров цифрового ПИ-регулятора применимы методы Чина-Хронеса-Ресвика (CHR), Всероссийского теплотехнического института (ВТИ) и Копеловича.

В третьей главе «Программа и методики проведения экспериментальных и компьютерных исследований по разработке цифровой системы динамического локального светодиодного освещения» представлена программа и методики проведения экспериментальных и компьютерных исследований параметров и режимов работы элементов цифровой системы динамической локального светодиодного освещения птичников с клеточным содержанием птицы.

Программа исследований включала:

1. Экспериментальные исследования зависимостей изменений естественной освещенности и КЦТ солнечного света в течение дня. Наблюдение проводилось в следящем режиме по направлению Солнца в дни, близкие к осеннему равноденствию (23 сентября). Географические координаты местности: 46°19'44,5" с.ш.; 38°46'37,4" в.д.

2. Экспериментальные исследования распределений освещенности на контрольной поверхности от излучения локального светодиодного светильника. В качестве основного конструктивного элемента светильника использовались поликарбонатные трубы-рассеиватели диаметром 25 мм с рифленой внутренней поверхностью и пазом под плату. Исследования состояли из опытов по изучению распределение освещенности, создаваемой на контрольной поверхности экспериментальными образцами светильников, изготовленных из пяти видов поликарбонатной трубы-рассеивателя, и опытов по изучению распределение освещенности при изменении активной длины светильника l_A . Измерения освещенности осуществлялись при высоте подвеса 0,5 м. Методика измерений учитывала требования ГОСТ 34819-2021.

3. Экспериментальное определение рабочей температуры активной области светодиодов светильника. Исследование проводилось путем определения величины изменения напряжения на двух последовательно подключенных СИД компании «Samsung LED» типа LM561B Plus в процессе их токового нагрева в прототипе светильника (рис. 5) в течение 720 с. Прямой ток СИД был равен 100 мА. Температурные режимы работы оценивались на трех типах опытных печатных плат.

4. Экспериментальное определения пространственного светораспределения локального светодиодного светильника. Опыты выполнялись для главной продольной и поперечной плоскостей светильника нижней полусферы с учетом требования ГОСТ 34819-2021.

5. Экспериментальные исследования качества стабилизации тока и регулировочной характеристики многоканального светодиодного драйвера. Исследования производились с использованием разработанного прототипа 16-канального высоковольтного светодиодного драйвера (рис. 6, а и б). Регулировочная характеристика драйвера определялась в виде зависимости освещенности, создаваемой экспериментальным образцом локального светодиодного светильника, подключенным к исследуемому каналу нагрузки драйвера, от коэффициента k_D заполнения ШИМ-сигнала, равного $k_D = k_{DW} = k_{DC}$.

6. Экспериментальное исследование зависимости изменения КЦТ локального светодиодного светильника от коэффициента заполнения управляющего ШИМ сигнала. Опыты проводились с применением разработанных образцов локальных светодиодных светильников (рис. 5), в которых использовались СИД типа LM561B Plus с номинальными КЦТ, равными 2700 К и 5700 К.

7. Компьютерные исследования параметров цифрового ПИ регулятора систем программного управления. Моделирование выполнялось на основе разработанной структурной схемы цифровой САР освещенности (рис. 1) и математического описания ее элементов (7)-(14) с применением программного обеспечения SimInTech. В компьютерном исследовании САР освещенности (рис. 10) искомыми являлись переходные процессы изменения во времени наблюдаемой освещенности $E_N = f(t)$ для заданной освещенности $E_Z = 10$ лк и возмущении $E_V = 1$ лк при параметрах настройки ПИ-регулятора, вычисленных по методам ЧНР, ВТИ и Копеловича, и постоянной времени $T_F = 125$ мс. Исследование систем программного управления освещенности кормушки и КЦТ оптического излучения локальных светодиодных светильниках проводилось для максимальной заданной освещенности равной 10 лк и продолжительности светового периода, равной 1 ч.

8. Компьютерные и экспериментальные исследования переходных процессов цифровой САР освещенности. Искомыми в данных исследованиях являлись переходные процессы освещенности $E_F = f(t)$ в компьютерной модели САР (рис. 10) и на экспериментальном образце системы освещения (рис. 9) для освещенности E_Z равной 1; 10; 25 лк и изменении возмущения $\Delta E_V = 0,5; 1,0; 2,5$ лк при параметрах настройки ПИ-регулятора, вычисленных по методу Копеловича.

Таким образом, для проведения экспериментальных исследований были разработаны: 6 экспериментальных установок; две компьютерные модели, 33 вариантов исполнения локального светодиодного светильника; 18 опытных печатных плат для светодиодов; прототип 16-канального высоковольтного светодиодного драйвера. Обработка опытных данных проводилась с применением программ Microsoft Office Excel и Statistica.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных и компьютерных исследований и разработка цифровой системы динамического локального светодиодного освещения» приведены результаты экспериментальных и компьютерных исследований, их статистическая обработка, рассмотрены вопросы, связанные с разработкой цифровой системы динамического локального освещения птичников с клеточным содержанием цыплят-бройлеров и ее отдельных элементов.

Экспериментальные зависимости изменения естественной освещенности $E_S = f(t)$ и коррелированной цветовой температуры $CCT_S = f(E_S)$ на земной поверхности, полученные в условиях ясного неба, усредненные и симметрированные относительно солнечного полдня, представлены на рис. 2.

Коэффициенты регрессий, полученные при аппроксимации данных (рис. 2) моделями (1) и (2), составили $a = 2,151$ о.е.; $b = 3027,1$ К/о.е.; $c = 2545,8$ К при высоте $h_{\text{MAX}} = 40,09^\circ$. Точность аппроксимации подтверждена высокими значениями коэффициентов детерминации, адекватность уравнений – F -критериями Фишера.

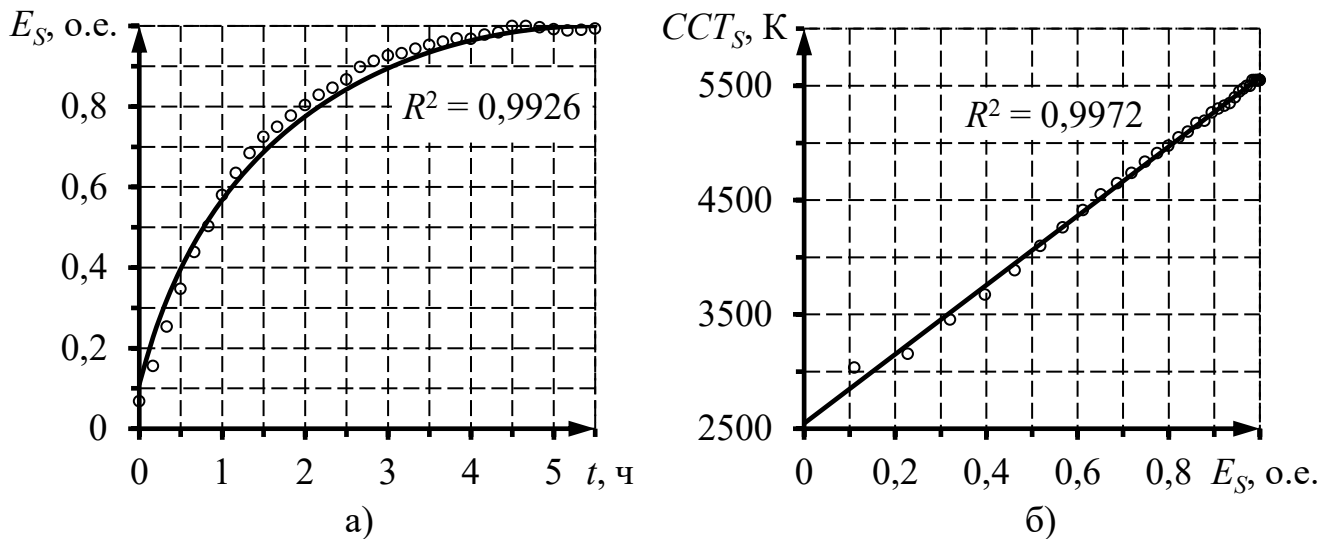


Рисунок 2 – Опытные данные и результаты аппроксимации зависимостей:
а – естественной освещенности; б – КЦТ солнечного света

С целью применения моделей (1) и (2) для управления параметрами динамического освещения в птичнике для выращивания цыплят-бройлеров модель освещенности представлена в виде:

$$E_s = \frac{1}{a} \ln \left\{ \frac{(h_{\text{MAX}} - h_0) \cos[d(1 - 2t/t_c)] + h_0}{h_{\text{MAX}}} (e^a - 1) + 1 \right\}, \quad (15)$$

где $h_0 = -4,390^\circ$ – корректирующий коэффициент; $d = 1,472$ – расчетный коэффициент; t – время от начала светового периода, мин; t_c – заданная продолжительность светового периода, ч.

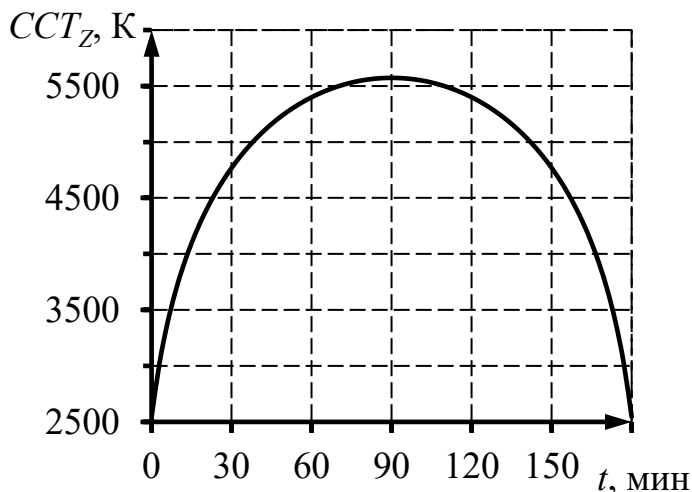


Рисунок 3 – Зависимость $CCT_z = f(t)$

Модель (15) позволяет относительно легко масштабировать зависимости (1) и (2) для заданной продолжительности светового периода. Применение моделей (15) и (2) для расчета заданной КЦТ (CCT_z) в птичнике при $t_c = 3$ ч показано на рис. 3. На основании полученных результатов исследований был запатентован способ локального светодиодного динамического освещения птичников с моделированием естественной световой среды.

По результатам обработки экспериментальных данных 18 опытов получены зависимости распределения освещенности E на контрольной поверхности. Проведенный анализ зависимостей показал, что вид опытных образцов поликарбонат труб-рассеивателей незначительно повлиял на форму кривых распределений освещенности, но оказал существенное влияние на их коэффициент светопропускания, который изменяется в пределах $k_\tau = 0,87 \dots 0,39$.

По результатам обработки экспериментальных данных 21 опыта построены зависимости распределения освещенности E на продольной оси X (вдоль светильника) при изменении длины l_A , представленные на рис. 4, а. Их анализ показал, что увеличение l_A до 38...46 мм позволяет существенно повысить равномерность освещения.

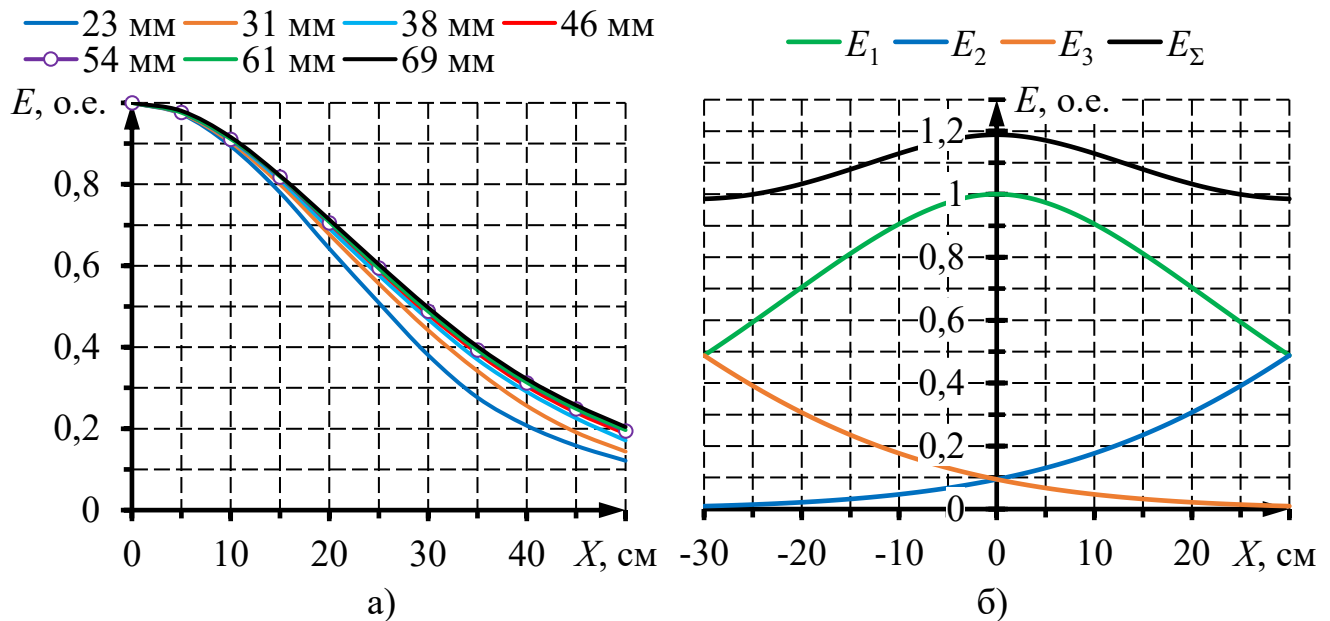


Рисунок 4 – Зависимости распределений освещенности:
а – на контрольной поверхности; б – на дне кормового желоба

На основе полученных экспериментальных данных разработаны точные ($R^2 > 0,999$) математические модели зависимостей распределения освещенности (рис. 4, а), с применением которых получены модели распределения освещенности на дне кормового желоба при продольном расположении светильников на высоте подвеса 0,5 м. Модель, построенная для расстояния между светильниками в ряду равном 60 см, представлена на рис. 4, б, на котором: E_1 , E_2 и E_3 – освещенности, создаваемые центральным, соседним левым и правым светильниками; E_Σ – суммарная освещенность.

С использованием полученных моделей была проведена численная оценка равномерности освещения по коэффициенту предельной неравномерности освещения $k_{\text{нп}}$ для светильников с активной длиной $l_A = 23...69$ мм и расстоянии между ними $L = 40...90$ см. Исходя из $k_{\text{нп}} = 1,57$, получена зависимость максимально допустимого расстояния между светильниками в ряду от длины l_A , на основании которой установлено, что для локального светильника рациональна $l_A = 5$ мм, а расстояние между светильниками в ряду при их продольном расположении на высоте подвеса 0,5 м не должно превышать 77 см.

По результатам обработки экспериментальных данных 15-ти опытов для локального светодиодного светильника обосновано применение недорогой печатной платы для светодиодов, изготовленной из фольгированного стеклотекстолита с площадью активной медной охлаждающей поверхности около 48 мм^2 . При действующем токе СИД типа LM561B Plus, равном 100 мА, средняя температура активной области светодиодов составляет около $57,4^\circ\text{C}$, что способствует продлению срока их службы.

На основе анализа полученных результатов экспериментальных исследований был разработан прототип локального светодиодного светильника системы динамического освещения птичников, представленный на рис. 5, на котором: 1 – поликарбонатная труба-рассеиватель; 2 – торцевая заглушка; 3 – держатель светильника; 4 – герметичный кабельный ввод; 5 – питающий кабель; 6 – СИД белого теплого и холодного света; 7 – самозажимные клеммники.



Рисунок 5 – Разработанный светильник и печатная плата для светодиодов

В разработанном светильнике (рис. 5) с целью снижения слепящего эффекта используется опытный образец поликарбонатной трубы-рассеивателя с коэффициентом $k_{\tau} = 0,73$; с целью повышения КПД светильника – образец с $k_{\tau} = 0,87$. Общая длина светильника с учетом торцевых заглушек составляет 9 см, длина $l_A = 5$ см.

По результатам обработки экспериментальных данных пяти опытов определены кривые силы света светильника (рис. 5) в нижнюю полусферу. Пространственное светораспределение светильника соответствует косинусному, однако в продольной плоскости имеет более концентрированную форму, чем в поперечной.

На основании проведенного анализа существующих технических средств управления локальным светодиодным освещением птичника и изложенных теоретических положений были разработаны прототип высоковольтного многоканального светодиодного драйвера (по восемь каналов управления белым теплым и холодным светом), выполненного на базе токового зеркала, и прототип его платы управления на основе микроконтроллера ATmega328P, представленные на рис. 6.

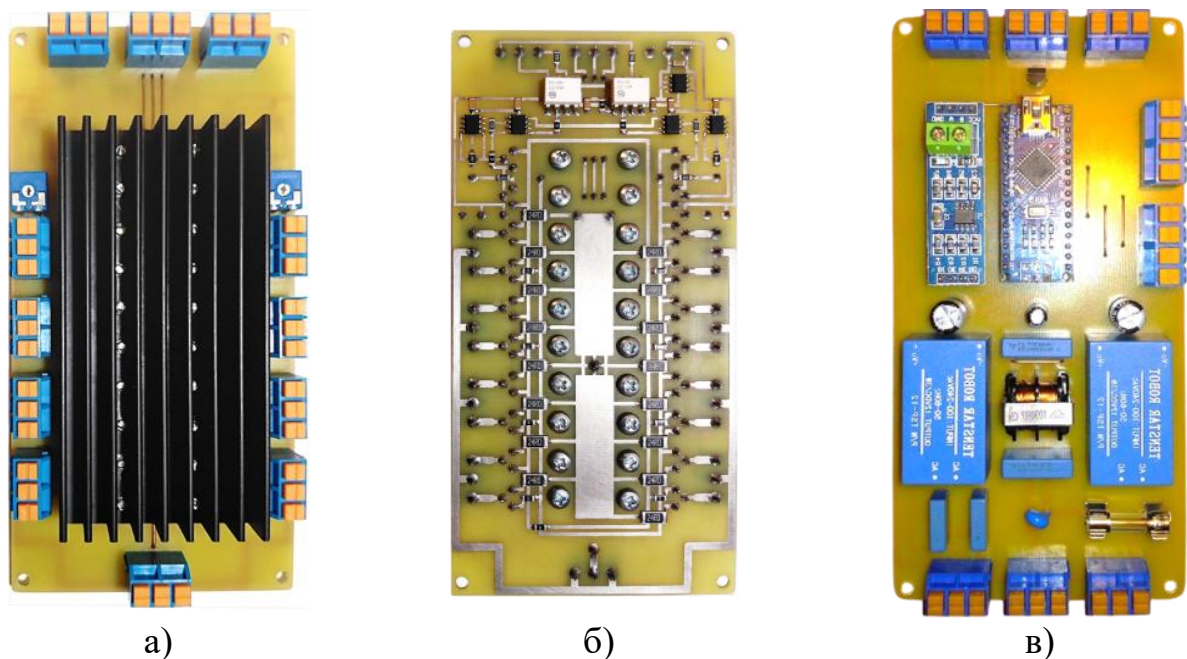


Рисунок 6 – Разработанные технические средства:

а и б – 16-канальный светодиодный драйвер; в – плата управления

По результатам обработки экспериментальных данных 16-ти опытов среднее отклонение величины стабилизированного тока в каналах нагрузки разработанного многоканального светодиодного драйвера (рис. 6) составило менее 0,5 %. Высокий уровень стабилизации тока (в пределах 1 %) сохраняется при падении напряжения в канале на драйвере около 3 В. Регулировочную характеристику разработанного светодиодного драйвера можно считать абсолютно линейной. При согласовании падения напряжения на нагрузке и напряжения источника питания КПД драйвера в диапазоне заполнения ШИМ-сигнала $k_D = 2,5 \dots 100 \%$ находится в пределах $\eta_D = 90 \dots 96,7 \%$.

Экспериментальная зависимость изменения КЦТ разработанного локального светодиодного светильника (рис. 5) от коэффициента заполнения управляющего ШИМ-сигнала, построенная по результатам обработки данных пяти опытов, представлена рис. 7.

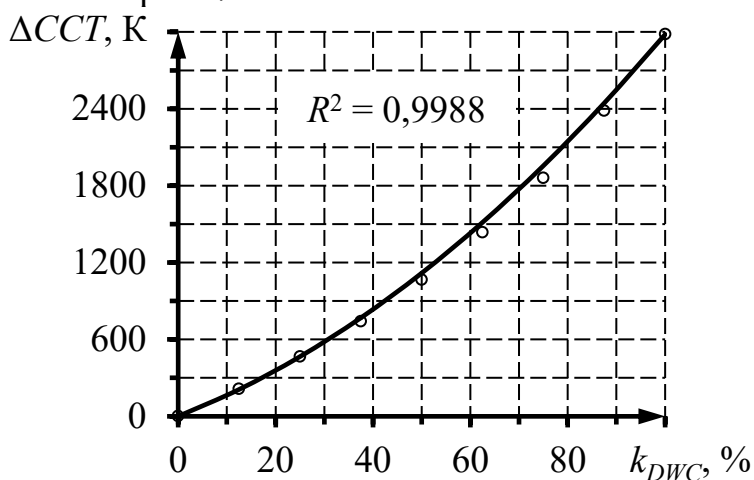


Рисунок 7 – Опытные данные и результаты аппроксимации зависимости $\Delta CCT = f(k_{DWC})$

Коэффициенты регрессии, полученные при аппроксимации экспериментальных данных зависимости $\Delta CCT = f(k_{DWC})$ моделью (5), составили $b_2 = 1634,24$ К и $b_1 = 1309,91$ К. Точность аппроксимации подтверждена высоким значением коэффициента детерминации ($R^2 = 0,9993$), а адекватность уравнения – F -критерием Фишера. Фактический диапазон изменения КЦТ светильника находится в пределах от 2660 до 5640 К.

В связи с тем, что полученные коэффициенты регрессии модели (5) применимы только для используемых СИД, их предложено упрощенно вычислять через середину диапазона изменения КЦТ светильника. При равенстве световых потоков светодиодов белого теплого и холодного света это позволяет относительно просто определить коэффициенты регрессии модели при использовании других СИД в светильнике. Результаты аппроксимации зависимости $\Delta CCT = f(k_{DWC})$ моделью (5) при $b_2 = b_1 = 1490$ К показаны на рис. 7.

На основании проведенного анализа и изложенных теоретических положений разработана структура цифровой системы динамического локального светодиодного освещения птичников, позволяющая плавно изменять световой поток (от 0 до 100 % заданного уровня) и КЦТ светильников (от теплых до холодных оттенков белого света), изображенная на рис. 8, на котором: КО – контроллер управления освещением, МУС – модуль управления светильниками, С – локальные светодиодные светильники, ДО – цифровые датчики освещенности, ЗА – аппараты защиты от короткого замыкания и токов утечки, Р – реле управления блоком питания; БП – импульсный блок питания, СД и ПУ – высоковольтный многоканальный светодиодный драйвер и его плата управления.

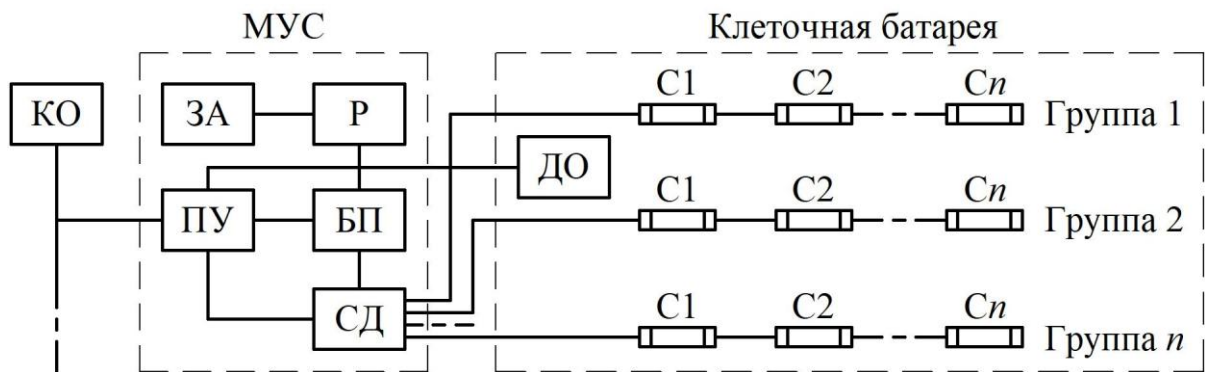


Рисунок 8 – Структура цифровой системы динамического локального освещения птичников с клеточным содержанием птицы

Применение в структуре системы освещения (рис. 8) разработанного светодиодного драйвера и его платы управления (рис. 6) позволяют в одной группе выходных каналов управлять световыми потоками и КЦТ оптического излучения до 100 последовательно подключенных локальных светодиодных светильников (рис. 5). При этом даже для большой протяженности линий энергопитания светильников в птичнике потери напряжения в питающих их медных проводниках сечением $0,5 \text{ мм}^2$ составляют менее 1 В. Количество отдельных модулей управления в птичнике определяется числом и параметрами клеточных батарей.

Плата управления драйвером формирует ШИМ-сигналы управления световыми потоками СИД частотой 2 кГц, разрядностью 10 бит, что позволяет снизить проявление эффектов мерцания и «ступенек» при ШИМ-управлении световыми потоками СИД. Связь платы управления с контроллером освещения выполняется по интерфейсу RS-485. Управление освещенностью кормушки и КЦТ оптического излучения светильников осуществляется системами программного управления.

В соответствии с разработанной структурой (рис. 8) создан экспериментальный образец цифровой системы динамического локального освещения для птичников с клеточным содержанием цыплят-бройлеров, показанный на рис. 9. В качестве контроллера освещения в нем применен отечественный ПЛК модели Trim5. Для реализации систем программного управления параметрами динамического освещения с применением языков программирования FBD, ST и Arduino C созданы управляющие программы для ПЛК и микроконтроллера ATmega328P.

Разработанная компьютерная модель цифровой САР освещенности показана на рис. 10. С использованием данной модели были проведены 3 опыта и получены переходные процессы САР освещенности. Переходные процессы по регулирующему воздействию представлены на рис. 11, а.



Рисунок 9 – Разработанный экспериментальный образец динамической системы освещения

Анализ результатов моделирования показал, что наилучшее качество процесса регулирования обеспечили параметры ПИ-регулятора, вычисленные по методу Копеловича ($k_P = 14,027 \cdot 10^{-3}$ 1/лк; $T_I = 145,72$ мс). При этом использование цифрового фильтра измеренной освещенности с $T_F = T_{ZA} = 125$ мс позволяет САР более корректно формировать управляющее воздействие с помощью ПИ-регулятора, что положительно сказывается на качестве регулирования. Применимость полученных настроек регулятора в системах программного управления освещенности кормушки и КЦТ излучения локальных светодиодных светильников проверена путем компьютерного моделирования данных систем.

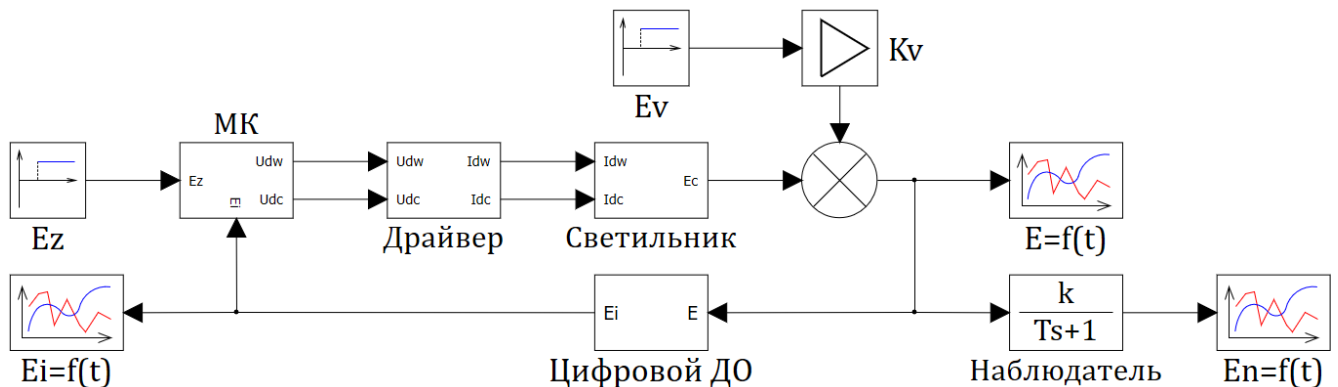


Рисунок 10 – Компьютерная модель цифровой САР освещенности в среде SimInTech

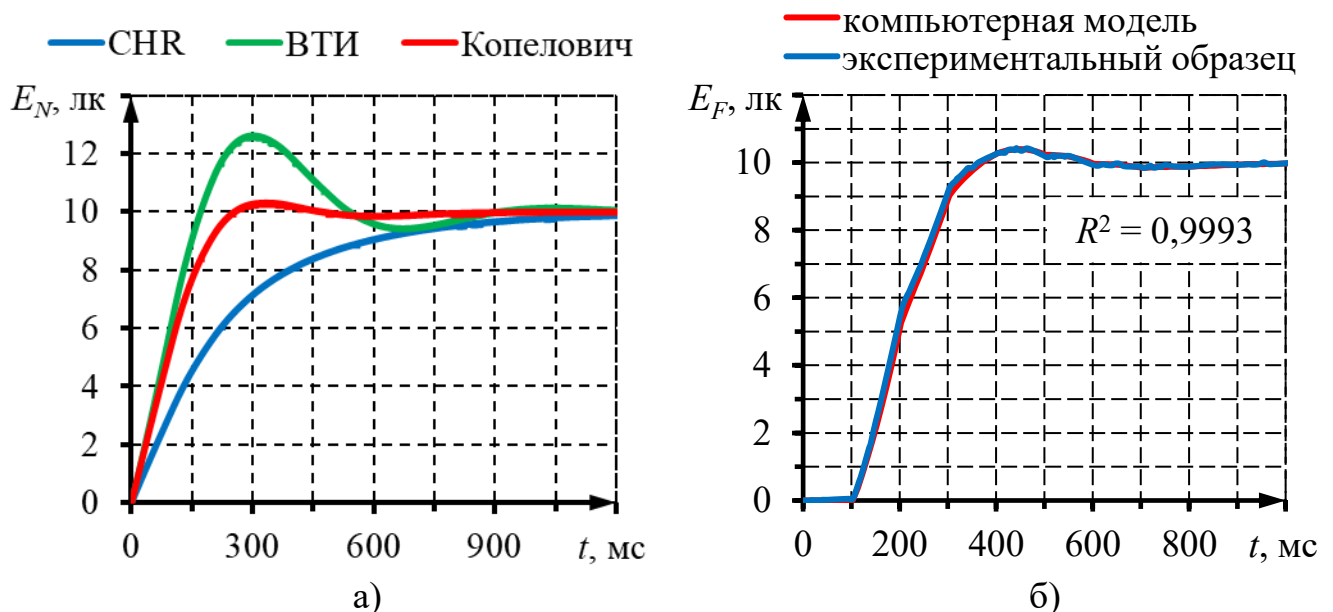


Рисунок 11 – Переходные процессы изменения наблюдаемой освещенности (а) и освещенности, сглаженной цифровым фильтром (б)

Достоверность результатов компьютерного моделирования подтверждена высокой сходимостью кривых переходных процессов, полученных по данным 30 опытов с использованием компьютерной модели цифровой САР (рис. 10) и на экспериментальном образце системы (рис. 9) в диапазонах $E_Z = 1 \dots 25$ лк. Сравнение данных кривых переходных процессов по регулирующему воздействию для освещенности $E_Z = 10$ лк показано на рис. 11, б.

В пятой главе «Технико-экономическая оценка эффективности применения разработанной системы освещения» приведено технико-экономическое обоснование применения разработанной динамической системы локального светодиодного освещения птичников с клеточным содержанием цыплят-бройлеров в промышленном птицеводстве.

По результатам сравнительной оценки показателей технико-экономической эффективности с ближайшим аналогом – системой освещения компании ООО «Микроэл» применение разработанной системы позволяет снизить капиталовложения на 27,1 % и эксплуатационные издержки на 23,4 %; принести дополнительный годовой доход (за счет повышения живой массы цыплят-бройлеров на 2,7 %) в размере 1 109,7 тыс. руб. При этом даже в условиях высокой ставки банка по кредитам и инфляции чистый дисконтированный доход составит 4 084,4 тыс. руб. при индексе доходности проектных капиталовложений – 2,25 и сроке окупаемости проектных капиталовложений – 3 года и 3 месяца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Существующие системы локального светодиодного освещения птичников с клеточным содержанием птицы не полностью используют биологический эффект от освещения и обладают невысокой технической эффективностью. Перспективным способом повышения продуктивности цыплят-бройлеров на 2,4–4,9 % и КПД системы электропитания светильников на 16 % и выше является применение цифровых систем динамического локального светодиодного освещения с плавно изменяемыми световым потоком и коррелированной цветовой температурой оптического излучения светильников и их электропитанием от высоковольтного многоканального светодиодного драйвера.

2. Уточнены коэффициенты регрессий ($a = 2,151$ о.е.; $b = 3027,1$ К/о.е.; $c = 2545,8$ К) математических моделей изменений естественной освещенности и КЦТ солнечного света на земной поверхности в течении дня в заданных географических координатах, которые применены для управления параметрами динамического освещения в птичнике.

3. В цифровой системе динамического локального светодиодного освещения птичников с клеточным содержанием цыплят-бройлеров следует использовать:

- рациональные параметры локального светодиодного светильника: поликарбонатная труба-рассеиватель диаметром 25 мм с рифленой внутренней поверхностью с коэффициентом светопропускания $k_{\tau} = 0,75–0,87$ и активной длиной светильника $l_A = 5$ см, печатная плата со светодиодами типа LM561B Plus с номинальными КЦТ, равными 2700 К и 5700 К, и площадью активной медной охлаждающей поверхности около 48 мм², амплитуда прямого тока при ШИМ-управлении световыми потоками светодиодов, равная 100 мА;

- расстояние между разработанными светильниками в ряду не более 77 см при их продольном расположении над кормушкой на высоте подвеса 0,5 м;

- для изменения коррелированной цветовой температуры оптического излучения светильника квадратную математическую модель зависимости изменения КЦТ от коэффициента заполнения управляющего ШИМ-сигнала прямыми токами светодиодов белого теплого и холодного света с коэффициентами $b_2 = b_1 = 1490$ К.

– величину падения прямого напряжения на высоковольтном многоканальном светодиодном драйвере, разработанном на базе улучшенной многоканальной схемы простого «трехтранзисторного» токового зеркала, не менее 3 В;

– пропорциональный коэффициент и постоянную времени ПИ-регулятора систем программного управления освещенности кормушки и КЦТ оптического излучения, равные $k_p = 14,027 \cdot 10^{-3}$ 1/лк и $T_I = 145,72$ мс, при постоянной времени цифрового фильтра измеренной освещенности $T_F = 125$ мс.

4. Разработана структура цифровой системы динамического локального светодиодного освещения птичников с клеточным содержанием сельскохозяйственной птицы, позволяющая плавно изменять световой поток (от 0 до 100 % заданного уровня) и КЦТ оптического излучения светильников (от теплых до холодных оттенков белого света) и обладающая низкими (менее 1 В) потерями в линиях электропитания светильников.

5. Создан экспериментальный образец цифровой системы динамического локального освещения птичников с клеточным содержанием цыплят-бройлеров, включающий в себя созданные технические средства (локальный светодиодный светильник с плавным изменением КЦТ от 2660 до 5640 К, многоканальный высоковольтный светодиодный драйвер с КПД до $\eta_D = 96,7$ %, плату управления светодиодным драйвером) и программы управления для ПЛК Trim5 и микроконтроллера ATmega328P платы управления.

6. Разработанная система освещения позволяет снизить капиталовложения в систему освещения на 27,1 %, эксплуатационные издержки на 23,4 % и принести чистый дисконтированный доход, определенный с учетом повышения живой массы цыплят-бройлеров, в размере 4 084,4 тыс. руб. при индексе доходности проектных капиталовложений – 2,25 и сроке окупаемости проектных капиталовложений – 3 года и 3 месяца.

Рекомендации и предложения производству

При содержании цыплят-бройлеров в клеточных батареях рекомендуется внедрение в производство разработанной цифровой системы локального светодиодного освещения и способа динамического освещения. В процессе проектирования систем локального светодиодного освещения для птицеводства предлагается использовать результаты исследований и разработок, полученные в настоящей работе. Заводам-изготовителям оборудования для птицеводства предлагается наладить выпуск систем динамического локального освещения с плавно изменяемыми световым потоком и КЦТ оптического излучения светильников, использующих для электропитания светильников разработанный эффективный высоковольтный многоканальный светодиодный драйвер.

Перспективы дальнейших исследований

Уточнение биологического эффекта от применения динамического локального светодиодного освещения с изменяемыми освещенностью кормушки и КЦТ оптического излучения по моделям изменения параметров солнечного света на земной поверхности, исследование параметров и режимов работы системы динамического локального светодиодного освещения для других видов сельскохозяйственной птицы и направлений ее выращивания, оптимизация параметров и технических

средств системы локального динамического светодиодного освещения по себестоимости производства.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

В изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus:

1. Романовец, М. М. Компьютерное моделирование цифровой системы автоматического регулирования освещенности / Е. А. Шабаев, М. М. Романовец // Инженерные технологии и системы. – 2024. – Т. 34, № 2. – С. 295-317.

2. Romanovets, M. M. Mathematical models of sunlight for dynamic lighting systems of agricultural objects / E. A. Shabaev, M. M. Romanovets // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 659 : Materials of Int. Conf. on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production, Zernograd, 27–28 August 2020. – DOI 10.1088/1755-1315/659/1/012110

В изданиях, рекомендуемых ВАК РФ:

3. Романовец, М. М. Исследование систем программного регулирования параметрами динамического освещения / М. М. Романовец // Вестник аграрной науки Дона. – 2025. – Т. 8, № 1(69). – С. 85-94.

4. Романовец, М. М. Исследование многоканального высоковольтного светодиодного драйвера / Е. А. Шабаев, М. М. Романовец, В. А. Кулачинский // Вестник НГИЭИ. – 2023. – № 4(143). – С. 67-78.

5. Романовец, М. М. Исследование нагрева светодиодов компактного светильника для системы локального освещения / Е. А. Шабаев, М. М. Романовец, В. А. Кулачинский // Вестник аграрной науки Дона. – 2022. – Т. 15. – № 1(57). – С. 78-86.

6. Романовец, М. М. Цифровая система динамического локального освещения клеток для содержания сельскохозяйственной птицы / Е. А. Шабаев, М. М. Романовец // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2022. – Т. 69, № 1(46). – С. 26-30.

7. Романовец, М. М. Исследование светодиодного светильника для систем локального освещения в области АПК / И. В. Юдаев, Е. А. Шабаев, М. М. Романовец // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2020. – № 3(59). – С. 376-387.

8. Романовец, М. М. Моделирование САР освещенности динамической системы освещения на RGB-светодиодах / В. С. Газалов, Е. А. Шабаев, М. М. Романовец // АгроЭкоИнфо. – 2019. – № 2(36). – URL: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2019/2/st_223.doc (дата обращения: 27.06.2026).

9. Романовец, М. М. Обоснование конструкции компактного светодиодного светильника системы локального освещения клеток для содержания птицы / Е. А. Шабаев, М. М. Романовец, С. А. Сагунов // АгроЭкоИнфо. – 2019. – № 4(38). – URL: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2019/4/st_418.doc (дата обращения: 27.06.2026).

10. Романовец, М. М. Экспериментальное определение динамической модели датчика освещенности / В. С. Газалов, Е. А. Шабаев, М. М. Романовец // Вестник АПК Ставрополя. – 2018. – № 2(30). – С. 6-10.

11. Романовец, М. М. Динамические системы освещения в помещениях для сельскохозяйственных животных / В. С. Газалов, Е. А. Шабаев, М. М. Романовец // Вестник аграрной науки Дона. – 2018. – № 2(42). – С. 80-86.

В прочих изданиях:

12. Романовец, М. М. Цифровое управление биодинамическими системами освещения в птичниках / Е. А. Шабаев, В. Н. Беленов, М. М. Романовец, С. И. Митяшова // Агротехника и энергообеспечение. – 2026. – № 1(50). – С. 11-18.

13. Романовец, М. М. Исследование кривой силы света компактного светодиодного светильника / Е. А. Шабаев, М. М. Романовец // Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения : сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции, СПб.-Пушкин, 25-27 мая 2022 года. – СПб : СПбГАУ, 2022. – С. 256-259.

14. Романовец, М. М. Анализ различных топологий светодиодных драйверов / В. М. Лозовой, М. М. Романовец, Е. А. Шабаев // Активная честолубивая интеллектуальная молодёжь сельскому хозяйству. – 2021. – № 2(11). – С. 59-66.

15. Романовец, М. М. Энергосберегающая динамическая система освещения для животноводческих и птицеводческих помещений / М. М. Романовец, В. С. Газалов, Е. А. Шабаев // Инновационные энерго-ресурсосберегающие технологии и техника 21 века : материалы Всероссийской молодежной научной конференции, Новочеркасск, 3 марта 2017 года. – Новочеркасск: НИМИ, 2017. – С. 115-117.

16. Романовец, М. М. Динамическая система освещения для животноводческих помещений / М. М. Романовец, В. С. Газалов, Е. А. Шабаев // Молодая наука аграрного Дона: традиции, опыт, инновации. – 2017. – № 1. – С. 122-127.

17. Романовец, М. М. Некоторые аспекты проектирования динамических систем освещения животноводческих помещений / М. М. Романовец // Образование, наука, производство : VIII международный молодежный форум, Белгород, 15-16 октября 2016 года. – Белгород : БГТУ, 2016. – С. 2014-2017.

Патенты, свидетельства:

18. Патент № 2797873 С1 РФ, МПК А01К 31/00, А01К 45/00. Способ локального динамического освещения клеток для содержания сельскохозяйственной птицы с моделированием естественной световой среды : № 2022117323 : заявл. 24.06.2022 : опубл. 09.06.2023 / Е. А. Шабаев, М. М. Романовец.

19. Патент № 2728358 С1 РФ, МПК А01К 31/00, А01К 45/00. Способ содержания сельскохозяйственной птицы при светодиодном динамическом освещении : № 2019134130 : заявл. 23.10.2019 : опубл. 29.07.2020 / Е. А. Шабаев, М. М. Романовец.

20. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022614680 РФ. Расчет уровня освещенности и цветовой температуры дневного солнечного света для светодиодных светильников локального динамического освещения : № 2022611787 : заявл. 04.02.2022 : опубл. 24.03.2022 / М. М. Романовец, Е. А. Шабаев.

21. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022619408 РФ. Сигналы управления для светодиодных светильников локального освещения при реализации ими динамики дневного солнечного света : № 2022618387 : заявл. 06.05.2022 : опубл. 20.05.2022 / Е. А. Шабаев, М. М. Романовец, В. А. Кулачинский.