

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ – МСХА
ИМЕНИ К. А. ТИМИРЯЗЕВА»

На правах рукописи

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

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Шабает Евгений Адимович

Москва – 2026

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	2
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 СИСТЕМЫ ИСКУССТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ В ПТИЦЕВОДСТВЕ	13
1.1 Механизмы фотобиологического воздействия света на организм сельскохозяйственной птицы	13
1.2 Влияния режима и основных параметров освещения на поведение и продуктивность сельскохозяйственной птицы.....	16
1.2.1 Режим и продолжительность освещения.....	16
1.2.2 Уровень освещенности	18
1.2.3 Спектр и цветность света	20
1.2.4 Коррелированная цветовая температура	22
1.3 Технологии искусственного освещения при клеточном содержании сельскохозяйственной птицы	26
1.4 Технические средства систем локального светодиодного освещения для клеточного содержания сельскохозяйственной птицы.....	30
1.5 Выводы и задачи исследований.....	37
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАЗРАБОТКИ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ЛОКАЛЬНОГО СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ	40
2.1 Анализ математических моделей изменений естественной освещенности и КЦТ солнечного света в течение дня.....	40
2.2 Математическое описание зависимости изменения КЦТ светильника от коэффициентов заполнения прямых токов светодиодов белого теплого и холодного света	44
2.3 Анализ методов определения рабочей температуры активной области светодиодов	48
2.4 Анализ электронных схем токовых зеркал для реализации светодиодного драйвера	51

2.5	Параметры и характеристики высоковольтного многоканального светодиодного драйвера, выполненного на базе токового зеркала	54
2.6	Анализ и синтез цифровой системы управления освещенностью.....	56
2.6.1	Разработка структурной схемы моделирования системы	56
2.6.2	Математическое описание структурных элементов системы управления	60
2.6.3	Анализ методов определения параметров настройки регулятора	58
2.7	Выводы	60
3	ПРОГРАММА И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И КОМПЬЮТЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ЛОКАЛЬНОГО СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ	66
3.1	Программа экспериментальных и компьютерных исследований.....	66
3.2	Методика экспериментальных исследований зависимостей изменений естественной освещенности и КЦТ солнечного света в течение дня	67
3.3	Методика экспериментальных исследований распределений освещенности на контрольной поверхности от излучения локального светодиодного светильника	68
3.4	Методика экспериментального определения рабочей температуры активной области светодиодов светильника.....	71
3.5	Методика экспериментального определения пространственного светораспределения локального светодиодного светильника	73
3.6	Методика экспериментальных исследований качества стабилизации тока и регулировочной характеристики многоканального светодиодного драйвера	74
3.7	Методика экспериментального исследования зависимости изменения КЦТ локального светодиодного светильника от коэффициента заполнения управляющего ШИМ-сигнала.....	77

3.8 Методика компьютерных исследований параметров цифрового ПИ-регулятора систем программного управления.....	78
3.9 Методика компьютерных и экспериментальных исследований переходных процессов цифровой САР освещенности	81
3.10 Методика обработки и анализа экспериментальных данных	83
3.11 Выводы.....	85
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И КОМПЬЮТЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ЛОКАЛЬНОГО СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ	86
4.1 Результаты экспериментальных исследований зависимостей изменений естественной освещенности и КЦТ солнечного света в течение дня	86
4.2 Разработка локального светодиодного светильника и обоснование его параметров	89
4.2.1 Результаты экспериментальных исследований конструктивных параметров светильника	89
4.2.2 Результаты экспериментального определения рабочей температуры активной области светодиодов	94
4.2.3 Разработка светильника.....	95
4.2.4 Результаты экспериментального определения пространственного светораспределения светильника	97
4.3 Разработка многоканального высоковольтного светодиодного драйвера и платы управления	99
4.4 Результаты экспериментальных исследований характеристик многоканального высоковольтного светодиодного драйвера.....	102
4.5 Результаты экспериментальных исследований зависимости изменения КЦТ разработанного светильника от коэффициента заполнения управляющего ШИМ-сигнала прямыми токами светодиодов.....	106
4.6 Разработка цифровой системы управления динамическим локальным светодиодным освещением птичника.....	109

4.7 Результаты компьютерного исследования параметров цифрового ПИ-регулятора.....	113
4.8 Результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований сходимости переходных процессов цифровой САР освещенности	117
4.7 Выводы	118
5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ.....	
5.1 Методика расчетов показателей эффективности.....	121
5.2 Результаты расчетов показателей эффективности	125
5.3 Выводы	127
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	128
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	131
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	153
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Реализации результатов.....	154
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Результаты исследований и разработок	156

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Птицеводство является одной из передовых и наукоемких отраслей АПК. Россия является одной из стран-лидеров по производству мяса птицы [56]. Удельный вес мяса птицы в стране в общем объеме мяса животных составляет 44 % [134]. 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 [90; 125; 150;]. В частности, существенно возросли издержки на импортозависимые компоненты, оборудование и используемые ресурсы [18; 135], что в условиях невысокой рентабельности отрасли (по состоянию на 2025 г. рентабельность яичного – 5,5 %, массного – 12,7 %) снижает доступность продукции птицеводства для населения и негативно сказывается на обеспечении продовольственной безопасности страны. В связи с этим требуется внедрение отечественных инновационных, энерго- и ресурсосберегающих технологий и оборудования, способствующих повышению эффективности птицеводства [125; 136]. К таким технологиям относятся современные цифровые системы управления параметрами микроклимата в птичнике [2; 18; 142], позволяющие в большей степени раскрыть генетический потенциал высокопродуктивных кроссов птицы. Важным фактором, влияющим на это, является искусственная световая среда [159; 185; 197].

В современном птицеводстве активно внедряются светодиодные системы освещения. По состоянию на 2022 год их использовали более 70 % птицеводческих предприятий России [38]. При интенсивной клеточной технологии выращивания птицы востребовано применение систем локального светодиодного освещения [13; 75; 183; 200; 202], в которых светильники небольшой мощности (до нескольких ватт) располагаются внутри клетки над кормушкой или комовым желобом. По сравнению с общей системой люминесцентного освещения его применение позволяет повысить однородность поголовья, живую массу птицы до 7,1 % и снизить потребление электроэнергии на освещение до трех раз без негативного влияния на коэффициент конверсии корма [13; 19].

Принимая во внимание современную концепцию циркадно-эффективного освещения [14; 48; 173] наиболее перспективными являются системы динамического (изменяемого во времени) светодиодного освещения птичников с изменяемыми световым потоком [168; 177] и спектральным составом, в том числе коррелированной цветовой температурой (КЦТ) [109; 158; 165], оптического излучения локальных светодиодных светильников, позволяющие дополнительно повысить живую массу цыплят-бройлеров до 4,9 %, снизить показатель коэффициент конверсии корма до 6,0 % и уменьшить потребление электроэнергии на освещение.

Содержание работы соответствует:

1. Целям стратегии развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов России (Распоряжение Правительства РФ № 2567-р от 08.09.2022), а именно: способствует достижению целей обеспечения долгосрочного и перспективного развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов РФ, импортозамещению критически важных видов продукции АПК, усилению продовольственной безопасности.

2. Приоритетам и перспективам стратегий научно-технологического развития Российской Федерации (Указы Президента РФ № 642 и № 145 от 01.12.2016 и 28.02.2024), а именно: переходу к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, высокопродуктивному и экологически чистому агро- и аквахозяйству.

3. Направлению научно-исследовательской работы ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» по тематике «Разработка технических средств контроля и управления микроклиматом и биологической обстановкой на сельскохозяйственных предприятиях, а также технологий в области инжиниринга животноводства».

Отдельные части диссертационного 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. Зонова, В. В. Самойленко, В. С. Буюрова, О. Ю. Коваленко, Ю. А. Журавлевой, Л. Ю. Юферева, А. А. Михалева, А. А. Бахарева, Н. В. Коняева, О. Н. Ястребовой и др. [12; 13; 16; 38; 39; 75; 81; 88; 96; 97; 109; 113; 118; 132; 193], а также зарубежных ученых D. J. Aldridge, S. W. Kang, G. S. Archer, K. El-Sabrout, H. A Olanrewaju и др. [158; 160; 165; 168; 177; 179; 183; 185; 198]. 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 изменения 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 научно-практической конференции «Электротехнологии, электрооборудование и автоматизация процессов в АПК», г. Зерноград, 2018-2025 гг.; Международной конференции «Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production», г. Зерноград, 2020 г.; Всероссийской научной конференции «Инновационное сельское хозяйство: от ресурсосберегающих до цифровых технологий», г. Зерноград, 2021, 2022 и 2025 гг; Международной научно-практической конференции «Приоритеты развития АПК в условиях цифровизации и структурных изменений национальной экономики», г. Санкт-Петербург, 2022 г.; Всероссийской научно-практической конференции «Инновационные аспекты современного сельского хозяйства», г. Зерноград, 2021, 2023 и 2025 гг; Международной научно-

практической конференции «Энергообеспечение АПК», г. Москва, 2025 г.; Международном научно-практическом семинаре «Чтения академика В.Н. Болтинского», г. Москва, 2026 г.; Всероссийской научной конференции посвященной 155-летию со дня рождения академика М. Ф. Иванова.

Результаты исследований и разработок внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева (рис. А.1) и производственную деятельность ООО «Птицефабрика «Элинар-Бройлер» (рис. А.2), а также представлены: на выставке-демонстрации достижений агробизнеса «День Донского поля», г. Зерноград, 2021 г.; выставке «Интерагромаш» и «Агротехнологии», г. Ростов-на-Дону, 2021 и 2022 гг.; Международных выставках «АГРОС» и «АГРОТЕХ», г. Москва, 2025 г.; Международной выставке-форуме «AGROBRICS+», г. Москва, 2025 г.; агропромышленной выставки «Золотая осень», г. Москва, 2025 г.; Международной выставке «АГРАВИЯ 2026», г. Москва, 2026 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.

1 СИСТЕМЫ ИСКУССТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ В ПТИЦЕВОДСТВЕ

1.1 Механизмы фотобиологического воздействия света на организм сельскохозяйственной птицы

Жизнедеятельность организма проходит в тесной связи с окружающей средой. Одним из наиболее важных факторов окружающей среды является свет [132; 137; 151]. В птицеводстве значение света, как фактора микроклимата по сравнению с другими отраслями животноводства наиболее высокое [17]. Основными параметрами, определяющими его фотобиологическое воздействие на физиологическое состояние и показатели продуктивности птицы, являются: фотопериод (продолжительность освещения), интенсивность освещения (уровень освещенности) и спектральное распределение, в том числе цветность и КЦТ [159; 185; 197;].

Восприятие света птицей осуществляется посредством сетчатки зрительного аппарата и экстраретинальных (внеглазных) фоторецепторов, расположенных в эпифизе и гипоталамусе (рис. 1.1). Первые участвуют в получении зрительной информации, а вторые – незрительные – позволяют птице определять продолжительность и сезонность фотопериода и регулировать циркадные ритмы. Рост и поведение птицы во многом связаны с рецептарами сетчатки, а репродуктивные функции – внеглазных фоторецепторов [50; 176; 185].

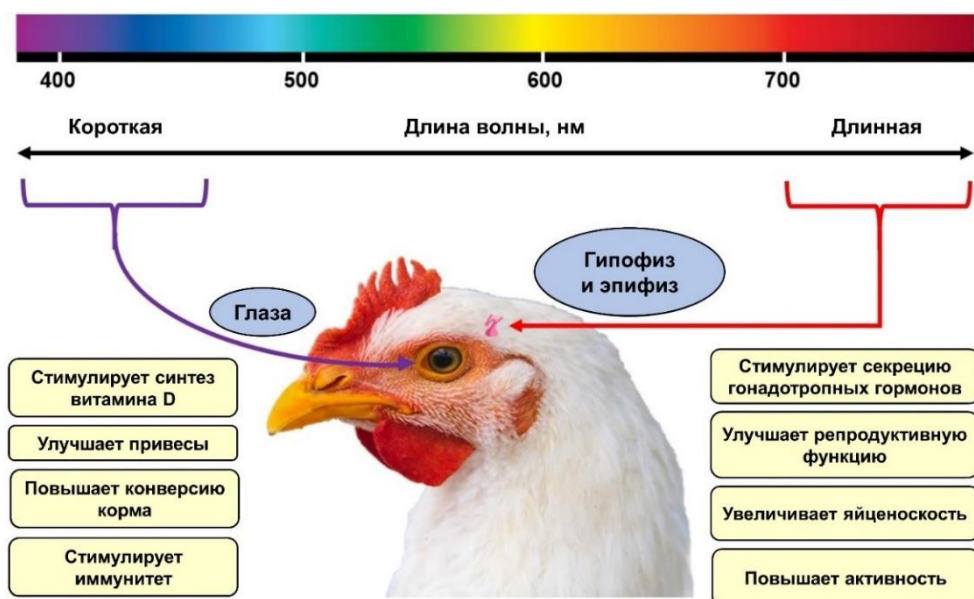


Рисунок 1.1 – Основные воздействия света на домашних кур [185]

В сетчатке зрительного аппарата домашних кур преобладают фоторецепторы типа колбочек, имеющие четыре светочувствительных пигмента (рис. 1.2). Сетчатка связана с корой больших полушарий, подкорковыми образованиями и гипофизом с помощью которых осуществляются сеть сложных реакций [79; 176]. В связи с разной спектральной чувствительностью зрительных фоторецепторов птицы и человека (рис. 1.2) предлагаются подходы [81] к оценке интенсивности света по его восприятию зрительным аппаратом птицы.

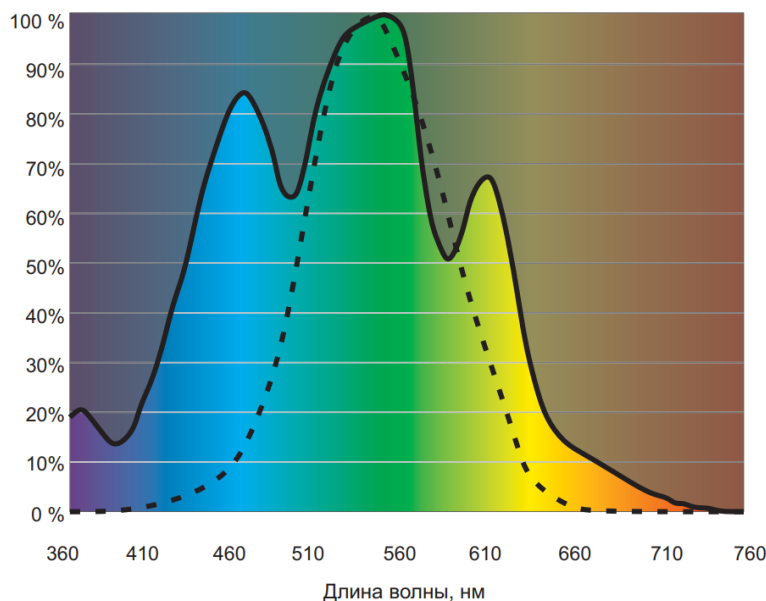


Рисунок 1.2 – Относительные спектральные чувствительности фотопического зрения домашней птицы (сплошная кривая) и человека (пунктирная кривая) [39]

Свету, чтобы достигнуть внеглазных рецепторов (рис. 1.1), необходимо преодолеть несколько барьеров: череп, кожу, мозговую ткань. Большей эффективностью для этого обладает длинноволновое видимое излучение [185]. Степень возбуждения внеглазных фоторецепторов влияет на выработку гормона-регулятора циркадных ритмов – мелатонина [176].

Циркадные ритмы – это фундаментальные циклы биологических событий организма, таких как пищеварение, температура тела, сон и бодрствование, повторяющиеся около 24 часов. Они эволюционно связаны с циклическими изменениями оптической части солнечного излучения на земной поверхности, то есть с вращением Земли вокруг своей оси. Одним из проявлений циркадных ритмов является

цикл сна и бодрствования [8]. Циркадные ритмы участвуют в процессах оптимизации метаболизма, физиологии и поведенческих реакций птицы, помогают ей установить ритмичность и синхронизировать жизненно важные функции [167; 176]. Данные ритмы запрограммированы генетически и определяются внутренними (эндогенными) факторами, тесно связанными с влиянием среды на организм (экзогенными), корректирующими время ритмов [9; 122; 132].

С уровнем гормона-регулятора мелатонина в организме птицы связана функция гонад и секреция гонадотропных гормонов, инсулиноподобного фактора роста ИФР-1, глюкокортикоидов и других гормонов, от которых напрямую зависят продуктивность, иммунитет и стресс-резистентность сельскохозяйственной птицы [128; 176; 185]. Кроме этого свет воспринимается клетками крови, что повышает ее бактерицидные свойства и общие иммунобиологические свойства организма, активизирует ферментативные процессы и кроветворение [128]. Изменение параметров освещения также является элементом цирканнуального (сезонного, годового) ритма с которым тесно связаны процессы периодической смены оперения и размножения птицы [87; 132].

В естественных условиях между эндогенными и экзогенными компонентами циркадного ритма нет существенных противоречий [122]. В искусственных условиях содержания сельскохозяйственной птицы нарушения экзогенного компонента светового режима приводит птицу к хроническому стрессу, истерии, физиологическим расстройствам, требующих от их организма более значимых энергозатрат, что отрицательно сказывается на продуктивности [83; 103]. В условиях клеточного содержания птицы эта проблема усугубляется, так как из всего многообразия естественных форм поведения птица может осуществлять только ряд ограниченных инстинктивных побуждений [122]. Особенно важно это учитывать для высокопродуктивных кроссов птицы с напряженным обменом веществ, для которой обычно действующие неблагоприятные факторы воспринимаются ее организмом как сильные раздражители [64]. При минимизации сенсорной информации возникает эффект десинхронизации циркадного ритма, что в конечном итоге приводит к более высоким затратам энергии птицей [151].

1.2 Влияния режима и основных параметров освещения на поведение и продуктивность сельскохозяйственной птицы

1.2.1 Режим и продолжительность освещения

При выращивании сельскохозяйственной птицы по чередованию периодов света и темноты выделяют постоянные и прерывистые режимы освещения. Постоянные режимы освещения характеризуются сменой одного периода света С и темноты Т в течение суток, прерывистые – чередованием периодов света и темноты несколько раз в сутки [132].

Прерывистые световые режимы главным образом направлены на экономию электроэнергии, что позволяет уменьшить ее расход до 38% и более [151], но отмечается их положительное влияние на физиологическое состояние и отдельные показатели продуктивности сельскохозяйственной птицы [89; 123; 132]. Прерывистые режимы освещения подразделяются на симметричные (например, 1С:3Т) и асимметричные (например, 9С:2Т:3С:6Т). Первые предусматривают непрерывное чередование в течение суток коротких периодов света и темноты, вторые воспринимаются птицей, как единственная смена дня и ночи, где наибольший период темноты куры воспринимают, как ночь, а следующий за ним световой период, как начало субъективного дня или как рассвет.

Асимметричные световые режимы эффективно используются при выращивании кур-несушек. В технологии выращивания цыплят-бройлеров наибольшее распространение получили постоянные и прерывистые режимы освещения симметричного типа [132; 151]. Круглосуточное освещение нарушает ритмичность потребления корма, вызывает стресс, повышает риск развития синдрома внезапной смерти, увеличивает внутриглазное давление и может приводить к слепоте, снижает газообмен и угнетает рост молодняка. Это связано с нарушениями процессов циркадных ритмов птицы и синтеза мелатонина [151].

С целью более эффективного воздействия искусственного освещения на поведение и физиологическое развитие сельскохозяйственной птицы режимы освещения дифференцируют в зависимости от ее возраста. При этом может изменяться

не только продолжительность, но и вид или тип режима освещения.

Цыплят-бройлеров в первые дни выращивания обычно содержат при постоянном режиме освещения с продолжительностью светового периода около 23 ч, которую в последующие дни постепенно уменьшают для укрепления внутренних органов и скелета, а в конце снова увеличивают для максимального набора живой массы. По результатам исследований Буярова В. С., Балашова В. В. [16] применение таких режимов освещения, по сравнению с постоянным 23С:1Т, позволяет повысить живую массу цыплят-бройлеров перед убоем до 3,6 %, сохранность – до 4,0 %, коэффициент конверсии корма – до 5,9 %.

Периоды темноты достаточной длительности необходимы для обеспечения восстановительной фазы суточного ритма, которая не менее важна для жизнедеятельности, чем активная. По данным Белорусского научного института внедрения новых форм хозяйствования в АПК [151], близкие к оптимальным циркадные изменения живой массы цыплят-бройлеров получаются тогда, когда параметры освещения и скорость их изменения были близки к существующим в естественных условиях. Это объясняется тем, что миллионы лет эволюции живых организмов в периодически меняющихся условиях освещения не могли не привести к формированию наследственно закрепленных программ ритмического функционирования в биологических системах.

Полученные выводы хорошо согласуются рекомендациями, представленным Трухачевым В.И., Зоновом М.Ф., Самойленко В.В. [132], в соответствии с которыми при формировании режимов освещения мясной птицы необходимо учитывать широту региона земной поверхности; мнением авторов работы [65], в соответствии с которым искусственному освещению следует обеспечивать плавный переход в птичнике между днем и ночью, а также материалами представленными в других работах [103; 122]. Так, по данным работы [103], режим освещения, несвойственный естественным условиям среды, является сильным стрессовым фактором для птиц, который требует от их организма более значимых энергозатрат, определяющих высокий уровень функционального напряжения.

1.2.2 Уровень освещенности

В связи с практической удобностью применения и большим накопленным объемом экспериментальных исследований, основным параметром, характеризующим интенсивность воздействия освещения на птицу является уровень освещенности. Он должен находиться в пределах, позволяющих птице ориентироваться в окружающем пространстве, и в то же время – не вызывать негативного воздействия на ее организм. Отраслевой стандарт ОСТ–АПК 2.10.24.001–04 нормирует освещенность на уровне кормушек для клеточного содержания птицы и на уровне пола для напольного.

Рекомендуемый уровень освещенности тесно связан с продолжительностью освещения и зависит от возраста и направления выращивания сельскохозяйственной птицы [132]. В первые дни выращивания цыплят-бройлеров обычно содержат при освещенности от 20 до 40 лк, что стимулирует их активность и помогает им находить воду и корм, которую в течении последующих нескольких недель постепенно снижают до 5–10 лк, что уменьшает активность птицы и положительно влияет на повышение показателей ее продуктивности [26].

Относительно высокие уровни освещенности (более 40–80 лк) повышают активность птицы и вызывают состояние хронического стресса, увеличивают вероятность каннибализма и расклева яйца [19; 132]. В свою очередь низкие уровни освещенности (менее 2,5–5 лк) приводят к повышению травматизма конечностей, нарушениям зрительного аппарата по причине дегенерации сетчатки глаза, негативно влияет на состояние оперения на груди. Темнота, низкий или круглосуточный высокий уровень освещенности приводят к недоразвитию гипофиза и эпифиза, снижению их массы и гормональной активности, ослаблению функции эндокринной системы [37]. По данным исследования Lon-Woe оптимальный уровень освещенности находится в пределах 2,5–22,5 лк [132].

В искусственных условиях содержания сельскохозяйственной птицы освещенность течение светового периода обычно является величиной постоянной, но в естественных условиях она изменяется в широких пределах. Применение освеще-

ния с изменяемой освещенностью в течении светового периода способно существенно повысить показатели продуктивности кур-несушек [3; 4; 76; 99]. Например, в отечественном способе освещения [3], предлагается содержать птицу с от 21–22-дневного возраста до 116–121-дневного возраста при ритмично изменяющейся освещенности от 0,4 до 25 лк через каждые 60–70 мин, а после до конца эксплуатации от 0,1 до 30 лк через каждые 120–150 мин., что позволяет повысить живую массу кур на 1,58–4,40 % и петушков на 2,36–4,28 %, коэффициент конверсии корма на у кур 2,40–11,80 % и петушков 1,00–6,48 %, повысить сохранность поголовья на 1,25%. Эффективность применения режимов освещения с изменяемой освещенностью в течении светового периода также связана с демонотонизирующим влиянием динамического освещения, которое разнообразит монотонное освещение в птичнике.

При содержании птицы мясных пород известен способ [92], в котором стимуляцию к поеданию корма перед фазами кормления птицы производят акустическими тоновыми послылками, которые сочетают имитацией наступления рассвета или сумерек путем изменения цвета освещения и плавного увеличения или уменьшения освещенности, которая в темный и светлый периоды в зонах кормления и отдыха составляет соответственно 4–6 лк, 1–3 лк и 15–30 лк, 5–15 лк соответственно, что, в частности, способствует повышению живой массы на 4,5 %, снижению коэффициента конверсии корма на 20,8 % и сохранности поголовья на 3,8 %.

Эффективным при содержании цыплят-бройлеров является световой режим с изменяющейся в течение дня освещенностью по следующему сценарию: три часа света при освещенности 25 лк и один час при освещенности 5 лк, что способствует интенсивному росту, снижению коэффициента конверсия корма и процента выбраковки [130]. Результаты исследования S. W. Kang и др. [168] показывают, что при содержании цыплят-бройлеров с освещением в разных зонах птичника уровнями 2–5 лк и 40 лк среднесуточные привесы живой массы увеличивается на 4,3; 1,2; и 4,1 %, по сравнению постоянным освещением уровнем 5 лк, 20 лк и естественным светом освещенностью 480 лк, при снижении коэффициента конверсии корма до 2,2 %. Отмечается, что такое освещение стимулировало врожденное естественное

поведение птицы, что оказало положительное влияние на ее физиологическое состояние и продуктивность.

В исследовании центра передового опыта птицеводства США, проводимые D. J. Aldridge и др. [177], оценивалось влияние разного уровня освещенности (5; 10; 20 лк) на показатели продуктивности и поведение цыплят-бройлеров, содержащихся в клеточных батареях. По результатам исследований было выявлено, что при освещении с доступом птицы ко всем зонам освещения, наблюдается наилучшая конверсия корма (1,70) по сравнению с остальными опытными группами (1,71; 1,74; 1,81), содержащимся соответственно только при освещенностях 5, 10, 20 лк. Цыплята-бройлеры инстинктивно выбирают освещение с разным уровнем освещенности в течении периода освещения [157].

1.2.3 Спектр и цветность света

Человек воспринимает монохроматическое оптическое излучение с длинами волны около 460 нм и 520 нм, как синий и зеленый цвет, а излучение – 580 нм и 700 нм, как желтый и красный. Основные эффекты воздействия света различного спектрального диапазона на показатели содержания сельскохозяйственной птицы представлены широко известной диаграммой (табл. 1.1), опубликованной М. О. North [188].

Благоприятным для роста цыплят-бройлеров является монохроматический свет с длинами волн в пределах 415–560 нм [17; 171; 175; 201]. По данным исследования Н. S Seo и др. [171], из диапазона 450–540 нм наиболее эффективным является свет с длиной волны 450–460 нм, который способствует повышению живой массы птицы до 7,1 % и снижению коэффициента конверсии корма до 2,2 %. Увеличение длины световой волны на каждые 100 нм приводит к снижению живой массы бройлеров в убойном возрасте в среднем на 50 г [17]. Р. Lewis, Т. Morris в исследовании [184] пришли к выводу, что увеличение привесов живой массы птицы при использовании освещения зеленого и синего спектра излучения является следствием исключения красного, который замедляет рост птицы. Для кур-несушек более предпочтителен монохроматический желто-красный свет.

Таблица 1.1 – Влияние монохроматического света на птицу

Показатель	Цвет излучения				
	Крас- ный	Оран- жевый	Жел- тый	Зеле- ный	Си- ний
Улучшение роста				+	+
Снижение расхода корма			+	+	
Задержка созревания				+	+
Патологическое укрупнение глазного яблока	+				
Стимуляция созревания	+	+	+		
Снижение беспокойства	+				
Снижение каннибализма	+				+
Повышение яичной продуктивности	+	+			
Снижение яичной продуктивности			+		
Увеличение размера яйца			+		
Повышение оплодотворяющей способности петухов				+	+
Снижение оплодотворяющей способности петухов	+				

Цыплята-бройлеры становятся пассивными и малоподвижными при освещении синим и зеленым спектром света, а при освещении красным они проявляют наибольшую агрессию [190]. F. N. K. Soliman и K. El-Sabrouh в работе [198] заключают, что более чем в половине исследований показано, что освещение цыплят-бройлеров синим и зеленым светом позволяет повысить на живую массу птицы на 3 % и более, а освещение красным светом повышает активность и агрессивное поведение птиц на 30 % и выше.

Следует учитывать, что зависимость показателей продуктивности птицы от спектра света изменяется в процессе ее роста и развития [166; 172; 175; 201]. Например, по данным исследования J. Сао и др. [84] освещение цыплят-бройлеров зеленым светом способствует росту птицы до 26 дней, а синий свет усиливает рост на более поздней стадии развития. Перспективным направлением в области освещения птичников является применение систем освещения с комбинированным излучением источников разного спектрального распределения [178; 185].

1.2.4 Коррелированная цветовая температура

Представленные выше исследования описывали влияние монохроматического света. Однако, на практике наибольшее распространение для освещения птичников получили энергоэффективные источники белого света, характеризующиеся широким спектральным распределением оптического излучения [20].

Основной характеристикой цветности источников белого света является коррелированная цветовая температура, описываемая в соответствии с ГОСТ 23198–2021 как температура излучателя Планка (T_c), имеющего координаты цветности, наиболее близкие к координатам цветности, соответствующим спектральному распределению рассматриваемого объекта (рис. 1.3). Естественным источником белого света является Солнце, спектральное распределение которого на земной поверхности близко к спектру излучателя Планка такой же КЦТ [61].

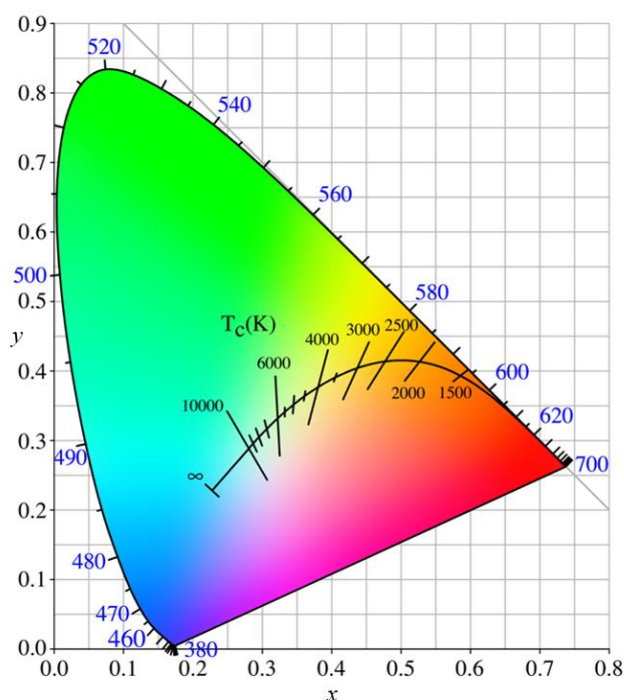


Рисунок 1.3 – Цветовая диаграмма МКО 1931 г. с нанесенной кривой излучения Планка

Долгое время в качестве источников белого света для освещения птичников применяли лампы накаливания и люминесцентные лампы [132], характеризующиеся длинноволновым и узкими линейчатыми спектрами оптического излучения [20; 29]. Влиянию их КЦТ на организм птицы не отдавали должного внимания.

Существенным стимулом к изучению влияние КЦТ оптического излучения на поведение, жизнеспособность и показатели продуктивности птицы послужило широкое применение в птицеводстве источников белого света на основе светодиодов [38]. КЦТ таких источников света по оттенку излучения можно условно классифицировать на источники белого теплого (около 3000 K), нейтрального (около 4000 K) и холодного (около 5700 K) света [78; 15].

По данным исследований А. Perretti и др. [170], применение светодиодного освещения белого света при выращивании цыплят-бройлеров оказалось эффективнее по сравнению с зеленым и синим. Результаты исследований [160; 169; 193; 179; 116] показывают, что для повышения продуктивности цыплят-бройлеров эффективно применения светодиодного освещения белого холодного света. В частности, по данным G. S. Archer [160], применение освещения с КЦТ равной 5000 K по сравнению с освещением с КЦТ равной 2700 K позволяет повысить живую массу птицы в возрасте 42 дней на 3,58 %, снизить коэффициент конверсии корма на 4,55% и повысить стрессоустойчивость птицы. В исследованиях Н. А Olanrewaju и др. [179] по сравнению с освещением светодиодами другими источниками и оттенками белого света повышение живой массы цыплят-бройлеров составляет до 4,4%, а снижение коэффициента конверсии корма до 2,7 %. Вместе с этим подчеркивается, что применение светодиодного освещения с КЦТ равной 5000 K показало наилучшие результаты на протяжении всего периода выращивания.

При содержании яичной птицы эффективным является освещение белым теплым светом [50; 110; 117]. А. А. Дубровский и В. В. Смирнова [50] утверждают, что от КЦТ источников света напрямую зависит уровень яичной продуктивности птицы, темпы роста, вес и состояние здоровья взрослых кур и петушков.

Известно, что поведенческие предпочтения птицы в спектре освещения изменяются в течении светового периода и возраста птицы [181; 191; 194]. Например, по данным исследований D. Senaratna и др. [191], показано, что для цыплят-бройлеров в течении светового предпочтительнее белый свет (широкого спектра) и красный свет (длинноволновой) при включении освещения. В этом контексте стоит отметить, что естественный солнечный свет на земной поверхности по своей

природе является динамическим и в течении дня плавно изменяется как по световому потоку – уровню освещенности, так и по спектральному составу – КЦТ. На рассвете или закате (рис. 1.5) солнечный свет имеет белый теплый оттенок (с доминирующей составляющей длинноволнового излучения), а в полдень – белый холодный (с большей составляющей коротковолнового) излучения [49].

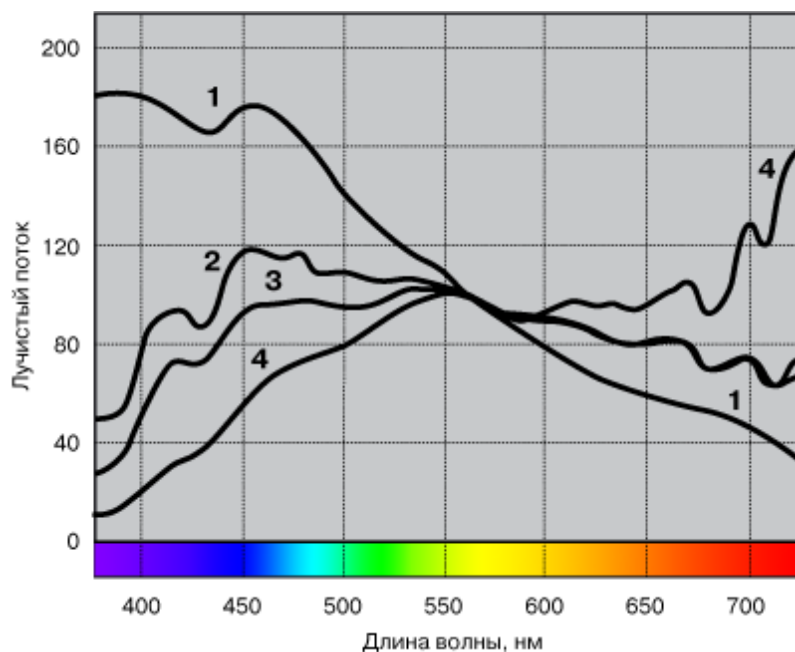


Рисунок 1.4 – Нормированные спектральные распределения различных фаз солнечного света, где 1 – неба в зените, 2 – неба полностью покрытого облаками
3 – прямого солнечного света в полдень; 4 – прямого солнечного света за один час до заката [49]

Плавное изменение КЦТ источников света в течении периода освещения нашло отражение в современной концепции динамического освещения HCL (Human Centric Lighting), в основе которой лежит гармонизация уровня освещенности и КЦТ искусственного света с циркадными ритмами человеческого организма. Чаще всего для реализации концепции HCL диапазон изменения КЦТ находится составляет от 2800 до 5500–6000 К [78], советуящий изменению характеристик солнечного света на земной поверхности в условиях ясного неба. При моделировании солнечного света с помощью светодиодов основную долю в результирующем спектре берут на себя светодиоды белого теплого и холодного света [82]. Математическое описание влияние изменение характеристик солнечного света в

течении дня на циркадные ритмы человеческого организма представлено в работах А. В. Леонидова [71; 72].

Искусственное освещение, моделирующее естественный солнечный свет, нормализует поведение, улучшает показатели обмена и способствует повышению показателей продуктивности птицы [151; 155; 158; 164; 165; 178; 199]. Например, по данным исследования L. Galosi [165], использование светодиодной системы динамического освещения Nature Dynamics System позволяет повысить в живую массу цыплят-бройлеров на 4,9 %.

По данным исследования А. Ш. Кавтарашвили и др. [109], применение светодиодного освещения с трехкратным чередованием периодов света с использованием белого теплого (с КЦТ равной 3000 К) и/или холодного (с КЦТ равной 5000 К) света по определенному сценарию по сравнению с постоянным освещением белым теплым светом для кур-несушек позволило повысить их яйценоскость на 4,6 %, массу яиц – на 1,8 %, выхода яичной массы – на 6,3%, выхода яиц высшей, отборной и первой категории – на 1,0; 2,7 и 1,1 % при снижении затрат корма на 10 яиц и 1 кг яичной массы на 1,4 и 3,0 %.

В исследовании центра передового опыта птицеводства США, проводимом D. J. Aldridge и др. [158], оценивалось влияние светодиодного освещения белого теплого и холодного света на продуктивность и поведение цыплят-бройлеров. По результатам исследований выявлено, что при применении освещения с размещением в двух зонах клетки отдельных светильников с разными КЦТ оптического излучения равными 2700 К и 5000 К наблюдается наибольшая живая масса птицы перед убоем в двух независимых исследованиях (2,954 кг и 3,240 кг) по сравнению с освещением бройлеров только белым теплым (2,816 кг и 3,110 кг) или холодным (2,867 кг и 3,164 кг) светом; при этом влияние КЦТ на коэффициент конверсии корма было незначительным. Перемещение птицы между белым теплым и холодным светом в течении дня совпадает с динамикой естественного солнечного света: цыплята-бройлеры инстинктивно отдавали предпочтение нахождению при освещении с КЦТ равной 2700 К в начале и конце светового периода, а в остальные часы освещению с КЦТ равной 5000 К [157].

Близким по сущности является отечественный способ содержания сельскохозяйственной птицы при светодиодном динамическом освещении [94], в котором в течение светового периода осуществляют плавное изменение КЦТ оптического излучения от 2000–2800 К, что соответствует естественному солнечному излучению при рассвете или закате, до 5500–6500 К, что соответствует полуденному солнечному излучению в условиях ясного неба, способствующий повышению показателей продуктивности птицы, в частности, за счет плавного воздействия на циркадные ритмы [174; 176]. По мнению авторов работы [178], светодиодное освещение, повторяющее динамику естественного солнечного света, обладает высоким потенциалом для повышения жизнеспособности и благополучия цыплят-бройлеров, способствуя повышению их живой массы и нормализации поведения, оказывая эффект подобный светотерапии.

1.3 Технологии искусственного освещения при клеточном содержании сельскохозяйственной птицы

В современных условиях интенсивного сельскохозяйственного производства России широко используется клеточная технология содержания сельскохозяйственной птицы, позволяющая увеличить эффективность производства [32; 100; 133]. По данным исследования В. Галкина [32], при клеточной технологии выращивания цыплят-бройлеров в сравнении с напольной технологией живая масса птицы увеличивается на 0,5–5,2 %, выход мяса с одного метра полезной площади птичника – в 3 раза, прибыль с одного метра площади птичника – в 3,8–4,1 раза, рентабельность производства мяса – на 8,3–10,8 % при одновременном снижении расхода корма на 1 кг живой массы на 7,3–10,7 %, срока выращивания птицы на 2,5 дня и себестоимости 1 кг мяса на 12,5–16,2 %.

В птицеводстве до 50 % всех затрат электроэнергии приходится на искусственное освещение [17]. В качестве источников света применяют лампы накаливания, люминесцентные лампы низкого давления и светодиоды. Наибольшее распространение в связи с высокой световой отдачей, длительным сроком службы, простотой управления потоком излучения и экологичностью и другими преимуще-

ствами [124] получили современные светодиодные источники света [39; 118; 178]. По данным работы Д. В. Гладина, А. Ш. Кавтарашвили [38], по состоянию на 2022 г. более 70 % птицеводческих предприятий России использовали светодиодное освещение. Применение светодиодного освещения позволяет снизить расход электроэнергии до 9 раз (по сравнению с лампами накаливания) [25] и оказать положительное влияние на показатели продуктивности сельскохозяйственной птицы [39; 41; 75; 118].

По расположению источников света при клеточном содержании птицы выделяют следующие виды освещения: общий (традиционный), местный (локальный) и комбинированный. При общем освещении светильники обычно располагаются в технологических проходах между клеточными батареями (рис. 1.5).



а



б

Рисунок 1.5 – Освещение птичников с клеточным содержанием птицы с расположением линейных светильников в технологических проходах:

а – горизонтально; б – вертикально

Одним из недостатков клеточной технологии содержания птицы является сложность в создании одинаковой освещенности на разных ярусах клеточной батареи [17], что снижает однородность поголовья, может выступать фактором хронического стресса и оказывать негативное влияние на поведение, жизнеспособность и показатели продуктивности птицы [102]. Для оценки равномерности освещения в птичнике используются различные критерии [33; 86; 108; 147].

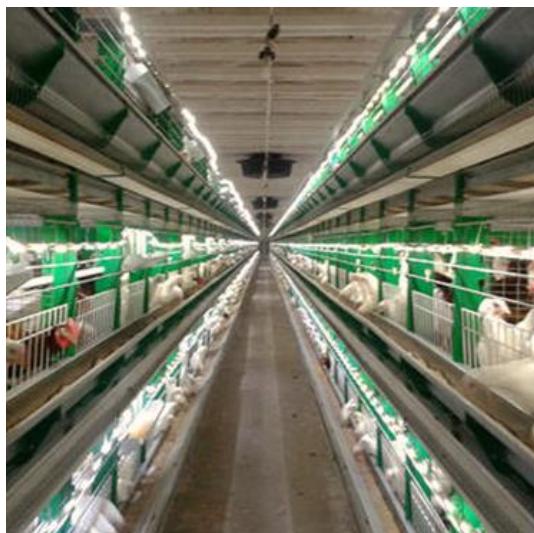
При общем освещении с горизонтальным расположением линейных светильников (рис. 1.5, а) сложно создать одинаковую освещенность на разных ярусах клеточной батареи. По данным исследований И. М. Новоселова [86], Н. В. Коняева и др. [88], средняя освещенность кормового желоба четырехъярусной клеточной батареи соответствует требуемому значению только во втором ярусе, а разница в уровнях освещенностей первого и последнего яруса может достигать 7 раз. Использование светодиодных светильников позволяет повысить равномерность распределения освещенности по ярусам клеточной батареи, но приводит к снижению равномерности вдоль яруса, что, по результатам исследований Д. В. Гладина, А. Ш. Кавтарашвили и др. [35; 102], для создания высокого уровня равномерности требует уменьшения расстояния между светильниками в ряду примерно в два раза.

Вертикальное расположение линейных светильников в технологических проходах птичника (рис. 1.5, б) ухудшает равномерность распределения освещенности освещения на дне кормушки (из-за перекрытия светового потока кормовым желобом) и распределение освещенности вдоль клеточной батареи, оказывает слепящий эффект на птицу, создает неудобства для обслуживающего персонала [88].

Равномерность распределения освещенности при общем освещении может быть повышена путем изменения формы кривой силы света КСС светодиодных светильников с помощью специальных линз или расположения светодиодов под углами [59; 93; 97]. И. М. Новоселовым, Н. П. Кочетковым [98] и Т. Р. Галлямовой, Т. А. Широковой [96] предложены конструкции светодиодных светильников, в которых светодиоды располагаются под углами по форме полуцилиндра, что позволяет концентрировать световой поток источника света для каждого яруса. Однако их применение существенно повышает стоимость светильника, требует адаптации светильника к параметрам птичника и клеточных батарей, а освещенность дна кормушки верхних ярусов по-прежнему остается недостаточной.

Перспективным способом повышения равномерность распределения освещенности в птичнике является применение локального светодиодного освещения [102; 39; 38]. При таком освещении светильники небольшой мощности (до нескольких ватт) могут располагаться над кормовым желобом (рис. 1.6, а) или непосред-

ственно в клетке над кормушкой, поилкой (рис. 1.6, б), что позволяет избавиться от неравномерности освещения по ярусам клеточной батареи, хотя не всегда гарантирует высокую равномерность освещения вдоль клеточной батареи, кормового желоба. Основным недостатком применения систем локального светодиодного освещения является его высокая стоимость (примерно в два раза дороже общего).



а



б

Рисунок 1.6 – Локальное освещение клеток для содержания птицы с расположением светильников: а – над кормовым желобом; б – внутри клетки

Эффективность систем локального светодиодного освещения с точки зрения положительного влияния на повышение показателей продуктивности птицы и снижения энергопотребления неоднократно подтверждалась отечественными и зарубежными исследованиями [13; 39; 75; 101; 183; 200; 202]. Например, по данным исследования А. А. Бахарева, С. С. Александровой [13], применение локального светодиодного освещения белого света по сравнению с общим освещением люминесцентными лампами белого света и лампами зеленого света типа «Орион», позволило повысить живую массу цыплят-бройлеров перед убоем на 7,11 % без негативного влияния на коэффициент конверсии корма, что в частности позволило снизить себестоимость 1 кг живой массы на 16,94 %. По данным работы [19], локальное светодиодное освещение по сравнению с общим освещением люминесцентными лампами способствует снижению электроэнергии на освещение в три раза.

1.4 Технические средства систем локального светодиодного освещения для клеточного содержания сельскохозяйственной птицы

На отечественном и зарубежном рынках используются системы локального светодиодного освещения птичников компаний: «Техносвет Групп», «Гелан», «Микроэл», «Лаборатория Интеллект», «Big Dutchman», «НАТО Agricultural Lighting», «Hontech-Wins» и др. [125]. Структура одной из широко распространенных отечественных систем локального освещения, представлена на рис. 1.7.

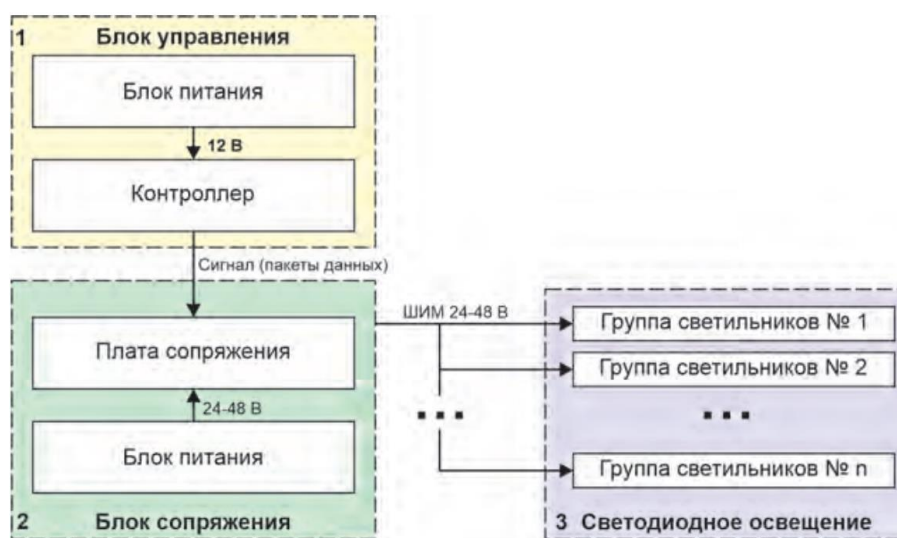


Рисунок 1.7 – Структура системы светодиодного освещения птичников компании «Техносвет Групп» [142]

Существующие системы локального светодиодного освещения птичников состоят из светильников, котроллера управления освещением с программой управления, источников питания, плат управления (сопряжения), питающих проводников (рис. 1.7), а также могут снабжаться датчиками освещенности для контроля и поддержания требуемой освещенности в помещении [129; 142].

Контроллеры освещения предназначены для автоматического или ручного управления параметрами освещения и режимом освещения, в соответствии с принятой программой освещения птицы. Эргономичность управления и эффективность системы освещением во многом зависят от качества программы управления [112]. Важной функцией системы управления освещением является «рассвет-закат», позволяющая плавно изменять уровень освещенности в течении заданной продолжительности времени, что снижает стрессовое воздействие света на орга-

низм птицы, вызванное резким включения и отключения источников света [2; 21].

В системах локального светодиодного освещения птичников контроллер освещения может представлять собой отдельное специализированное устройство (рис. 1.8) или быть в программном составе контроллера управления микроклиматом. Контроллер освещения также может быть реализован на базе общепромышленного программируемого логического контроллера [12; 112], а также обладать дополнительными интерфейсами для подключения к внешним устройствам.



Рисунок 1.8 – Контроллеры управления освещением птичника

Главной задачей платы управления является формирование ШИМ-сигналов управления световыми потоками светильников по сигналам, поступающим от контроллера освещения. Плата управления обычно реализуется на базе микроконтроллера [142]. В качестве источников постоянного напряжения используют импульсные блоки питания или трансформаторы с выпрямителем.

Частота и разрядность ШИМ-сигнала управления световым потоком светодиодного светильника может является дополнительным стресс-фактором для птицы. Исследования А. Ш. Кавтарашвили др. [58] показывают, что негативное влияние на зоотехнические показатели птицы отсутствуют при частоте изменения светового потока свыше 488 Гц. Шилов С. М. [153] утверждает, что частота пульсаций 900 Гц и более не воспринимается птицей.

Разрядность ШИМ-сигнала оказывает существенное влияние на плавность управления потоком излучения. Высокая разрядность (около 16 бит) может приводить к искажениям формы ШИМ-сигнала, а разрядность менее 10-ти бит – к «ступенчатому» изменению световых потоков светильников [115]. В существующих системах светодиодного освещения птичников частота ШИМ-управления

световым потоком находится в пределах 0,5–2,0 кГц, а разрядность – 8–16 бит.

В процессе эксплуатации освещенность в птичнике может существенно отличаться от заданной величины из-за запыленности светильников, изменений фоновой освещенности в помещении, снижения светового потока, вызванного деградацией светоизлучающего кристалла светодиода, изменения величины питающего напряжения и температуры активной области светодиода. Это требует коррекции уровня освещенности, которая может реализована на программном уровне с применением цифровых ПИД-регуляторов и датчиков освещенности [11; 12; 112; 159]. По данным работы И. А. Барановой, Т. А. Широбоковой и И. М. Новоселова [12], за счет их применения можно снизить затраты электроэнергии до 10 %.

Несмотря на эффективность использования ПИД-регуляторов с обратной связью по освещенности, виду сложностью их настройки, должного распространения в системах программного управления освещенностью птичников они не получили. В таких системах даже небольшое отклонение параметров регулятора от оптимальных приводит к возникновению пульсаций светового потока светильников со значительным перерегулированием, работе колебательном режиме [28].

Светильники существующих систем локального светодиодного освещения птичников различаются по ряду конструктивных параметров и технических характеристик (рис. 1.9). Результаты обзора основных параметров и характеристик применяемых на практике светильников, представлены в табл. Б.1.

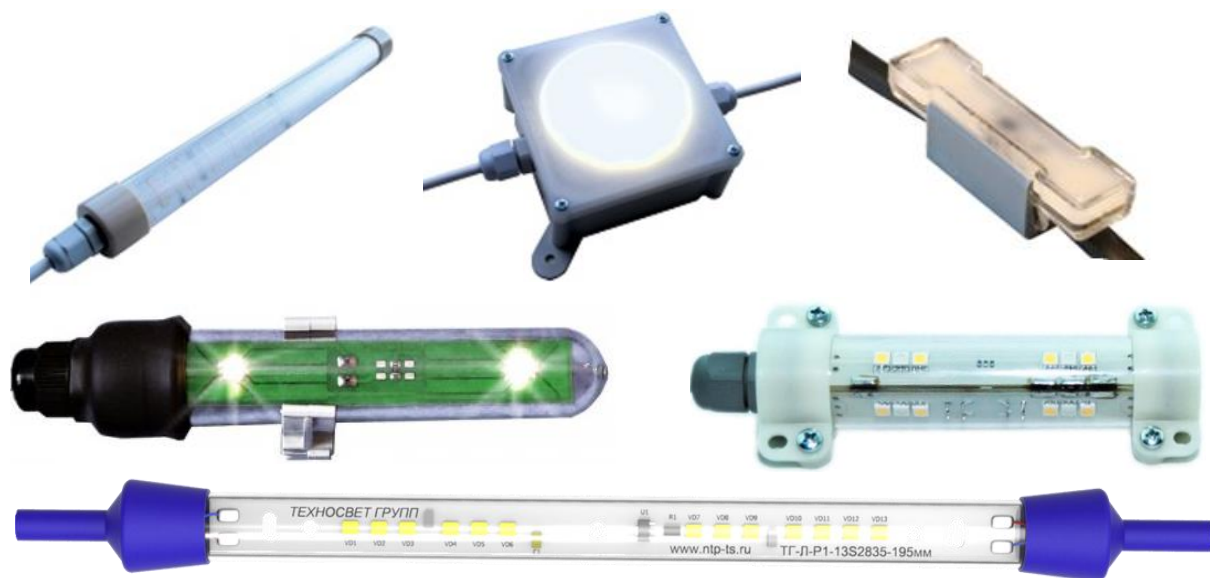


Рисунок 1.9 – Светильники систем локального освещения птичников

Потребляемая электрическая мощность светильников обычно не превышает 6,7 Вт (табл. Б.1). Степень защиты от попадания пыли и влаги составляет IP66 и выше. Кривые силы света светильников в основном соответствуют косинусному типу, что является характерным для пространственного светораспределения светодиода [15]. Напряжение питания светильников составляет от 24 до 48 В постоянного тока. Низкое напряжение питания способствует повышению уровня электробезопасности [40], в частности, при нем могут отсутствовать меры защиты от косвенного прикосновения [107].

Широкое распространенным вариантом конструктивного исполнения локальных светодиодных светильников для птичников является его изготовление на основе поликарбонатных труб-рассеивателей (рис. 1.9), что обусловлено их невысокой стоимостью, высоким коэффициентом светопропускания, механической прочностью и стойкостью к воздействию паров аммиака, моющих и дезинфицирующих растворов. Помимо поликарбонатной трубы-рассеивателя в состав такого светильника входят печатная плата со светодиодами и элементами их электропитания, заглушки и герметичные кабельные вводы.

Основным цветом оптического излучения локальных светодиодных светильников является белый с постоянной КЦТ излучения (табл. Б.1). В качестве источников света используют энергоэффективные люминофорные светоизлучающие диоды (СИД) с потребляемой мощностью до 0,5 Вт. Спектральное распределение излучений таких светодиодов (рис. 1.10) состоит из двух выраженных максимумов – излучения кристалла и переизлучения люминофора [20].

В некоторых локальных светильниках (табл. Б.1) имеется опциональная возможность переключения на один из дополнительных цветов излучения (обычно красный или синий), реализуемая встречно-параллельным включением светодиодов разного цвета и сменой полярности источника питания или организацией отдельных линий их электропитания. Ведутся разработки светильников с изменяемым спектром излучения использованием многокомпонентных RGB и RGBW-светодиодов [21; 113; 182].

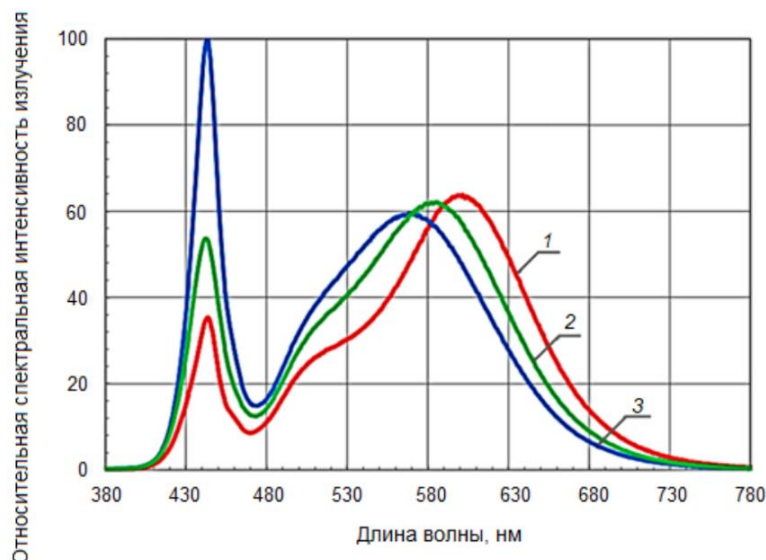
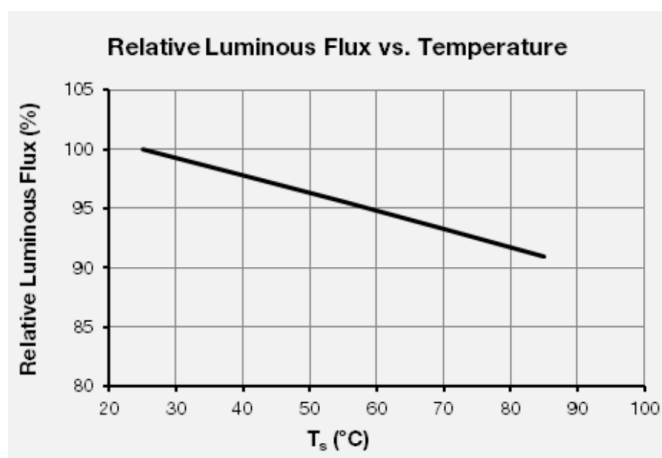


Рисунок 1.10 – Относительное спектральное распределение белого светодиода:

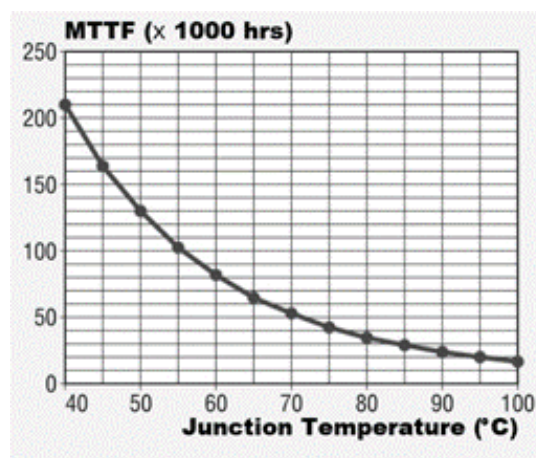
1) теплого света; 2) нейтрального света; 3) холодного света [78]

Отсутствие возможности плавного изменения КЦТ (спектра) оптического излучения локальных светильников ограничивает биологический эффект от освещения, в частности – на привесы живой массы цыплят-бройлеров [158; 165; 178].

Световой поток светодиодов для управления освещенностью изменяется в режиме ШИМ. При этом следует учитывать, изменение тепловой мощности выделяемой на р-п-переходе СИД, а, следовательно, и его температуры, оказывающей влияние на почти все рабочие характеристики [84; 85]. На рис. 1.11 представлены некоторые температурные зависимости СИД компании «Samsung LED».



а



б

Рисунок 1.11 – Температурные зависимости светодиодов:

а – относительного светового потока [163]; б – срока службы [55]

Повышение температуры активной области светодиода, в частности снижает его световой поток (рис. 1.11, а), прямое падение напряжение, срок службы (рис. 1.11, б) и изменяет координат цветности. Например, для светодиодов LM561B Plus увеличение действующего тока в два раза, повышает выделяемую в нем тепловую мощность примерно в 2,42 раза [154]. Хотя полупроводниковый кристалл может работать до 120 °С для обеспечения высокой эффективности и длительного срока службы желательно не превышать температуру активной области светодиода более 80 °С [27].

Поскольку светодиод является токовым полупроводниковым прибором, то его питание корректно осуществлять от источника тока [140], т.е. необходимо обеспечивать стабилизацию тока, протекающего через СИД, с заданной точностью. С этой целью могут применяться линейные и импульсные светодиодные драйверы [74; 203; 204]. В существующих системах локального светодиодного освещения птичников в основном используются светильники с индивидуальными линейными светодиодными драйверами [36], а управление их световыми потоками осуществляется путем ШИМ-регулирования питающего напряжения [39].

Несмотря на то, что питание цепочек светодиодов светильника следует производить источником стабилизированного тока, в системах локального освещения птичников для ограничения величины тока СИД на практике часто используют резисторы, включенные в последовательную цепь со светодиодами [36]. Такое подключение, в совокупности большой протяженностью и высокими потерями напряжения в линии электропитания светильников, приводит к разнице их световых потоков в начале и конце питания. Разность световых потоков может достигать двух и более раз, что снижает равномерность распределения освещенности на ярусе клеточной батареи.

Более эффективным вариантом исполнения линейного светодиодного драйверов для питания СИД локального светильника птичника являются линейные светодиодные драйверы, выполненные на базе микросхемы регулируемого линейного стабилизатора напряжения LM317 и ее аналогов, работающих в режиме ограничения тока (рис. 1.12) [36].

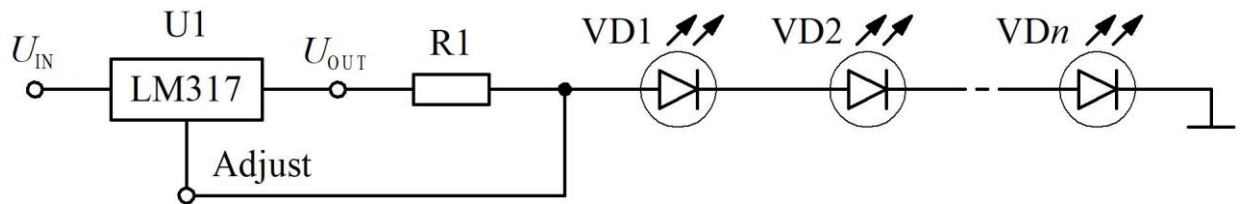


Рисунок 1.12 – Применение микросхемы LM317 в режиме ограничения тока для питания светодиодов

Использование микросхемы LM317 и ее аналогов для ограничения тока светодиодов (рис. 1.12) характеризуется высокой точностью и простотой реализации. К недостаткам применения подобных микросхем относятся: относительно небольшая величина максимального входного напряжения (до 40 В), дополнительные потери на токоизмерительном резисторе и микросхеме (не менее 2,5 В), необходимость использования внешнего ШИМ-регулятора для управления световым потоком светодиодов.

В существующем подходе к проектированию локальных светильников, количество СИД ограничивается напряжением источника питания, в то время как требуемый световой поток отходит на второй план. Максимальная величина светового потока светильника задается путем ограничений прямого тока цепочки последовательно подключенных светодиодов или их отдельных кристаллов, а управление световыми потоками светильников осуществляется путем ШИМ-регулирования питающего напряжения [39]. Например, для светильника СК170-Т(Х) с напряжением питания 48 В количество белых светодиодов с одним р-п-переходом составляет 13 шт. (табл. А.1), хотя для создания требуемого светового потока светильника достаточно от 2 до 4 шт. Это, в совокупности с использованием светодиодных драйверов для каждого светильника, существенно повышает его стоимость.

Параллельное подключение относительно источника питания большого количества светильников к одной линии электропитания повышает ее общий ток, что в комплексе со значительной протяженностью питающих проводников, приводит к высоким потерям напряжения. По данным работы [36], даже при напряжении питания 48 В и применении питающего проводника с медными жилами сечением

2,5 мм² напряжение, подводимое к последнему в группе из 48 светильников, составляет 40,3 В. В работе В. В. Боцмана [108] сообщается, что потери в проводниках светодиодной осветительной сети на 15–20 % выше, чем при использовании газоразрядных ламп.

Л. Ю. Юфревым и А. А. Михалевым [80] с целью повышения эффективности систем светодиодного освещения птичников предложено использование резонансной системы электропитания светильников, но его применение при локальном освещении экономически нецелесообразно. Помимо этого, нерациональным является снижение потерь путем увеличения сечения питающих светильники проводников, поскольку доля стоимости кабельно-проводниковой продукции в общей себестоимости систем освещения птичников может достигать 30–35 % [36]. Поэтому в существующих системах локального светодиодного освещения приходится мириться с большими потерями в электросети.

Реализовать плавное изменения КЦТ оптического излучения локальных светодиодных светильников, снизить потери электроэнергии в линиях питания светильников и светодиодном драйвере, уменьшив требуемое сечение жил питающего кабеля и снизить капитальные затраты на систему освещения возможно за счет применения групповой стабилизации тока с последовательным подключением светильников и систем программного управления параметрами динамического освещения в птичнике. Перспективными для этих целей являются источники стабилизированного тока на основе схем токовых зеркал [63; 73; 138], характеризующиеся широким диапазоном регулирования тока и питающих напряжений, а также простотой реализации в многоканальном исполнении.

1.5 Выводы и задачи исследований

Проведенный обзор и анализ существующих систем локального светодиодного освещения птичников позволил сделать следующие выводы:

1. Фотобиологическое воздействие света на организм сельскохозяйственной птицы характеризуется зрительными и незрительными механизмами, связанными с циркадными ритмами главным образом посредством гормона-регулятора –

мелатонина. Циркадные ритмы эволюционно обусловлены циклическими изменениями оптической части солнечного излучения на земной поверхности. Несоответствие эндогенного и экзогенного компонента циркадных ритмов негативно сказывается на жизнеспособности, показателях продуктивности и благополучии птицы.

2. Цыплят-бройлеров выращивают с применением постоянных и прерывистые режимов освещения симметричного типа при освещенности от 5 до 20–40 лк, дифференцированных от возраста птицы. Спектральное распределение, КЦТ оптического излучения и их изменение в течении светового периода оказывают существенно влияние на показатели продуктивности птицы. Путем плавного изменения уровня освещенности и КЦТ в течении светового периода, в соответствии с динамикой естественного солнечного света на земной поверхности, можно создать благоприятную искусственную световую среду, снизить стрессовое воздействие света на организм птицы и нормализовать ее поведение, что позволяет повысить живую массу цыплят-бройлеров перед убоем на 2,4–4,9 %, а также уменьшить потребляемую электроэнергию без негативного влияния на коэффициент конверсии корма или небольшом (до 3,9 %) его снижении.

3. Среди технологий искусственного освещения при клеточном содержании птицы наиболее эффективным является способ локального светодиодного освещения, позволяющий по сравнению с системой общего освещения повысить равномерность распределения освещенности на ярусах клеточной батареи, однородность поголовья и живую массу цыплят-бройлеров до 7 % при снижении потребляемой электроэнергии примерно до трех раз.

4. Существующие системы локального светодиодного освещения птичников с клеточным содержанием птицы не полностью используют биологический эффект от освещения и обладают невысокой технической эффективностью. Реализовать плавное изменение светового потока и КЦТ оптического излучения локальных светодиодных светильников в широком диапазоне от 2700–3000 К до 5000–6500 К, повысить эффективность их системы электропитания на 16 % и выше можно за счет применения многоканального высоковольтного светодиодного драйвера и систем программного управления параметрами динамического освещения.

На основании проведенного анализа и сделанных выводов для достижения поставленной цели были сформулированы основные **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 изменения 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.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАЗРАБОТКИ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ЛОКАЛЬНОГО СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

2.1 Анализ математических моделей изменений естественной освещенности и КЦТ солнечного света в течение дня

Солнечное излучение на земной поверхности в видимой области спектра содержит прямую и рассеянную составляющие, которые определяются астрономическими, географическими и метеорологическими факторами [34; 42; 69]. Процессы рассеяния солнечного излучения в земной атмосфере описываются законами Рэлея, Ми, Бугера – Ламберта – Бера, Тиндаля. Для математического описания зависимости изменения суммарной естественной освещенности E_S на земной поверхности в течении дня $E_S = f(t)$ могут быть использованы различные модели [7; 42; 70; 161; 187]. В основе большинства моделей лежит зависимость освещенности от высоты h Солнца над горизонтом, связанной с местным временем t [69], и коэффициента оптической толщины атмосферы τ_0 , характеризующей ее прозрачность [42], с учетом влияния альбедо и рельефа поверхности местности [34].

Зависимость $E_S = f(h)$ в произвольные сутки года при любом состоянии атмосферы может быть описана известной периодической моделью вида [70]:

$$E_S = 0,5E_{v,ES} [\sin(ah + b) + 1], \quad (2.1)$$

где $E_{v,ES}$ – среднее значение естественной освещенности земной поверхности на экваторе при нормальном падении солнечного излучения в полдень в дни весеннего и осеннего равноденствий, лк;

a и b – коэффициенты, зависящие от вида облачного покрова и степени перекрытия неба облаками, о.е. и рад.

Определение E_S по математической модели (2.1) для заданных географических координат может обладать невысокой точностью, так как основывается на экспериментальных данных, представленных в трудах 1945 г. [152], которые не учитывают произошедшие с того момента свето-климатические изменения.

Зависимость изменения энергетической освещенности E_{S*} в течении дня в условиях ясного неба может быть описана периодической функцией с применением экспоненциальной модели [7]:

$$E_{S*} = E_* \sin h \left[e^{-\tau_0 \operatorname{cosec} h} + \frac{1 - e^{-\tau_0}}{2} (1 - e^{-\tau_0 \operatorname{cosec} h}) \right] \quad (2.2)$$

где E_* – энергетическая освещенность на границе с атмосферой, Вт/м².

Модель (2.2) разработана для применения при ведении аэрокосмической съемки и имеет сложное математическое описание, которое требует определения коэффициента τ_0 для заданных географических координат и условий наблюдений.

Относительной простотой применения для описания зависимости $E_S = f(h)$ в условиях ясного неба обладает степенная модель вида [42]:

$$E_S = a(\sin h)^b, \quad (2.3)$$

где a и b – коэффициенты модели, определяемые в зависимости от периода года и аэрозольной оптической толщины атмосферы, клк и о.е.

Модель (2.3) основывается на экспериментальных данных, полученных для географических координат г. Москвы. Для расчета в других условиях и географических координатах необходимо определение аэрозольной оптической толщины атмосферы и уточнения коэффициентов a и b . В связи с недостаточной точностью данную модель рекомендуется применять при $h > 15^\circ$.

Известно, что в условиях ясного неба изменение аэрозольной оптической толщины атмосферы в три раза приводят к изменению суммарной освещенности примерно на 5 %, а основным фактором модели, определяющим уровень E_S , выступает высота h [42]. Допущение о незначительном влиянии оптической толщины атмосферы используется в математической модели зависимости $E_S = f(h)$ [196]:

$$E_S = \frac{1}{a} \ln \left\{ \frac{h}{h_{\text{MAX}}} (e^a - 1) + 1 \right\}, \quad (2.4)$$

где a – коэффициент по максимальной освещенности, о.е;

$h_{\text{MAX}} = 0 \dots 90^\circ$ – высота Солнца над горизонтом в момент верхней кульминации (солнечного полдня).

Эмпирическая модель (2.4) предназначена для определения относительной

величины освещенности в направлении Солнца. Использование логарифмической формы модели обусловлено законом Вебера – Фехнера. Коэффициент a модели зависит от максимального уровня освещенности, наблюдаемого при h_{MAX} .

Математическое описание зависимости коррелированной цветовой температуры CCT_s солнечного света вблизи земной поверхности в течение дня для заданной географической точки провести затруднительно. Имеющиеся литературные данные [43; 49; 68], плохо согласуются по географическим широтам и времени наблюдений, недостаточно информации о характеристиках наблюдаемой местности. Результаты экспериментальных исследований [23; 45] для математического описания зависимости $CCT_s = f(t)$ применимы лишь частично из-за влияний затмения приемной поверхности и отражения излучения, о чем свидетельствует несимметричная форма графиков относительно солнечного полня. Тем не менее на основе выборки данных для ясного неба можно получить примерный диапазон изменения КЦТ в течении дня, составляющий от 2200–2900 К на рассвете или закате до 5400–6500 К и выше в полдень.

Процессы изменения КЦТ солнечного света в земной атмосфере, как и освещенности E_s , в течение дня описываются одинаковыми физическими законами. Следовательно, допуская на равнинной местности для ясного неба линейную взаимосвязь уровня естественной освещенности и КЦТ солнечного света, зависимость $CCT_s = f(t)$ может быть представлена в форме $CCT_s = f(E_s)$, описываемой следующим выражением [196]:

$$CCT_s = bE_s + c, \quad (2.5)$$

где b – коэффициент пропорциональности между естественной освещенностью и КЦТ солнечного света, К/лк или К/о.е.;

$c = 2200\text{--}2900$ К – коэффициент постоянной составляющей КЦТ, характеризующий КЦТ в момент восхода Солнца, К.

Коэффициенты b и c модели (2.5) зависят от характеристик рассматриваемой местности и времени. Для математического описания изменения естественной освещенности в течении дня целесообразно использовать модель зависимости

$E_S = f(h)$ в направления Солнца (2.4). При экспериментальном определении коэффициентов b и c это позволяет корректно учесть прямую составляющую солнечного излучения, поступающего на фоточувствительные элементы измерительного прибора.

Зависимость $h = f(t)$ в заданных географических координатах в рассматриваемые сутки года с высокой точностью может быть описана периодической функцией вида [196]:

$$h = (h_{\text{MAX}} - h_0) \cos[(t_{\text{MAX}} - t)2\pi/T] + h_0, \quad (2.6)$$

где $h_{\text{MAX}} = 0 \dots 90$ – высота Солнца над горизонтом в момент верхней кульминации (солнечного полдня), °;

h_0 – корректирующий коэффициент модели, °;

t_{MAX} – положительность времени от восхода Солнца до его полдня, ч;

$T = 24$ ч – продолжительность суток, ч.

Подставив выражение (2.6) в модель (2.4) получим математическую модель искомой зависимости $E_S = f(t)$:

$$E_S = \frac{1}{a} \ln \left\{ \frac{(h_{\text{MAX}} - h_0) \cos[(t_{\text{MAX}} - t)2\pi/T] + h_0}{h_{\text{MAX}}} (e^a - 1) + 1 \right\}. \quad (2.7)$$

С учетом выражения (2.7) математическая модель (2.5) может быть представлена в виде зависимости $CCT_S = f(t)$, имеющей следующий вид:

$$CCT_S = \frac{b}{a} \ln \left\{ \frac{(h_{\text{MAX}} - h_0) \cos[(t_{\text{MAX}} - t)2\pi/T] + h_0}{h_{\text{MAX}}} (e^a - 1) + 1 \right\} + c, \quad (2.8)$$

Модели (2.4), (2.7) и (2.5), (2.8) применимы при условии, что все коэффициенты и зависимая переменная – положительные числа. Для согласования полученных моделей естественно освещенности и КЦТ, требуется экспериментальное уточнение величин коэффициентов a , b и c для заданных географических координат и условий наблюдений. На основе уточненных математических моделей зависимостей можно разработать модели для управления параметрами динамического освещения в птичнике.

2.2 Математическое описание зависимости изменения КЦТ светильника от коэффициентов заполнений прямых токов светодиодов белого теплого и холодного света

В системе динамического освещения птичников для изменения освещенности и спектрального состава излучения локальных светодиодного светильников целесообразно использовать метод управления оттенками белого света [141]. Сущность метода заключается в использовании минимум двух белых светодиодов с разными КЦТ и отдельными каналами управления их световыми потоками [78]. Широкий диапазон изменения КЦТ оптического излучения с минимальным числом каналов управления может быть получен путем смешения световых потоков Φ_W и Φ_C светодиодов белого теплого и холодного света. При таком смешивании происходит линейное изменение цвета (рис. 2.1), что приводит к незначительному отклонению оттенка цвета от белого, возрастающее с повышением диапазона регулирования.

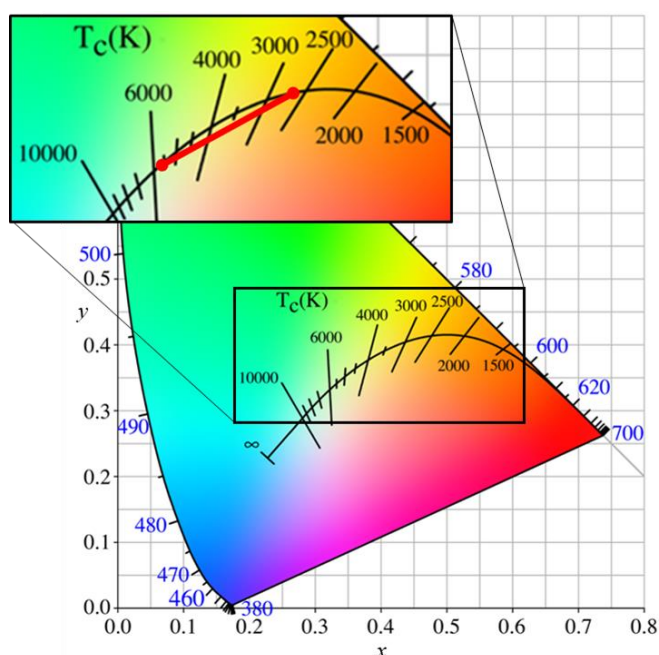


Рисунок 2.1 – Цветовая диаграмма МКО 1931 г. с нанесенной кривой излучения Планка и прямой смешения световых потоков светодиодов с номинальными КЦТ 2700 К и 5700 К

При одинаковых диаграммах пространственного светораспределения и близком расположении в светильнике СИД белого теплого и холодного света координаты цветности x и y на прямой смешения их световых потоков Φ_W и Φ_C могут быть

определены следующей системой уравнений [61]:

$$\begin{cases} x = \left(\Phi_{wO} \frac{x_w}{y_w} + \Phi_{cO} \frac{x_c}{y_c} \right) / \left(\frac{\Phi_{wO}}{y_w} + \frac{\Phi_{cO}}{y_c} \right); \\ y = (\Phi_{wO} + \Phi_{cO}) / \left(\frac{\Phi_{wO}}{y_w} + \frac{\Phi_{cO}}{y_c} \right), \end{cases} \quad (2.9)$$

где Φ_{wO} и Φ_{cO} – относительные световые потоки СИД белого теплого и холодного света;

x_w и y_w – координаты цветности СИД белого теплого света;

x_c и y_c – координаты цветности СИД белого холодного света.

Из системы уравнений (2.9) следует, что положение точки на прямой цветового смешения (рис. 2.1) при заданных координатах цветности светодиодов линейно зависит от соотношения световых потоков Φ_{wO} и Φ_{cO} . Однако КЦТ (CCT) смеси световых потоков как функция $CCT = f(x, y)$ изменяется нелинейно.

Расчет коррелированной цветовой температуры оптического излучения по известным координатам цветности возможен различными методами [57; 62; 111]. Одним из наиболее простых и удобных для практического применения является метод, предложенный Маком Ками, обеспечивающий хорошую точность вблизи кривой излучения Планка [57]. В соответствии с ним КЦТ оптического излучения вычисляется по уравнению [62]:

$$CCT = -449n^3 + 3525n^2 - 6823,3n + 5520,33, \quad (2.10)$$

где $n = f(x, y)$ – коэффициент, характеризующий угол наклона изотермической линии (рис. 2.1).

Коэффициент n определяется следующим уравнением:

$$n = (x - 0,3320) / (y - 0,1858). \quad (2.11)$$

Однако система уравнений (2.9) для вычисления x и y при фиксированных координатах цветности излучений светодиодов представляют собой выражения с двумя неизвестными величинами – Φ_{wO} и Φ_{cO} . В связи с этим введем в систему распространенное условие на равенство единице суммы относительных световых потоков СИД [62]:

$$\Phi_{wO} + \Phi_{cO} = 1. \quad (2.12)$$

Тогда путем задания одного из световых потоков в диапазоне от 0 до 1, можно произвести расчет координат цветности x и y .

При ШИМ-регулировании прямыми токами СИД, пренебрегая влиянием изменений их температур, световые потоки Φ_W и Φ_C определяются как [149]:

$$\Phi_W = k_{IW} I_{DW} = k_{IW} k_{DW} I_{AW}; \quad (2.13)$$

$$\Phi_C = k_{IC} I_{DC} = k_{IC} k_{DC} I_{AC}, \quad (2.14)$$

где k_{IW} и k_{IC} – коэффициенты пропорциональности между световым потоком и прямым током для СИД белого теплого и холодного света, лм/А;

I_{DW} и I_{DC} – действующие значения прямых токов СИД белого теплого и холодного света, А;

k_{DW} и k_{DC} – коэффициенты заполнения ШИМ-сигналов прямого тока для СИД белого теплого и холодного света, о.е.;

I_{AW} и I_{AC} – амплитуды ШИМ-регулирования прямого тока СИД белого теплого и холодного света, А.

Из условия сохранения неизменным светового потока светильника во всем диапазоне регулирования КЦТ оптического излучения следует:

$$\Phi_{W \text{ MAX}} = \Phi_{C \text{ MAX}}. \quad (2.15)$$

где $\Phi_{W \text{ MAX}}$ и $\Phi_{C \text{ MAX}}$ – максимальные световые потоки СИД белого теплого и холодного света, лм;

Световые потоки $\Phi_{W \text{ MAX}}$ и $\Phi_{C \text{ MAX}}$ из уравнений (2.13) и (2.14) (при $k_{DW} = k_{DC} = 1$) вычисляются как:

$$\Phi_{W \text{ MAX}} = k_{IW} I_{AW}; \quad (2.16)$$

$$\Phi_{C \text{ MAX}} = k_{IC} I_{AC}. \quad (2.17)$$

Тогда, с учетом выражений (2.16) и (2.17), уравнения (2.13) и (2.14) можно представить в виде:

$$\Phi_W = k_{DW} \Phi_{W \text{ MAX}}; \quad (2.18)$$

$$\Phi_C = k_{DC} \Phi_{C \text{ MAX}}. \quad (2.19)$$

При соблюдении условия (2.15) из уравнений (2.18) и (2.19) следует, что относительно световые потоки Φ_{WO} и Φ_{CO} будут определяться как:

$$\Phi_{WO} = k_{DW}; \quad (2.20)$$

$$\Phi_{CO} = k_{DC}. \quad (2.21)$$

Поэтому исходное условие (2.12) будет иметь следующий вид:

$$k_{DW} + k_{DC} = 1. \quad (2.22)$$

Последнее выражение позволяет перейти к одной переменной [162] k_{DWC} – коэффициенту заполнения управляющего ШИМ-сигнала, равного:

$$k_{DWC} = k_{DC} = 1 - k_{WC}. \quad (2.23)$$

Тогда уравнения (2.20) и (2.21) можно представить в виде системы:

$$\begin{cases} \Phi_{WO} = 1 - k_{DWC}; \\ \Phi_{CO} = k_{DWC}. \end{cases} \quad (2.24)$$

Подставив в исходную систему уравнений (2.9) систему (2.24), получим:

$$\begin{cases} x = \left[\frac{x_W}{y_W} + k_{DWC} \left(\frac{x_C}{y_C} - \frac{x_W}{y_W} \right) \right] / \left[\frac{1}{y_W} + k_{DWC} \left(\frac{1}{y_C} - \frac{1}{y_W} \right) \right]; \\ y = 1 / \left[\frac{1}{y_W} + k_{DWC} \left(\frac{1}{y_C} - \frac{1}{y_W} \right) \right]. \end{cases} \quad (2.25)$$

С учетом системы (2.25) формула (2.11) будет иметь следующий вид:

$$n = \frac{\left[\frac{x_W}{y_W} + k_{DWC} \left(\frac{x_C}{y_C} - \frac{x_W}{y_W} \right) \right] / \left[\frac{1}{y_W} + k_{DWC} \left(\frac{1}{y_C} - \frac{1}{y_W} \right) \right] - 0,332}{1 / \left[\frac{1}{y_W} + k_{DWC} \left(\frac{1}{y_C} - \frac{1}{y_W} \right) \right] - 0,1858}. \quad (2.26)$$

Примем за величину изменения коррелированной цветовой температуры ΔCCT повышение КЦТ от минимальной, определяемой координатами цветности СИД белого теплого света, значит:

$$\Delta CCT = CCT - CCT_W = CCT - a_0, \quad (2.27)$$

где CCT_W – КЦТ оптического излучения по каналу белого теплого света, К.

a_0 – коэффициент, характеризующий постоянную составляющую КЦТ, К.

Тогда при применении светодиодов с КЦТ, равными 2700 К и 5700 К с координатами цветности $x_W = 0,460$; $y_W = 0,411$ и $x_C = 0,328$; $y_C = 0,337$, расположенными на кривой излучения Планка [180], используя выражения (2.10), (2.26) и (2.27), получим кривую зависимости $\Delta CCT = f(k_{DWC})$, показанную на рис. 2.2.

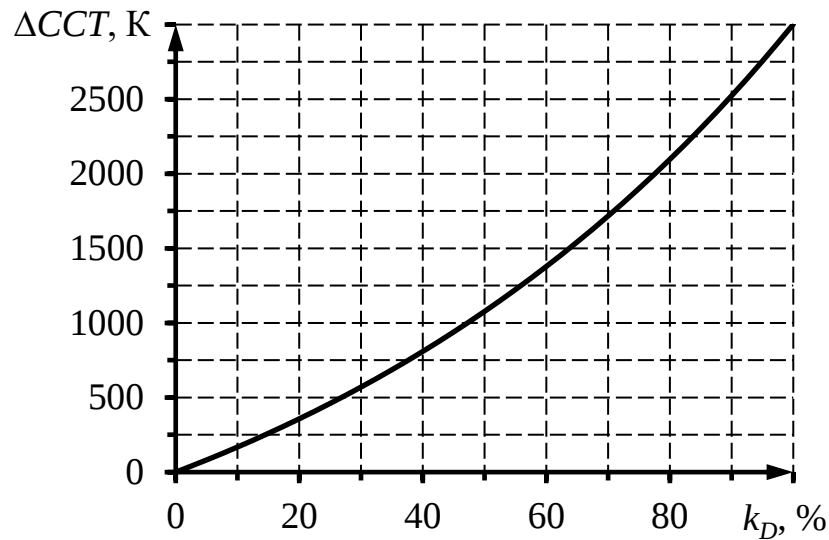


Рисунок 2.2 – Аналитический график зависимости $\Delta CCT = f(k_{DWC})$

Полученная зависимость (рис. 2.2) является нелинейной. Регрессионный анализ зависимости показал, что для ее аппроксимации с высокой точностью применимы кубическое или квадратное уравнения вида:

$$\Delta CCT = a_3 k_{DWC}^3 + a_2 k_{DWC}^2 + a_1 k_{DWC}; \quad (2.28)$$

$$\Delta CCT = b_2 k_{DWC}^2 + b_1 k_{DWC}, \quad (2.29)$$

где a_3, a_2, a_1, b_2, b_1 – коэффициенты регрессии моделей, К.

Выбор формы модели зависимости $\Delta CCT = f(k_{DWC})$ следует проводить с учетом диапазона изменения КЦТ и требуемой точности управления. Разработанные модели зависимостей (2.28) и (2.29) требуют экспериментального уточнения коэффициентов регрессии для разработанного локального светильника, поскольку в реальном светильнике необходимо учитывать отклонения параметров СИД (в том числе по световому потоку и координатам цветности) и их термозависимость, поглощение и отражение излучения материалами светильника [6; 44; 186].

2.3 Анализ методов определения рабочей температуры активной области светодиодов

Важной задачей при проектировании светодиодных светильников является определение рабочей температуры θ_J активной области светоизлучающего кристалла (р-п-перехода) светодиода [182; 189].

Температура θ_J в общем виде определится как:

$$\theta_J = \theta_A + \Delta\theta_J, \quad (2.30)$$

где θ_A – температура окружающей среды, °С.

$\Delta\theta_J$ – изменение температуры р-п-перехода СИД, вызванное его нагревом в процессе работы, °С.

Изменение температуры $\Delta\theta_J$ р-п-перехода светодиода при его токовом нагреве может быть вычислено по формуле [51]:

$$\Delta\theta_J = R_{\theta J-A} P_D, \quad (2.31)$$

где $R_{\theta J-A}$ – тепловое сопротивление между р-п-переходом СИД и внешней окружающей средой, °С/Вт;

P_D – тепловая мощность, отводимая от светоизлучающего кристалла, Вт.

Тепловая мощность P_D определяется как [10]:

$$P_D = (1 - \eta_{LED}) U_F I_D, \quad (2.32)$$

где η_{LED} – КПД (электроэнергия в свет) используемого СИД;

U_F – прямое падения напряжения на СИД, В;

I_D – действующее значение прямого тока СИД, А.

Тепловое сопротивление $R_{\theta J-A}$ может быть представлено в виде суммы отдельных тепловых сопротивлений элементов вдоль пути отвода тепла от р-п-перехода светодиода во внешнюю окружающую среду [104]. Для локального светодиода светильника для птичника, изготовленного с применением поликарбонатной трубы-рассеивателя и одним SMD-светодиодом на печатной плате без радиатора $R_{\theta J-A}$ будет определяться как:

$$R_{\theta J-A} = R_{\theta J-S} + R_{\theta S-PSB} + R_{\theta PSB-B} + R_{\theta B-C} + R_{\theta C-A}, \quad (2.33)$$

где $R_{\theta J-S}$ – тепловое сопротивление между р-п-переходом и точкой пайки СИД, °С/Вт;

$R_{\theta S-PSB}$ – тепловое сопротивление между точкой пайки СИД и печатной платой, °С/Вт;

$R_{\theta PSB-B}$ – тепловое сопротивление между печатной платой СИД и воздушной средой внутри светильника, °С/Вт;

$R_{\theta B-C}$ – тепловое сопротивление между воздушной средой внутри светильника и его корпусом, °C/Вт;

$R_{\theta C-A}$ – тепловое сопротивление между корпусом светильника и внешней окружающей средой, °C/Вт.

В общем виде тепловое сопротивление между отдельными элементами вычисляется по формуле [104]:

$$R_{\theta} = (\theta_1 - \theta_2) / P_D, \quad (2.34)$$

где θ_1 – температура в первой рассматриваемой точке, °C;

θ_2 – температура во второй рассматриваемой в точке, °C.

Тепловое сопротивление $R_{\theta PSB-A}$ между печатной платой и внешней окружающей средой зависит от материалов, параметров платы и светильника, оказывающих влияние на передачу теплоты от активной области светоизлучающего кристалла светодиода. Если на печатной плате смонтировано несколько однотипных СИД при одиночном режиме работы, то их общая тепловая мощность будет пропорциональна их количеству. В связи с высокой теплопроводностью припоя допустимо пренебрегать влиянием теплового сопротивления $R_{\theta S-P}$ [104].

Максимально допустимое тепловое сопротивление $R_{\theta J-A \text{ MAX}}$ светильника для требуемого температурного режима работы СИД можно вычислить по формуле:

$$R_{\theta J-A \text{ MAX}} = (\theta_{J \text{ MAX}} - \theta_{A \text{ MAX}}) / P_{D \text{ MAX}}, \quad (2.35)$$

где $\theta_{J \text{ MAX}}$ – максимальная допустимая температура р-п-перехода СИД, °C;

$\theta_{A \text{ MAX}}$ – максимальная температура окружающей среды, °C;

$P_{D \text{ MAX}}$ – максимальная тепловая мощность, отводимая от кристалла СИД, Вт.

Влияние множества факторов и сложность аналитических вычислений тепловых сопротивлений, затрудняет теоретический расчет температуры светоизлучающего кристалла СИД. Экспериментальные методы определения температуры θ_J , основанные на прямом измерении температуры р-п-перехода светодиода с помощью контактных датчиков температуры, не применимы для маломощных СИД из-за дополнительного отвода тепла измерителями. Бесконтактные датчики показывают температуру поверхности светодиода, а не температуру р-п-перехода во внут-

ренных его слоях [5]. Таким измерениям также препятствует наличие линз или рассеивателей. Поэтому на практике часто используются методы косвенного определения температуры θ_J [53; 31; 192; 156].

Одними из наиболее доступных являются методы определения температуры θ_J , основанные на температурном изменении прямого падения напряжения ΔU_F и светового потока. Результаты сравнения данных методов показывают, что большей точностью обладает метод, основанный на изменении падения напряжения.

В соответствии данным методом величина $\Delta\theta_J$ вычисляется как [54]:

$$\Delta\theta_J = \Delta U_F / k_U = (U_F - U_{F0}) / k_U, \quad (2.36)$$

где U_{F0} – начальное падение напряжения на СИД (при температуре $\theta_J \approx \theta_A$), В.

k_U – коэффициент температурного изменения прямого падения напряжения на напряжения на СИД, мВ/°С.

Определение температуры р-п-перехода СИД с помощью метода температурного изменения падения напряжения не требует дорогостоящего оборудования. На основе полученного значения температуры можно легко вычислить значение теплового сопротивления светильника с использованием выражения (2.31).

2.4 Анализ электронных схем токовых зеркал для реализации светодиодного драйвера

Известны различные схемотехнические решения реализации токового зеркала [63; 73; 138]. Широкое распространение получили схемы простого и простого «трехтранзисторного» токового зеркала, источника тока Видлара, токового зеркала Уилсона, каскодного источника тока Уайета. Поскольку цепочка последовательно подключенных светодиодов представляет собой активную нагрузку, при анализе схем токовых зеркал они рассматриваются упрощенно, как эквивалентные активные сопротивления нагрузки R_H .

Простое токовое зеркало (рис. 2.3, а) состоит из токозадающего (опорного) резистора $R1$ и пары согласованных биполярных транзисторов $VT1$ и $VT2$, включенных по схеме с общим эмиттером. Стабилизированный ток нагрузки I_H схемы равен коллекторному току I_{C2} выходного (силового) транзистора $VT2$. Если пара-

метры используемых транзисторов одинаковые, то ток I_{C2} является зеркальным подобием опорного тока I_0 , протекающего через входной (задающий) транзистор VT2, так как напряжения U_{B1} и U_{B2} баз соответственно транзисторов VT1 и VT2 равны. Напряжения питания цепи опорного напряжения U_{CC1} и силовой нагрузки U_{CC2} могут отличаться, что позволяет подключать длинные цепочки СИД.

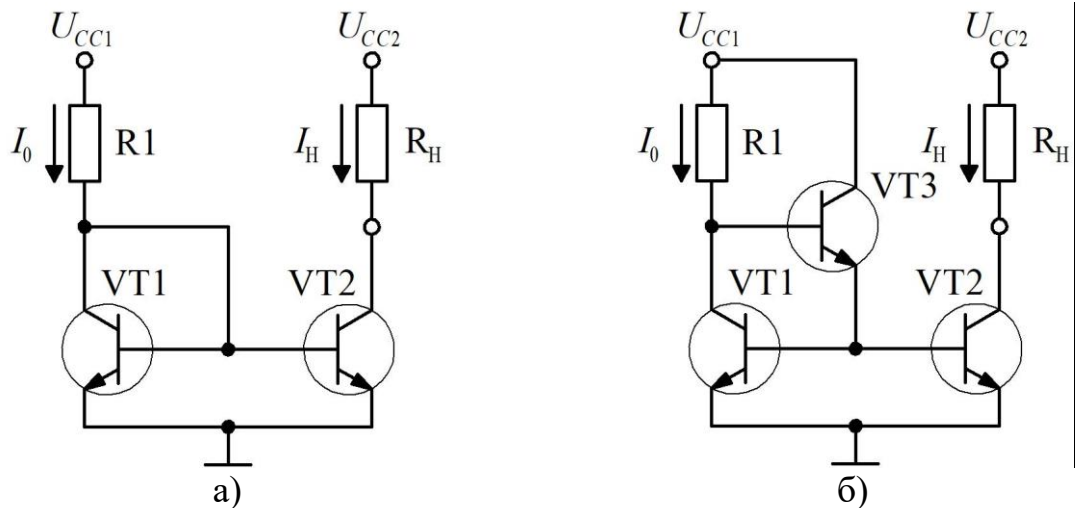


Рисунок 2.3 – Схемы токовых зеркал на п-р-п-транзисторах:

а – простого; б – «трехтранзисторного» [73]

Однако, в многоканальном исполнении схемы (рис. 2.3, а) подключение дополнительных силовых транзисторов изменяет значение тока I_0 , что приводит к отклонению тока от заданной величины в каналах нагрузки. Также, если один из силовых транзисторов схемы переходит в режим насыщения (например, когда отключается его нагрузка), то его база будет отбирать повышенный ток из общей линии питания, что вызывает резкое снижение токов в остальных каналах нагрузки [138].

Более высокой точностью стабилизации тока в особенности в многоканальном исполнении обладает схема простого «трехтранзисторного» токового зеркала (рис. 2.3, б). В такой схеме резистор R1, помимо задания фиксированного напряжения U_{C1} и тока I_{C1} коллектора задающего транзистора, также устанавливает базовый ток I_{B3} буферного транзистора VT3. Базовые токи всех используемых в схеме транзисторов протекают через VT3. Это позволяет повысить точность стабилизации тока в соответствии β^2 применяемых транзисторов.

При практической реализации на точность стабилизации токового зеркала

будет оказывать влияния разности температур р-п-переходов и конструктивная однотипность используемых транзисторов [63]. Главными параметрами, определяющие эти воздействия, являются отклонения коэффициентов β передачи базового тока и напряжений U_{BE} между базой и эмиттером. Снижение влияния разницы напряжений U_{BE} применяемых транзисторов и повышение температурной стабильности схемы возможно включением в эмиттерной цепи задающего и силовых транзисторов дополнительных резисторов (рис. 2.4), выполняющих функции отрицательной обратной связи по току [73].

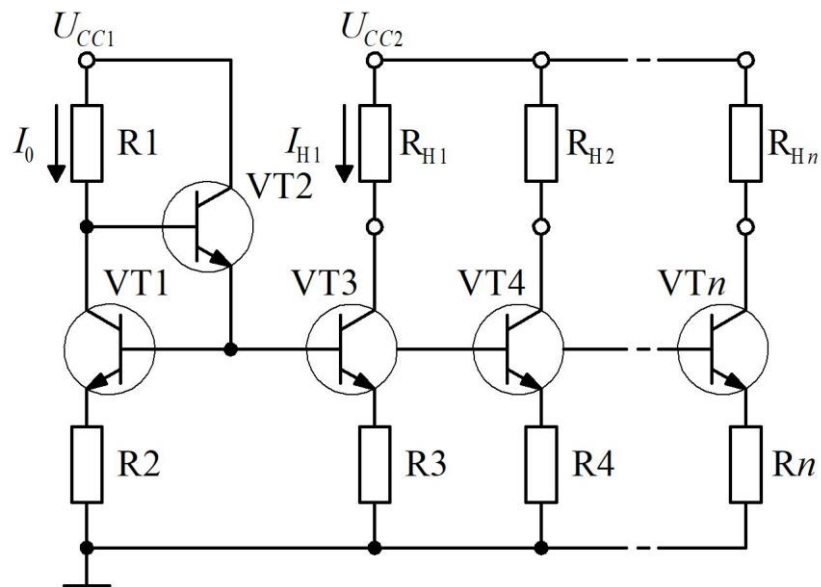


Рисунок 2.4 – Улучшенная многоканальная схема простого «трехтранзисторного» токового зеркала на п-р-п-транзисторах

В улучшенной многоканальной схеме (рис. 2.4) величина тока I_0 задается резисторами $R1$ и $R2$. Применение дополнительных эмиттерных резисторов $R2...Rn$ в цепях транзисторов также позволяют снизить влияние эффекта Эрли. Несмотря на некоторое снижение общего КПД, схема позволяет легко масштабировать ток нагрузки путем изменения соотношения сопротивлений резисторов $R2$ и $R3...Rn$.

Эффективность применения схемы (рис. 2.4) для реализации многоканального высоковольтного светодиодного драйвера существенно зависит от точности стабилизации тока в каналах нагрузки и формы регулировочной характеристики драйвера, оказывающих влияние на световой поток и КЦТ излучения светодиодных светильников, что требует проведения экспериментальных исследований.

2.5 Параметры и характеристики высоковольтного многоканального светодиодного драйвера, выполненного на базе токового зеркала

Одной из главных характеристик линейного светодиодного драйвера, выполненного на базе токового зеркала, является коэффициент k_O отражения, который может быть определен по формуле [73]:

$$k_O = I_H / I_0. \quad (2.37)$$

При использовании в основе драйвера улучшенной многоканальной схемы простого «трехтранзисторного» токового зеркала (рис. 2.4) с одинаковыми токами в каналах нагрузки, допуская незначительное влияние токов I_B (в случае высокого коэффициента β) и отклонений напряжений U_{BE} используемых транзисторов, опорный ток и ток нагрузки определяются следующими выражениями:

$$I_0 \approx I_{C1}; \quad (2.38)$$

$$I_H \approx I_0 R_2 / R_3, \quad (2.39)$$

где I_{C1} – коллекторный ток задающего транзистора VT1, А.

R_2 и R_3 – сопротивления эмиттерных резисторов R2 и R3, Ом.

Подставив уравнения (2.38) и (2.39) в выражение (2.37), получим:

$$k_O = R_2 / R_3. \quad (2.40)$$

Напряжение опорного источника питания схемы (2.4) вычисляется как:

$$U_{CC1} = I_0 (R_1 + R_2) + U_{BE2} + U_{BE1}, \quad (2.41)$$

где R_1 – сопротивление эмиттерного резистора R1, Ом;

U_{BE1} и U_{BE2} – напряжения между базой и эмиттером VT1 и VT2, В.

Транзисторы токового зеркала работают в активном режиме, их токи описываются известными уравнениями [52]. Подключенные в качестве нагрузки в каналах драйвера светодиоды при переключении транзистора совершают полезную работу, потому динамическими потерями транзистора допустимо пренебречь. Тогда потери мощности ΔP_{VT} биполярного транзистора равны:

$$P_{VT} = (U_{CE} I_C + U_{BE} I_B) k_D, \quad (2.42)$$

где U_{CE} и U_{BE} – напряжения коллектор-эмиттер и база-эмиттер, В;

I_C и I_B – прямой ток коллектора и базы, А;

k_D – коэффициент заполнения ШИМ-сигнала.

Коэффициент заполнения ШИМ-сигнала определяется как:

$$k_D = t_{ON}/T = t_{ON}f, \quad (2.43)$$

где t_{ON} – продолжительность импульса, с.

T – период ШИМ-сигнала, с.

f – частота ШИМ-сигнала, Гц.

Допуская, что нагрузка во всех каналах одинаковая, КПД светодиодного драйвера η_D можно определить по формуле [144]:

$$\eta_D = \frac{P_H}{P_H + \Delta P_{DR}} 100\%, \quad (2.44)$$

где P_H – мощность нагрузки одного канала драйвера, Вт.

ΔP_{DR} – потери мощности во всей схеме драйвера в расчете один канал, Вт.

При использовании в качестве нагрузки в каналах длинных цепочек, последовательно соединенных СИД, прямое падение напряжения на нагрузке, а, следовательно, и мощность нагрузки при токе $I_H = \text{const}$ будет уменьшаться в процессе нагрева светодиода. Значит мощность нагрузки одного канала равна:

$$P_H = U_H(1 - \Delta U_H)I_H k_D, \quad (2.45)$$

где U_H – прямое падение напряжения на нагрузке, В.

ΔU_H – изменение прямого падения напряжения на нагрузке, о.е.

Потери мощности ΔP_{DR} схемы (рис. 2.4), можно представить в виде [144]:

$$\Delta P_{DR} = \Delta P_H + \Delta P_{Y1}k_D + \Delta P_{Y0}(1 - k_D), \quad (2.46)$$

где ΔP_H – потери мощности от токов нагрузки в одном канале драйвера, Вт.

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.

С учетом формулы (2.46) потери мощности ΔP_H рассчитываются как:

$$\Delta P_H = (\Delta U_{DR} + U_H \Delta U_H)I_H k_D, \quad (2.47)$$

где ΔU_{DR} – прямое падение напряжения в одном канале драйвера, В.

Падение напряжения ΔU_{DR} для токового зеркала (рис. 2.4) равно:

$$\Delta U_{DR} = U_{CES3} + \Delta U_{R3}. \quad (2.48)$$

где U_{CE3} – напряжение между коллектором и эмиттером VT3, В.

ΔU_{R3} – прямое падение напряжения на эмиттерном резисторе R3, В.

Высокий КПД линейного светодиодного может быть получен только при согласовании мощности нагрузки и напряжения источника питания [74]. Требуемое напряжение источника питания нагрузки схемы (рис. 2.4) можно определить как:

$$U_{CC2} = U_H + \Delta U_{DR} + \Delta U_L, \quad (2.49)$$

где ΔU_L – потери напряжения в линии электропитания СИД, В.

Полученные выражения могут быть использованы для расчета параметров и характеристик многоканального высоковольтного светодиодного драйвера системы динамического локального светодиодного освещения птичников с клеточным содержанием сельскохозяйственной птицы.

2.6 Анализ и синтез цифровой системы управления освещенностью

2.6.1 Разработка структурной схемы моделирования системы

Анализ и синтез систем программного управления параметрами динамического освещения целесообразно проводить с помощью современного метода исследования, основанного на компьютерном моделировании [60]. Одним из главных компонентов таких систем управления освещения в птичнике является система автоматического регулирования (САР) освещенности.

Моделирование технической системы базируется на структурной схеме, математических моделях ее элементов и объекта регулирования [126]. Для составления структурной схемы моделирования на основе анализа существующих систем локального светодиодного освещения птичников (п. 1.4) и изложенных теоретических положений (п. 2.2 и 2.4), была разработана обобщенная функциональная схема цифровой САР освещенности, представленная рис. 2.5, на котором: ЗО – задающий орган (контроллер управления освещением), СО – цифровой сравнивающий орган; ПО1 и ПО2 – цифровые преобразующие органы; Р – цифровой регулятор; РО – регулирующий орган (светодиодный драйвер); ВО – воспринимающий орган (датчик освещенности); ОР – объект регулирования.

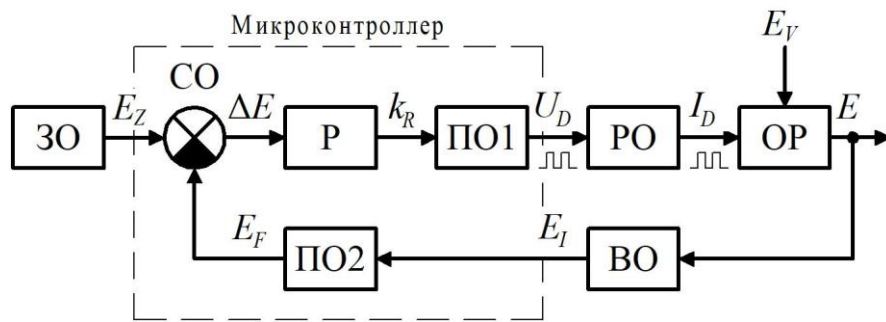


Рисунок 2.5 – Функциональная схема цифровой САР освещенности в птичнике

Объектом регулирования данной САР (рис. 2.5) является клетка для содержания сельскохозяйственной птицы, освещаемая локальным светодиодным светильником. Регулируемой величиной является освещенность E на дне кормушки. За основное возмущение принято изменение фоновой освещенности E_V в помещении [146]. Задающая величина представляет собой цифровой сигнал требуемого уровня освещенности E_Z на дне кормушки.

Рассматриваемая САР освещенности (рис. 2.5) функционирует следующим образом. Контроль текущего уровня освещенности E производится цифровым датчиком освещенности (ДО), который на выходе формирует сигнал измеренной освещенности E_I и по интерфейсу I²C передает его на преобразующее устройство, реализуемое на микроконтроллере. ПО2 с помощью цифрового фильтра сглаживает результаты измерений освещенности E_I . Полученная освещенность на выходе цифрового фильтра E_F , сравнивается с заданным значением E_Z , в результате чего образуется сигнал рассогласования ΔE . Регулятор по сигналу рассогласования рассчитывает требуемое значение регулирующего коэффициента k_R заполнения управляющего ШИМ-сигнала. ПО1 по вычисленному сигналу k_R , с учетом требуемой КЦТ оптического излучения $ССТ_Z$ светильников, формирует управляющие ШИМ-сигналы напряжения U_D по каналу управления белым теплым U_{DW} и холодным U_{DC} светом. Данные сигналы поступают в многоканальный высоковольтный светодиодный драйвер, выполненный на базе токового зеркала (рис. 2.4), где осуществляют управление токами I_D светодиодов белого теплого I_{DW} и холодного I_{DC} света.

На основе функциональной схемы (рис. 2.6) была разработана структурная схема моделирования цифровой САР освещенности, изображенная на рис. 2.6. При

разработке данной схемы были приняты следующие допущения: квантование сигнала освещенности E_I по уровню является несущественным; не учтено температурное изменение светового потока СИД; влияние температуры светодиодного драйвера на точность стабилизации тока незначительно; регулировочная характеристика светодиодного драйвера является абсолютно линейной [144].

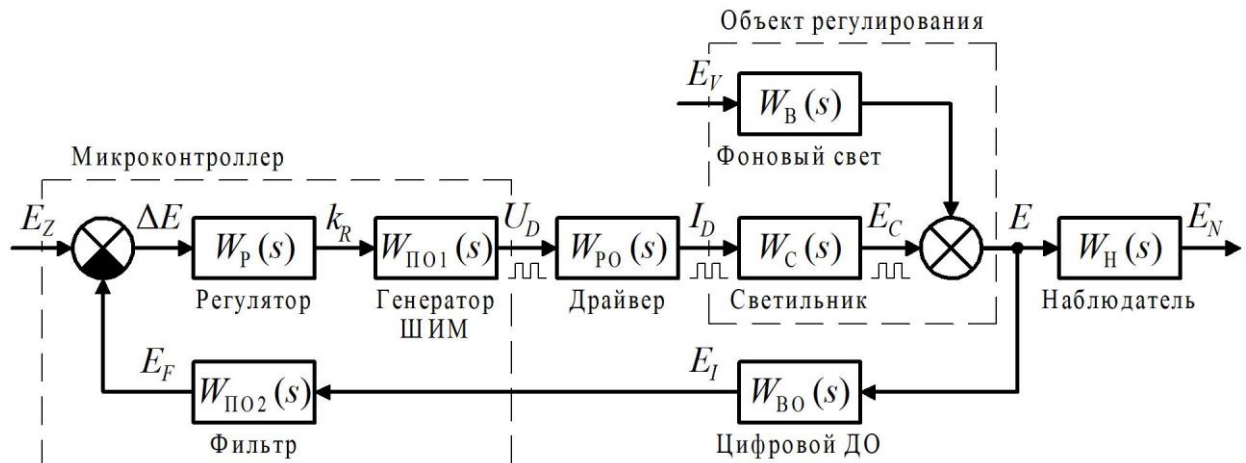


Рисунок 2.6 – Структурная схема моделирования цифровой САР освещенности в птичнике с клеточным содержанием птицы

В разработанной структурной схеме (рис. 2.6), объект регулирования описывается двумя передаточными функциями: $W_C(s)$ – по регулирующему воздействию и $W_B(s)$ – по возмущению. Величина E_C представляет собой освещенность, создаваемой светильником на дне кормушки. Передаточная функция $W_H(s)$ была добавлена в структурную схему для оценки качества регулирования по наблюдаемой освещенности E_N , учитывающей восприятие импульсивного света зрительным аппаратом человека.

2.6.3 Анализ методов определения параметров настройки регулятора

Определение оптимальных параметров настройки регулятора возможно различными методами: Цинглера-Никольса, Стогестада, Чина-Хронеса-Ресвика (CHR), Куна, Копеловича, Шеделя, Всероссийского теплотехнического института (ВТИ), численной оптимизации и др. [46; 47; 66; 143].

Одним из наиболее известных методов определения параметров настройки

регулятора является метод Цинглера-Никольса. Метод основан на получении графика переходного процесса САР на границе устойчивости системы, что для цифровых систем управления не всегда возможно [47]. При этом его применение не гарантирует оптимальных показателей качества переходного процесса [47; 126].

Метод CHR является развитием метода Циглера-Никольса и основан на анализе отклика объекта регулирования на ступенчатое тестовое воздействие. Он позволяет получить больший запас устойчивости системы чем метод Циглера-Никольса [47]. Метод имеет возможность выбора систем расчета параметров с учетом требуемой формы графика переходного процесса. Параметры ПИ-регулятора по отклику на изменение уставки для апериодического переходного процесса минимальной длительности, рассчитываются по формулам:

$$k_P = \frac{0,35T_{\text{ОБ}}}{k_{\text{ОБ}}\tau_{\text{ОБ}}}; \quad (2.67)$$

$$T_I = 1,2T_{\text{ОБ}}. \quad (2.68)$$

Относительной гибкостью расчета в отечественной практике обладает метод, опубликованный А. П. Копеловичем [66]. В данном методе расчет параметров регуляторов производится исходя из трех критериев качества переходного процесса: апериодический с минимальной длительностью, с допустимым перерегулированием равным 20 % и минимальным среднеквадратичным отклонением. Определение параметров ПИ-регулятора для апериодического переходного процесса минимальной длительности, производится по выражениям:

$$k_P = \frac{0,6T_{\text{ОБ}}}{k_{\text{ОБ}}\tau_{\text{ОБ}}}; \quad (2.73)$$

$$T_I = 0,8\tau_{\text{ОБ}} + 0,5T_{\text{ОБ}}. \quad (2.74)$$

Развитием метода Копеловича, получившим широкое распространение на практике, является метод ВТИ. Определение параметров ПИ-регулятора по данному методу для апериодического переходного процесса минимальной длительности при относительном запаздывания ($\tau_{\text{ОБ}}/T_{\text{ОБ}}$) на объекте регулирования в диапазоне 0,2–1,5, выполняется по формулам [143]:

$$k_P = \frac{0,38(\tau_{\text{ОБ}}/T_{\text{ОБ}} + 0,6)}{k_{\text{ОБ}}(\tau_{\text{ОБ}}/T_{\text{ОБ}} - 0,08)}; \quad (2.75)$$

$$T_I = 0,8T_{\text{ОБ}}. \quad (2.76)$$

Методы СНР, ВТИ и Копеловича при известных характеристиках обобщенного объекта регулирования могут быть применены для расчета оптимальных параметров настройки цифрового ПИ-регулятора систем программного управления параметрами локального динамического светодиодного освещения в птичнике.

2.6.2 Математическое описание структурных элементов системы управления

Динамические свойства элементов разработанной структурной схемы моделирования цифровой САР освещенности в птичнике (рис. 2.6) описываются следующими передаточными функциями и математическими выражениями.

Светодиод является сверхбыстрым полупроводниковым прибором, в котором задержки сигнала пренебрежимо малы [126]. Следовательно, при использовании в светильнике СИД белого теплого и холодного света, передаточная функция светильника $W_C(s)$ описывается выражением:

$$W_C(s) = k_{EW} + k_{EC}, \quad (2.50)$$

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

Коэффициенты k_{EW} и k_{EC} при амплитуде ШИМ-сигналов токов $I_{DW} = I_{DC}$ можно вычислить как [146]:

$$k_{EW} = \frac{E_{CW}}{I_{DW}} = \frac{E_{\text{MAX}}}{I_A(1+1/k_{WC})}; \quad (2.51)$$

$$k_{EC} = \frac{E_{CC}}{I_{DC}} = \frac{E_{\text{MAX}}}{I_A(1+k_{WC})}, \quad (2.52)$$

где E_{CW} и E_{CC} – освещенности светильника, создаваемые СИД белого теплого и холодного света, лк;

E_{MAX} – максимальная освещенность, создаваемая светильником, лк;

k_{WC} – коэффициент соотношения освещенностей, создаваемых белым теплым и холодным СИД светильника.

Передаточная функция объекта регулирования по возмущению $W_B(s)$ принята равной единице [146]:

$$W_B(s) = k_V, \quad (2.53)$$

где $k_V = 1$ – коэффициент передачи возмущения.

Передаточная функция $W_H(s)$ наблюдателя описывается выражением [28]:

$$W_H(s) = \frac{1}{T_{ZA}s + 1}, \quad (2.54)$$

где $T_{ZA} = 0,05–0,20$ с – постоянная времени зрительного аппарата человека;
 s – оператор преобразования Лапласа.

Математическое описание процесса измерения освещенности E_I цифровым датчиком с учетом дискретизации процесса измерений во времени, может быть представлено в виде [155]:

$$E_I = \frac{\int_0^{\tau_{DO}} E_i \Delta t_E}{\tau_{DO}}, \quad (2.55)$$

где E_i – освещенность отдельного измерения в периоде интегрирования показаний датчика, лк;

Δt_E – продолжительность преобразования измерений освещенности АЦП, с;

τ_{DO} – продолжительность интегрирования освещенности, с.

Помимо этого, при низкой скорости передачи данных следует учитывать время τ_{ZDO} , затрачиваемое на обработку и передачу данных измерений освещенности по цифровому интерфейсу. Задержки при передаче сигналов в линейном представлении могут быть учтены звеном идеального транспортного запаздывания [28]. Квантованием освещенности по уровню при высокой разрядности измерений АЦП датчика допустимо пренебречь [146].

При использовании цифрового фильтра измерений освещенности на основе апериодического звена первого порядка, уравнение его выходной величины E_F в дискретной форме имеет вид:

$$E_F = E_{F0} + (E_I - E_{F0}) \Delta t_{MC} / T_F, \quad (2.56)$$

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.

В случае применения аналогового датчика, его математическая модель может быть описана апериодическим звеном первого или второго порядка [30].

Сигнал рассогласования сравнивающего органа равен:

$$\Delta E = E_Z - E_F. \quad (2.57)$$

В качестве регулятора в системах управления освещением целесообразно применение ПИ-регулятора, обеспечивающего требуемые показатели качества САР со статистической ошибкой близкой к нулю и обладающий относительно более простой настройкой параметров чем ПИД [28]. Математическое описание выходной величины ПИ-регулятора можно предоставить в виде [126]:

$$k_R = k_P \left(\Delta E + 1/T_I \int \Delta E \Delta t_{MC} \right), \quad (2.58)$$

где k_P – пропорциональный коэффициент передачи, 1/лк;

T_I – приведенная постоянная времени интегрирования, с.

Параметрами k_P и T_I являются основными для настройки ПИ-регулятора. Также в качестве варьируемого параметра цифрового регулятора может выступать время дискретизации [77]. Если расчет коэффициента k_R выполняется микроконтроллером в каждом цикле программы, период которого относительно мал, им допустимо пренебречь.

Напряжения на выходах генераторов ШИМ-сигналов по каналу управления «теплым» U_{DW} и «холодным» U_{DC} светом зависят от амплитуды выходного напряжения, продолжительности импульсов и пауз ШИМ-сигналов. Продолжительности импульсов для канала управления «теплым» t_{ONW} и «холодным» t_{ONC} светом, и длительности их пауз t_{OFFW} и t_{OFFC} вычисляются как:

$$\begin{cases} t_{ONW} = T / (k_R k_{DW}); \\ t_{OFFW} = T - t_{ONW}, \end{cases} \quad (2.59)$$

$$\begin{cases} t_{ONC} = T / (k_R k_{DC}); \\ t_{OFFC} = T - t_{ONC}. \end{cases} \quad (2.60)$$

Определение коэффициентов заполнения k_{DW} и k_{DC} в зависимости от заданной КЦТ оптического излучения светильников производится с использованием выражений (2.23), (2.27), (2.28) или (2.29).

Продолжительности импульсов и пауз квантуются во времени с шагом Δt_{PWM} , определяемым исходя из частоты разрядности ШИМ-сигналов. При их задании необходимо учитывать физические ограничения применяемого микроконтроллера.

Коэффициент передачи ШИМ-сигналов равен:

$$k_{UD} = 1/U_{DA}, \quad (2.61)$$

где U_{DA} – амплитуда выходного напряжения ШИМ-сигнала, В.

Передаточные функции светодиодного драйвера по каналу «теплого» $W_{POW}(s)$ и «холодного» $W_{POW}(s)$ света при одинаковой амплитуде токов нагрузки в каналах описываются выражениями:

$$W_{POW}(s) = W_{POC}(s) = k_{ID}, \quad (2.62)$$

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

Коэффициент k_{ID} вычисляется как:

$$k_{ID} = I_A/U_{DA}. \quad (2.63)$$

Для расчета параметров настройки ПИ-регулятора часто требуются определения коэффициента передачи k_{OB} , постоянной времени T_{OB} и запаздывания τ_{OB} обобщенного объекта регулирования [47; 143]. Исходя из структурной схемы САР освещенности (рис. 2.6) и полученных математических описаний ее элементов следует, что коэффициент k_{OB} рассматриваемой системы равен:

$$k_{OB} = k_{UD} k_{ID} (k_{EW} + k_{EC}) = E_{MAX}. \quad (2.64)$$

Параметры T_{OB} и τ_{OB} определяются постоянными времени элементов и запаздыванием на них, следовательно:

$$T_{OB} = T_F; \quad (2.65)$$

$$\tau_{OB} = \tau_{DO} + \tau_{ZDO} + \tau_{MC}. \quad (2.66)$$

Полученные выражения могут быть использованы для компьютерного моделирования цифровых систем программного управления параметрами динамического освещения в птичнике с клеточным содержанием цыплят-бройлеров.

2.7 Выводы

1. Математическое описание зависимостей изменений естественной освещенности и КЦТ солнечного света в течение дня для управления партерами динамического освещения в птичнике целесообразно производить через модели $E_s = f(h)$ и $CCT_s = f(E_s)$, описываемые выражениями (2.4) и (2.5). Для этого требуется экспериментальное уточнение коэффициентов a , b и c моделей для заданных географических координат и условий наблюдений.

2. Изменение КЦТ оптического излучения локального светодиодного светильника для птичника с клеточным содержанием цыплят-бройлеров рационально проводить путем аддитивного смешения световых потоков светодиодов белого теплого и холодного света. Математическая модель изменения КЦТ светильника от прямых токов светодиодов белого теплого и холодного света может быть представлена в виде зависимости от одного коэффициента заполнения управляющего ШИМ-сигнала (2.23). Аппроксимация зависимости $\Delta CCT = f(k_{DWC})$ возможна кубическим (2.28) или квадратным (2.29) уравнениями регрессии. Выбор формы модели и уточнение коэффициентов ее регрессии следует проводить на основе экспериментального исследования для разработанного светильника.

3. Рабочая температура активной области светоизлучающего кристалла светодиода зависит от условий его охлаждения и выделяемой тепловой мощности в светильнике. Определение температуры θ_J локального светодиодного светильника целесообразно производить экспериментальным методом (2.3), основанным на температурном изменении прямого падения напряжения на светодиоде.

4. В основе многоканального высоковольтного светодиодного драйвера для системы динамического локального светодиодного освещения птичника с клеточным содержанием птицы может быть использована улучшенная схема простого «трехтранзисторного» токового зеркала (рис. 2.4). Полученные математические выражение (п. 2.5) позволяют произвести проектирование и расчет характеристик такого драйвера. Для оценки эффективности его применения требуется проведение экспериментальных исследований точности стабилизации тока в каналах нагрузки и определение регулировочной характеристики драйвера.

5. Разработанная структурная схема моделирования цифровой САР освещенности в птичнике с клеточным содержанием птицы (рис. 2.6), математическое описание элементов системы и объекта регулирования (п. 2.6.2) могут быть использованы для компьютерного моделирования систем программного управления параметрами локального динамического освещения птичника с целью определения оптимальных параметров настройки регулятора и анализа качества работы систем управления. Для данных цифровых систем управления целесообразно применение ПИ-регулятора с расчетом параметров его настройки методами CHR, ВТИ, Копеловича.

3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И КОМПЬЮТЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ЛОКАЛЬНОГО СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

3.1 Программа экспериментальных и компьютерных исследований

Разработка динамической системы локального светодиодного освещения птичников с клеточным содержанием цыплят-бройлеров потребовала проведения экспериментальных и компьютерных исследований. Целями исследований являлось обоснование параметров и режимов работы элементов системы освещения, оценка достоверности теоретических предположений и допущений. В связи с этим возникла необходимость разработки программы и методик проведения экспериментальных и компьютерных исследований. Теоретической основой для разработки методик послужили известные положения постановки, проведения и обработки результатов исследований [1; 91; 106].

В программу исследований входят:

1. Экспериментальные исследования зависимостей изменений естественной освещенности и КЦТ солнечного света в течении дня.
2. Экспериментальные исследования распределений освещенности на контрольной поверхности от излучения локального светодиодного светильника.
3. Экспериментальное определение рабочей температуры активной области светодиодов светильника.
4. Экспериментальное определения пространственного светораспределения локального светодиодного светильника.
5. Экспериментальные исследования качества стабилизации тока и регулировочной характеристики многоканального светодиодного драйвера.
6. Экспериментальное исследование зависимости изменения КЦТ локального светодиодного светильника от коэффициента заполнения управляющего ШИМ-сигнала.

6. Компьютерные исследования параметров цифрового ПИ-регулятора систем программного управления динамическим освещением.

7. Компьютерные и экспериментальные исследования переходных процессов САР освещенности.

3.2 Методика экспериментальных исследований зависимостей изменений естественной освещенности и КЦТ солнечного света в течение дня

Основными задачами исследований являлись определение уточненных коэффициентов регрессий математических моделей изменения естественной освещенности (2.7) и коррелированной цветовой температуры (2.8) солнечного света в течение дня для заданных географических координат местности с целью разработки математических моделей управления параметрами динамического освещения в птичнике.

Получение искомых зависимостей выполнялось с помощью разработанной экспериментальной установки, представленной на рис. 3.1, на котором 1 – измерительная монтировка; 2 и 3 – цифровой колориметр ТКА-ИЦТ и его фотометрическая головка; 4 и 5 – ручки движений по азимуту и высоте Солнца; 6 – утяжелитель. Место проведения: Краснодарский край, Россия ($46^{\circ}19'44,5''$ с.ш.; $38^{\circ}46'37,4''$ в.д.).

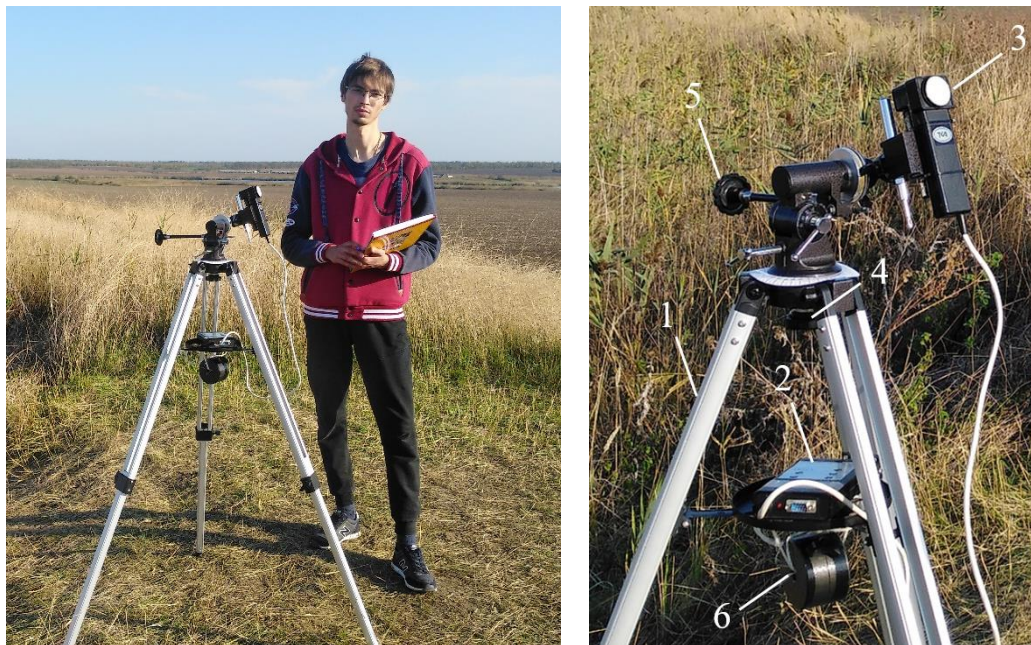


Рисунок 3.1 – Фотографии места проведения опытов и экспериментальной установки

С целью снижения влияния отраженного света и затенения от объектов на результаты измерений освещенности и КЦТ наблюдение проводилось в чистом поле на искусственной возвышенности равнинной местности (рис. 3.1). Измерения выполнялись в следящем режиме по направлению Солнца (по азимуту и высоте Солнца над горизонтом). Шаг измерений составлял 10 мин.

Азимут и высота Солнца для требуемых географических координат на заданную дату и время определялись с помощью интернет-сервисов PlanetCalc и SunEarthTools, использующие для их вычислений элементы известной методики [195]. Время проведения опытов выбиралось с учетом погодных в дни близкие к осеннему равноденствию (23 сентября).

Обработка полученных экспериментальных данных проводилась с использованием элементов методики, изложенной в п. 3.10.

3.3 Методика экспериментальных исследований распределений освещенности на контрольной поверхности от излучения локального светодиодного светильника

Основной задачей исследований являлось определение кривых распределений освещенности, создаваемых экспериментальными образцами локального светодиодного светильника, изготовленных на основе поликарбонатных труб-рассеивателей для обоснования рациональных параметров светильника птичника по светораспределению. Это потребовало проведения экспериментальных исследований по изучению влияния вида поликарбонатной трубы-рассеивателя и активной длины светильника на форму кривых распределения освещенности.

В соответствии с требованиями ГОСТ 34819–2021 исследования кривых распределений освещенности проводились на контрольной поверхности измерительного стола. Для проведения опытов была разработана экспериментальная установка, представленная рис. 3.2, на котором: 1 – контрольная поверхность; 2 – подвес для светильника; 3 – экспериментальный образец светильника; 4 и 5 – люксметр ТКА-Люкс и его фотометрическая головка; 6 и 7 – продольная и поперечная ось измерений. Опыты проводились в светоизолированном помещении.

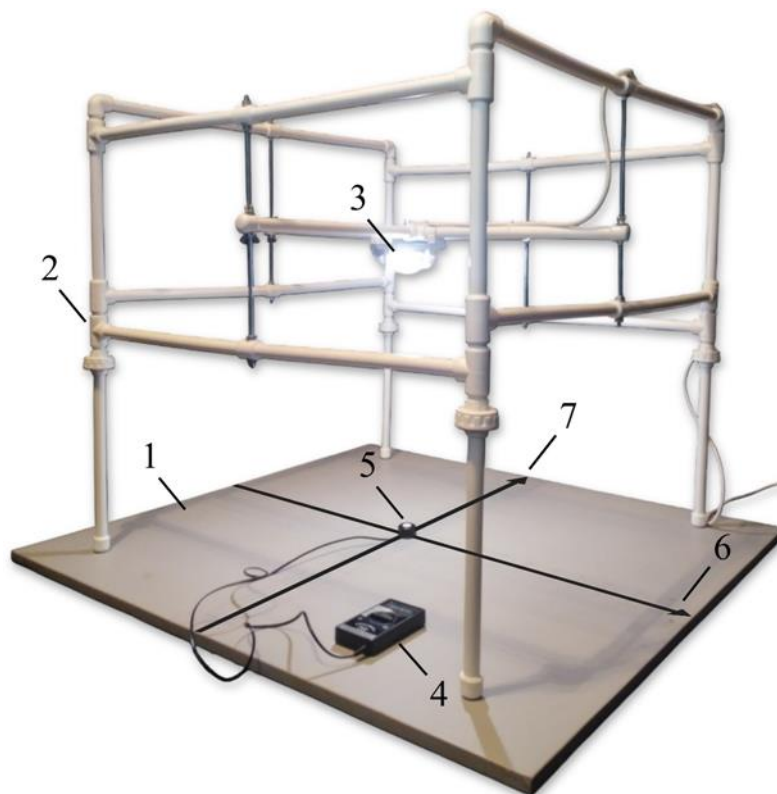


Рисунок 3.2 – Экспериментальная установка для исследования распределения освещенности на контрольной поверхности

Высота подвеса экспериментальных светодиодных светильников до приемной поверхности фотометрической головки люксметра (рис. 3.2) выбиралась с учетом требований ГОСТ 27461–87 и составляла 50 см. Электропитание светильников осуществлялись постоянным рабочим током $I_D = 130$ мА от импульсного блока питания и регулируемого линейного стабилизатора тока, описанных в п. 3.5. Перед проведением опытов выполнялся предварительный прогрев СИД и платы стабилизатора рабочими токами в течение 15 мин.

Исследование влияния вида поликарбонатной трубы-рассеивателя на форму кривых распределений освещенности на контрольной поверхности проводилось на пяти видах опытных образцов поликарбонатных труб-рассеивателей диаметром 25 мм с рифленой внутренней поверхностью и пазом под плату (рис. 3.3) производства компании ООО «Экструзионные линии». Опытные образцы 1–4 имели различное содержание примеси опала в поликарбонате; в качестве образца 5 использовалась белая труба-рассеиватель.

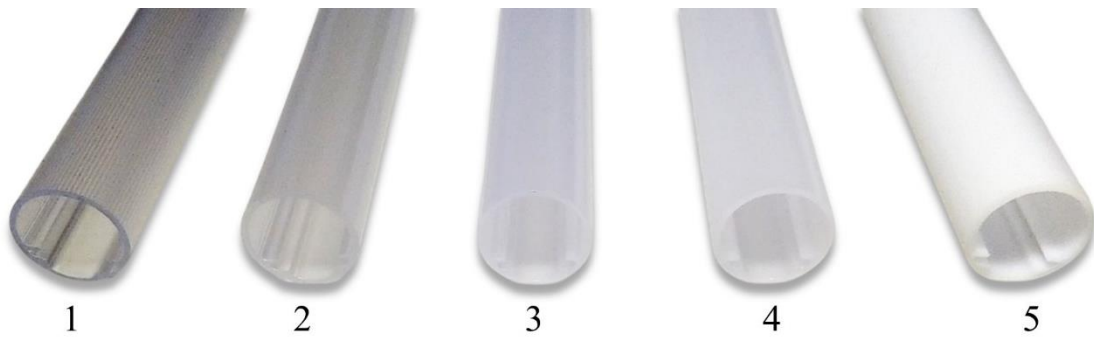


Рисунок 3.3 – Опытные образцы поликарбонатных труб-рассеивателей

Из опытных образцов труб-рассеивателей (рис. 3.3) для числа повторных опытов равным трем были изготовлены 15 экспериментальных образцов локальных светодиодных светильников, конструкции, показанной на рис. 4.9. С целью исключения влияния краевых эффектов активная длина светильников составляла $l_A = 30$ см. В светильниках применялись изготовленные из фольгированного стеклотекстолита экспериментальные печатные платы [154] с припаянным по центру SMD-светодиодом LM561B Plus компании «Samsung LED» [163].

Измерения освещенности проводилось вдоль длины экспериментальных образцов светильников (ось X) и по оси, поперечной их длине (ось Y) в пределах ± 50 см от оптического центра (рис. 3.2). Шаг измерений составлял 5 см. Для проведения сравнительной оценки опытных образцов поликарбонатных труб-рассеивателей и расчета их коэффициентов светопропускания дополнительно измерялось распределение освещенности, создаваемой светодиодом на печатной плате без использования трубы-рассеивателя.

Исследование влияния активной длины светильника на форму кривых распределения освещенности проводилось в пределах изменения $l_A = 23\text{--}69$ мм с шагом примерно равным 6,6 мм (рис. 4.5). Измерения освещенности проводились по оси X в пределах ± 50 см от оптического центра. Шаг измерений составлял 5 см. Число повторных опытов было принято равным трем. Для проведения исследования из поликарбонатной трубы-рассеивателей образца 3 был изготовлен 21 экспериментальный образец локального светодиодного светильника.

Обработка полученных экспериментальных данных проводилась с использованием элементов методики, изложенной в п. 3.10.

3.4 Методика экспериментального определения рабочей температуры активной области светодиодов светильника

Основной задачей исследования являлось определение рабочих температур активной области светодиодов в экспериментальных образцах локальных светодиодных светильников для птичника, изготовленных с применением разных материалов и параметров печатных плат.

Исследование температур θ_J , осуществлялось косвенным методом, основанным на температурном изменении прямого падения напряжения на СИД (2.36). Описание используемых светильников представлено в п. 4.2.3. Определение температур светодиодов проводилось на трех типах экспериментальных печатных плат, конструкция которых показана на рис. 4.10. Для каждого из трех типов плат было изготовлено пять опытных образцов с параметрами представленными в табл. 3.1, где: D и $Ш$ – длина и ширина печатной платы; d_O – толщина основания платы, d_M – толщина слоя меди, S_O – площадь активной медной охлаждающей поверхности.

Таблица 3.1 – Параметры экспериментальных печатных плат для СИД

Тип платы	Материал основания	D , мм	$Ш$, мм	d_O , мм	d_M , мкм	S_O , мм ²
A	Стеклотекстолит (FR-4)	80	16	1,0	18	48
B	Стеклотекстолит (FR-4)	80	16	1,5	35	48
C	Алюминий (VT-4A2)	80	16	1,0	35	48

Для проведения опытов была разработана экспериментальная установка, представленная на рис. 3.4, на котором: 1 – светодиодный светильник с исследуемой печатной платой; 2 – подвес для светильника; 3 – плата стабилизатора тока; 4 – блок питания; 5 – тумблер подачи питания; 6 – системный блок персонального компьютера с платой АЦП типа LA70M4; 7 – окно компьютерной программы «Регистратор ЛА-70 и LAVP».

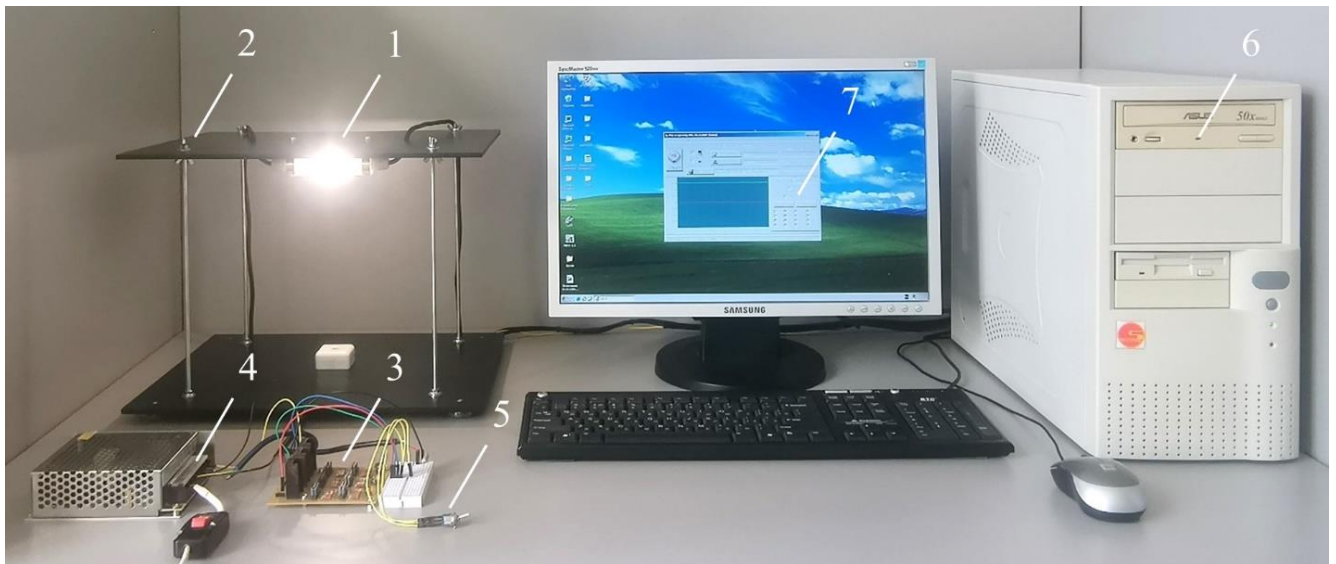


Рисунок 3.4 – Экспериментальная установка для определения рабочих температур активной области светодиодов

Используемые светодиоды LM561B Plus компании «Samsung LED» на печатных платах подключались последовательно. Их номинальное прямое падение напряжения на составляло от 2,7 до 3,2 В [163]. Электропитание СИД осуществлялось постоянным рабочим током $I_D = 100$ мА от импульсного блока питания напряжением 12 В и регулируемого параметрического стабилизатора тока на микросхемах LM317Т (рис. 3.4). Плата стабилизатора предварительно прогревалась рабочим током для исключения влияния температурного дрейфа параметров.

Падение напряжения измерялось на двух светодиодах через делитель напряжения и регистрировалось с помощью платы АЦП. Период опроса платы аналого-цифрового преобразователя LA70M4 в начальный интервал времени от 0 до 10 с от подачи питания на светодиоды был равен 2 мс (предельная скорость стабильных измерений); после 10 с составлял 1 с до конечного времени работы $t = 720$ с для гарантированного выхода температуры θ_J на установившийся уровень.

Обработка полученных экспериментальных данных велась с использованием элементов методики, изложенной в п. 3.10.

3.5 Методика экспериментального определения пространственного светораспределения локального светодиодного светильника

Основной задачей исследования являлось определение кривых сил света экспериментального образца локального светодиодного светильника для птичника с клеточным содержанием птицы.

В соответствии с требованиями ГОСТ 34819–2021 исследование проводилось с использованием гениофотометрической установки для главной продольной (C_{90} и C_{270}) и поперечной (C_0 и C_{180}) плоскостей светильника нижней полусферы. Для проведения опытов была разработана экспериментальная установка, представленная рис. 3.5, на котором: 1 – измерительная монтировка; 2 – держатель светильника; 3 – исследуемый светильник; 4 – механический угломер с фиксацией положения; 5 – ручки регулировки начального положения светильника; 6 – люксметр ТК-Люкс; 7 – фотометрическая головка люксметра.

В исследовании использовались пять экспериментальных образцов локального светодиодного светильников (рис. 4.9), описание которых представлено п. 4.2.3. В светильниках применялись печатные платы для светодиодов типа *B* (табл. 3.1). Электропитание светильников осуществлялись постоянным рабочим током $I_D = 100$ мА от импульсного блока питания и регулируемого линейного стабилизатора тока, описанных в п. 3.4. Перед проведением опытов выполнялся предварительный прогрев СИД и платы стабилизатора рабочими токами в течение 15 мин.

Опыты проводились в светоизолированном помещении. Стены и посторонние предметы помещения были закрыты черном материалом. Изменение углов наклона светильника γ , осуществлялось в диапазонах $\pm 90^\circ$ относительно оптической оси. Шаг изменений освещенности составлял 5° . Высота подвеса светильников была равна 1 м. Данные измерений освещенности пересчитывались в силу света I с использованием фотометрического закона обратных квадратов.

Обработка полученных экспериментальных данных проводилась с использованием элементов методики, изложенной в п. 3.10.



Рисунок 3.5 – Экспериментальная гениофотометрическая установка
для определение кривых сил света

3.6 Методика экспериментальных исследований качества стабилизации тока и регулировочной характеристики многоканального светодиодного драйвера

Основными задачами исследований являлись определение величин стабилизированных токов в каналах нагрузки и получение регулировочной характеристики прототипа многоканального высоковольтного светодиодного драйвера системы, выполненного на базе токового зеркала, для системы динамического локального освещения птичников с клеточным содержанием птицы.

Исследования проводились с использованием разработанного прототипа 16-канального высоковольтного светодиодного драйвера, описание которого в представлено п. 4.3. Для проведения опытов была разработана экспериментальная установка, показанная на рис. 3.6, на котором: 1 – импульсный блок питания;

2 – разработанный светодиодный драйвер; 3 – эквивалентная резистивная нагрузка; 4 – плата микроконтроллера типа Arduino Uno с преобразователем интерфейсов HW-97; 5 – преобразователь интерфейсов AC4; 6 – ноутбук с управляющей программой; 7 – цифровой колориметр ТКА-ИЦТ; 8 – светоизолирующий короб; 9 – подвес для светильника; 10 – светодиодный светильник; 11 – фотометрическая головка колориметра.

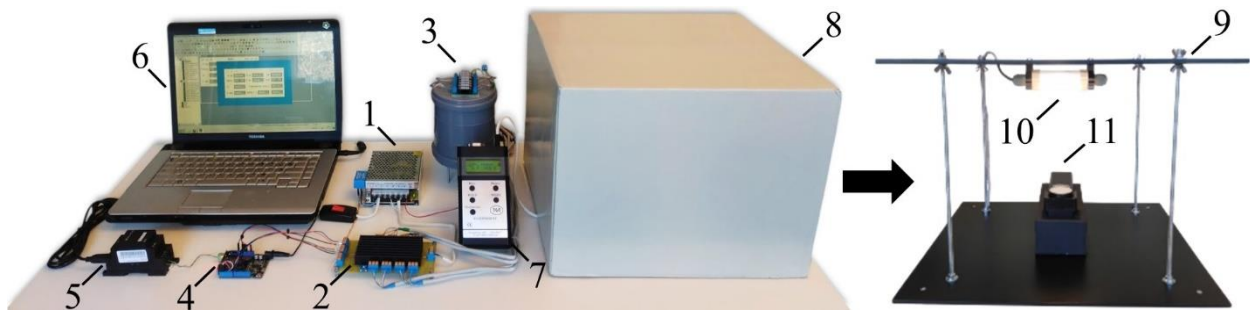


Рисунок 3.6 – Экспериментальная установка для проведения исследований характеристик светодиодного драйвера

Определение величины тока I_H в каждом канале светодиодного драйвера выполнялось путем пересчета измеренного падения прямого напряжения U_H на нагрузочном резисторе сопротивлением R_H при заданной величине стабилизированного тока в каналах нагрузки равной 100 мА. Падение напряжения в канале на драйвере составляло около $U_{DR} = 6$ В. Измерения электрических величин проводилось цифровым мультиметром APPA 105N. В качестве эквивалентной нагрузки в каналах драйвера применялись 16 металлооксидных резисторов мощностью 2 Вт и номинальным сопротивлением 68 Ом с принудительное охлаждение резисторов потоком воздуха от вентилятора. Перед проведением опытов выполнялся предварительный прогрев нагрузки и светодиодного драйвера рабочими токами в течение 15 мин. Выходное напряжение импульсного блока питания составляло 12,9 В, что позволило упростить эксперименты без существенной потери точности и повысить безопасность работ [144].

В связи с температурными изменениями мощности нагрузки (2.46) потребовалось проведение экспериментальной проверки точности стабилизации тока при изменении сопротивления в канале нагрузки. Сопротивление R_H варьировалось в

четвертом канале в диапазоне от 47 до 115 Ом (табл. 4.6). Для оценки взаимного влияния изменения P_H дополнительно измерялись токи I_H еще в трех каналах (2, 10 и 15) драйвера. Кроме этого, оценивалась работа четвертого канала в аварийных режимах: при коротком замыкании в нагрузке через шунт мультиметра и обрыве соединительного проводника в цепи питания нагрузки.

Регулировочная характеристика светодиодного драйвера исследовалась в виде зависимости освещенности E_C , создаваемой экспериментальным образцом локального светодиодного светильника (рис. 4.9), подключенным к исследуемому каналу нагрузки драйвера, от коэффициента заполнения ШИМ-сигнала k_D . В светильнике использовалось последовательное соединение СИД и дополнительного резистора, применимого для согласования нагрузки по каналам. Остальные каналы светодиодного драйвера подключались на эквивалентную резистивную нагрузку. Для исключения влияния фонового света на результаты измерений освещенности использовался светоизолирующий короб (рис. 3.6).

Исследование зависимости $E_C = f(k_D)$ выполнялось во всех 16 каналах драйвера при коэффициенте $k_D = k_{DW} = k_{DC}$, изменяемого в диапазоне от 0 до 100%. В исследовании применялся адаптивный шаг измерений, изменяемый в зависимости от продолжительности импульса и пауз ШИМ-сигнала. Задание требуемого коэффициента k_D выполнялось на ноутбуке с экспериментальной управляющей программой (рис. 3.6). Формирование ШИМ-сигналов управления частотой 2 кГц и разрядностью 10 бит осуществлялось платой микроконтроллера.

С целью снижения влияния температур на результаты измерений освещенности в светодиодном светильнике использовалась печатная плата типа С (табл. 3.1) и проводился предварительный прогрев СИД и драйвера током $I_A = 100$ мА при $k_D = 0,5$ в течение 15 мин. Каждое измерение освещенности выполнялись в следующей последовательности: сначала задавалось номинальное значение $k_D = 0,5$; затем устанавливалось требуемое значение коэффициента k_D и производилась фиксация измеренной E_C ; потом значение k_D возвращалось на номинальное.

Обработка полученных экспериментальных данных проводилась с использованием элементов методики, изложенной в п. 3.10.

3.7 Методика экспериментального исследования зависимости изменения КЦТ локального светодиодного светильника от коэффициента заполнения управляющего ШИМ-сигнала

Основной задачей данного исследования являлось определение зависимости изменения КЦТ оптического излучения экспериментального образца локального светодиодного светильника для освещения птичников от коэффициента заполнения управляющего ШИМ-сигнала.

Исследование зависимости $\Delta CCT = f(k_{DWC})$ проводилось с использованием экспериментальной установки, представленной на рис. 3.6, и пяти прототипов локальных светодиодных светильников (рис. 4.9), описание которых представлено п. 4.2.3. В светильниках использовались печатные платы типа *B* (табл. 3.1) с номинальными КЦТ светодиодов 2700 К и 5700 К.

Исследуемый локальный светодиодный светильник (рис. 3.6) подключался к третьему и четвертому каналам разработанного светодиодного драйвера. Последовательно в цепи питания СИД светильника были включены дополнительные резисторы, применимые для согласования нагрузки по каналам. Остальные каналы драйвера подключались на эквивалентную резистивную нагрузку. Выходное напряжение импульсного блока питания составляло 12 В. Амплитуда ШИМ-регулирования прямого тока была равна $I_A = 100$ мА.

Высота подвеса светильников (рис. 3.6) подбиралась с учетом необходимого уровня освещенности для корректного измерения КЦТ цифровым колориметром. Фотометрическая головка колориметра располагалась в оптическом центре. Для исключения влияния фонового света на результаты измерений освещенности использовался светоизолирующий короб.

Коэффициент заполнения k_{DWC} изменялся в диапазоне от 0 до 100 % с шагом 12,5 % (128 уровней 10-ти битного ШИМ-сигнала). При задании шага измерений учитывались рекомендации к испытаниям светодиодных светильников с управляемой цветностью [78]. Частота ШИМ-сигналов составляла 2 кГц.

Предварительно для каждого опытного светильника обеспечивалось равен-

ство световых потоков (2.15), получаемое путем пропорционального снижения коэффициента заполнения k_{DC} в величину коэффициента k_{WC} . Дополнительно в процессе измерений КЦТ контролировалось постоянство общей освещенности, создаваемой светильником.

С целью снижения влияния температур на результаты измерений КЦТ проводился предварительный прогрев СИД и светодиодного драйвера током $I_A = 100$ мА при $k_{DWC} = 0,5$ в течение 15 мин. Процесс измерений КЦТ осуществлялся аналогично методике измерения освещенности, изложенной в п. 3.6.

Обработка полученных экспериментальных данных проводилась с использованием элементов методики, изложенной в п. 3.10.

3.8 Методика компьютерных исследований параметров цифрового ПИ-регулятора систем программного управления

Основными задачами данных исследований являлось получение кривых переходных процессов компьютерных моделей цифровой САР освещенности и систем программного управления (СПУ) параметрами динамического освещения в птичнике при заданных параметрах настройки ПИ-регулятора.

Компьютерное моделирование проводилось в отечественной среде моделирования SimInTech [126]. Разработанная на основе структурной схемы моделирования (рис. 2.6) и математического описания ее элементов (п. 2.6.2), схема цифровой САР освещенности в среде SimInTech, представлена на рис. 3.7.

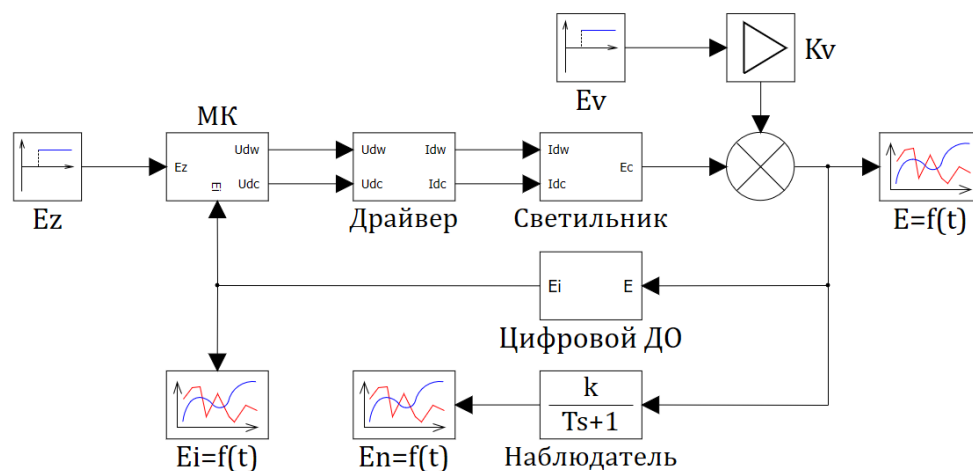


Рисунок 3.7 – Структурная схема моделирования цифровой САР освещенности в птичнике с клеточным содержанием птицы в среде SimInTech

В структурной схеме (рис. 3.7) блоки «МК», «Драйвер», «Светильник», «Цифровой ДО» являются субмоделями. Структурная схема главной субмодели микроконтроллера, показана на рис. 3.8.

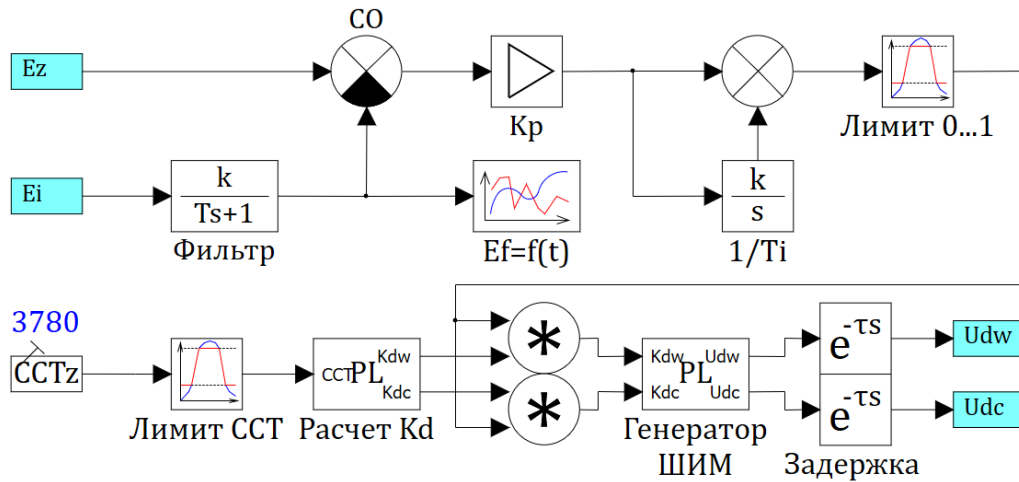


Рисунок 3.8 – Структурная схема субмодели «МК»

В структуре субмодели «МК» (рис. 3.8) блоки «Расчет K_d » и «Генератор ШИМ» были реализованы с использованием текстового языка программирования, встроенного в SimInTech. Блок «Расчет K_d » для заданного CCT_z с помощью коэффициента k_{DWC} (2.23) и выражения (2.29) выполняет расчет коэффициентов k_{DW} и k_{DC} заполнения ШИМ-сигналов. Блок «Генератор ШИМ» формирует ШИМ-сигналы напряжения U_{DW} и U_{DC} . Блоки «Задержка» учитывают запаздывание τ_{MC} на выполнение цикла программы. Параметры ПИ-регулятора задаются в блоках «Кр» и « $1/T_i$ ».

При моделировании использовался метода интегрирования Эйлера и следующие параметры элементов системы: $E_{MAX} = 51,4$ лк; $I_A = 100$ мА; $U_{DA} = 5$ В; $k_{WC} = 0,9274$; $CCT_W = 2660$ К; $CCT_C = 5640$ К; $f = 2$ кГц; $N = 10$ бит (п. 4.1-4.6). Параметры запаздывания $\tau_{MC} = 1,021 \cdot 10^{-3}$ с; $\tau_{DO} = 0,1$ с; $\tau_{ZDO} = 3,0041 \cdot 10^{-3}$ с, определялись экспериментально [146]. Постоянная времени цифрового фильтра принималась равной $T_F = T_{ZA} = 0,125$ с. Постоянный шаг интегрирования составлял $dt = dt_{PWM} = 4,883 \cdot 10^{-7}$ с. Параметры обобщенного объекта определялись по формулам (2.64)–(2.66). Результаты расчетов параметров настройки ПИ-регулятора по методам СНР, ВТИ, Копеловича с использованием выражений (2.67)–(2.76), представлены табл. 3.2.

CST_W . Для оценки качества работы системы по каналу управления КЦТ оптического излучения на выходе субмодели «Светильник» был сформирован векторизованный сигнал E_{WC} , состоящий из сигналов освещенностей E_{CW} и E_{CC} . В субмодели «Наблюдатель», помимо учета инертности зрительного аппарата человека, с использованием выражений (2.27) и (2.29) производится расчет наблюдаемой коррелированной цветовой температуры CST_N . Выходной векторизованный сигнал E_{ZN} (рис. 3.9), включает в себя сигналы E_Z и E_N , а CST_{ZN} – сигналы CST_Z и CST_N .

Искомymi переходными процессами СПУ (рис. 3.9) являлись кривые изменения заданной и наблюдаемой освещенностей кормушки $E_Z = f(t)$ и $E_N = f(t)$; заданной и наблюдаемой КЦТ оптического излучения $CST_Z = f(t)$ и $CST_N = f(t)$ при параметрах настройки ПИ-регулятора, вычисленных по методу Копеловича (табл. 3.2). С целью снижения вычислительной нагрузки и объемов модельных данных их получение проводилось только для характерных участков светового периода: «начальный» и «конечный» – при изменении освещенностей от 0 до 1 лк ($t = 0–35$ с) и от 1 до 0 лк ($t = 3565–3600$ с); «средний» – при изменении освещенностей от 9,5 до 10 лк ($t = 1230–1800$ с). Моделирование производилось для продолжительности светового периода $t_C = 1$ ч и максимальной заданной освещенности на дне кормушки, равной $E_{Z\text{MAX}} = 10$ лк.

Обработка данных, полученных с помощью компьютерного моделирования, проводилась с использованием элементов методики, изложенной в п. 3.10.

3.9 Методика компьютерных и экспериментальных исследований переходных процессов цифровой САР освещенности

Основной задачей данных исследований являлось получение кривых переходных процессов освещенности, сглаженной цифровым фильтром в компьютерной модели цифровой САР освещенности и на экспериментальном образце цифровой системы динамического локального светодиодного освещения птичников с клеточным содержанием цыплят-бройлеров.

Компьютерное моделирование проводилось с использованием структурной схемы цифровой САР освещенности в среде SimInTech (рис. 3.7), описанной в

п. 3.8. Получение модельных данных кривых переходных процессов $E_F = f(t)$ производилось для освещенности E_Z равной 1; 10; 25 лк и изменении возмущений $\Delta E_V = 0,5; 1,0; 2,5$ лк при ступенчатом изменении освещенностей в течение интервала времени $t = 0-6$ с, в котором первый интервал времени при $t = 0-2$ с соответствовал переходному процессу по регулирующему воздействию равному E_Z (при $E_V = 0$); второй при $t = 2-4$ с и третий при $t = 4-6$ с интервалы – переходным процессам по возмущениям. Положительное ступенчатое изменение возмущения величиной ΔE_V производилось при $t = 2$ с, отрицательное – при $t = 4$ с. Параметры настройки цифрового ПИ-регулятора были равны $k_p = 14,027 \cdot 10^{-3}$ 1/лк и $T_I = 145,72$ мс (табл. 3.2). Число повторностей для каждого опыта с различными значениями E_Z и E_V равнялось 10 с шагом смещения начала времени интегрирования датчика освещенности 10 мс.

Получение опытных данных реального переходного процесса $E_F = f(t)$ проводилось на экспериментальном образце цифровой системы динамического локального светодиодного освещения (рис. 4.20), описанным в п. 4.6. В качестве задающего органа экспериментальной системы вместо ПЛК был использован ПК, на который передавались экспериментальные данные. Передача данных осуществлялась микроконтроллером платы управления через встроенный преобразователь интерфейсов UART $\Leftrightarrow$ USB. С целью снижения объема данных их передача выполнялась по изменению освещенности E_L .

Для проведения опытов к экспериментальному образцу системы освещения (рис. 4.20) подключался внешний локальный светодиодный светильник (рис. 4.9) закрепленный на подвесе (рис. 3.6) и датчик освещенности на базе микросхемы OPT3001. Последовательно в цепи питания СИД светильника были включены дополнительные резисторы, применимые для согласования нагрузки по каналам. Высота подвеса светильника от приемной поверхности датчика освещенности составляла 50 см. С целью исключения влияния фонового света на результаты измерений освещенности использовался светоизолирующий короб (рис. 3.6).

Методика изменения освещенности E_Z и возмущений ΔE_V на экспериментальном образце системы освещения была аналогичной ее компьютерной модели. Воз-

мушающее воздействие создавалось на программном уровне путем ступенчатого изменения коэффициента заполнения k_{DWC} на величину, соответствующей изменению возмущения ΔE_V . Число повторностей для каждого опыта равнялось 10 со случайным шагом смещения начала времени интегрирования цифрового датчика освещенности. Предварительно осуществлялась коррекция показаний датчика освещенности относительно данных измерений люксметра ТКА-«Люкс» и прогрев СИД и светодиодного драйвера рабочими токами, советующими опытной освещенности E_Z , в течение 15 мин.

Обработка полученных экспериментальных данных проводилась с использованием элементов методики, изложенной в п. 3.10.

3.10 Методика обработки и анализа экспериментальных данных

Обработка полученных экспериментальных данных проводилась с использованием компьютерных программ Microsoft Office Excel и Statistica.

Среднеквадратическое отклонение S величины выборки определилось по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3.1)$$

где x_i – i -й результат измерений величины;

$\bar{x}$ – среднее арифметическое значение измеряемой величины;

n – число исправленных измерений.

Исключение грубых погрешностей измерений проводилось с помощью графического анализа экспериментальных данных и применения критерия Граббса для заданного уровня значимости нулевой гипотезы $\alpha = 0,05$ с проверкой значимости наибольшего G_1 и наименьшего G_2 результата измерения, рассчитываемых в соответствии ГОСТ Р 8.736–2011, по выражениям:

$$G_1 = \frac{|x_{\text{MAX}} - \bar{x}|}{S}; \quad (3.2)$$

$$G_2 = \frac{|\bar{x} - x_{\text{MIN}}|}{S}, \quad (3.3)$$

где x_{MAX} и x_{MIN} – максимальное и минимальное значения измеряемой величины.

В соответствии с критериями Граббса результаты измерений не содержат выбросов если выполняются условия:

$$G_T > G_1; \quad (3.4)$$

$$G_T > G_2, \quad (3.5)$$

где G_T – табличное значение критерия Граббса, определяемое для заданного α и числа исправленных измерений n .

где y_i и $\bar{y}$ – i -я и средняя величина результативного признака.

Оценка точности результатов обработки полученных данных выполнялась на основе коэффициента детерминации R^2 линеаризованной модели, определяемого как:

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right)^2. \quad (3.6)$$

Оценка адекватности уравнений регрессии в целом производилась по F -критерию Фишера для $\alpha = 0,05$. Фактическое значение F -критерия, вычислялось по выражению:

$$F = \frac{R^2}{(1-R^2)} \cdot \frac{f_2}{f_1}, \quad (3.7)$$

где f_1 и f_2 – число степеней свободы факторной и остаточной дисперсий.

Степени свободы f_1 и f_2 определялись по формулам:

$$f_1 = m; \quad (3.8)$$

$$f_2 = n - m - 1, \quad (3.9)$$

где m – число параметров при факторных переменных;

n – объем выборки.

В соответствии с F -критерием Фишера уравнение считается значимым, если соблюдается условие:

$$F > F_T, \quad (3.10)$$

где F_T – табличное значение F -критерия, определяемое в зависимости от α , f_1 и f_2 .

3.11 Выводы

1. Разработаны методики, опытные образцы, экспериментальные установки и компьютерные модели для проведения 8 экспериментальных исследований по обоснованию основных параметров и режимов работы элементов системы динамического локального светодиодного освещения птичников, в том числе: 6 экспериментальных установок; две компьютерные модели, 33 вариантов исполнения локального светодиодного светильника; 18 экспериментальных печатных плат для светодиодов; прототип 16-канального высоковольтного светодиодного драйвера.

2. Достоверность получаемых экспериментальных данных обеспечивается: учетом требований нормативных документов; необходимой повторностью опытов; использованием элементов апробированных методик; применением специализированных программных средств для проведения исследований; применением методов статистики и программных средств для обработки и анализа экспериментальных данных; использованием точных измерительных приборов.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И КОМПЬЮТЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ЛОКАЛЬНОГО СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

4.1 Результаты экспериментальных исследований зависимостей изменений естественной освещенности и КЦТ солнечного света в течение дня

По методике, изложенной в п. 3.2, в период с 22 сентября по 4 октября были получены экспериментальные данные пяти опытов по изучению изменения естественной освещенности и КЦТ солнечного света в течении дня.

На начальном этапе обработки была проведена выборка опытных данных для условий ясного неба; путем графического анализа устранены выбросы; произведено усреднение и симметрирование данных измерений освещенности и КЦТ относительно солнечного полдня для числа повторных опытов $n = 4$; проведено представление освещенности в относительных единицах. В качестве начального времени ($t = 0$) при обработке данных принималось ближайшее время измерений при падении прямых солнечных лучении на измерительную головку цифрового колориметра. Графические интерпретации результатов обработки полученных данных, представлены круглыми маркерами на рис. 4.1 и 4.2.

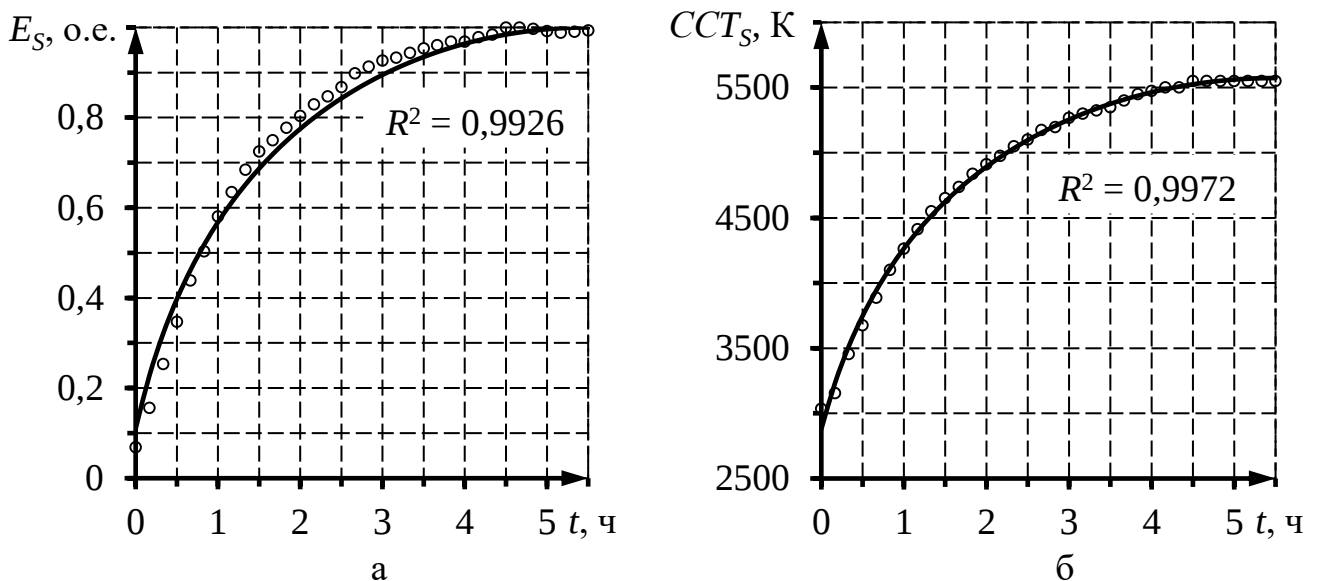


Рисунок 4.1 – Опытные данные и результаты аппроксимации
зависимостей: а – $E_s = f(t)$; б – $CCT_s = f(t)$

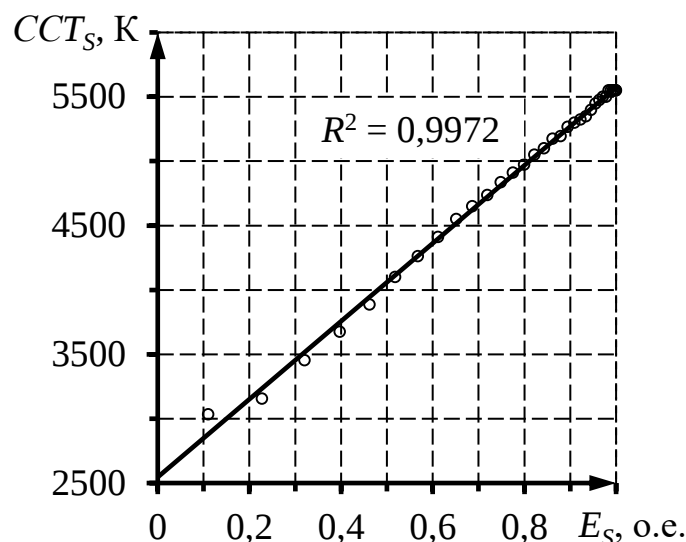


Рисунок 4.2 – Опытные данные и результаты аппроксимации зависимости $CCT_s = f(E_s)$

Визуальное сравнение графиков, изображенных на рис. 4.1, показывает практически идентичные формы кривых зависимостей $E_s = f(t)$ и $CCT_s = f(t)$. Их линейная взаимосвязь подтверждается графиком зависимости $CCT_s = f(E_s)$ (рис. 4.2).

По результатам обработки опытных данных среднее значение максимальной высоты Солнца над горизонтом равно $h_{\text{MAX}} = 40,09^\circ$, корректирующий коэффициент, времени максимума $t_{\text{MAX}} = 5,5$ ч. Корректирующий коэффициент модели (2.6) равен $h_0 = -4,39^\circ$ [196]. При аппроксимации данных зависимости $E = f(t)$ (рис. 4.1, а) моделью (2.7) в программе Microsoft Office Excel искомый коэффициент регрессии составил $a = 2,1507$. Точность аппроксимации подтверждена высоким значением коэффициента детерминации (рис. 4.1, а). Фактическое значение F -критерия Фишера $F = 4081,98$ (3.7) значительно больше табличного $F_T = 4,15$, что свидетельствует о адекватности уравнения регрессии в целом. Графическая интерпретация полученной модели регрессии показана кривой на рис. 4.1, а.

При аппроксимации данных зависимости $CCT_s = f(E_s)$ (рис. 4.2) математической моделью (2.5) искомые коэффициенты регрессии составили $b = 3027,08$ К/о.е и $c = 2545,82$ К. Коэффициент детерминации полученной модели с экспериментальными данными крайне высок (рис. 4.2). Значения F -критериев Фишера – $F = 11845,26 > F_T = 4,15$. Графическая интерпретация модели (2.5) показана прямой на рис. 4.2. и кривой на рис. 4.1, б в форме зависимости $CCT_s = f(t)$.

Для применения уточненных моделей (2.7) и (2.5) при выращивании цыплят-бройлеров требуется их масштабирование для заданного максимального уровня освещенности кормушки $E_{Z\text{ MAX}}$ и продолжительности светового периода t_c , поэтому модель освещенности $E_S = f(t)$ была представлена в виде:

$$E_S = \frac{1}{a} \ln \left\{ \frac{(h_{\text{MAX}} - h_0) \cos \left[\arccos(-h_0/[h_{\text{MAX}} - h_0])(1 - 2t/t_c) \right] + h_0}{h_{\text{MAX}}} (e^a - 1) + 1 \right\}, \quad (4.1)$$

где t – время от начала светового периода, с;

Примем за расчетный коэффициент $d = 1,472$ выражение:

$$d = \arccos(-h_0/[h_{\text{MAX}} - h_0]). \quad (4.2)$$

Тогда получим уравнение (4.1) в упрощенной форме:

$$E_S = \frac{1}{a} \ln \left\{ \frac{(h_{\text{MAX}} - h_0) \cos [d(1 - 2t/t_c)] + h_0}{h_{\text{MAX}}} (e^a - 1) + 1 \right\}. \quad (4.3)$$

Применение моделей (4.3) и (2.5) для управления параметрами динамического освещения в птичнике для выращивания цыплят-бройлеров при режиме освещения ЗС:1Т [19] и $E_{Z\text{ MAX}} = 10$ лк, показано на рис. 4.3.

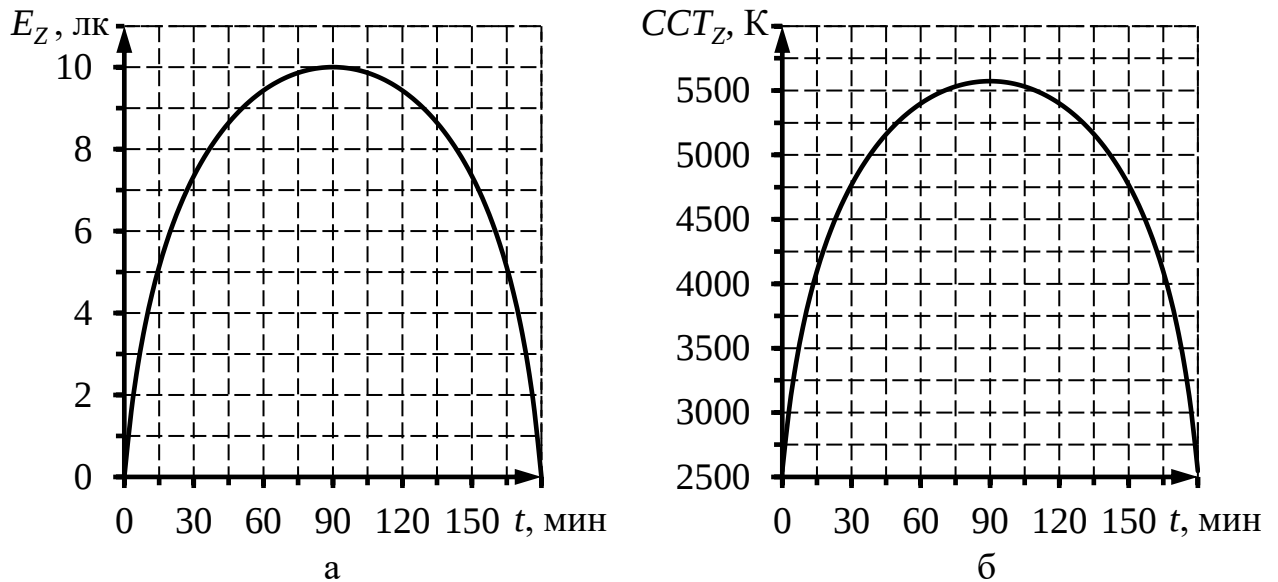


Рисунок 4.3 – Графики зависимостей: а – $E_Z = f(t)$; б – $CCT_Z = f(t)$

На основании полученных результатов исследований был запатентован способ локального светодиодного динамического освещения птичников с моделированием естественной световой среды [95].

4.2 Разработка локального светодиодного светильника и обоснование его параметров

4.2.1 Результаты экспериментальных исследований конструктивных параметров светильника

По методике, изложенной в п. 3.3, были получены экспериментальные данные 18 опытов по измерению распределений освещенности на контрольной поверхности, создаваемой опытными образцами поликарбонатных труб-рассеивателей и печатной платы для светодиодов, 21 опыт по измерению распределений освещенности при изменении активной длины экспериментального образца локального светодиодного светильника для птичника.

На начальном этапе обработки опытных данных освещенность была представлена в относительных единицах; произведено усреднение и симметрирование освещенности относительно оптического центра ($n = 6$); путем графического анализа устранены выбросы. Графические интерпретации результатов обработки полученных данных в виде кривых зависимостей распределения освещенности E на контрольной поверхности, создаваемой экспериментальными образцами светильников представлены на рис. 4.4 и 4.5.

По полученным графикам, представленным на рис. 4.4, видно, что вид исследуемых образцов поликарбонатных труб-рассеивателей незначительно влияет на форму кривых распределения освещенности на продольной X и поперечной Y оси контрольной поверхности. Форма данных кривых и главным образом зависит от исходного светораспределения применяемого светодиода.

Из графиков кривых распределения освещенности, представленных на рис. 4.5, следует что увеличение активной длины светильника до 38–46 мм оказывает существенное влияние на форму кривых распределении освещенности на контрольной поверхности.

Ожидаемо вид опытных образцов поликарбонатных труб-рассеивателей повлиял на уровень освещенности, создаваемой ими на контрольной поверхности, что потребовало проведения расчета их коэффициентов k_t светопропускания.

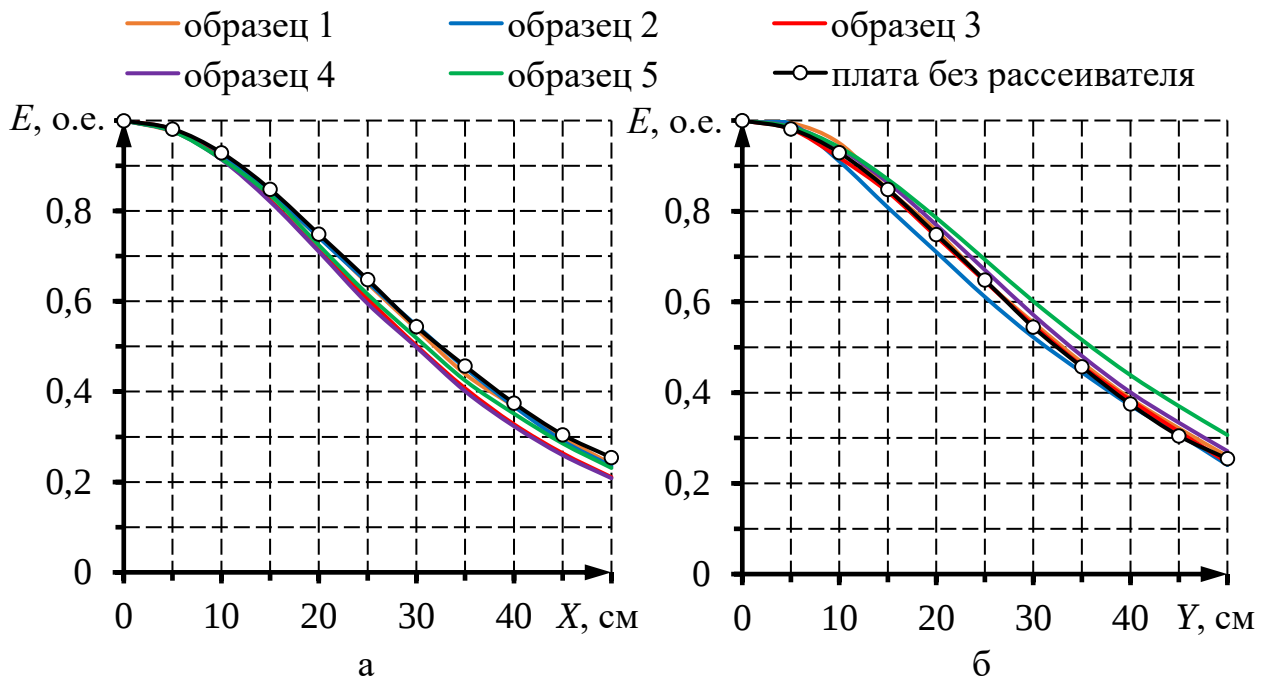


Рисунок 4.4 – Графики зависимости: а – $E = f(X)$; б – $E = f(Y)$,
полученные для опытных образцов труб-рассеивателей

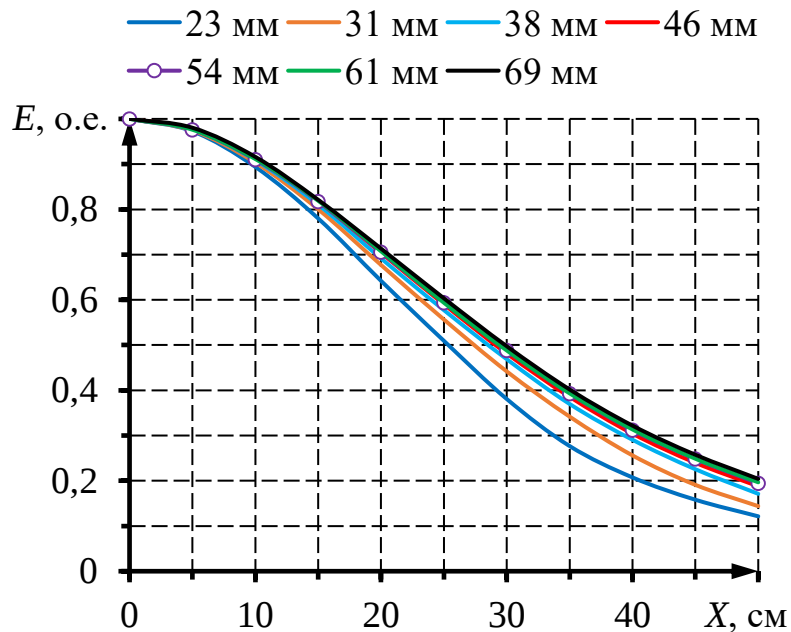


Рисунок 4.5 – Графики зависимости $E = f(X)$,
полученные при изменении активной длины светильника

Определение коэффициентов k_t опытных образцов производилось приближенно на основании отношения средних значений освещенности E_0 под их оптическими центрами к среднему значению освещенности, создаваемой СИД на печатной плате без рассеивателя. Результаты расчета k_t представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Опытные данные и результаты расчета коэффициента k_t

Образец	Описание	E_0 , лк	k_t , о.е.
1	Прозрачный	94,3	0,868
2	Опаловый 1	94,4	0,869
3	Опаловый 2	79,3	0,730
4	Опаловый 3	68,6	0,632
5	Белый	42,4	0,390
-	Плата СИД	108,6	-

Из полученных данных (табл. 4.1) следует, что коэффициент светопропускания опытных образцов изменяется в пределах $k_t = 0,87\text{--}0,39$. Образцы 1 и 2 обладают высоким коэффициентом светопропускания. Наименьшим светопропусканием обладает образец 5 из белого поликарбоната. Для корпуса локального светодиодного светильника рационально использование образцов 1, 2 и 3, обладающие высокими коэффициентами светопропускания $k_t = 0,87\text{--}0,73$.

Для проведения оценки равномерности освещения на дне кормушки потребовалось математическое описание экспериментальных кривых (рис. 4.5). Их аппроксимация проводилась с использованием экспоненциальной модели, основанной на законе нормального распределения Гаусса, вида [154]:

$$E = \exp\left\{-X^2 / \left[k_1 \ln(|X| + k_2)\right]^2\right\}, \quad (4.4)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты регрессии модели.

Результаты аппроксимации экспериментальных кривых (рис. 4.5) математической моделью (4.4) с помощью компьютерной программы Statistika, представлены в табл. 4.2. Точность аппроксимации диапазоне $X = 0\text{--}50$ см подтверждена высокими коэффициентами детерминации. Вычисленные фактические значения F -критериев Фишера значительно больше табличного $F_T = 4,46$, что свидетельствует о адекватности применяемого уравнения регрессии в целом.

С использованием полученных математических моделей были разработаны модели распределения суммарной освещенности E_Σ , создаваемой светильниками на дне кормового желоба при $l_A = 23\text{--}69$ и расстоянии между светильниками в ряду $L = 40\text{--}90$ см. Графическая интерпретация модели зависимости $E_\Sigma = f(X)$ для $l_A = 46$ мм и $L = 60$ см, показана на рис. 4.6, на котором E_1 , E_2 и E_3 – освещенности,

создаваемые центральным, соседним левым и правым светильниками.

Таблица 4.2 – Результаты аппроксимации зависимостей $E = f(X)$

l_A , мм	k_1	k_2	R^2	F
23	-1142	10105	0,9992	5022
31	-2560	21961	0,9999	77118
38	-3414	23034	0,9999	61251
46	-3550	23125	0,9999	33516
54	-4398	26377	0,9999	67812
61	-4226	25223	0,9999	41042
69	-3788	22657	0,9999	36337

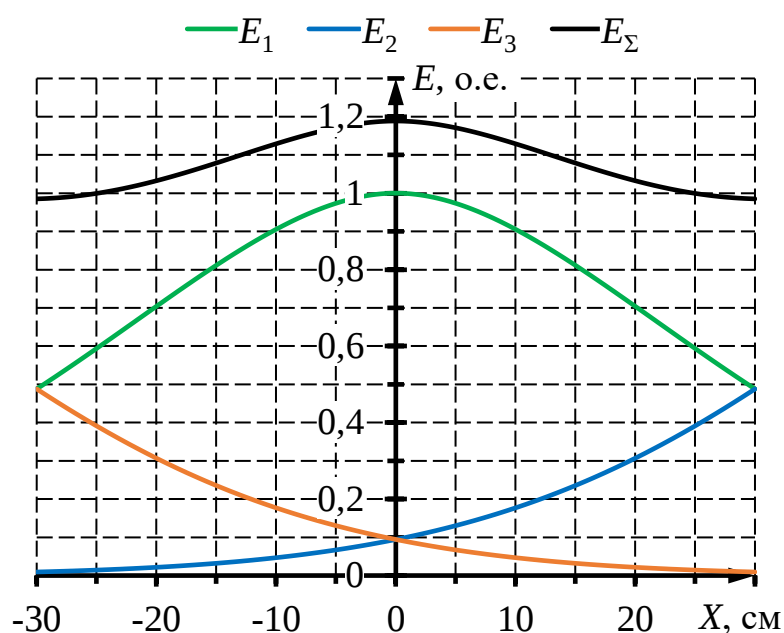


Рисунок 4.6 – Распределение освещенности на дне кормового желоба

По рис. 4.6 видно, что при высоте подвеса светильников 0,5 м, освещенность на дне кормового желоба плавно изменяется в пределах $E_\Sigma = 1,189\text{--}0,985$ о.е.

Численная оценка равномерности локального освещения в птичнике проводилась с использованием коэффициент предельной неравномерности распределения освещенности $k_{\text{НП}}$, определяемого по формуле [147]:

$$k_{\text{НП}} = E_{\text{MAX}}/E_{\text{MIN}}, \quad (4.4)$$

где E_{MAX} и E_{MIN} – максимальная и минимальная освещенность.

Результаты расчетов коэффициентов $k_{\text{НП}}$ для светильников с активной длиной $l_A = 23\text{--}69$ мм и расстояний $L = 40\text{--}90$ см, показаны на рис. 4.7.

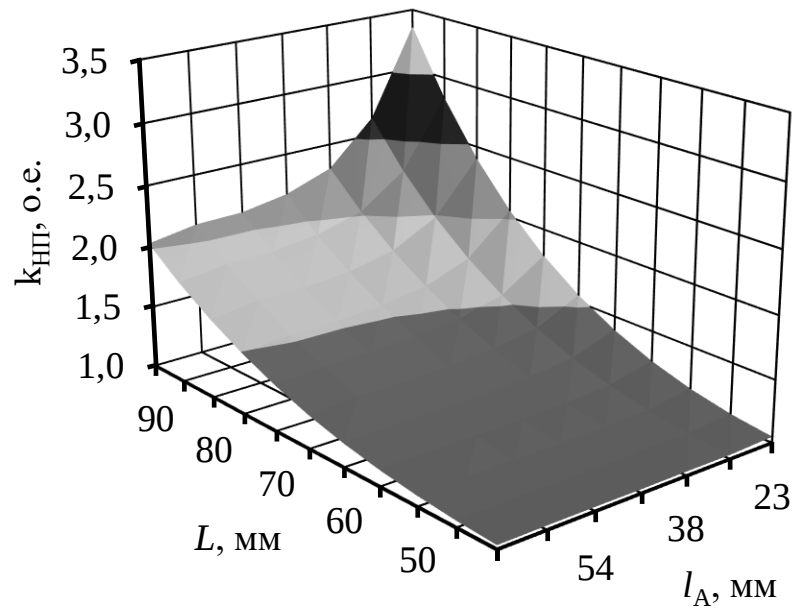


Рисунок 4.7 – Графическая модель зависимости $k_{\text{нп}} = f(l_A, L)$

Из графика зависимости (рис. 4.7) следует, что при $l_A < 38$ мм и $L < 65$ см наблюдается резкое увеличение коэффициента $k_{\text{нп}}$. Исходя из максимального значения коэффициента неравномерности освещенности в птичнике $k_{\text{нп}} = 1,57$ [148], с использованием модели (4.4) был произведен расчет максимально допустимого расстояния L_{MAX} между светильниками в ряду. Результаты расчета, представленные в форме графика зависимости $L_{\text{MAX}} = f(l_A)$, показаны на рис. 4.8.

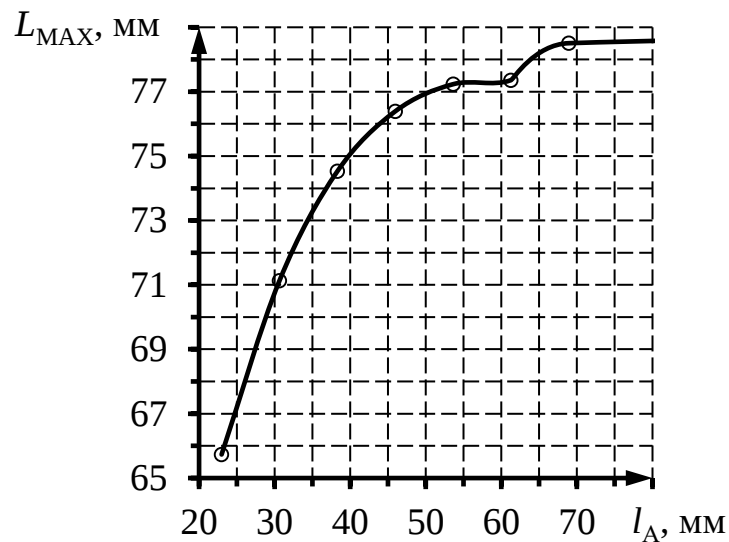


Рисунок 4.8 – График зависимости $L_{\text{MAX}} = f(l_A)$

при высоте подвеса светильников 0,5 м

По графику зависимости (рис. 4.8) видно, что наибольшее (около 11 см) изменение величины L_{MAX} наблюдается на участке $l_A = 23\text{--}46$ мм. Дальнейшее увеличение до $l_A = 69$ мм повышает L_{MAX} всего на 2 см и является нецелесообразным, что также подтверждается результатами обработки экспериментальных данных, полученные для $l_A = 300$ мм, которой соответствует $L_{\text{MAX}} = 79,2$ см.

4.2.2 Результаты экспериментального определения рабочей температуры активной области светодиодов

По методике, изложенной в п. 3.4, были получены экспериментальные данные 15 опытов по измерению прямого падения напряжения на светодиодах при их токовом нагреве в локальном светодиодном светильнике для птичника в процессе его работы.

На начальном этапе обработки данных был отобран полезный сигнал и проведена его нормализация; осуществлена выборка начальных падений напряжений U_{F0} и напряжений U_F при установившейся рабочей температуре светодиодов. Падение напряжения U_{F0} определялось как максимальное зафиксированное в опыте значение напряжения в момент подачи электропитания на СИД. Падение напряжения U_F вычислялось как среднее значение 10-ти последних измерений напряжений в опыте в конце интервала времени 720 с, что гарантировало выход температуры θ_J на установившийся уровень [145]. Результаты обработки, представлены табл. 4.3.

Расчет рабочей температуры активной области СИД, представленный форме табл. 4.3, производился в следующей последовательности: сначала по полученным значениям напряжениям U_{F0} и U_F были вычислены изменения падений напряжений ΔU_F ; затем для значения температурного коэффициента $k_U = 1,718$ мВ/°С [145] по формулам (2.36) и (2.30) определены температуры $\Delta\theta_J$ и θ_J отдельных опытах; потом по температурам $\Delta\theta_J$ и θ_J были вычислены средние значения температур $\bar{\theta}_J$ и их среднеквадратичные отклонения S_{θ} (3.1).

Из полученных результатов расчета (табл. 4.3) следует, что средние значения температур $\bar{\theta}_J$ на всех типах экспериментальных печатных платах при $I_D = 100$ мА оказалось меньше $\theta_{J\text{MAX}} = 80$ °С.

Таблица 4.3 – Опытные данные и результаты расчета рабочих температур р-п-переходов светодиодов

Тип	Опыт	U_{F0} , В	U_F , В	ΔU_F , %	$\Delta \theta_J$, °C	θ_A , °C	θ_J , °C	$\bar{\theta}_J \pm S_0$, °C
А	1	3,032	2,971	2,032	35,87	25	60,87	57,36 ± 2,79
	2	3,021	2,972	1,611	28,33	25	53,33	
	3	3,010	2,954	1,866	32,69	25	57,69	
	4	3,014	2,956	1,914	33,58	25	58,58	
	5	3,007	2,953	1,792	31,36	25	56,36	
В	1	3,021	2,979	1,405	24,70	25	49,70	50,35 ± 4,48
	2	3,000	2,966	1,144	19,97	25	44,97	
	3	3,021	2,966	1,838	32,32	25	57,32	
	4	3,036	2,995	1,352	23,89	25	48,89	
	5	3,013	2,968	1,476	25,89	25	50,89	
С	1	3,004	2,967	1,210	21,15	25	46,15	41,74 ± 3,58
	2	3,000	2,966	1,144	19,97	25	44,97	
	3	3,025	3,000	0,840	14,79	25	39,79	
	4	3,013	2,988	0,844	14,79	25	39,79	
	5	2,995	2,972	0,747	13,02	25	38,02	

Вычисленные с использованием формулы (2.31) тепловые сопротивления светильников $R_{\theta J-A}$ при применение печатных плат типа А, В, и С соответственно составили 109,3 °C/Вт; 85,2 °C/Вт и 56,2 °C/Вт. Сравнение полученных тепловых сопротивлений светильников с максимально допустимым $R_{\theta J-A \text{ MAX}} = 166,6$ °C/Вт, рассчитанным по формуле (2.35) для $\theta_{A \text{ MAX}} = 30$ °C; $\theta_{J \text{ MAX}} = 80$ °C; $P_{D \text{ MAX}} = 0,3$ Вт, указывает на обеспечение благоприятного режима СИД при изменении температурных условия и режима светильника в птичнике.

4.2.3 Разработка светильника

На основе изложенных теоретических положений (п. 2.2) и анализа полученных результатов экспериментальных исследований (п. 4.2.1 и 4.2.2), был разработан прототип локального светодиодного светильника системы динамического освещения птичников с клеточным содержанием птицы, представленный на рис. 4.9, на котором: 1 – поликарбонатная труба-рассеиватель; 2 – поликарбонатная торцевая заглушка; 3 – держатель светильника; 4 – герметичный кабельный ввод типа PG-7; 5 – питающий кабель.

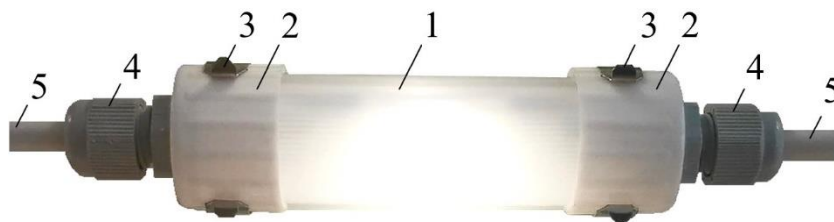


Рисунок 4.9 – Разработанный локальный светодиодный светильник системы динамического освещения птичников

В разработанном светильнике (рис. 4.9) с целью снижения коэффициента слепящей блескости и показателей дискомфорта для светильника применяется поликарбонатная труба-рассеиватель образца 3 с коэффициентом светопропускания $k_t = 0,73$; с целью повышения КПД светильника – образцов 1, 2 с $k_t = 0,87$ (табл. 4.1). Активная длина светильника $l_A = 5$ см, общая длина (с учетом заглушек) составляет 9 см.

Внутри светильника используется разработанная печатная плата для светодиодов, показанная на рис. 4.10. В качестве источников света на печатной плате применяются два высокоэффективных SMD-светодиода типа LM561B Plus компании «Samsung LED» [163] с номинальной КЦТ светодиодов белого теплого и холодного света равны 2700 К и 5700 К.



Рисунок 4.10 – Разработанная печатная плата для светодиодов

Разработанная печатная плата (рис. 4.10) при токе через светодиоды $I_D = 100$ мА изготавливается из более дешевого [145] фольгированного стеклотекстолита по типу А (табл. 3.1). При высоте подвеса 0,5 м светильник обеспечивает освещенность дна кормушки для цыплят-бройлеров на уровне 25–30 лк по одному каналу света. Среднее падение напряжения на светодиоде равно $U_F = 2,96$ В, а температура его активной области не превышает 60 °С. При токе $I_D = 140$ –180 мА для предотвращения перегрева СИД печатная плата изготавливается по типу В.

Светодиоды на печатной плате (рис. 4.10) имеет отдельные линии электропи-

тания (рис. 4.9), что позволяет использовать последовательное подключение светильников и изменять его КЦТ оптического излучения. Встроенный в СИД стабилизатор, предотвращает разрыв цепи электропитания светильников при электрическом пробое в полупроводнике. С целью повышения защитных свойств в условиях повышенной влажности и наличия агрессивной среды в птицеводческом помещении печатная плата покрыта белой изоляционной маской.

4.2.4 Результаты экспериментального определения пространственного светораспределения светильника

По методике, изложенной в п. 3.5, были получены экспериментальные данные пяти опытов по измерению сил света опытных образцов локальных светодиодных светильников для птичника.

На начальном этапе обработки опытных данных силы света были представлена в относительных единицах; произведено их усреднение и симметрирование для продольной (C_{90} и C_{270}) и поперечной (C_0 и C_{180}) плоскости светильника относительно оптического центра ($n = 10$); выполнен расчет среднеквадратических отклонений (3.1); проведена проверка на выбросы по критериям Граббса (3.2) и (3.3). Результаты обработки полученных опытных данных представлены в табл. 4.4.

Среднеквадратические отклонения сил света S_I в обеих плоскостях составили менее 1 % (табл. 4.4). Расчетные значения критериев Граббса G_1 и G_2 меньше табличного $G_T = 2,29$, что свидетельствует об отсутствии аномальных измерений. На основе полученных данных в полярной системе координат были построены кривые силы света светильника в нижнюю полусферу, представленные на рис. 4.11.

В соответствии с ГОСТ 34819–2021 формы полученных кривых сил света (рис. 4.11) в обеих плоскостях характеризуются косинусным светораспределением, при этом форма КСС в продольной плоскости близка к глубокому типу. Более широкая форма КСС в поперечной плоскости положительно сказывается на распределении освещенности в птичнике и позволяет увеличить расстояние между светильниками в ряду при их поперечном расположении, но оказывает негативное влияние на его КПД, так как часть светового потока направляется в верхнюю полусферу.

Таблица 4.4 – Результаты обработки данных измерений сил света

$\gamma, ^\circ$	Продольная плоскость				Поперечная плоскость			
	$I, \text{о.е.}$	$S_I, \%$	G_1	G_2	$I, \text{о.е.}$	$S_I, \%$	G_1	G_2
0	1,000	0,000	-	-	1,000	0,000	-	-
5	0,994	0,070	1,71	1,40	0,996	0,541	1,10	1,12
10	0,975	0,131	1,97	1,67	0,981	0,232	1,61	1,37
15	0,945	0,159	1,87	1,40	0,962	0,187	1,29	1,59
20	0,902	0,165	1,76	1,54	0,935	0,557	1,32	1,16
25	0,849	0,161	1,93	1,98	0,903	0,282	1,19	1,81
30	0,786	0,216	1,87	1,72	0,871	0,256	1,60	1,14
35	0,715	0,220	2,22	1,26	0,831	0,271	1,21	1,96
40	0,637	0,235	2,09	1,08	0,786	0,346	1,41	1,86
45	0,553	0,252	1,73	1,14	0,740	0,267	1,13	2,01
50	0,467	0,288	2,07	1,36	0,688	0,333	1,16	2,05
55	0,377	0,445	2,29	1,18	0,633	0,364	1,37	1,70
60	0,293	0,274	2,27	1,13	0,578	0,352	1,32	1,75
65	0,224	0,233	2,04	1,30	0,523	0,276	1,36	1,90
70	0,163	0,202	1,72	1,43	0,470	0,198	1,51	1,41
75	0,109	0,206	1,46	1,55	0,420	0,257	1,79	1,41
80	0,065	0,153	1,70	1,15	0,373	0,307	1,49	1,51
85	0,036	0,166	1,30	1,54	0,331	0,423	1,19	1,46
90	0,022	0,208	1,09	1,32	0,293	0,465	1,31	1,42

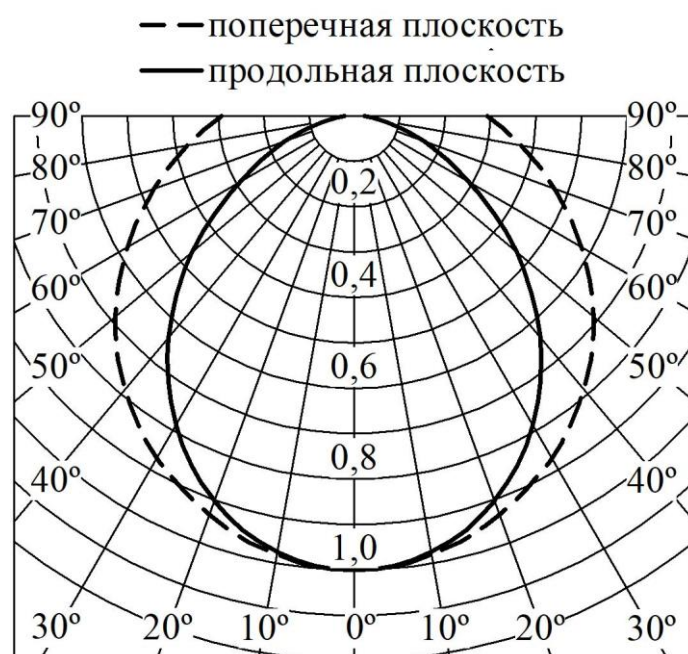


Рисунок 4.11 – КСС разработанного светильника

4.3 Разработка многоканального высоковольтного светодиодного драйвера и платы управления

На основе изложенных теоретических положений (п. 2.4 и 2.5) с учетом принципов построения электронных схем были разработаны структуры многоканального высоковольтного светодиодного драйвера и его платы управления для системы динамического локального освещения птичников, представленные на рис. 4.12, на котором: БЗ – блок элементов защиты электрических цепей от токов короткого замыкания и перенапряжения; БП1 и БП2 – блоки питания цепей управления светодиодным драйвером и платы управления; Ф1 – сетевой фильтр; Ф2 и Ф3 – фильтры сглаживания пульсаций напряжений; БМК – блок микроконтроллера; ДТ1 и ДТ2 – датчики температуры окружающего воздуха и радиатора охлаждения силовых транзисторов; МП – модуль передачи данных; ОР – оптическая развязка сигналов; БУ – блок управления опорными токами токовых зеркал; СБ – силовой блок транзисторов каналов токовых зеркал.

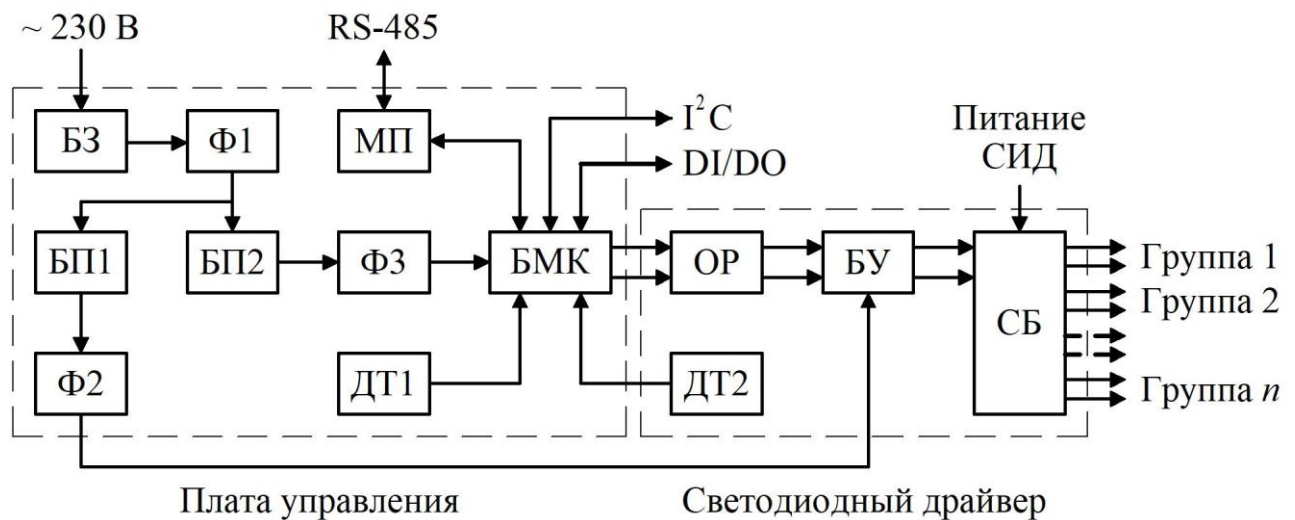


Рисунок 4.12 – Структуры светодиодного драйвера и его платы управления для системы динамического локального освещения птичников

В предложенных структурах (рис. 4.12) светодиодный драйвер выполняется на базе улучшенной многоканальной схемы простого «трехтранзисторного» токового зеркала (рис. 2.4). Управление световым потоком и КЦТ оптического излучения локальных светодиодных светильников (рис. 4.9) реализуется за счет применения двух токовых зеркал.

Формирование ШИМ-сигналов управления U_{DW} и U_{DC} выполняется микроконтроллером платы управления (рис. 4.12). Предусмотрена оптическая развязка сигналов с целью предотвращения попадания высокого напряжения от драйвера в блок микроконтроллера платы управления. Микроконтроллер также производит опрос и обработку сигналов датчиков, и с помощью модуля передачи реализует обмен данными с контроллером освещения по интерфейсу RS-485.

Предусмотрена защита микроконтроллера и транзисторов светодиодного драйвера от перегрева за счет использования датчиков температур ДТ1 и ДТ2 (рис. 4.12), а также заложена возможность управления блоком питания светодиодов и контроля срабатывания защитных аппаратов с помощью дискретных входов и выходов (DI/DO) микроконтроллера.

Разработанные на основе структур (рис. 4.12) прототипы 16-канального высоковольтного светодиодного драйвера и его платы управления, предназначенные для локального динамического освещения четырехъярусной клеточной батареи птичника для содержания цыплят-бройлеров, представлены на рис. 4.13 и 4.14.

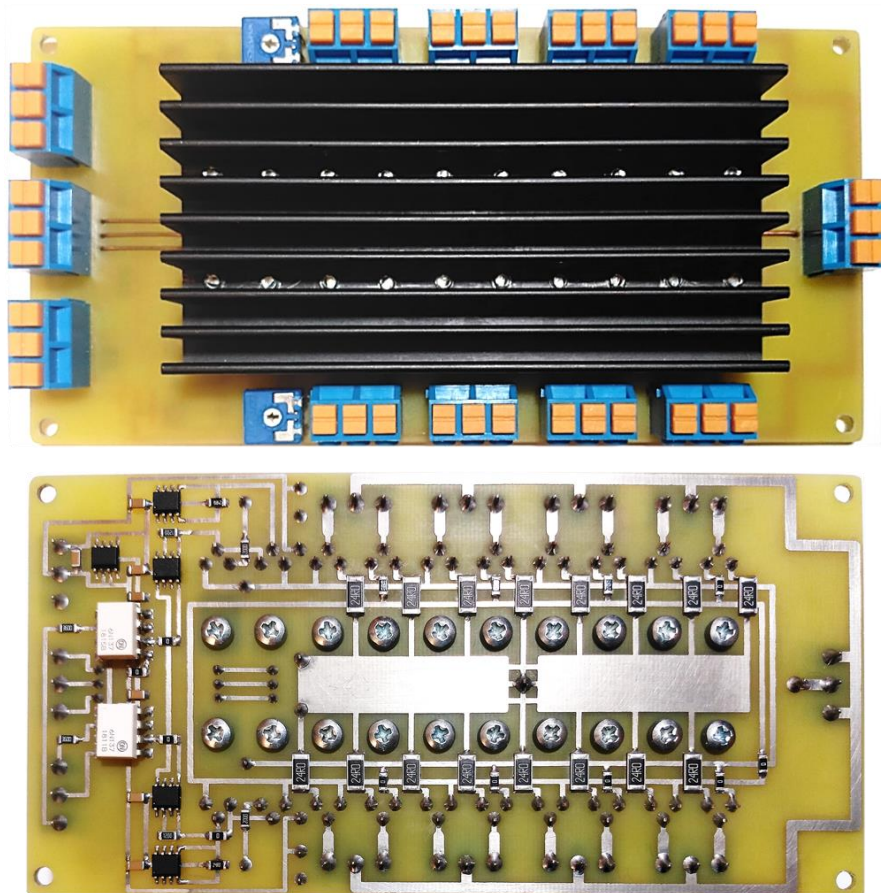


Рисунок 4.13 – 16-канальный светодиодный драйвер

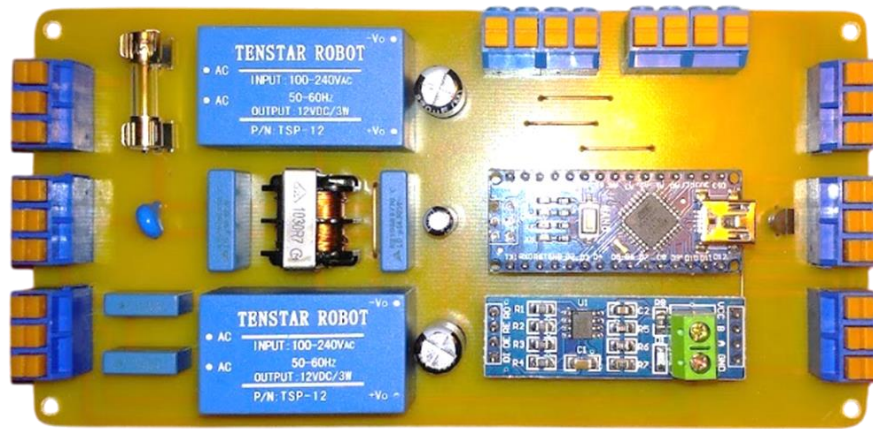


Рисунок 4.14 – Плата управления светодиодным драйвером

Проектная величина токов в каналах нагрузки разработанного светодиодного драйвера $I_H = I_A = 100$ мА. Номинальный коэффициент отражения токовых зеркал равен $k_0 = 10$ (2.37). Драйвер имеет 8 отдельных групп выходных каналов (рис. 4.15), в каждой из которых, последовательно подключаются до 100 разработанных локальных светодиодных светильников (рис. 4.9).

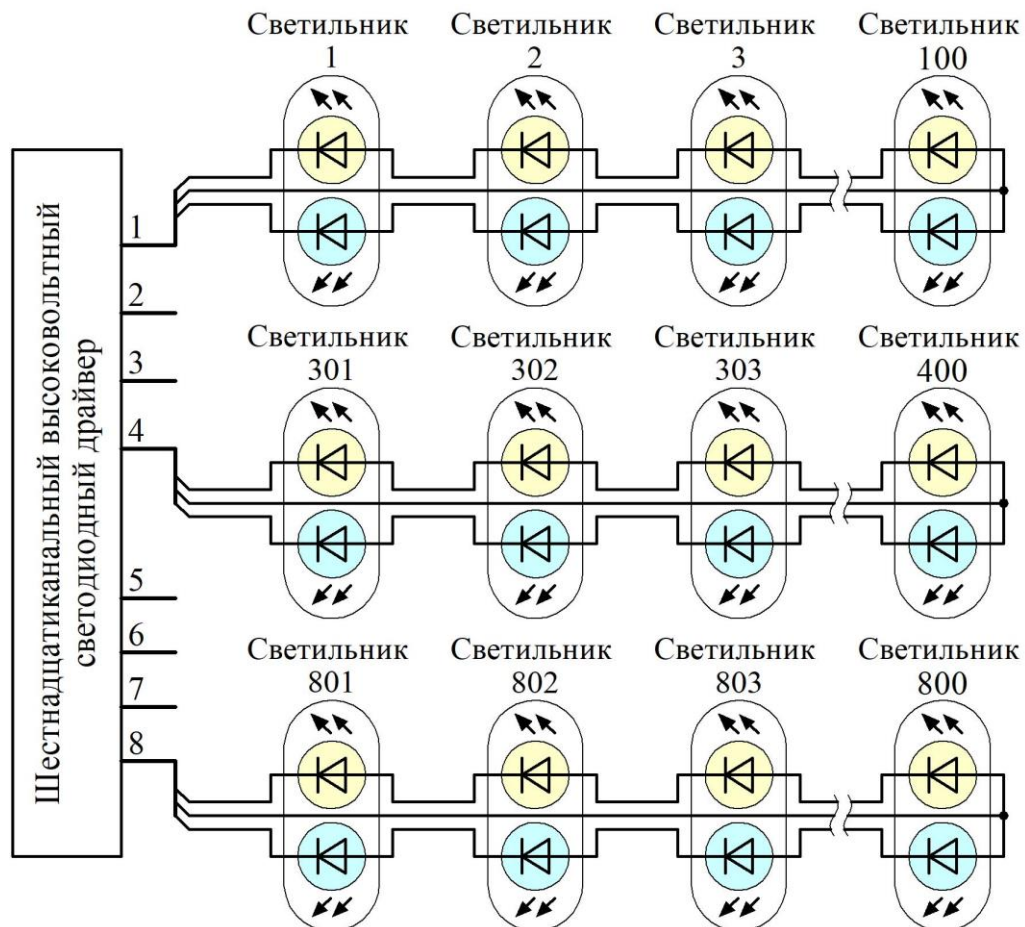


Рисунок 4.15 – Схема подключения локальных светодиодных светильников к 16-канальному высоковольтному светодиодному драйверу

В разработанном драйвере (рис. 4.13) токовые зеркала реализованы на высоковольтных биполярных транзисторах ST13003, расположенных на одном радиаторе HS 117-100. Контроль температуры радиатора выполнен на аналоговом датчике температуры TMP37. Для задания и точной стабилизации опорных токов I_0 токовых зеркал в место токозадающего резистора R1 схемы (рис. 2.4), применены интегральные микросхемы LM317L, работающие в режиме ограничения тока (рис. 1.11). Оптическая развязка ШИМ-сигналов управления амплитудой напряжения $U_{DA} = 5$ В выполняется на высокоскоростных оптопарах 6N137.

С учетом существующих подходов к реализации подобных систем управления [114; 129; 22], плата управления светодиодным драйвером (рис. 4.14) была создана на базе микроконтроллера ATmega328P, распаянного в составе электронной платы типа Arduino Nano. Плата снабжена встроенными источниками питания на 5 В и 3,3 В, преобразователем USB $\rightleftharpoons$ UART и интерфейсом I²C, применяемым для подключения цифровых датчиков освещенности. В качестве модуля передачи данных использован преобразователь интересов HW-97 (UART $\rightleftharpoons$ RS-485). Контроль температуры окружающего воздуха выполнен на датчике TMP37.

Сетевой фильтр платы управления (рис. 4.14) реализован на конденсаторах класса X2 и Y2 и симметричном дросселе типа PLA10AS. В качестве фильтров сглаживания пульсаций выходных напряжений источников питания применены электролитические конденсаторы и дополнительные развязывающие керамические SMD-конденсаторы. Электропитание цепей управления драйвера и платы управления обеспечивается модульными блоками питания TSP-12 с выходным напряжением 12 В. Защита электрических цепей выполнена на быстродействующем предохранителе ВПБ6-5 и варисторе VDR-05D.

4.4 Результаты экспериментальных исследований характеристик многоканального высоковольтного светодиодного драйвера

По методике, изложенной в п. 3.5, были получены экспериментальные данные 16 опытов по определению величины стабилизированного тока в каналах нагрузки, 10 опытов по определению величины тока при изменении сопротивления

нагрузки и 16 опытов по определению регулировочной характеристики прототипа 16-канального высоковольтного светодиодного драйвера для птичника, разработанного на основе токового зеркала.

Полученные экспериментальные данные и результаты расчета токов в каналах нагрузки, представлены в табл. 4.5 и табл. 4.6. Расчетные значения критериев Граббса опытных данных (табл. 4.5) сопротивлений нагрузки составили $G_1 = 1,94$ (3.2) и $G_2 = 2,41$ (3.3); падений напряжений на нагрузке – $G_1 = 1,06$ и $G_2 = 1,87$. Вычисленные значения критериев оказались меньше $G_T = 2,59$, что указывает на отсутствие аномальных измерений. Среднее значение тока в каналах нагрузки и его среднеквадратическое отклонение составили 100,17 мА и 0,238 мА, что свидетельствует о крайне высокой точности стабилизации тока разработанным драйвером.

Таблица 4.5 – Опытные данные и результаты расчета токов I_H

Канал	R_H , Ом	U_H , В	I_H , мА
1	66,8	6,68	100,00
2	66,7	6,69	100,30
3	66,7	6,69	100,30
4	66,9	6,69	100,00
5	67,0	6,69	99,85
6	66,7	6,71	100,60
7	66,9	6,69	100,00
8	66,7	6,67	100,00
9	66,9	6,68	99,85
10	66,9	6,69	100,00
11	66,8	6,69	100,15
12	66,9	6,70	100,15
13	66,8	6,69	100,15
14	66,8	6,72	100,60
15	66,7	6,70	100,45
16	66,7	6,69	100,30

Из опытных данных, представленных в табл. 4.6, следует, что изменение R_H в четвертом канале, практически не сказывается на величине стабилизированного тока даже при коротком замыкании ($R_H = 0$). При этом практически отсутствует взаимное влияние каналов друг на друга. Обрыв питающего провода ($R_H = \infty$) ожидаемо приводит к снижению I_H в каналах, относящихся к этому токовому зеркалу.

Таблица 4.6 – Опытные данные и результаты расчета токов I_H при изменении сопротивления в четвертом канале нагрузки

Канал 4			Канал 2		Канал 10		Канал 15	
R_H , Ом	U_H , В	I_H , мА	U_H , В	I_H , мА	U_H , В	I_H , мА	U_H , В	I_H , мА
0	0	99,90	6,66	99,70	6,65	99,40	6,67	100,00
46,5	4,65	100,00	6,67	100,00	6,66	99,55	6,68	100,15
54,5	5,45	100,00	6,68	100,15	6,67	99,70	6,69	100,30
66,9	6,69	100,00	6,69	100,30	6,69	100,00	6,70	100,45
73,3	7,31	99,73	6,69	100,30	6,68	99,85	6,69	100,30
80,3	8,02	99,88	6,70	100,45	6,69	100,00	6,70	100,45
90,2	8,99	99,67	6,71	100,60	6,69	100,00	6,70	100,45
98,1	9,72	99,08	6,70	100,45	6,69	100,00	6,71	100,60
113,3	9,67	85,35	6,67	100,00	6,66	99,55	6,68	100,15
∞	0	0	4,73	70,91	4,72	70,55	6,69	100,30

Резкое снижение величины стабилизированного тока до $I_H = 85,35$ мА (табл. 4.6) наблюдается при $R_H = 113,30$ Ом, когда сказывается ограничение уровня напряжения питания и напряжение U_{CE} силового транзистора оказывается менее напряжения насыщения. С использованием формулы (2.48) определено, что высокий уровень стабилизации тока (в пределах 1%) сохраняется при падении напряжения на драйвере не менее $U_{DR} = 3$ В.

На начальном этапе обработки опытных данных исследования регулировочной характеристики светодиодного драйвера, данные измерений освещенности были представлены в относительных единицах; произведено их усреднение ($n = 16$); проведена проверка на выбросы по критериям Граббса. Графическая интерпретация результатов обработки полученных данных в виде зависимости $E_C = f(k_D)$, представлена рис. 4.16.

Полученная зависимость $E_C = f(k_D)$ (рис. 4.16, а) с высокой точностью ($R^2 > 0,9999$) описывается уравнением прямой, проходящей через начало координат под углом 45° . Незначительные отклонения от линейного тренда наблюдаются на граничных диапазонах коэффициента заполнения (рис. 4.16, б), вызванные искажениями формы импульсов управляющих ШИМ-сигналов напряжений на высокоскоростных отпарках [144].

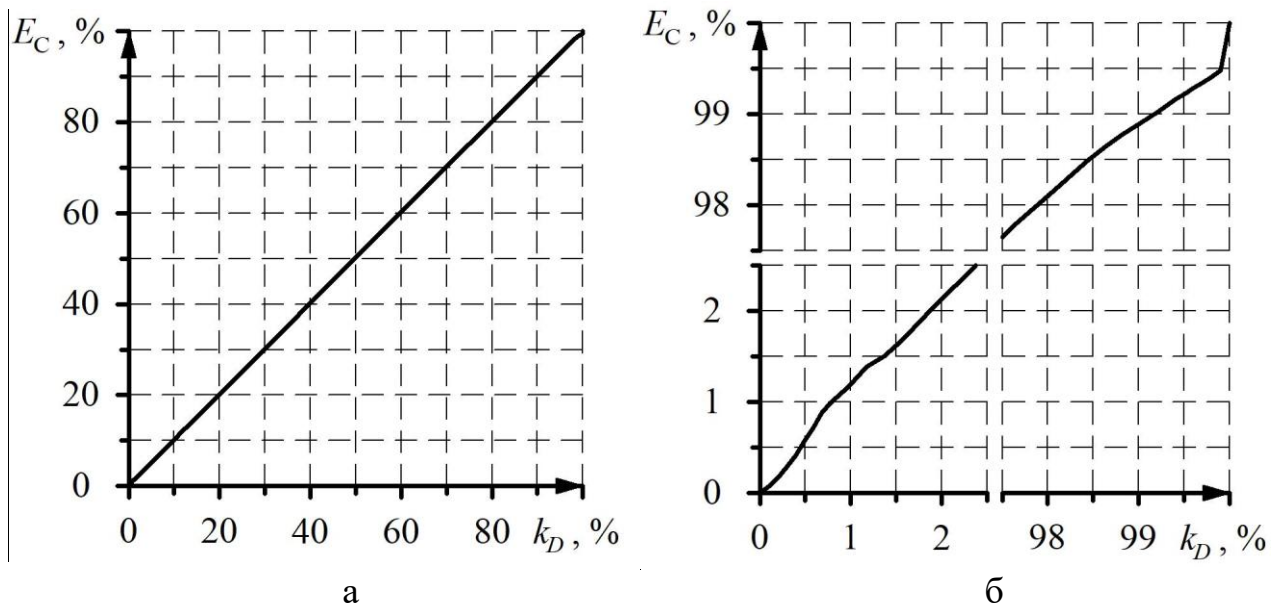


Рисунок 4.16 – Графики зависимости $E_C = f(k_D)$: а – для $k_D = 0\text{--}100 \%$;
б – для $k_D = 0\text{--}2,5 \%$ и $k_D = 97,5\text{--}100 \%$

На основе полученных результатов экспериментальных исследований была проведена оценка эффективности разработанного светодиодного драйвера (рис. 4.13) в виде зависимости $\eta_D = f(k_D)$ для последовательного подключения в одной группе выходных каналов драйвера 100 локальных светодиодных светильников (рис. 4.15). При таком подключении напряжение в канале на нагрузке $U_H = 100U_F = 300 \text{ В}$; изменения напряжение на нагрузке $\Delta U_H = \Delta U_F = 0,02$; ток нагрузки $I_H = I_D = 100 \text{ мА}$ (п. 4.2.2). Потери в цепях управления равны $\Delta P_{Y1} = 97 \text{ мВт}$ и $\Delta P_{Y2} = 55 \text{ мВт}$ [144]. Результаты расчета зависимости $\eta_D = f(k_D)$ по формулам (2.45)–(2.48), показаны на рис. 4.17.

По рис. 4.17, а видно, что при коэффициенте заполнения ШИМ-сигнала $k_D = 1 \%$ КПД светодиодного драйвера в расчете на один канал более 80 %. Для $k_D = 20\text{--}100 \%$ эффективность драйвера составляет $\eta_D = 96\text{--}96,7 \%$ и незначительно зависит от нагрузки (рис. 4.17, б). При этом максимальная мощность нагрузки одного канала равна $P_H = 29,4 \text{ Вт}$, потери мощности на драйвере составляют $\Delta P_{DR} = 1,0 \text{ Вт}$, потери напряжения в питающих светильники медных кабелях сечением $0,5 \text{ мм}^2$ и длине линии 65 м равны $U_L = 0,7 \text{ В}$ [144].

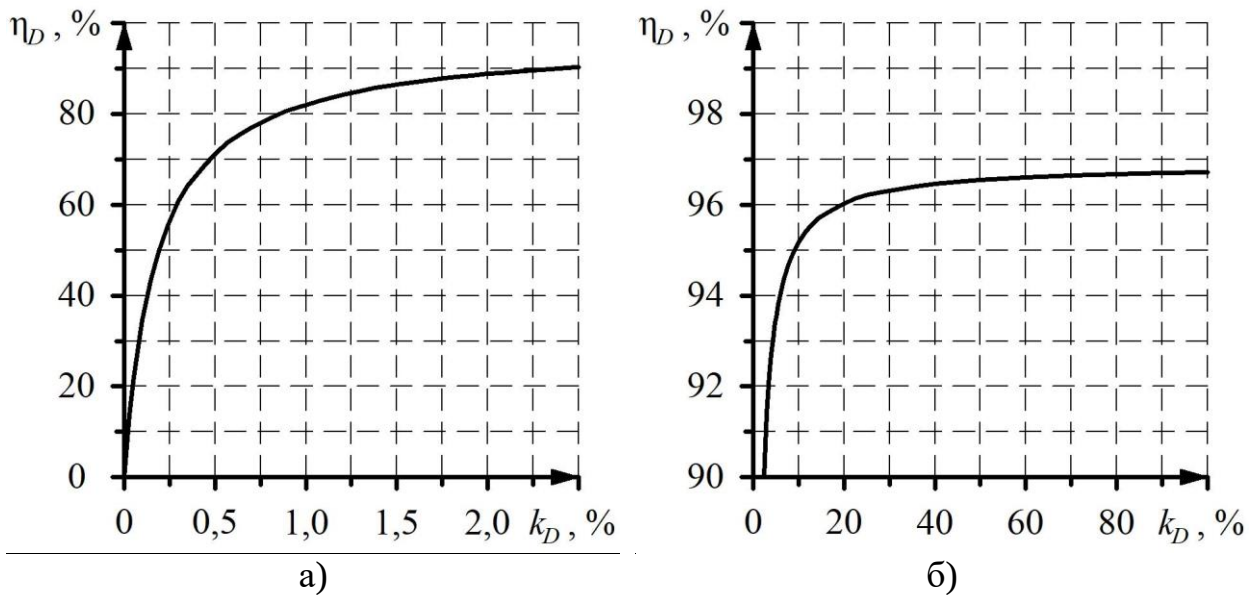


Рисунок 4.17 – Графики зависимости $\eta_D = f(k_D)$:

а – для $k_D = 0–2,5$ %; б – для $k_D = 2,5–100$ %

4.5 Результаты экспериментальных исследований зависимости изменения КЦТ разработанного светильника от коэффициента заполнения управляющего ШИМ-сигнала прямыми токами светодиодов

По методике, изложенной в п. 3.5, были получены экспериментальные данные пяти опытов по измерению КЦТ оптического излучения, создаваемой экспериментальными образцами локальных светодиодных светильников системы динамического освещения птичника, при изменении коэффициента заполнения управляющего ШИМ-сигнала прямого тока.

На начальном этапе обработки опытных данных было произведено усреднение полученных значений КЦТ; выполнен расчет среднеквадратических отклонений (3.1); проведена проверка на выбросы по критериям Граббса (3.2) и (3.3). Опытные данные и результаты их обработки, представлены в табл. 4.7.

Расчетные значения критериев Граббса G_1 и G_2 (табл. 4.7) оказались меньше табличного $G_T = 1,72$ что указывает на отсутствие аномальных измерений. Среднеквадратические отклонения S_{CCT} измеренной КЦТ являются незначительными и не превышают 2,0 %. Тенденция к их повышению с ростом измеряемой КЦТ главным образом обусловлена увеличением погрешности измерений колориметра.

Таблица 4.7 – Опытные данные измерений КЦТ и результаты их обработки

k_{DWC}	CCT, K					$\overline{CCT}, K$	S_{CCT}, K	G_1	G_2
	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4	Опыт 5				
0	2660	2640	2680	2640	2680	2660	20,00	1,00	1,00
0,125	2900	2840	2890	2850	2890	2874	27,02	0,96	1,26
0,250	3160	3100	3140	3090	3140	3126	29,66	1,15	1,21
0,375	3450	3375	3400	3350	3425	3400	39,53	1,26	1,26
0,500	3775	3700	3725	3675	3750	3725	39,53	1,26	1,26
0,625	4150	4050	4100	4025	4150	4095	57,01	0,96	1,23
0,750	4600	4450	4500	4450	4600	4520	75,83	1,06	0,92
0,875	5100	5000	5000	4925	5200	5045	106,65	1,45	1,13
1,000	5700	5600	5600	5500	5800	5640	114,02	1,40	1,23

Фактический диапазон изменения КЦТ разработанного светильника, определенный на основе средней коррелированной цветовой температуры $\overline{CCT}$, составляет от 2660 до 5640 К (табл. 4.6). Постоянная составляющая КЦТ равна $a_0 = 2660$ К (2.27). Среднее экспериментальное значение коэффициента соотношения освещенностей в опытах составляло $k_{WC} = 0,923$. Результаты расчета величины изменения КЦТ от минимальной показаны круглыми маркерами на рис. 4.18.

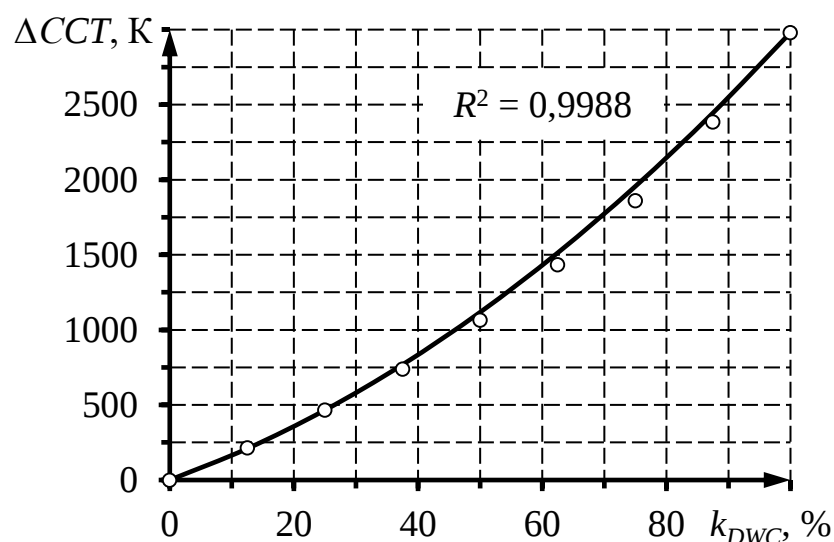


Рисунок 4.18 – Опытные данные и результаты аппроксимации зависимости $\Delta CCT = f(k_D)$

При аппроксимации экспериментальных данных зависимости $\Delta CCT = f(k_D)$ (рис. 4.18) кубической математической моделью (2.28) коэффициенты регрессии составили $a_3 = 903,23$ К; $a_2 = 366,41$ К и $a_1 = 1709,86$ К. Все коэффициенты регрес-

сии являются значимыми. Коэффициент детерминации модели крайне высок – $R^2 > 0,9999$ (3.6). Фактическое значение F -критерия Фишера $F = 70417,20$ (3.7) значительно больше табличного $F_T = 5,41$, что свидетельствует о адекватности уравнения регрессии в целом.

При аппроксимация экспериментальных данных (рис. 4.16) квадратной математической моделью (2.29), коэффициенты регрессии составили $b_2 = 1634,24$ К и $b_1 = 1309,91$ К. Коэффициенты регрессии являются значимыми. Коэффициент детерминации равен $R^2 = 0,9993$. Значения F -критериев Фишера – $F = 4139,41 > F_T = 5,14$.

Полученные коэффициенты регрессии математических моделей (2.28) и (2.29) применимы только для используемых СИД. Допуская, что коэффициенты регрессии b_2 и b_1 при условии (2.15) напрямую связаны с КЦТ используемых светодиодов, их упрощенно можно упрощенно вычислять через среднее значение диапазона изменения КЦТ светильника, как:

$$b_2 = b_1 = (CCT_C - CCT_W) / 2, \quad (4.5)$$

где CCT_C – КЦТ оптического излучения по каналу белого холодного света, К.

Коэффициенты регрессии b_2 и b_1 , вычисленные на основе опытных данных (табл. 4.7) по выражению (4.5), составили $b_2 = b_1 = 1490$ К. Коэффициент детерминации модели (2.29) с данными значениями коэффициентов регрессии достаточно высок (рис. 4.18). Значения F -критериев Фишера – $F = 2579,32 > F_T = 5,14$. Графическая интерпретация полученной математической модели показана кривой на рис. 4.18.

При значениях коэффициентов регрессии модели (2.29), определенных по выражению (4.5), ее точность снижается несущественно (менее чем на 0,1 %), а расчетные значения КЦТ проходят через крайние точки, определяющие диапазон изменения КЦТ (рис. 4.17). Это позволяет достаточно просто определить коэффициенты регрессии модели при использовании других СИД в светильнике.

4.6 Разработка цифровой системы управления динамическим локальным светодиодным освещением птичника

На основании проведенного анализа (п. 1.4), изложенных теоретических положений (п. 2.1–2.6) и полученных результатов экспериментальных исследований (п. 4.1–4.5) была разработана структура цифровой системы динамического локального светодиодного освещения птичников с клеточным содержанием птицы, позволяющая плавно изменять световой поток и КЦТ оптического излучения светильников, представленная на рис. 4.19, на котором: КО – контроллер управления освещением, МУС – модуль управления светильниками, С – разработанные 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 – разработанные многоканальный высоковольтный светодиодный драйвер и его плата управления.

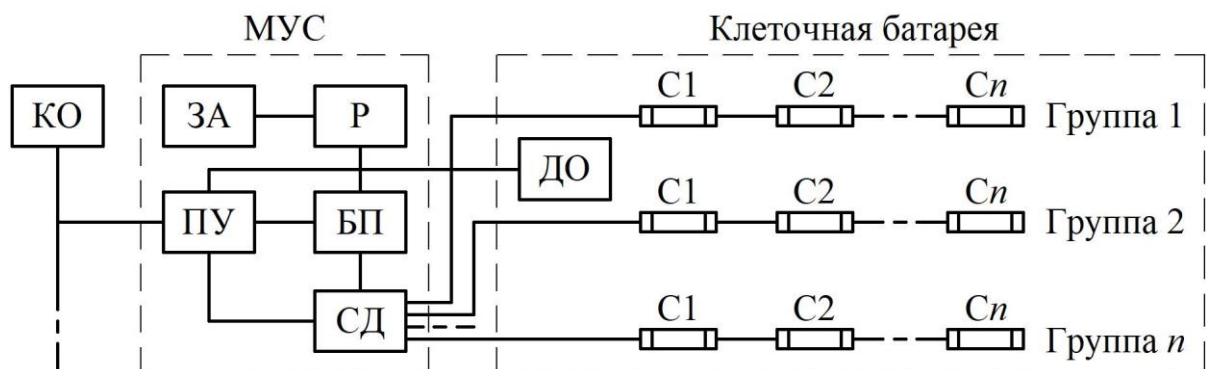


Рисунок 4.19 – Структура цифровой системы динамического локального светодиодного освещения птичников для одной клеточной батареи

В разработанной структуре (рис. 4.19) в соответствии с рекомендациями [78] в качестве контроллера управления освещением используется панельный ПЛК. Контроллер по математическим моделям (4.1) и (2.5) производит расчет заданного уровня освещенности кормушки и КЦТ оптического излучения светильников, которые по помехозащищенному цифровому интерфейсу RS-485 предаются на плату управления модулей управления светильниками клеточных батарей. Количество отдельных модулей управления в птичнике определяется числом и параметрами клеточных батарей.

На микроконтроллере платы управления (рис. 4.19) реализуются системы программного управления освещенностью кормушки и КЦТ оптического излучения светильников, которые выполняются с применением цифрового ПИИ-регулятора (2.58), датчиков освещенности с интерфейсом I²C и цифрового фильтра сигналов измерений освещенности (2.56). С учетом регулирующего воздействия k_R микроконтроллер формирует ШИМ-сигналы управления U_{DW} и U_{DC} световыми потоками светодиодов белого теплого и холодного света частотой 2 кГц, разрядностью 10 бит. Такие параметры сигнала позволяют снизить влияние от эффектов мерцания и «ступенек» при ШИМ-управлении световыми потоками светодиодов даже для более быстродействующего зрительного аппарата птицы чем у человека.

Сигналы U_{DW} и U_{DC} поступают на многоканальный светодиодный драйвер (рис. 4.19). Его электропитание выполняется высоковольтным (до 300 В) импульсным блоком питания с регулировкой выходного напряжения. Это обеспечивает управление в одной группе выходных каналов драйвера до 100 локальных светильников (рис. 4.15). При этом обеспечивается высокая эффективности системы электропитания без учета КПД блока питания, достигающая $\eta_D = 96,7 \%$ (рис. 4.17, б).

Количество локальных светодиодных светильников (рис. 4.9), подключенных в одной группе каналов драйвера определяется исходя из заданной равномерности распределения освещенности (п. 4.2.1), высоты подвеса светильников и длины клеточных батарей. Для каждого яруса клеточной батареи целесообразно организовать индивидуальные линии питания светильников (рис. 4.19). Требуемая величина напряжения питания светильников определяется по выражению (2.49). Низкие потери в линиях электропитания светильников (п. 4.4), позволяют использовать для их подключения кабели сечением всего 0,5...0,75 мм².

Светодиодный драйвер обеспечивают стабилизацию ШИМ-сигналов тока в каналах нагрузки амплитудой около 100 мА, что существенно меньше нижней границы опасного фибрилляционного постоянного тока равного 300 мА [121]. Тем не менее в условиях повышенной влажности и возможного воздействия агрессивной среды в птицеводческом помещении, в соответствии с требованиями ПУЭ [107], в системе (рис. 4.19) используются дополнительные меры защиты: блок питания с

гальванической развязкой от первичной цепи, двойная изоляция питающих проводников и аппараты защиты от токов утечки с порогом срабатывания 30 мА. Важным условием обеспечения электробезопасности является заземление клеточных батарей. Также предусмотрен контроль срабатывания защитных аппаратов за счет использования дискретных входов микроконтроллера.

Созданный на основе разработанной структуры системы освещения (рис. 4.19) экспериментальный образец цифровой системы динамического локального светодиодного освещения птичников с клеточным содержанием цыплят-бройлеров, представлен на рис. 4.20.



Рисунок 4.20 – Разработанный экспериментальный образец цифровой системы динамического локального светодиодного освещения

Разработанный экспериментальный образец системы (рис. 4.20), моделирует работу системы освещения четырехъярусной клеточной батареи птичника. В качестве контроллера освещения в нем применен панельный ПЛК модели Trim5 российской компании «Segnetics». Цифровой датчик освещенности выполнен на микросхеме OPT3001. Диапазоны изменения светового потока и КЦТ светодиодных светильников составляют от 0 до 100 % и от 2660 до 5640 К (п. 4.5).

Важными компонентами разработанной системы (рис. 4.20) являются

созданные управляющие программы для ПЛК Trim5 и микроконтроллера ATmega328P платы управления, позволяющие реализовывать как постоянные, так и прерывистые программы освещения для выращивания цыплят-бройлеров любых типов с плавным изменением освещенности и КЦТ оптического излучения по запатентованному способу освещения (п. 4.1). Основные фрагменты кодов управляющих программ защищены свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ [119; 120]. Написание кодов управляющих программ, проводилось с использованием языков программирования FBD, ST и Arduino C в отечественных средах программирования OWEN Logic, SMLogix и FLprog.

На встроенном в ПЛК сенсорном дисплее был создан современный графический интерфейс оператора, главный экран которого представлен на рис. 4.21. Экраны настройки параметров и режимов системы освещения, а также журнала событий, показаны на рис. Б.1-Б.3.

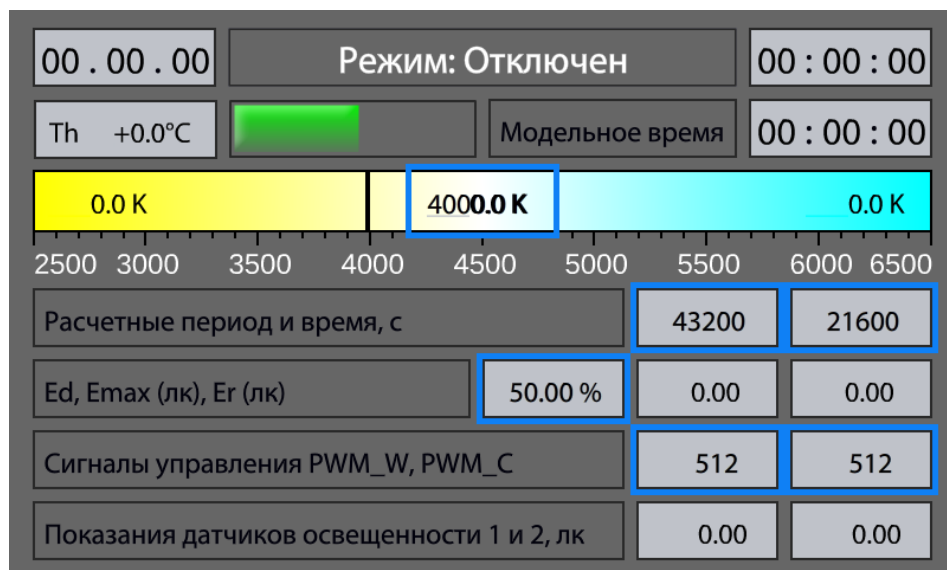


Рисунок 4.21 – Экран «Главный» графического интерфейса оператора

С использованием разработанного экспериментального образца системы динамического локального освещения (рис. 4.20) производилась отладка управляющих программ и исследование параметров настройки цифрового регулятора систем программного управления освещенности кормушки и КЦТ оптического излучения локальных светодиодных светильников (п. 4.7).

4.7 Результаты компьютерного исследования параметров цифрового ПИ-регулятора

По методике, изложенной в п. 3.8, были получены данные четырех опытов по получению кривых переходных процессов в компьютерной модели цифровой САР освещенности и систем программного управления параметрами динамического освещения в птичнике с клеточным содержанием птицы. Графические интерпретации полученных данных переходных процессов $E_N = f(t)$ компьютерной модели САР освещенности (рис. 3.7), представлены на рис. 4.22.

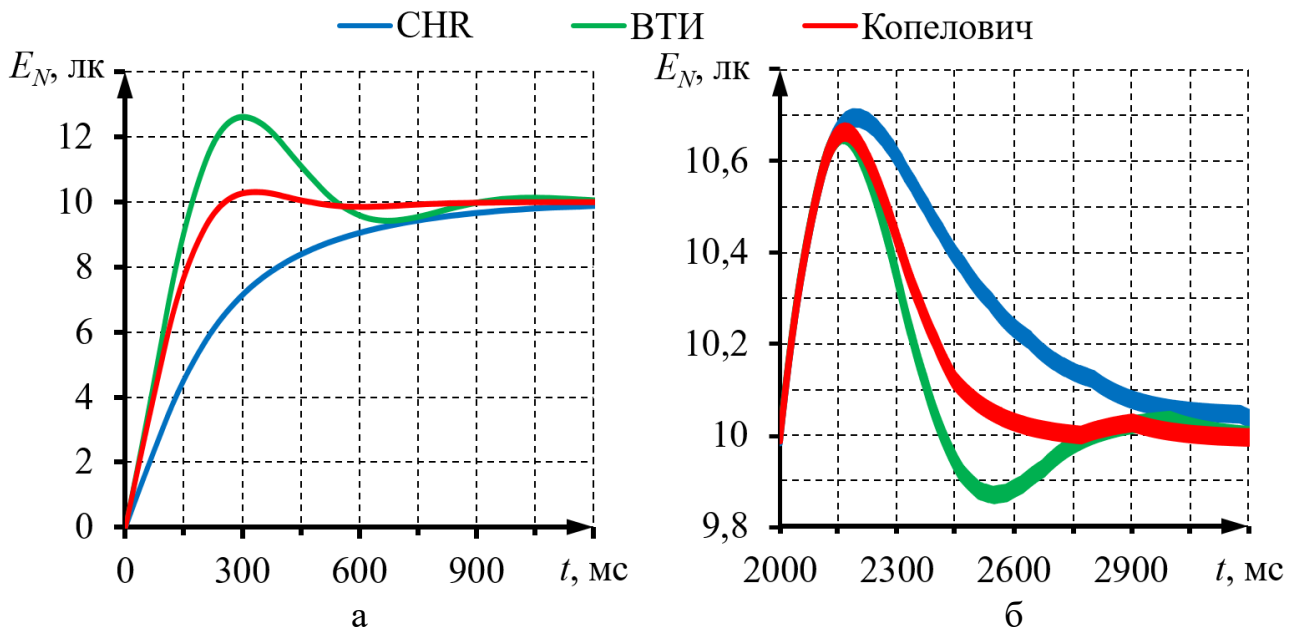


Рисунок 4.22 – Графики переходных процессов $E_N = f(t)$ при $E_Z = 10$ лк и $E_V = 1$ лк: а – по регулируемому воздействию; б – по возмущению

Сравнение полученных кривых переходных процессов $E_N = f(t)$ (рис. 4.22), показывает, что наилучшее качество переходных процессов по регулируемому воздействию и возмущению обеспечивают параметры настройки цифрового ПИ-регулятора, вычисленные по методу Копеловича (табл. 3.2). При параметрах настройки, определенных по методу CHR, переходные процессы характеризуются затянутым выходом на установившуюся величину. При параметрах регулятора, определенных по методу ВТИ, наблюдается затухающие колебания освещенности.

На рис. 4.22, б заметно утолщение кривых освещенности при приближении

к выходу на установившуюся величину. При дальнейшем увлечении масштаба графика отчетливо видны колебания E_N амплитудой 17 мк относительно среднего за период (0,5 мс) значения, которые вызваны дискретизацией ШИМ-сигналов.

Численная оценка показателей качества процесса регулирования производилась исходя из следующих критериев: статическая ошибка $\Delta E_{\text{ст}} \leq 0,25$ лк; время регулирования $t_p \leq 1$ с; перерегулирование $\sigma \leq 10$ %; число полных колебаний $n = 1$. Результаты численной оценки показателей качества по известным выражениям [126] для переходного процесса, полученного при параметрах настройки ПИ-регулятора, вычисленных по методу Копеловича, представлены в табл. 4.8.

Таблица 4.8 – Результаты расчета показателей качества САР

Показатель качества	Регулирующее воздействие	Возмущающее воздействие
Статическая ошибка $\Delta E_{\text{ст}}$, лк	≈ 0	≈ 0
Время регулирования t_p , мс	384,16	382,35
Перерегулирование σ , %	3,18	6,80
Число полных колебаний n	1	1

Полученные показатели качества (табл. 4.18), рассчитаны по освещенности E_N воспринимаемой наблюдателем, которая может существенно отличаться от воспринимаемой системой, что может привести к их рассогласованию. Графические интерпретации опытных данных переходных процессов $E_I = f(t)$ и $E_F = f(t)$ компьютерной модели САР при параметрах настройки ПИ-регулятора, вычисленные по методу Копеловича, представлены на рис. 4.23.

По рис. 4.23 видно, что несмотря на существенную дискретизацию сигнала измеренной освещенности E_I , за счет равенства постоянных времени цифрового фильтра T_F и зрительного аппарата наблюдателя $T_{\text{ЗА}}$ получен эффект идентичности кривых $E_F = f(t)$ и $E_N = f(t)$ со сдвигом по времени около 103 мс. Это позволяет САР более корректно формировать управляющее воздействие с помощью ПИ-регулятора, что положительно сказывается на качестве регулирования.

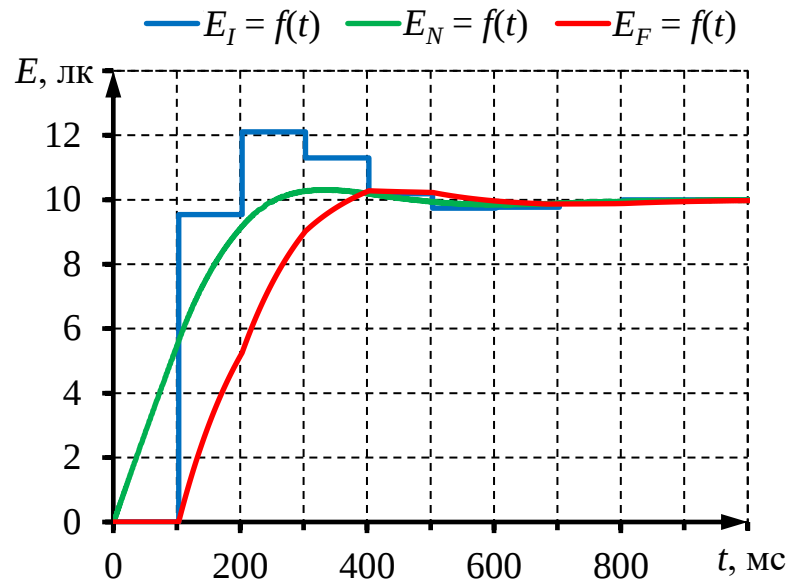
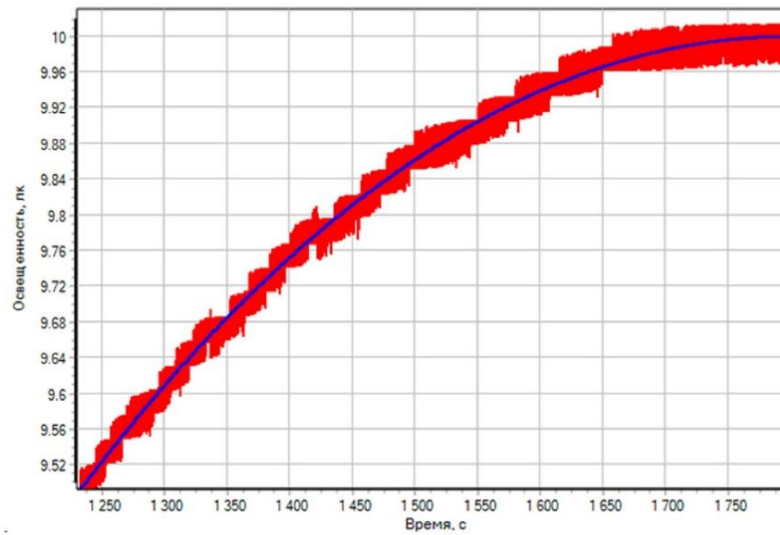


Рисунок 4.23 – Графики переходных процессов САР при $E_Z = 10$ лк по регулирующему воздействию

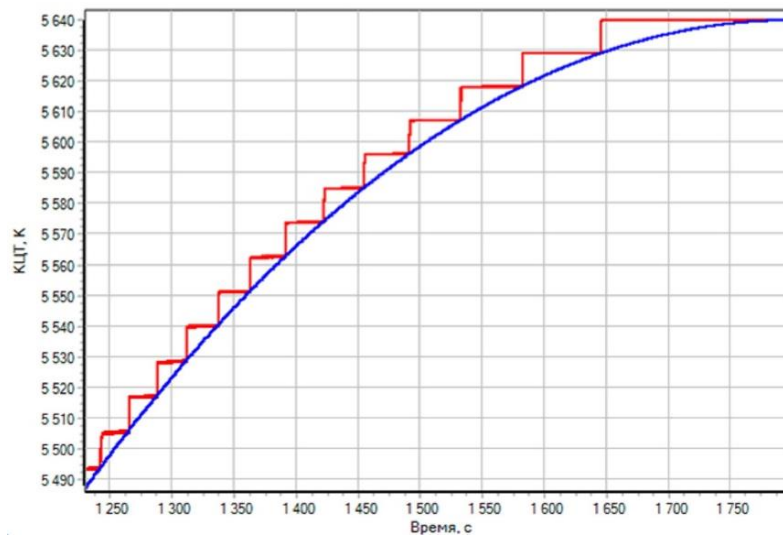
Графические интерпретации полученных данных переходных процессов компьютерной модели СПУ параметрами динамического освещения (рис. 3.9), представлены на рис. 4.24, на котором: синие кривые – зависимости $E_Z = f(t)$ и $CCT_Z = f(t)$; красные кривые – зависимости $E_N = f(t)$ и $CCT_N = f(t)$. Графики переходных процессов для участков «начальный» и «конечный», представлены на рис. Б.4 и Б.5.

Визуальный анализ полученных кривых переходных процессов (рис. 4.24) показывает, что дискретизации сигналов приводят к скачкообразному изменению E_N и CCT_N . Несмотря на это система достаточно точно управляет изменением освещенности кормушки и КЦТ оптического излучения локальных светодиодных светильников в течении светового периода. Амплитуда изменения КЦТ на «среднем» участке составляет всего около 10 К [115].

Показатели качества систем программного управления, оценивались исходя из следующих критериев: ошибка управления по освещенности $\Delta E_N \leq 0,25$ лк; ошибка управления коррелированной цветовой температуре $\Delta CCT_N \leq 100$ К.



а



б

Рисунок 4.24 – Графики переходных процессов СПУ на участке «средний» при $E_{Z\text{MAX}} = 10$ лк и $t_C = 1$ ч: а – освещенности; б – КЦТ

По каналу управления освещенности на всех участках ΔE_N не превысили допустимых отклонений (рис. 4.24 и рис. Б.4-Б.5). По каналу управления КЦТ оптического излучения локальных светодиодных светильников на «начальном» и «конечном» участках светового периода (рис. Б.4-Б.5) при освещенности $E_N < 0,3$ лк наблюдаются незначительные превышение величины $\Delta CСТ_N$ от допустимых значений. Такое непродолжительное (около 10 с) отклонение в сочетании с крайне малым уровнем освещенности не вносит существенного влияния общую точность управления КЦТ в течение светового периода.

4.8 Результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований сходимости переходных процессов цифровой САР освещенности

По методике, изложенной в п. 3.9, получены данные 30 опытов по определению переходных процессов $E_F = f(t)$ в компьютерной модели цифровой САР освещенности и 30 опытов по их определению на разработанном экспериментальном образце цифровой системы динамического локального светодиодного освещения птичников с клеточным содержанием цыплят-бройлеров.

Графические интерпретации полученных данных 10 компьютерных и натуральных опытов, полученных для $E_Z = 10$ лк и положительном изменении $E_V = 1$ лк, представлены на рис. 4.25. Графические интерпретации экспериментальных данных части других отдельных опытов, представлены в рис. Б.6 и Б.7.

По графикам переходных процессов (рис. 4.25), видно, что при $E_Z = 10$ лк и положительном изменении $\Delta E_V = 1$ лк переходные процессы разработанной компьютерной модели цифровой САР освещенности хорошо сопоставляются с переходными процессами экспериментального образца цифровой системы освещения. Подобные результаты наблюдаются и при других освещенностях E_Z и возмущениях E_V (рис. Б.6 и Б.7).

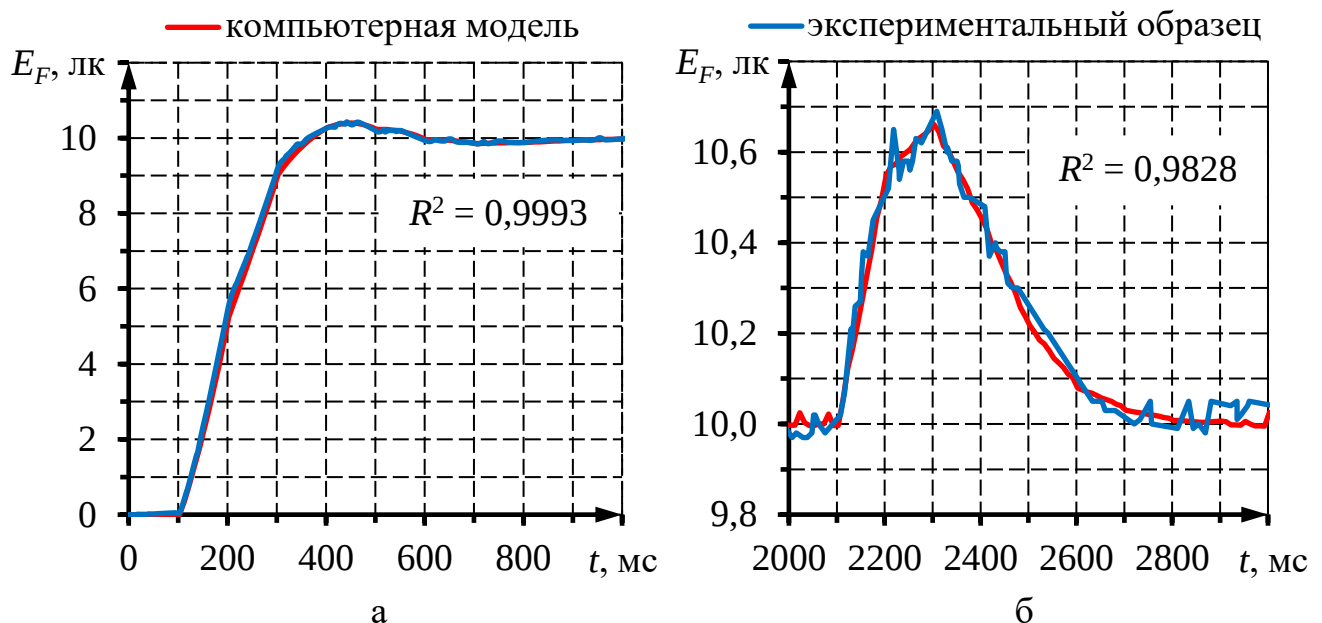


Рисунок 4.25 – Переходные процессы $E_F = f(t)$ при $E_Z = 10$ лк:

а – по регуливающему воздействию; б – по положительному возмущению

Результаты численной оценки сходимости исследуемых переходных процессов по коэффициенту детерминации для продолжительности переходных процессов равной 1 с, представлены в табл. 4.9. При расчете коэффициентов R^2 сопоставление точек расчета выполнялось с использованием линейной интерполяции.

Таблица 4.9 – Результаты расчета сходимости переходных процессов

E_Z , лк	R^2 по регулируемому воздействию	ΔE_V , лк	R^2 по возмущению
1	0,9887	+ 0,5	0,9357
		– 0,5	0,9050
10	0,9993	+ 1,0	0,9828
		– 1,0	0,9857
25	0,9995	+ 2,5	0,9913
		– 2,5	0,9906

Из полученных данных (табл. 4.9), следует, что за исключением переходных процессов, полученных для возмущений при $E_Z = 1$ лк, коэффициенты детерминации $R^2 > 0,99$, что свидетельствует о высокой точности разработанной компьютерной модели. Снижение коэффициента R^2 по возмущению при $E_Z = 1$ лк связано с более существенным влиянием погрешностей измерений, помех и принятых допущений в компьютерной модели при малой величине освещенности. Несмотря на это даже при $E_Z = 1$ лк модель достаточно точно описывает переходные процессы цифровой САР.

4.7 Выводы

1. По результатам проведенных экспериментальных исследований и их обработки уточненные коэффициенты регрессии математических моделей изменений естественной освещенности (2.4), (2.7) и КЦТ солнечного света (2.5), (2.8) в заданных географических координатах составили: $a = 2,151$; $b = 3027,1$ К/о.е; $c = 2545,8$ К при $h_{\text{MAX}} = 40,09^\circ$; $h_0 = -4,39^\circ$ и $t_{\text{MAX}} = 5,5$ ч. Модели являются точными и адекватными, что свидетельствует о применимости теоретических положений, изложенных в п. 2.1. Математические модели в форме (4.3) и (2.5) можно использовать для управления параметрами динамического освещения в птичнике.

2. Экспериментально установлено, что качестве материала для корпуса локального светодиодного светильника для системы динамического освещения птичника рационально использование поликарбонатных туб-рассеивателей образцов 1, 2 и 3 (табл. 4.1) с коэффициентами светопропускания равными $k_t = 0,87-0,73$ и активной длины светильника равной $l_A = 5$ см. Расстояние между светильниками в ряду для их продольного расположения на высоте подвеса 0,5 м не должно превышать $L_{MAX} = 77$ см. При использовании в светильнике светодиодов LM561B Plus с номинальными КЦТ, равными 2700 К и 5700 К при токе $I_D \leq 140$ мА достаточно применение печатных плат, изготовленных из фольгированного стеклотекстолита (табл. 3.1) с площадью активной медной охлаждающей поверхности, равной $s_0 = 48$ мм². Полученные точные кривые силы света светильника (рис. 4.11) могут быть использованы для расчетов локального светодиодного освещения в птичнике с клеточным содержанием цыплят-бройлеров при различной высоте подвеса светильников и их пространственном расположении.

3. Разработанный на базе токового зеркала прототип 16-канального высоковольтного драйвера для системы динамического локального светодиодного освещения цыплят-бройлеров (рис. 4.13) точно стабилизирует ток в каналах нагрузки при падении напряжения на драйвере не менее $U_{DR} = 3$ В. Регулировочную характеристику драйвера, полученную при частоте 2 кГц и разрядности управляющих ШИМ-сигналов 10 бит, можно считать абсолютно линейной (рис. 4.16). Разработанный драйвер обладает высоким КПД в широком диапазоне ШИМ-регулирования тока, достигающим $\eta_D = 96,7$ % (рис. 4.17). Полученные результаты свидетельствуют о корректности применения теоретических положений, изложенных в п. 2.3 и 2.4. Светодиодный драйвер, разработанный на базе токового зеркала (рис. 2.4), может быть применен для стабилизации токов и ШИМ-управления световыми потоками локальных светодиодных светильников (рис. 4.9).

4. Экспериментальные данные зависимости изменения КЦТ оптического излучения локального светодиодного светильника от коэффициента заполнения управляющего ШИМ-сигнала с высокой точностью могут быть аппроксимированы

математическими моделями (2.28) и (2.29). Высокая точность и адекватность уравнений свидетельствуют о корректности использования теоретических положений, изложенных в п. 2.2. При использовании СИД с номинальными КЦТ 2700 К и 5700 К с практической точки зрения целесообразно применение модели (2.29) с коэффициентами регрессии $b_2 = b_1 = 1490$ К, определяемыми по формуле (4.5).

5. Разработана структура цифровой системы динамического локального светодиодного освещения птичников с клеточным содержанием сельскохозяйственной птицы (рис. 4.19), позволяющая плавно изменять световой поток и КЦТ оптического излучения локальных светодиодных светильников, в которой электропитание светильников осуществляется с помощью высоковольтного многоканального светодиодного драйвера. Возможность практической реализации разработанной структуры системы динамического освещения с изменением освещенности кормушки и КЦТ оптического излучения светильников по математическим моделям (4.3) и (2.5) подтверждена созданным экспериментальным образцом системы освещения (рис. 4.20). Для функционирования систем программного управления были созданы управляющие программы для ПЛК Trim5 и микроконтроллера ATmega328P платы управления.

6. В системах программного управления освещенностью кормушки и КЦТ оптического излучения локальных светодиодных светильников следует использовать параметры ПИ-регулятора, определенные по методу Копеловича ($k_P = 14,027 \cdot 10^{-3}$ 1/лк и $T_I = 145,72$ мс), при постоянной времени цифрового апериодического фильтра измерений освещенности $T_F = 125$ мс, обеспечивающие высокое качество процесса управления. Точность заработанной компьютерной модели цифровой САР освещенности (рис. 3.7) и достоверность результатов исследований, полученных методом компьютерного моделирования, подтверждена экспериментально.

5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ

5.1 Методика расчетов показателей эффективности

В основу технико-экономической оценки эффективности применения разработанной цифровой системы динамической локального светодиодного освещения положены известные методики [67; 131; 139]. За основные показатели эффективности были приняты: капиталовложения, степень снижения эксплуатационных затрат, годовой экономический эффект, чистый дисконтированный доход, индекс доходности и период окупаемости капиталовложений. Сравнение показателей технико-экономической эффективности разработанной системы освещения (проектный вариант) производилось с ближайшим аналогом – отечественной системой локального освещения компании ООО «Микроэл» (базовый вариант). В качестве объекта для сравнения был принят птичник для выращивания цыплят-бройлеров в четырехъярусных клеточных батареях с кормлением по фронту кормового желоба. Результаты расчета стоимости системы освещения представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1 – Расчет стоимости систем освещения

№ п/п	Наименование элементов	Ед. из- мерения	Количе- ство	Цена, руб.	Стоимость, тыс. руб.
Система освещения компании «Микроэл»					
1	Устройство управления освещением МУУС-Ф-15.25	шт.	2	146 000	292
2	Светильник ССД-2-150	шт.	4800	250	1 200
3	Провода, кабели	м	3965	32,7	129,5
Итого:					1 621,5
Проектная система освещения					
1	ПЛК	шт.	1	39 114	39,1
2	Модуль управления светильниками	шт.	6	31 248	187,5
3	Светильник	шт.	4800	181,4	870,7
4	Провода, кабели	м	3600	23,4	84,4
Итого:					1 181,7

В базовом и проектном варианте для выращивания цыплят-бройлеров использовался с 1-го по 6-й день жизни постоянный режим освещения 23С:1Т, с 7-го по 28-й – режим прерывистого освещения 3С:1Т и с 29-го и далее – 23С:1Т [19] при убывающей освещенности в течении возраста птицы от 20 лк в первые дни жизни до 5 лк перед убоем [16]. КЦТ оптического излучения светильников в базовом варианте была постоянной равной 5000 К. В проектном варианте изменение освещенности кормушки и КЦТ излучения светильников в течении светового периода осуществлялось по разработанным математическим моделям (4.3) и (2.5). За основное положительное влияние динамического освещения на продуктивность птицы было принято увеличение живой массы [158]. Сохранность поголовья принималась одинаковой. Влияние на коэффициент конверсии корма не учитывалось [177].

Светильники локального светодиодного освещения располагались на высоте подвеса 0,5 над кормовым желобом при расстоянии между ними $L = 60$ см, что обеспечивало высокий ($k_{\text{НП}} \leq 1,2$) уровень равномерности распределения освещенности на дне кормового желоба (п. 4.2.1).

Капиталовложения K в общем виде, рассчитывались по формуле:

$$K = \text{Ц}_O + M_{\text{Н}} + N_{\text{Р}} + \Pi_{\text{Н}}, \quad (5.1)$$

где Ц_O – цена оборудования, руб.;

$M_{\text{Н}}$ – затраты на монтаж и наладку, руб.;

$N_{\text{Р}}$ – накладные расходы, руб.;

$\Pi_{\text{Н}}$ – плановые накопления, руб.

Расчетная формула (5.1), представлялась в виде:

$$K = \text{Ц}_O + 0,2\text{Ц}_O + 0,1\text{Ц}_O + 0,18(\text{Ц}_O + 0,2\text{Ц}_O + 0,1\text{Ц}_O). \quad (5.2)$$

Дополнительные капиталовложения $K_{\text{доп}}$, определялись как:

$$K_{\text{доп}} = K_{\text{ПР}} - K_{\text{Б}}, \quad (5.3)$$

где $K_{\text{ПР}}$ и $K_{\text{Б}}$ – капиталовложения в проектную и базовую системы, руб.

Годовые эксплуатационные издержки $I_{\text{Э}}$, вычислялись по формуле:

$$I_{\text{Э}} = (A + P + 3_{\text{П}} + 3_{\text{Э}})k_{\text{П}}, \quad (5.4)$$

где A – амортизационные отчисления, руб.;

P – отчисления на техническое обслуживание и ремонт, руб.;

$З_{\Pi}$ – заработная плата обслуживающего персонала, руб.;

$З_{\text{э}}$ – затраты на потребленную электроэнергию, руб.;

$k_{\Pi} = 1,05$ – коэффициент, учитывающий прочие прямые затраты.

Амортизационные отчисления A определялись по выражению:

$$A = K \cdot N_A / 100, \quad (5.5)$$

где N_A – норма амортизационных отчислений по оборудованию, %.

Отчисления на ремонт и техническое обслуживание P определились, как:

$$P = K \cdot P_A / 100, \quad (5.6)$$

где N_P – норма отчислений на ремонт и техническое обслуживание, %.

Зарботную плату обслуживающего персонала $З_{\Pi}$ вычисляли по формуле:

$$З_{\Pi} = \alpha_{\Pi} \alpha_{\text{д}} \alpha_{\text{св}} C_{\text{м}} T_{\text{год}}, \quad (5.7)$$

где α_{Π} – коэффициент, учитывающий премии по фонду оплаты труда;

$\alpha_{\text{д}}$ – коэффициент, учитывающий дополнительную оплату труда;

$\alpha_{\text{св}}$ – коэффициент, учитывающий страховые взносы;

$C_{\text{м}}$ – основная ставка электромонтера за час работы, руб./(чел.·ч);

$T_{\text{год}}$ – годовая трудоемкость обслуживания оборудования, чел.·ч.

Годовую трудоемкость обслуживания определяли через условные единицы ремонта [105].

Затраты на потребленную электроэнергию $З_{\text{э}}$ рассчитывали по формуле:

$$З_{\text{э}} = n_{\text{д}} n_{\text{год}} \Pi_{\text{э}} N / \eta, \quad (5.8)$$

где $n_{\text{д}}$ – число часов работы системы освещения в день;

$n_{\text{год}}$ – число дней работы системы освещения в году;

$\Pi_{\text{э}}$ – цена на электроэнергию, руб./(кВт·ч);

N – средняя мощность, потребляемая светильниками, кВт·ч;

η – КПД системы питания светильников с учетом эффективности источников питания, о.е.

Степень снижения $C_{\text{и}}$ эксплуатационных издержек, определялась как:

$$C_{\text{и}} = \frac{(I_{\text{б}} - I_{\text{ип}})}{I_{\text{б}}} 100\%, \quad (5.9)$$

где I_B и $I_{ПР}$ – эксплуатационные издержки в проектной и базовой системе освещения, руб.

Годовой экономический эффект $\mathcal{E}_{ГОД}$ от применения разработанной системы освещения, вычисляли по формуле:

$$\mathcal{E}_{ГОД} = \mathcal{E}_{ДОП} - (I_{ПР} - I_B), \quad (5.10)$$

где $\mathcal{E}_{ДОП}$ – дополнительный годовой доход, руб.

Дополнительный годовой доход $\mathcal{E}_{ГОД}$, получаемые от повышения живой массы цыплят-бройлеров, вычисляли по выражению:

$$\mathcal{E}_{ДОП} = n_{П} m_{П} k_{ДОП} (C_P - C_B), \quad (5.11)$$

где $n_{П}$ – поголовье птицы на момент реализации;

$m_{П}$ – масса птицы в живом весе на момент реализации, кг;

$k_{ДОП}$ – коэффициент дополнительного увеличения живой массы;

C_P – цена реализации птицы в живом весе, руб./кг;

C_B – себестоимость выращивания птицы, руб./кг.

Чистый дисконтированный доход ЧДД рассчитывали, как:

$$\text{ЧДД} = -K_{ДОП} + k_{СД} [\mathcal{E}_{ГОД} + (A_{ПР} - A_B) - H_{П}], \quad (5.12)$$

где $k_{СД}$ – коэффициент суммы дисконтирования;

$A_{ПР}$ и A_B – проектные и базовые амортизационные отчисления, руб.

$H_{П}$ – годовая величина налога на прибыль, руб.

Коэффициент суммы дисконтирования $k_{СД}$ определяли по формуле:

$$k_{СД} = \frac{(1 + E_P)^t - 1}{E_P (1 + E_P)^t}, \quad (5.13)$$

где E_P – норма дисконта капитала с поправкой на инфляцию, руб.;

t – срок службы, лет.

Норма дисконта капитала E_P вычислялась по формуле:

$$E_P = \frac{1 + E}{1 + r} - 1, \quad (5.14)$$

где E – ставка процента банка, о.е.;

r – уровень инфляции, о.е.

Налог на прибыль H_{Π} вычисли как:

$$H_{\Pi} = \Xi_{\text{доп}} \alpha_H, \quad (5.15)$$

где α_H – коэффициент, учитывающий ставку налога на прибыль.

Индекс доходности ИД определялся по формуле:

$$\text{ИД} = \text{ЧДД} / K_{\text{ПР}}. \quad (5.16)$$

Период окупаемости $T_{\text{ОК}}$ капиталовложений рассчитывался по выражению:

$$T_{\text{ОК}} = \frac{-\ln \left(1 - \frac{K_{\text{ПР}} E_p}{\Xi_{\text{ГОД}} + (A_{\text{ПР}} - A_{\text{Б}}) - H_{\Pi}} \right)}{\ln(1 + E_p)}. \quad (5.17)$$

5.2 Результаты расчетов показателей эффективности

Исходные данные, используемые для расчетов показателей технико-экономической эффективности по методике, представленной в п. 5.1, приведены в табл. 5.2. Результаты расчетов показателей эффективности представлены в табл. 5.3.

Таблица 5.2 – Исходные данные для расчета показателей эффективности

№ п/п	Наименование	Обозначение	Величина
1	2	3	4
1	Цена оборудования базового варианта, тыс. руб.	$K_{\text{Б}}$	1 621,5
2	Цена оборудования проектного варианта, тыс. руб.	$K_{\text{ПР}}$	1 181,7
3	Коэффициент учета прочих прямых затрат	$k_{\text{П}}$	1,05
4	Норма амортизационных отчислений [67], %	$H_{\text{А}}$	10,0
5	Норма отчислений на ремонт и техническое обслуживание [139], %	$H_{\text{Р}}$	4,6
6	Трудоемкость обслуживания электрооборудования в базовой системе, чел.·ч	$T_{\text{ГОД Б}}$	213,7
7	Трудоемкость обслуживания электрооборудования в проектной системе, чел.·ч	$T_{\text{ГОД ПР}}$	278,5
8	Ставка электромонтера, руб./чел.·ч	S_{Ξ}	196,2
9	Коэффициент премий по фонду оплаты труда	$\alpha_{\text{П}}$	1,20
10	Коэффициент дополнительной оплаты труда	$\alpha_{\text{Д}}$	1,12
11	Коэффициент страховых взносов	$\alpha_{\text{ВФ}}$	1,30
12	Число часов работы системы освещения в день	$n_{\text{Д}}$	18
13	Число дней работы системы освещения в году	$n_{\text{ГОД}}$	270

Продолжение таблицы 5.2

1	2	3	4
14	Тариф на электроэнергию, руб./ (кВт·ч)	$\Pi_{\text{Э}}$	8,43
15	Мощность, потребляемая светильниками базовой системы, кВт·ч	$N_{\text{Б}}$	1,72
16	Мощность, потребляемая светильниками проектной системы, кВт·ч	$N_{\text{ПР}}$	0,60
17	КПД системы питания базовой системы	$\eta_{\text{Б}}$	0,549
18	КПД системы питания проектной системы	$\eta_{\text{ПР}}$	0,725
19	Поголовье птицы	$n_{\text{П}}$	59 030
20	Масса птицы в живом весе, кг	m	2,53
21	Коэффициент увеличения живой массы при применении проектной системы освещения [158]	$k_{\text{ДОП}}$	1,027
22	Цена реализации птицы в живом весе, руб./кг [24]	$\Pi_{\text{Р}}$	173
23	Себестоимость выращивания, руб./кг [24]	$C_{\text{В}}$	127,47
24	Срок службы проекта, лет	t	8
25	Ставка процента банка, %	E	36
26	Уровень инфляции, %	r	12
27	Коэффициент ставки налога на прибыль	$\alpha_{\text{П}}$	0,2

Таблица 5.3 – Результаты расчета показателей технико-экономической эффективности

№ п/п	Наименование показателя	Базовая система	Проектная система
1	Капиталовложения, руб.	2 487 435	1 812 742
2	Годовые эксплуатационные издержки, руб., в том числе:	438 093	335 455
	– амортизационные отчисления, руб.	159 196	116 015
	– отчисления на техническое обслуживание и ремонт, руб.	114 422	83 386 Р
	– заработная плата обслуживающего персонала, руб.	73 249	95 460
	– затраты на электроэнергию, руб.	70 364	24 619
3	Степень снижения годовых эксплуатационных издержек, %	-	23,43
4	Дополнительный годовой доход за счет повышения живой массы на 2,7 %, руб.		1 109 722
5	Общий годовой экономический эффект, руб.	-	1 212 360
6	Чистый дисконтированный доход, руб.	-	4 084 409
7	Индекс доходности	-	2,25
8	Период окупаемости, лет	-	3,28

Из полученных данных (табл. 5.3), следует, что капиталовложения в проектную систему освещения на 675 тыс. руб. меньше базового варианта. Принятые технические решения, несмотря на несколько большие затраты на техническое обслуживание и ремонт, позволили снизить годовые эксплуатационные издержки на 103 тыс. руб. Решающее влияние на снижение годовых эксплуатационных издержек оказала статья затрат на электроэнергию. Применение разработанной системы освещения позволит получить дополнительный годовой доход за счет повышения живой массы цыплят-бройлеров на 2,7 % в размере 1 109,7 тыс. руб., что составляет составит около 4,1 тонн птицы в живом весе. При этом даже в условиях высокой ставки банка по кредитам и растущей инфляции ЧДД за 8 лет составляет 4 084,4 тыс. руб.

5.3 Выводы

1. Разработанная система динамического локального светодиодного освещения клеток для содержания цыплят-бройлеров позволяет снизить капиталовложения на 27,1 % и эксплуатационные издержки на 23,4 %.

2. Дополнительный годовой доход за счет повышения живой массы цыплят-бройлеров на 2,7 % составляет 1 109,7 тыс. руб.; общий годовой доход – 1 212, 4 тыс. руб. Чистый дисконтированный доход от применения разработанной системы равен 4 084,4 тыс. руб. при индексе доходности проектных капиталовложений – 2,25 и сроке окупаемости капиталовложений – 3 года и 3 месяца.

3. Внедрение разработанной системы освещения в промышленное птицеводство экономически целесообразно.

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 ($a = 2,151$; $b = 3027,1$; $c = 2545,8$ K) 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 $k_t = 0,75–0,87$ и активной длиной светильника $l_A = 5$ см, печатная плата со светодиодами типа LM561B Plus с номинальными КЦТ, равными 2700 K и 5700 K, и площадью активной медной охлаждающей поверхности около 48 мм^2 , 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авроров, В. А. Основы проведения научных исследований: модели, методы анализа и обработки результатов экспериментов в пищевых производствах : Учеб. пособие / В. А. Авроров, Е. А. Жистин, Н. В. Моряхина. – Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 436 с.
2. Автоматизированная система обеспечения микроклимата в птичниках / И. М. Довлатов, Л. Ю. Юферев, В. В. Кирсанов [и др.] // Вестник НГИЭИ. – 2018. – № 7(86). – С. 7-18.
3. Автор. свидетельство 1561928 СССР, МПК А01К 31/00. Способ содержания птицы : № 4474151/31-15: заявл. 08.02.88 : опубл. 07.05.90 / М. С. Найденский, Н. К. Свириденко, Л. З. Поплавский [и др.].
4. Автор. свидетельство 967430 СССР, МПК А01К 31/00. Способ содержания кур-несушек в клетках : № 2974592/30-15 : заявл. 18.05.81 : опубл. 23.10.82 / Б. Ф. Авдонин, В. И. Фисинин, Журавлев И. В [и др.].
5. Азизян, Г. Определение температуры р-п-перехода в светодиодных кластерах и одиночных светодиодах / Г. Азизян // Полупроводниковая светотехника. 2012. – № 6. – С. 31-33.
6. Алгоритмы и методы автоматического регулирования оптических характеристик осветительных систем / В. И. Корнага, А. С. Олейник, В. М. Сорокин, А. В. Рыбалочка // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2015. – № 4(90). – С. 46-52.
7. Алтухов, А. И. Моделирование освещенности земной поверхности для выбора режимов работы источника излучения / А. И. Алтухов, Д. С. Коршунов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2023. – Т. 23, № 6. – С. 1077–1083.
8. Аристакесян, Е. А. Эволюционные аспекты формирования цикла бодрствование-сон в подтипе позвоночных (Современное состояние теории эволюции сна И.Г. Кармановой) / Е. А. Аристакесян // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. – 2016. – Т. 52. – № 2. – С. 126-142.

9. Ашофф, Ф. Экзогенные и эндогенные компоненты циркадных ритмов / Ф. Ашофф // Биологические часы. – М.: Мир, 1964. – С. 27-59.

10. Ашрятов, А. А. Измерение температуры кристалла маломощных светодиодов / А. А. Ашрятов, А. Б. Мышонков, С. А. Микаева // Автоматизация и современные технологии. – 2011. – № 3. – С. 10-13.

11. Бакиров, С. М. Анализ систем управления освещением в животноводческих помещениях / С. М. Бакиров, Т. А. Широбокова // Современные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения : Материалы XII Нац. конф. с междунар. участием, Саратов, 21–22 апреля 2022 г. – Саратов : Саратовский ГАУ, 2022. – С. 260-268.

12. Баранова, И. А. Светодиодное освещение птичника с программой регулирования / И. А. Баранова, Т. А. Широбокова, И. М. Новоселов // Вестник НГИЭИ. – 2021. – № 5(120). – С. 42-52.

13. Бахарев, А. А. Влияние освещения на продуктивность цыплят бройлеров / А. А. Бахарев, С. С. Александрова // Эпоха науки. – 2018. – № 15. – С. 120-124.

14. Боммель, В. Динамическое освещение рабочих помещений – по уровню освещенности и цвету / В. Боммель // Светотехника. – 2006. – № 6. – С. 15-18.

15. Бугров, В. Е. Оптоэлектроника светодиодов : Учеб. пособие / В. Е. Бугров, К. А. Виноградова. – СПб. : НИУ ИТМО, 2013. – 174 с.

16. Буяров, В. С. Влияние режимов освещения на рост и развитие цыплят-бройлеров / В. С. Буяров, В. В. Балашов // Биология в сельском хозяйстве. – 2015. – № 1. – С. 18-23.

17. Буяров, В. С. Научные основы ресурсосберегающих технологий производства мяса бройлеров / В. С. Буяров, Т. А. Столляр, А. В. Буяров ; Под общ. редакцией В. С. Буярова. – Орёл : Орловский ГАУ, 2013. – 284 с.

18. Буяров, В. С. Развитие животноводства и птицеводства России в условиях импортозамещения / В. С. Буяров, И. В. Комоликова, А. В. Буяров. – Орёл : Орловский ГАУ, 2024. – 205 с.

19. Буяров, В. С. Эффективность современных энергоресурсосберегающих

технологий производства мяса бройлеров / В. С. Буяров, С. Ю. Головина, А. В. Буяров // Аграрный вестник Верхневолжья. – 2019. – № 2(27). – С. 86-98.

20. Варфоломеев, Л. П. Элементарная светотехника / Л. П. Варфоломеев. – М. : Световые технологии, 2013. – 285 с.

21. Васильков, А. А. Разработка осветительной установки с плавным регулированием освещенности с функцией «рассвет – закат» для птичника в личном подсобном хозяйстве / А. А. Васильков, А. С. Платонов, А. А. Смирнов // Аграрный вестник Нечерноземья. – 2025. – № 1(17). – С. 26–35.

22. Верещагин, И. В. Проектирование и оценка эффективности системы управления освещением / И. В. Верещагин, Д. В. Глухов, В. И. Козлова // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям : Материалы XXVIII Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям, Санкт-Петербург, 28-30 мая, 2025. – СПб : СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2025. – С. 408-416.

23. Вишневский, С. А. Разработка методов расчета и конструирования интеллектуальных установок для создания оптимальных условий освещения помещений : дис. ... канд. техн. наук : специальность 05.23.03 / Сергей Александрович Вишневский. – Пенза, 2017. – 150 с.

24. Влияние способа содержания цыплят-бройлеров на эффективность производства мяса / О. А. Басонов, Р. В. Гинойн, Г. Ф. Анаников, П. А. Феокистова // Известия Кабардино-Балкарского ГАУ им. В. М. Кокова. – 2024. – № 1(43). – С. 35-43.

25. Влияние энергосберегающего освещения на эффективность птицеводства / В. Н. Нефедова, С. В. Семенченко, А. А. Савинова, А. С. Дегтярь // Селекция сельскохозяйственных животных и технология производства продукции животноводства : Материалы междунар. науч.-практ. конф., пос. Персиановский, 05 февраля 2015 г. – пос. Персиановский : Донской ГАУ, 2015. – С. 134-140.

26. Выращивание цыплят-бройлеров на современном предприятии / Т. Н. Якушева, А. В. Аристов, Л. А. Матюшевский [и др.] // Теория и практика инновационных технологий в АПК : Материалы нац. науч.-практ. конф., Воронеж, 23-27 марта 2020 г. Том Часть III. – Воронеж : Воронежский ГАУ, 2020. –

С. 139-141.

27.Газалов, В. С. Моделирование процесса нагрева радиатора, применяемого для охлаждения светодиода / В. С. Газалов, Е. А. Шабаев // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2019. – Т. 12, № 3(62). – С. 62-70.

28.Газалов, В. С. 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: 21.06.2026).

29.Газалов, В. С. Светотехника и электротехнология. Часть 1. Светотехника : Учеб. пособие. / В. С. Газалов. – Ростов-на-Дону: Терра, 2004. – 344 с.

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

31.Галеева, А. А. Измерение светотехнических и тепловых параметров люминофорных SMD-светодиодов / А. А. Галеева, Н. Р. Гайнуллина, А. А. Мальцев // Вопросы технических наук: новые подходы в решении актуальных проблем : Материалы междунар. науч.-практ. конф., Казань, 11 июня 2016 г. Том Выпуск III. – Казань: ЦИРОН, 2016. – С. 27-30.

32.Галкин, В. Клетки или напольник? Считаем деньги... / В. Галкин // Животноводство России. – 2006. – № 10. – С.70-72.

33.Галлямова, Т. Р. Повышение эффективности и равномерности светодиодного освещения сельскохозяйственных помещений на примере птичника : дис. канд. техн. наук : специальность 05.20.02 / Галлямова Татьяна Ратмировна. – Москва, 2016. – 140 с.

34.Гиясов, А. И. Моделирование солнечно-светового климата горного рельефа – предпосылка оценки инсоляции и освещения помещений / А. И. Гиясов // Светотехника. – 2023. – № 3. – С. 34-44.

35.Гладин, Д. В. Повышение равномерности освещения при содержании ро-

дительского стада птицы в многоярусных клеточных батареях / Д. В. Гладин // Эффективное животноводство. – 2018. – № 6(145). – С. 56-59.

36.Гладин, Д. В. Равномерность освещения в птичнике при низковольтном электропитании светодиодных светильников / Д. В. Гладин, А. Ш. Кавтарашвили // Птицеводство. – 2021. – № 2. – С. 45-49.

37.Гладин, Д. В. Светодиодное локальное освещение при производстве яиц кур : дис. ... канд. с.-х. наук : специальность 06.02.10 / Гладин Дмитрий Викторович. – Сергиев Посад, 2017. – 178 с.

38.Гладин, Д. В. Современная концепция освещения в птицеводстве / Д. В. Гладин, А. Ш. Кавтарашвили // Вестник аграрной науки. – 2022. – № 1(94). – С. 45-53.39

39.Гладин, Д. Концепция светодиодного освещения в птицеводстве / Д. Гладин // Полупроводниковая светотехника. – 2022. – № 1(75). – С. 31-42.

40.Гладин, Д. Локальное светодиодное освещение для клеточного выращивания цыплят-бройлеров Требования нормативных документов по электробезопасности, особенности проектирования, производства, монтажа и эксплуатации светодиодного осветительного оборудования / Д. Гладин // Полупроводниковая светотехника. – 2013. – Т. 6, № 26. – С. 54-60.

41.Гончарова, Л. Н. Влияние различных источников освещения на яичную продуктивность кур-несушек / Л. Н. Гончарова // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2016. – № 11(145). – С. 95-98.

42.Горбаренко, Е. В. Моделирование естественной освещенности в условиях безоблачной атмосферы / Е. В. Горбаренко, А. Н. Рублев, Н. А. Бунина // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. – 2021. – № 603. – С. 49-65.

43.Горбунова, Е. В. Типовые расчеты по колориметрии источников излучения : Учеб. пособие / Е. В. Горбунова, А. Н. Чертов. – СПб. : Университет ИТМО, 2014. – 90 с.

44.Гурский, А. Л. Взаимосвязь между колориметрическими и спектральными параметрами светодиодных ламп белого свечения / А. Л. Гурский, Н. В. Машедо

// Журнал прикладной спектроскопии. – 2020. – Т. 87, № 6. – С. 997-1004.

45. Дас, Б. Проектирование и разработка искусственного окна, работающего от солнечной энергии, с изменяющейся цветовой температурой на основе красного, синего и белого светодиодов / Б. Дас, А. К. Сур, С. Мазумдар // Светотехника. – 2019. – № 1. – С. 44-49.

46. Демин, И. О. Исследование методов настройки параметров ПИД-регулятора / И. О. Демин, Г. В. Саблина // Автоматика и программная инженерия. – 2020. – № 1(31). – С. 174-181.

47. Денисенко, В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. Часть 2 / В. Денисенко // Современные технологии автоматизации. – 2008, № 1. – С. 86–99.

48. Дехофф, П. Воздействие изменяющегося света на здоровье людей во время работы / П. Дехофф // Светотехника. – 2006. – № 3. – С. 54-57.

49. Домасев, М. В. Цвет, управление цветом, цветовые расчеты и измерения / М. В. Домасев, С. П. Ганатюк. – СПб. : Питер, 2009. – 224 с.

50. Дубровский, А.А. Использование светодиодного освещения с различной цветовой температурой при выращивании родительского стада птицы / А. А. Дубровский, В. В. Смирнова // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2020. – № 4(63). – С. 188-195.

51. Ежов, В. Стандартизация и расчет тепловых характеристик мощных светодиодов / В. Ежов // Электронные компоненты. – 2009. – № 6. – С. 42-48.

52. Ермаков, С. Ф. Биполярные транзисторы : Лаб. практикум / С. Ф. Ермаков, В. Е. Минин, Г. С. Гаврилов. – Гомель : БелГУТ, 2008. – 72 с.

53. Железникова, О. Е. Разработка методики измерения температуры кристалла светодиодов / О. Е. Железникова, А. Б. Мышонков, А. М. Кокинов // Естественные и технические науки. – 2017. – № 9(111). – С. 41-45.

54. Зеленов, Г. Измерение температуры р-п-переходом / Г. Зеленов // Современная электроника. – 2007. – № 2. – С. 38-39.

55. Зенков, А. Светодиоды Samsung / А. Зенков // Современная электроника. – 2009, № 5. – С. 12-13.

56. Зимина, Т. «Птицеводство России 2024»: экспертный диалог / Т. Зимина

// Животноводство России. – 2024. – № 4. – С. 10-12.

57. К вопросу выбора оптимального метода расчета коррелированной цветовой температуры / О. Е. Железникова, С. В. Прытков, Е. А. Вилков, С. А. Микаева // Автоматизация. Современные технологии. – 2018. – Т. 72, № 1. – С. 32-36.

58. Кавтарашвили, А. Ш. Влияние пульсации освещенности в птичнике на продуктивные качества кур при использовании светодиодных систем освещения / А. Ш. Кавтарашвили, Е. Н. Новоторов, Д. В. Гладин // Птица и птицепродукты. 2022. – № 1. – С. 42–45.

59. Кавтарашвили, А. Ш. Равномерность освещения клеточных батарей и продуктивность кур-несушек при различных кривых силы света светодиодных светильников / А. Ш. Кавтарашвили, Е. Н. Новоторов, Д. В. Гладин // Птицеводство. – 2022. – №11. – С. 66-71.

60. Карташов, Б. А. SimInTech: Применение информационных технологий в автоматическом управлении / Б. А. Карташов, Е. А. Шабает. – М. : ДМК Пресс, 2025. – 580 с.

61. Келли, Д. Теория цвета и успешное применение светодиодов. Часть 2 / Д. Келли ; Пер. М. Бадгутдинов // Полупроводниковая светотехника. – 2013. – № 5. – С. 54-58.

62. Келли, Д. Теория цвета и успешное применение светодиодов. Часть 3 / Д. Келли ; Пер. М. Бадгутдинов // Полупроводниковая светотехника. – 2014. – № 1. – С. 56-59.

63. Кириллова, Е. Построение топологии токовых зеркал / Е. Кириллова // Компоненты и технологии. – 2008. – № 5(82). – С. 128-131.

64. Коняев, Н. В. Современное освещение птичников / Н. В. Коняев, Р. С. Новиков, Н. С. Половинкина // Актуальные вопросы инновационного развития агропромышленного комплекса : Материалы междунар. науч.-практ. конф., Курск, 28-29 января 2016 г. Том Часть 2. – Курск: Курская ГСХА, 2016. – С. 224-228.

65. Коняева, О. Н. Влияние освещение на здоровье и продуктивность птицы / О. Н. Коняева, Н. В. Коняев // Проблемы развития современного общества : Материалы 7-й Всерос. нац. науч.-практ. конф., Курск, 20–21 января 2022 г. Том 5. –

Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2022. – С. 81-84.

66.Копелович, А. П. Инженерные методы расчета при выборе автоматических регуляторов / А. П. Копелович. – М. : Металлургиздат, 1960. – 192 с.

67.Королевич, Н.Г. Экономическое обоснование технических решений в дипломных проектах по электроснабжению предприятий АПК : Учеб.-метод. пособие / Н. Г. Королевич, В. В. Ширшова, Г. И. Янукович. – Минск : БГАТУ, 2008. – 78 с.

68.Лаврус, В. С. Свет и тепло / В. С. Лаврус. – СПб. : НиТ, 1995. – С. 15-25. – URL: <http://n-t.ru/ii/st/> (дата обращения: 21.06.2026).

69.Леонидов, А. В. Аналитическое представление взаимосвязи угловой высоты Солнца и местного времени при расчетах естественных облученности и освещенности на земной поверхности / А. В. Леонидов // Светотехника. – 2020. – № 2. – С. 37-39.

70.Леонидов, А. В. Аналитическое представление освещенности на земной поверхности при разных видах и состояниях облачного покрова в 11-летнем цикле солнечной активности / А. В. Леонидов // Светотехника. – 2021. – № 3. – С. 67-74.

71.Леонидов, А. В. Определение характеристик мгновенной суточной активности организма человека при воздействии излучения Солнца в циркадианной области оптического спектра в светлое время суток / А. В. Леонидов // Светотехника. – 2021. – № 2. – С. 21-28.

72.Леонидов, А. В. Спектрально-селективные преобразования солнечного излучения фотоприемниками сетчатки при управлении циркадианным ритмом организма человека в 11-летнем цикле солнечной активности / А. В. Леонидов // Биофизика. – 2020. – Т. 65, №. 3. – С. 605-613.

73.Линден, Т. Х. Источники опорного напряжения и тока / Т. Х. Линден. – М. : ДМК Пресс, 2015. – 576 с.

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

75.Локальное светодиодное освещение – путь повышения эффективности птицеводства / В. И. Фисинин, А. Ш. Кавтарашвили, Е. Н. Новоторов, Д. М. Гладин

// Достижения науки и техники АПК. – 2011. – № 6. – С. 61-63.

76.Любовь, А. П. Изучение влияния импульсного освещения на продуктивность клеточных кур-несушек : автореф. дис. канд. с.-х. наук : специальность 06.02.04 / Любовь Александровна Попова. – Москва, 1979. – 20 с.

77.Мазуров, В. Автоматические регуляторы в системах управления и их настройка. Часть 3. Цифровые регуляторы и их настройка / В. Мазуров // Компоненты и технологии. – 2003, № 5(31). – С. 146-151.

78.Методическое руководство по проектированию динамического освещения общественных зданий. – М. : ФАУ «ФЦС», 2019. – 99 с.

79.Микулич, Е. Л. Морфология сельскохозяйственных животных. Особенности анатомического строения сельскохозяйственной птицы : Учеб.-метод. пособие. / Е. Л. Микулич, С. Н. Лавушева, В. И. Бородулина. – Горки : Белорусская ГСХА, 2022. – 94 с.

80.Михалев, А. А. Энерго-ресурсосберегающая система освещения птицеводческих помещений / А. А. Михалев, Л. Ю. Юферев // Инновации в сельском хозяйстве. – 2012. – № 1(1). – С. 4-9.

81.Моделирование относительной спектральной чувствительности органа зрения биообъекта для оценки эффективности источников излучения / Ю. А. Пильщикова, О. Ю. Коваленко, Е. Д. Гусева, М. В. Кудашкина // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4. – С. 183.

82.Моделирование спектра солнечного излучения с помощью светодиодов / В. Афонин, О. Коваленко, Е. Гусева, Ю. Пильщикова // Фотоника. – 2016. – № 2 (56). – С. 72-77.

83.Мусаев, А. М. Влияние дневных и ночных ритмов на продуктивность японского перепела (*Japonicus coturnix* L) / А. М. Мусаев // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2015. – № 2(34). – С. 53-56.

84.Никифоров, С. Температура в жизни и работе светодиодов. Часть 1 / С. Никифоров // Компоненты и технологии. – 2005. – № 9(53). – С. 48-54.

85.Никифоров, С. Температура в жизни и работе светодиодов. Часть 2 / С. Никифоров // Компоненты и технологии. – 2006. – №. 1(54). – С. 42-47.

86.Новоселов, И. М. Разработка и обоснование эффективности технологического светодиодного освещения птичника промышленного стада кур-несушек : дис. канд. техн. наук : специальность 05.20.02 / Новоселов Иван Михайлович. – Ижевск, 2011. – 163 с.

87.Носков, Г. А. Регуляция параметров годового цикла и ее роль в микроэволюционном процессе у птиц / Г. А. Носков, Т. А. Рымкевич // Успехи современной биологии. – 2010. – Т. 130, № 4. – С. 346-359.

88.Обзор систем освещения для птицеводческих помещений / Н. В. Коняев, Б. С. Блинков, Ю. В. Назаренко [и др.] // Современные тенденции развития технологий и технических средств в сельском хозяйстве : Материалы междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, 10 января 2017 г. Том Часть II. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2017. – С. 22-30.

89.Овсянникова, М. А. Влияние режима освещения на экономическую эффективность птицеводства / М. А. Овсянникова // Ученые записки Санкт-Петербургской академии управления и экономики. – 2010. – № 2(28). – С. 23-28.

90.Овчинников О. Г. Тенденции и факторы развития животноводства в России и США в XXI веке: сравнительный анализ // Столыпинский вестник. – № 1. – 2025. – DOI 10.55186/27131424_2025_7_1_1

91.Основы теории инженерного эксперимента : Учеб. пособие / Н. П. Коновалов, Ю. И. Кураков, В. Ф. Кукоз [и др.] ; Под общей редакцией: Н. П. Коновалова. – Иркутск : ИГТУ, 2014. – 300 с.

92.Пат. 2165694 С2 РФ, МПК А01К 67/02, А01К 31/00. Способ стимуляции откорма и повышения усвояемости корма у птицы мясных пород и установка для его осуществления : № 99105664/13 : заявл. 29.03.1999 : опубл. 27.04.2001 / В. А. Резник, О. В. Резник, В. Н. Далин.

93.Пат. № 2453762 С1 РФ, МПК F21V 8/00, А01G 9/20, А01К 31/00. Светильник для искусственного освещения помещений и/или клеток для содержания птицы и способ искусственного освещения помещений и/или клеток для содержания птицы : № 2011101789/07 : заявл. 20.01.2011 : опубл. 20.06.2012 / Д. А. Наумов, В. В. Швецов, В. Д. Шишкин.

94. Пат. № 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. Шабает, М. М. Романовец.

95. Пат. № 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. Шабает, М. М. Романовец.

96. Пат. на полезн. модель № 159705 U1 РФ, МПК F21S 13/00. Светодиодный светильник для равномерного освещения рабочей поверхности птичника : № 2014149314/07 : заявл. 08.12.2014 : опубл. 20.02.2016 / Т. Р. Галлямова, Т. А. Широбокова.

97. Пат. на полезн. модель № 162253 U1 РФ, МПК F21V 8/00, F21V 13/00. Светодиодный осветительный прибор для освещения птичников : № 2015155771/07 : заявл. 24.12.2015 : опубл. 10.06.2016 / Н. В. Коняев, Б. С. Блинков, Ю. В. Назаренко.

98. Пат. на полезн. модель № 99242 U1 РФ, МПК H01J 33/00. Светодиодный осветительный прибор : № 2010121080/28 : заявл. 25.05.2010 : опубл. 10.11.2010 / И. М. Новоселов, Н. П. Кочетков.

99. Патент 2165693 С2 РФ, МПК А01К 67/02, А01К 31/00. Способ стимуляции яйценоскости и повышения усвояемости корма у птицы яичных пород : № 99105663/13, заявл. 29.03.1999 : опубл. 27.04.2001 / В. А. Резник, О. В. Резник, В. Н. Далин.

100. Петрукович, Т. Выбираем способ выращивания бройлеров / Т. Петрукович, Д. Кириленко // Животноводство России. – 2025. – № 2. – С. 55-56.

101. Повышение равномерности освещения клеточных батарей для кур-несушек / Д. В. Гладин, А. Ш. Кавтарашвили, Е. Н. Новоторов, В. А. Гусев // Птицеводство. – 2018. – № 7. – С. 17-21.

102. Повышение равномерности освещения клеточных батарей для кур-несу-

шек / Д. В. Гладин, А. Ш. Кавтарашвили, Е. Н. Новоторов, В. А. Гусев // Птицеводство. – 2018. – № 7. – С. 17-21.

103. Погребняк, Т. А. Особенности адаптации птиц к действию нейрогенных стрессов в условиях реалистических моделей десинхроноза / Т. А. Погребняк // Научный результат. Серия: Физиология. – 2015. – Т. 1, № 1(3). – С. 40-47.

104. Поль, А. Особенности расчета систем отвода тепла при использовании светодиодов в корпусах PLCC / А. Поль // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – № 5. – С. 54-57.

105. Помогаев, Ю. М. Эксплуатация электрооборудования на предприятиях агропромышленного комплекса : Учеб. пособие / Ю. М. Помогаев, Г. А. Пархоменко, Г. В. Коробов. – Воронеж : Воронежский ГАУ, 2013. – 414 с.

106. Пономарев, А. Б. Методология научных исследований : Учеб. пособие / А. Б. Пономарев, Э. А. Пикулева. – Пермь: ПНИПУ, 2014. – 186 с.

107. Правила устройства электроустановок: все действующие разделы и главы шестого и седьмого изданий. – М. : ЭНАС, 2019. – 672 с.

108. Проблемы освещения птичников / В. В. Боцман, Н. В. Черный, И. С. Григорьян, Р. В. Шахбазян // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2017. – № 2(14). – С. 3-11.

109. Продуктивность кур при светодиодном освещении с изменяемой цветовой температурой / А. Ш. Кавтарашвили, Е. Н. Новоторов, В. А. Гусев, Д. В. Гладин // Птицеводство. – 2017. – № 3. – С. 27-29.

110. Продуктивность яичных кур промышленного стада при разных источниках освещения / А. Ш. Кавтарашвили, Е. Н. Новоторов, Т. Н. Волконская, М. В. Федорова // Сборник научных трудов ВНИТИП. Том 82. – Сергиев Посад : ВНИТИП, 2007. – С. 63-71.

111. Прытков, С. В. Основы светотехники и колориметрии : Лаб. практикум / С. В. Прытков. – Саранск : МГУ им. Н. П. Огарёва, 2018. – 63 с.

112. Развитие средств автоматизации для управления световым режимом в птицеводстве / Н. П. Кондратьева, С. И. Юран, И. Р. Владыкин [и др.] // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 2(58). –

С. 52-61.

113. Разработка прибора со светодиодами для освещения молодняка птиц при клеточном содержании / А. К. Хайретдинова, Ю. А. Журавлева, А. Н. Туркин [и др.] // Светотехника. – 2025. – № 4. – С. 65-69.

114. Разработка фитооблучателей на основе светодиодов с настраиваемым соотношением спектра ФАР / А. А. Смирнов, Ю. А. Прошкин, И. М. Довлатов [и др.] // Инновации в сельском хозяйстве. – 2019. – № 4(33). – С. 247-254.

115. Романовец, М. М. Исследование систем программного регулирования параметрами динамического освещения / М. М. Романовец // Вестник аграрной науки Дона. – 2025. – Т. 18, № 1(69). – С. 85-94.

116. Светодиодное освещение – как фактор повышения продуктивности цыплят-бройлеров / О. Н. Ястребова, А. Н. Добудько, В. А. Сыровицкий, А. Е. Ястребова // Актуальные вопросы сельскохозяйственной биологии. – 2017. – № 2(4). – С. 41-45.

117. Светодиодное освещение при содержании родительского стада / А. Ш. Кавтарашвили, Е. Н. Новоторов, Д. В. Гладин, Т. Н. Колокольникова // Птицеводство. – 2012. – № 5. – С. 15-17.

118. Светодиоды в промышленном птицеводстве / В. И. Трухачев, Е. М. Кобышева, М. Ф. Зонов [и др.] // Вестник АПК Ставрополя. – 2013. – № 4(12). – С. 67-69.

119. Сви-во 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.

120. Сви-во 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.

121. Сейтенов, А. Т. Производственная безопасность – обеспечивает защиту

людей от вредного воздействия электрического тока / А. Т. Сейтенов // Сельскохозяйственные науки и агропромышленный комплекс на рубеже веков. – 2014. – № 8. – С. 161-165.

122. Сидоренко, Л. И. Биология кур : Учеб. пособие / Л. И. Сидоренко, В. И. Щербатов. – Краснодар : КубГАУ, 2016. – 244 с.

123. Синцорова, А. М. Влияние прерывистых световых режимов с убывающей освещенностью на переваримость питательных веществ рациона и активность пищеварительных ферментов цыплят-бройлеров / А. М. Синцорова // Сельское, лесное и водное хозяйство. – 2013. – № 3(18). – URL: <https://agro.snauka.ru/2013/03/944> (дата обращения 21.06.2026).

124. Смирнов, А. А. Оптимизация спектрального состава и энергетической эффективности фитооблучателей / А. А. Смирнов, Ю. А. Прошкин, А. В. Соколов // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2019. – № 1(34). – С. 53-60.

125. Состояние российского рынка оборудования для производства мяса бройлеров / Т. Н. Кузьмина, В. Н. Кузьмин, Т. Е. Маринченко [и др.] // Птицеводство. – 2023. – № 3. – С. 42-47.

126. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech: Практикум по моделированию систем автоматического регулирования / Б. А. Карташов, Е. А. Шабаев, О. С. Козлов, А. М. Щекатуров. – М. : ДМК Пресс, 2017. – 424 с.

127. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход / Б. Ю. Лемешко, С. Б. Лемешко, С. Н. Постовалов, Е. В. Чимитова. – Новосибирск : НГТУ, 2011. – 888 с.

128. Стекольников, Г. А. Влияние различного уровня и разных источников освещения на физиологическое состояние и продуктивные качества кур-несушек при клеточном содержании в условиях Приамурья : дис. канд. с.-х. наук : специальность 06.02.04 / Стекольников Галина Анатольевна. – Рязань, 2001. – 104 с.

129. Стерхова, Т. Н. Система управления освещением производственных помещений в сельском хозяйстве / Т. Н. Стерхова, Т. А. Широбокова // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2022. – Т. 69, № 2(47). – С. 112-116.

130. Столляр, Т. Ресурсосберегающие технологии производства мяса бройлеров / Столляр, Т., Буяров В. // Птицеводство. – 2007. – № 10. – С. 9-11.

131. Техничко-экономическое обоснование инженерных решений в дипломных проектах : Учеб. пособие / Ю. А. Кузнецов, А. В. Коломейченко, К. В. Кулаков, В. В. Гончаренко. – Орел : Орловский ГАУ, 2014. – 124 с.

132. Трухачев, В. И. Светодиодное освещение в промышленном птицеводстве / В. И. Трухачев, М. Ф. Зонов, В. В. Самойленко. – Ставрополь : АГРУС, 2012. – 108 с.

133. Фисинин, В. И. Биологические и экономические аспекты производства мяса бройлеров в клетках и на полу / В. И. Фисинин, А. Ш. Кавтарашвили // Птицеводство. – 2016. – № 5. – С. 25-31.

134. Фисинин, В. И. Динамика и перспективы развития мирового и отечественного птицеводства. Результаты работы яичного и мясного птицеводства России в 2024 году / В. И. Фисинин // Птицеводство. – 2025. – № 3. – С. 4-10.

135. Фисинин, В. И. Динамика развития мирового и российского птицеводства / В. И. Фисинин // Комбикорма. – № 4. – 2024. – С. 2-6.

136. Фисинин, В. И. Уровень динамики развития мясного и яичного птицеводства России. Результаты работы отрасли в 2022 году / В. И. Фисинин // Птицеводство. – 2023. – Т. 4. – С. 4-8.

137. Холманский, А. С. Зависимость физиологии и анатомии птиц от внешних условий / А. С. Холманский, А. А. Смирнов // Вестник ВИЭСХ. – 2017. – № 2(27). – С. 141-143.

138. Хоровиц, П. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл ; Пер. Б. Н. Бронина [и др.]. – 6. изд. – М. : Мир, 2003. – 704 с.

139. Хорольский, В. Я. Техничко-экономическое обоснование дипломных проектов / В. Я. Хорольский, М. А. Таранов, Д. В. Петров. – Ростов-на-Дону : Терра, 2004. – 168 с.

140. Цевелюк, Е. Обзор интегральных микросхем светодиодных драйверов / Е. Цевелюк, В. М. Котов // Современная электроника. – 2014. – № 8. – С. 32-37.

141. 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.

142. Цифровые решения для птицеводства : аналит. обзор. / Т. Н. Кузьмина, В. Я. Гольяпин, А. В. Скляр [и др.] – М. : ФГБНУ «Росинформагротех», 2022. – 156 с.

143. Чернов, Б. А. Настройка систем автоматического управления и регулирования : Учеб. пособие / Б. А. Чернов. – Алматы : НАО АУЭС, 2019. – 87 с.

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

145. Шабаев, Е. А. 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.

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

147. Шабаев, Е. А. 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 21.06.2026).

148. Шабаев, Е. А. Обоснование параметров светодиодного излучателя системы освещения в птичнике с клеточным содержанием птицы / Е. А. Шабаев, Е. Ю. Матвиенко // Вестник магистратуры. – 2017. – № 5-1(68). – С. 7-12.

149. Шабаев, Е. А. Повышение эффективности привлечения комаров электрооптическим преобразователем с изменяющейся цветностью излучения для подкормки рыбы : дис. ... канд. техн. наук : специальность 05.20.02 / Шабаев Евгений Адимович. – зерноград, 2008. – 197 с.

150. Шагайда, Н. И. Ценовой кризис на рынке яйца: факты и последствия / Н. И. Шагайда, Д. С. Терновский // Всероссийский экономический журнал ЭКО. – 2024. – Т. 50, № 2. – С. 131-145.
151. Шарейко, Н. А. Световые режимы в птицеводстве: аналитический обзор / Н. А. Шарейко – Минск : Белорус. науч. ин-т внедрения новых форм хозяйствования в АПК – 2004 – 20 с.
152. Шаронов, В. В. Таблицы для расчета природной освещенности и видимости / В. В. Шаронов. – М.-Л. : АН СССР, 1945. – 199 с.
153. Шилов, С. М. Современные требования, предъявляемые к системам освещения в птицеводстве. Индекс мерцания-что это? / С. М. Шилов // Птицеводство. – 2019. – № 1. – С. 35-38.
154. Юдаев, И. В. Исследование светодиодного светильника для систем локального освещения в области АПК / И. В. Юдаев, Е. А. Шабает, М. М. Романовец // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2020. – № 3(59). – С. 376-387.
155. Юфеев, Л. Ю. Энергосберегающее освещение сельскохозяйственных помещений и расчет его параметров // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2021. – Т. 15, №. 3. – С. 28-34.
156. A comparative study on the junction temperature measurements of LEDs with Raman spectroscopy, microinfrared (IR) imaging, and forward voltage methods / E. Tamdogan, G. Pavlidis, S. Graham, M. Arik // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 8, № 11. – P. 1914-1922.
157. Aldridge, D. J. Optimization of the light environment for broiler chickens / D. J. Aldridge. – Fayetteville : University of Arkansas, 2019. – 110 p.
158. Aldridge, D. J. Performance and preference of broilers provided dual light warmth / D. J. Aldridge, C. G. Scanes, M. T. Kidd // Journal of Applied Poultry Research. – 2021. – Vol. 30, № 4. – DOI 10.1016/j.japr.2021.100187
159. An updated review on the effect of lighting on broilers and the environment of commercial houses / J. E. Linhoss, O. B. Falana, J. D. Davis [et al.] // World's Poultry Science Journal. – 2025. Vol. 81, № 2 – P. 373-401.

160. Archer, G. S. Color temperature of light-emitting diode lighting matters for optimum growth and welfare of broiler chickens / G. S. Archer // *Animal*. – 2018. – Vol. 12, № 5. – P. 1015-1021.
161. Bourgeois, D. Standard daylight coefficient model for dynamic daylighting simulations / D. Bourgeois, C. F. Reinhart, G. Ward // *Building Research & Information*. – 2008. – Vol. 36, № 1. – C. 68-82.
162. Chen, H.-T. Nonlinear dimming and correlated color temperature control of bicolor white LED systems / H.-T Chen, S.-C. Tan, S. Y. Hui // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2009. – Vol. 30. – № 12. – P. 6934-6947.
163. Data sheet LM561B Plus CRI80 // Samsung LED. – 2022. – 33 p – URL: https://download.led.samsung.com/led/file/resource/2022/05/Data_Sheet_LM561B_Plus_CRI80_Rev.9.2.pdf (дата обращения: 21.06.2026).
164. Description of light environment in broiler breeder houses with different light sources – And how it differs from natural forest light / G. Vasdal, K. E. Kittelsen, F. Tahamtani, D. E. Nilsson // *Animals*. – 2022. – Vol. 12, № 23. – DOI 10.3390/ani12233408
165. Effect of a Broiler-Specific Light Spectrum on Growth Performance and Adrenocortical Activity in Chickens: A Pilot Study on a Commercial Farm / L Galosi, L Todini, L Menchetti [et al.] // *Veterinary sciences*. – 2024. – Vol. 11, № 12. – DOI 10.3390/vetsci11120618
166. Effect of combinations of monochromatic lights on growth and productive performance of broilers / J. Cao, Z. Wang, Y. Dong [et al.] // *Poultry Science*. – 2012. – Vol. 91, № 12. – P. 3013-3018.
167. Effect of light management in broiler production: a review / P. Pal, D. K. Dey, B. Sharma [et al] // *Journal of Entomology and Zoology Studies*. – 2019. – Vol. 7, № 3. – P. 437-441.
168. Effects of a variable light intensity lighting program on the welfare and performance of commercial broiler chickens / S. W. Kang, K. D. Christensen, Jr. Kidd [et al.] // *Frontiers in Physiology*. – 2023. – Vol. 14. – DOI 10.3389/fphys.2023.1059055
169. Effects of color temperatures (Kelvin) of LED bulbs on blood physiological

variables of broilers grown to heavy weights / H. A. Olanrewaju, J. L. Purswell, S. D. Collier, S. L. Branton [et al.] // *Poultry Science*. – 2015. – Vol. 94, № 8. – P. 1721-1728.

170. Effects of light wavelength on broiler performance, blood cell profiles, stress levels, and tibiotarsi morphology / A. Perretti, V. J. Oyeniran, J. M. Cherry [et al.] // *Animals*. – 2025. – Vol. 15, № 16. – DOI 10.3390/ani15162372

171. Effects of various LED light colors on growth and immune response in broilers / Seo H. S., Kang M., Yoon R. H. [et al.] // *The Journal of Poultry Science*. – 2015. – Vol. 53, № 1. – P. 76-81.

172. Evaluation of light colour manipulation on physiological response and growth performance of broiler chickens / O. E. Oke, A. I. Oni, P. O. Adebambo [et al.] // *Tropical Animal Health and Production*. – 2021. – Vol. 53, № 6. – DOI 10.1007/s11250-020-02432-1

173. Figueiro, M. G. Non-visual effects of light: how to use light to promote circadian entrainment and elicit alertness / M. G. Figueiro, R. Nagare, L. L. A. Price // *Lighting Research and Technology*. – 2017. – Vol. 50, № 1 – P. 38-62.

174. Galan, L. The influence of different light spectra on broiler chicken endocrine systems and productivity / L. Galan, G. Solcan, C. Solcan // *Animals*. – 2025. – Vol. 15, № 21. – DOI 10.3390/ani15213209

175. Halevy, O. Various light source treatments affect body and skeletal muscle growth by affecting skeletal muscle satellite cell proliferation in broilers / O. Halevy, I. Biran, I. Rozenboim // *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*. – 1998. – Vol. 120, № 2. – P. 317-323.

176. Horodincu, L. Influence of different light spectra on melatonin synthesis by the pineal gland and influence on the immune system in chickens / L. Horodincu, C. Solcan // *Animals*. – 2023. – Vol. 13, № 13. – DOI 10.3390/ani13132095

177. Impact of light intensity or choice of intensity on broiler performance and behavior / D. J. Aldridge, C. M. Owens, C. Maynard [et al.] // *Journal of Applied Poultry Research*. – 2022. – Vol. 31, № 1. – DOI 10.1016/j.japr.2021.100216

178. Impact of light wavelength on growth and welfare of broiler chickens: an overview and future perspective / A.-M. E. Abdel-Moneim, S. A. Siddiqui, A. M. Shehata [et al.] // *Annals of Animal Science*. – 2024. – Vol. 24, № 3. – P. 731-748.

179. Influence of light sources and photoperiod on growth performance, carcass characteristics, and health indices of broilers grown to heavy weights / H.A. Olanrewaju, W.W. Miller, W.R. Maslin [et al.] // *Poultry Science*. – 2018. – Vol. 97, №. 4. – P. 1109-1116.

180. Judd, D. B. *Color in Business, Science, and Industry* / D. B. Judd, G. Wyszecki. – 3rd ed. – New York, 1963. – 576 p.

181. Layer pullet preferences for light colors of light-emitting diodes / G. Li, B. Li, Y. Zhao [et al.] // *Animal*. – 2019. – Vol. 13, №. 6. – P. 1245-1251.

182. LED lamp for poultry housing – Design and thermal management / P. Mashkov, B. Gyoch, R. Kandilarov [et al.] // 38th International Spring Seminar on Electronics Technology : Proc. Int. Sci.-Pract. Conf., Eger, 06-10 May 2015. – Eger : ISSE, 2015. – P. 91-96.

183. LED light applied to the feeder: impact on growth performances of chickens under productive conditions / L. Galosi, R. Falconi, L. Biagini [et al.] // *Veterinary Sciences*. – 2023. – Vol. 10, № 4. – DOI 10.3390/vetsci10040306

184. Lewis, P. D. *Poultry and coloured light* / Lewis P. D., Morris T. R. // *World's Poultry Science Journal*. – 2000. – Vol. 56, № 3. – C. 189-207.

185. Lighting, density, and dietary strategies to improve poultry behavior, health, and production / K. El-Sabrou, A. El-Deek, S Ahmad [et al.] // *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*. – 2022. – Vol. 10, № 1. – DOI 10.31893/jabb.22012

186. Malik, R. Wide-range, open-loop, CCT and illuminance control of an LED lamp using two-component color blending / R. Malik, K. K. Ray, S. Mazumdar // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2017. – Vol. 33, № 11. – P. 9803-9818.

187. Models of sky radiance distribution and sky luminance distribution / N. Igawa, Y. Koga, T. Matsuzawa, H. Nakamura // *Solar Energy*. – 2004. – Vol. 77, № 2. – P. 137-157.

188. North, M. O. *Commercial Chicken Production Manual* / M. O. North. –

1st ed. – Westport : AVI Publishing Company, 1972. – 645 p.

189. Optimization of the design of a greenhouse LED luminaire with immersion cooling / P. V. Tikhonov, A. A. Smirnov, Yu. A. Proshkin [et al.] // *AgriEngineering*. – 2024. – Vol. 6, No. 3. – P. 3460-3473.

190. Prayitno, D.S. The effect of color of lighting of the behaviour and production of meat chickens / D. S. Prayitno, C. J. Phillips, H. Omed // *Poultry Science*. – 1997. – Vol. 76, № 3 – P. 452-457.

191. Preference of broiler chicken for different light colors in relation to age, session of the day and behavior / D. Senaratna, T. S. Samarakone, A. A. P. Madusanka, W. W. D. A. Gunawardane // *Tropical Agricultural Research*. – 2012. – Vol. 23, № 3. – P. 193-203.

192. Relationships between junction temperature, electroluminescence spectrum and ageing of light-emitting diodes / A. Vaskuri, P. Kärhä, H. Baumgartner [et al.] // *Metrologia*. – 2018. – Vol. 55. – DOI 10.1088/1681-7575/aaaed2

193. Riber, A. B. 2015. Effects of color of light on preferences, performance, and welfare in broilers/ A. B. Riber // *Poultry Science*. – 2015. – Vol. 94, № 8. – P. 1767-1775.

194. Rierison, R. D. Broiler preference for light color and feed form, and the effect of light on growth and performance of broiler chicks / R. D. Rierison. – Manhattan : Kansas State University, 2011. – 71 p.

195. Schlyter, P. Computing planetary positions – a tutorial with worked examples. / P. Schlyter. // *Stjarnhimlen*. – URL: <https://stjarnhimlen.se/comp/tutorial.html> (дата обращения 21.03.2026).

196. Shabaev, E. A. Mathematical models of sunlight for dynamic lighting systems of agricultural objects / E. A. Shabaev, M. M. Romanovets // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : Proc. Int. Sci.-Pract. Conf.*, Zernograd, 27-28 August 2020. – Zernograd : IOP, 2021. – DOI 10.1088/1755-1315/659/1/012110

197. Significance of light in poultry production: a review / S. Patel, A. S. Patel, M. D. Patel, A. Patel // *Advances in Life Sciences*. – 2016. – Vol. 5, № 4. – P. 1154-1160.

198. Soliman F. N. K. Light wavelengths/colors: Future prospects for broiler behavior and production / F. N. K. Soliman, K. El-Sabrout // *Journal of Veterinary Behavior*. – 2020. – Vol. 36. – P. 34-39.
199. The effect of light wavelength on the production and quality of eggs of the domestic hen / R. Pyrzak, N. Snapir, G. Goodman, M. Perek // *Theriogenology*. – 1987. – Vol. 28, № 6. – P. 947-960.
200. The effect of linear lighting systems on the productive performance and egg quality of laying hens / J. de S. G. Barros, T. A. dos S. Barros, K. Sartor [et al.] // *Poultry Science*. – 2020. – Vol. 99, № 3. – P. 1369-1378.
201. The effect of monochromatic light on broilers growth and development / I. Rozenboim, I. Biran, Z. Uni [et al.] // *Poultry Science*. – 1999. – Vol. 78, № 1 – P. 135-138.
202. Thomson, A. Improving energy efficiency in poultry farms through LED usage: a provincial study / A. Thomson, K. W. Corscadden // *Energy Efficiency*. – 2018. – Vol. 11. – P. 927-938.
203. Wang, Y. A review of LED drivers and related technologies / Y. Wang, J. M. Alonso, X. Ruan // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2017. – Vol. 64, № 7. P. 5754-5765.
204. Yadlapalli, R. T. An overview of energy efficient solid state LED driver topologies / R. T. Yadlapalli, R. P. Narasipuram, A. Kotapati // *International Journal of Energy Research*. – 2020. – Vol. 44, № 2. – P. 612-630.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Реализации результатов

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора института механики
и энергетики имени В.П. Горячкина

« 15 »  А.И. Арженовский
2026 г.

АКТ

о внедрении результатов научно-исследовательской работы



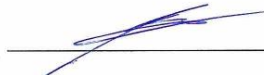
Настоящий Акт составлен комиссией Института механики и энергетики имени В.П. Горячкина Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» в лице председателя комиссии и.о. директора, д.т.н., проф. Арженовского Алексея Григорьевича, заместителя директора по науке и практике, к.т.н. Федоткина Романа Сергеевича, заместителя директора по учебной работе, к.с.-х.н., доц. Шевкуна Николая Александровича, заместителя директора по методической работе, к.т.н., доц. Толстоуховой Татьяны Николаевны.

Настоящим Актом подтверждается, что результаты, полученные соискателем ученой степени канд. техн. наук Романовцом Михаилом Михайловичем на тему «Разработка цифровой системы динамического локального светодиодного освещения птичников с клеточным содержанием цыплят-бройлеров» под научным руководством и.о. заведующего кафедрой, доцента кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф. Бородина, к.т.н., доц. Шабаева Евгения Адимовича, внедрены в процесс научных исследований и разработок Института механики и энергетики имени В.П. Горячкина, а также в учебный процесс для подготовки студентов по направлениям 35.03.06 Агроинженерия, 35.04.06 Агроинженерия.

Заместитель директора
по науке и практике

 Р.С. Федоткин

Заместитель директора
по учебной работе

 Н.А. Шевкун

Заместитель директора
по методической работе

 Т.Н. Толстоухова

Рисунок А.1 – Акт внедрения результатов НИР в учебный процесс
ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева



**ООО «Птицефабрика
«Элинар-Бройлер»**

Россия • 143325 • Московская
область • г. Наро-Фоминск
п. Новая Ольховка
ОГРН 1155030000201
ИНН 5030084600
тел. (495) 745 5950
Факс (495) 745 5951
тел./факс (49634) 45 902
reception@elinar-broiler.ru

№ 133
дата 29.05 2026г.

**АКТ
о внедрении результатов
научно-исследовательской работы**

Настоящим актом подтверждается, что результаты научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы, проведенной в рамках диссертационного исследования соискателя, инженера кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф. Бородина ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева Романовца Михаила Михайловича на тему «Разработка цифровой системы динамического локального светодиодного освещения птичников с клеточным содержанием цыплят-бройлеров» переданы ООО «Птицефабрика «Элинар-Бройлер».

Результаты исследований использованы при расчете параметров системы светодиодного освещения птичников с клеточным содержанием сельскохозяйственной птицы. По итогам оценки эффективности реализации НИОКР на предприятии их применение позволит существенно повысить равномерность освещения клеточных батарей, снизить энергопотребление и улучшить условия содержания сельскохозяйственной птицы в клеточных батареях. Потенциал повышения живой массы цыплят-бройлеров за счет реализации результатов исследования на предприятии составляет 3...7 %. При условии доработки системы в части внедрения в общую автоматизированную систему управления предприятием разработанную систему можно рекомендовать для промышленного применения.

Генеральный директор
ООО «Птицефабрика
«Элинар-Бройлер»


 М.П.

В.С. Петров

**Рисунок А.2 – Акт внедрения результатов НИР в производственную деятельность
ООО «Птицефабрика «Элинар-Бройлер»**

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Результаты исследований и разработок

Таблица Б.1 – Параметры локальных светодиодных светильников систем освещения птичников

Светильник	СК170- Т(Х)	СК400- Т(Х)	СВП-07- 140- 465Нм	СВП-07- 210- 465Нм	GL048-D- 001.3BN	GL048-D- 001.3KBN	FlexLED eco	FlexLED glo
Габариты, мм	170×20	430×20	160	215	285×30	115×115× 45	60×16 ×16	12×12
Потребляемая мощность, Вт	0,5–3,0	1,0–3,0	1,6 (бе- лый); 0,7 (синий)	3,2 (бе- лый); 0,7 (синий)	1,3	1,3	2,0	1,0
Световой поток, лм	60–325	125–350	140; 20	210; 20	170	170	130–190	360
Световая отдача, лм/Вт	125	125	88	67	131	131	95	100
Напряжение питания, В	48	48	39	39	48	48	48	48
Количество светодиодов, шт.	13	13	8; 4	12; 4	-	-	14	14
Угол раскрытия. светового потока, °	120	120	180	180	120	120	110–150	360
Степень защиты	IP66	IP66	IP67	IP67	IP66/ IP68	IP66/ IP68	IP69K	IP67
КЦТ, К	3000; 5000 и др.	3000; 5000 и др.	3000; 6500 и др. +синий	3000; 6500 и др. +синий	4000; +синий	4000; +синий	3000	3000

Продолжение таблицы Б.1

Светильник	Flex LED 2- channel	LGT- 03W	BUBO WWR 7555	BUBO WWR 7556	HT- T6DC04 W12FB	HT- T6DC05 W15FB	HT- T6DC06 W18FB	ССД-2- 150	Све- диод Альфа	Tube LED- 100-
Габариты, мм	1800 ×22×11	75×27 ×22,5	900	1820	1200 ×18	1500 ×18	1800×1 8	300×15	400×10 ×8	-
Потребляемая мощность, Вт	6,7	2,0; 3,0	2,2 (бе- лый); 0,7	4,3 (бе- лый); 1,5	4,0	5,0	6,0	0,5	0,9	0,5
Световой поток, лм	500	320; 480	220	430	520–560	650–700	780–840	-	-	-
Световая отдача, лм/Вт	74	160	100	100	130–140	130–140	130–140	-	-	-
Напряжение питания, В	48	36; 48	48	48	48	48	48	24	24	24
Количество свето- диодов, шт.	8-14	11	-	-	-	-	-	2	6	-
Угол раскрытия. светового потока, °	110	120	120; 130	120; 130	180	180	180	120	120	120
Степень защиты	IP69K	IP69K	IP67	IP67	IP67	IP67	IP67	IP65	IP65	IP65
КЦТ, К	3000; крас- ный	2700; 5000	3000; крас- ный	3000; крас- ный	2700; 6500 и др.	2700; 6500 и др.	2700; 6500 и др.	-	3000	-

< НАЗАД

Параметры освещения

Заданная освещенность, лк	25
Допустимое отклонение, ± лк	2.5
Контроль освещенности	Отключен
Расчетная освещенность, лк	0
Датчик освещенности 1, лк	0
Датчик освещенности 2, лк	0

< НАЗАД

Параметры освещения

Датчик освещенности 2, лк	0
Тцв "теплого" светодиода, К	2660
Тцв "холодного" светодиода, К	5640
Тцв излучения светильника, К	0
Коэффициент Ew/Es, о.е.	0.927
Emax светильника, лк	51.4

Рисунок Б.1 – Экраны графического интерфейса «Параметры освещения»

< НАЗАД

Программа освещения

Множитель времени	1
Время начала отсчета	
Часы	0
Минуты	0
Секунды	0
Световой период 1	

< НАЗАД

Программа освещения

Минуты	0
Секунды	0
Темновой период 2	
Часы	10
Минуты	0
Секунды	0

< НАЗАД

Программа освещения

Световой период 1	
Часы	2
Минуты	0
Секунды	0
Темновой период 1	
Часы	6

< НАЗАД

Программа освещения

Часы	6
Минуты	0
Секунды	0
Световой период 2	
Часы	6
Минуты	0

Рисунок Б.2 – Экраны графического интерфейса «Программа освещения»

< НАЗАД

Журнал событий

ОЧИСТКА

Журнал пустой
Событий нет

Неисправность ДО 1	14:04:34 22.09.2022
Неисправность ДО 2	14:04:34 22.09.2022
Неисправность ДТ радиатора	14:04:34 22.09.2022
Неисправность ДТ воздуха	14:04:34 22.09.2022
Значительное отклонение E1	14:04:34 22.09.2022

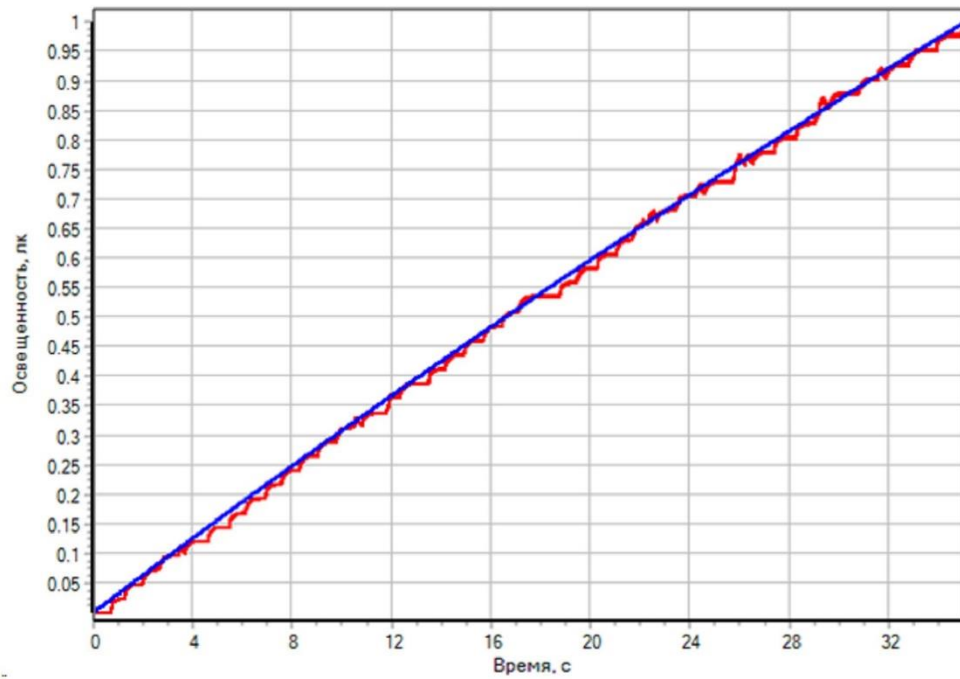
< НАЗАД

Журнал событий

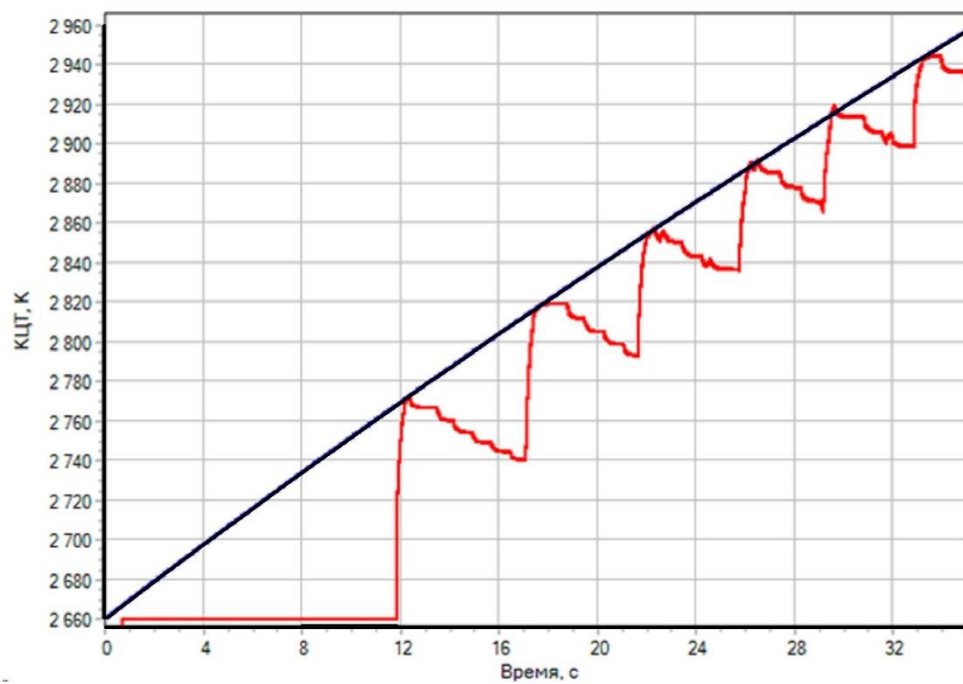
ОЧИСТКА

Значительное отклонение E2	14:04:34 22.09.2022
Выключение питания	14:04:34 22.09.2022
Обрыв линии	14:04:34 22.09.2022
Короткое замыкание	14:04:34 22.09.2022
Перегрев драйвера	14:04:34 22.09.2022
Нарушение связи с модулем управления	14:04:34 22.09.2022

Рисунок Б.3 – Экран графического интерфейса «Журнал событий»

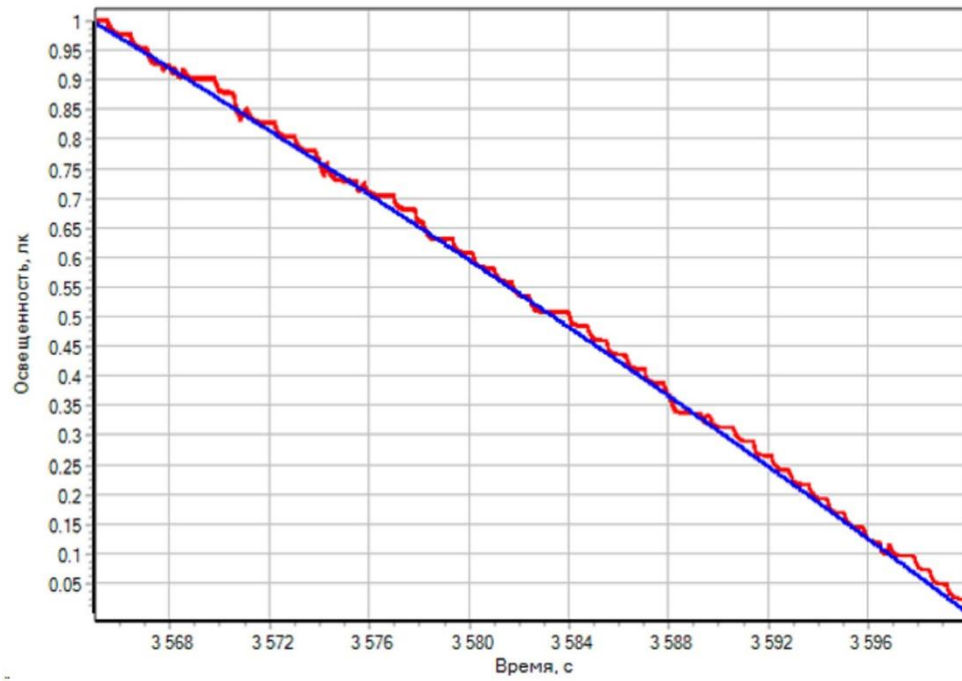


а

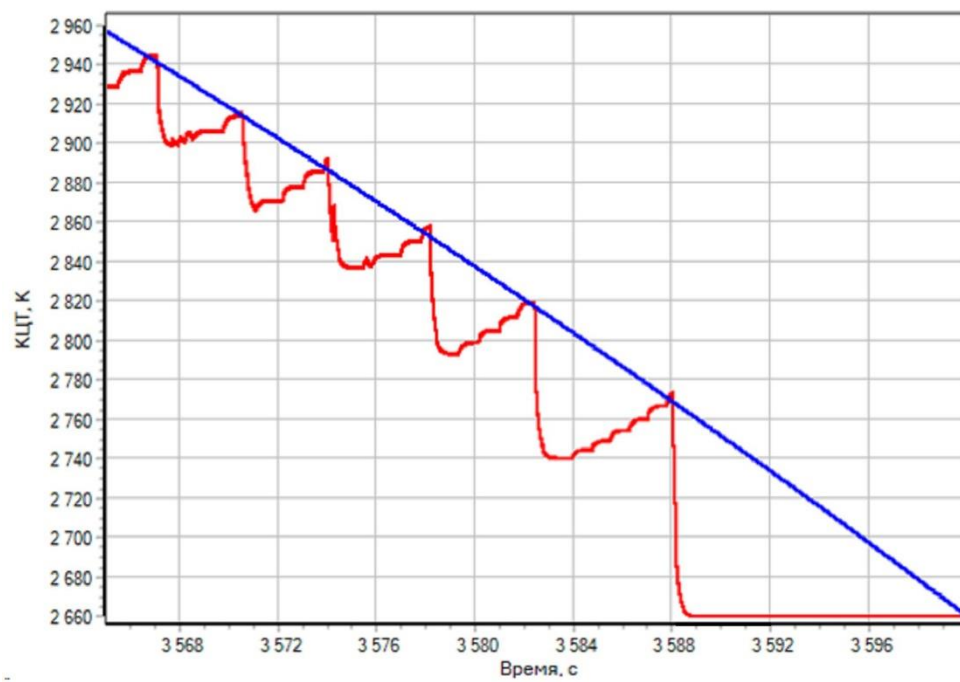


б

Рисунок Б.4 – Графики переходных процессов систем программного управления на участке «начальный» при $E_{Z\text{MAX}} = 10$ лк и $t_C = 1$ ч: а – освещенности; б – КЦТ



а



б

Рисунок Б.5 – Графики переходных процессов систем программного управления на участке «конечный» при $E_{Z\text{MAX}} = 10$ лк и $t_C = 1$ ч: а – освещенности; б – КЦТ

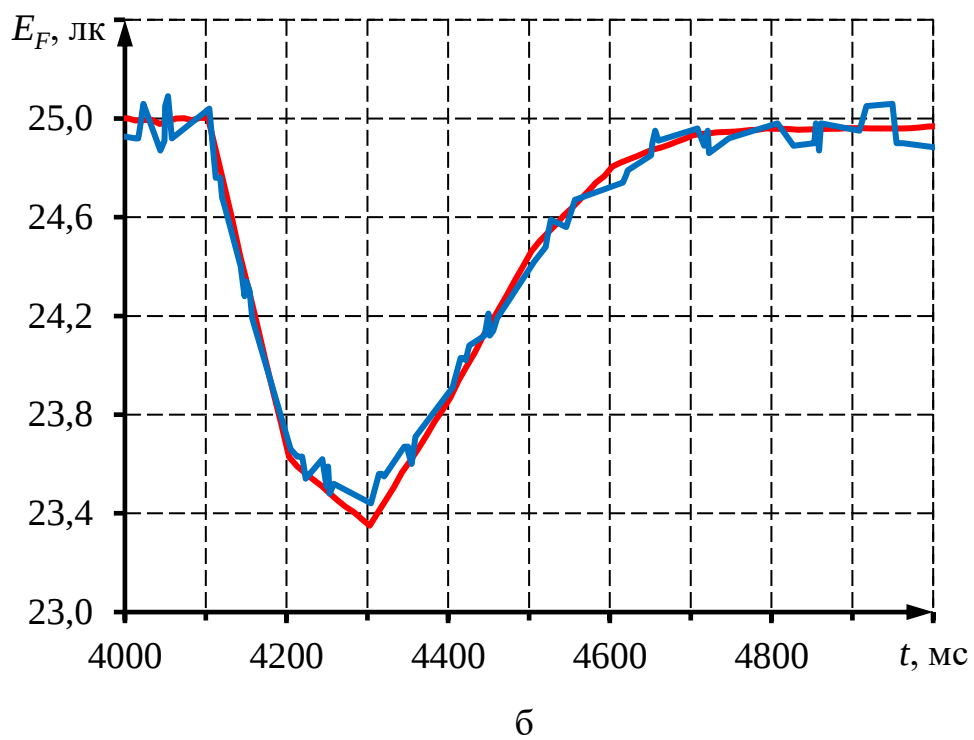
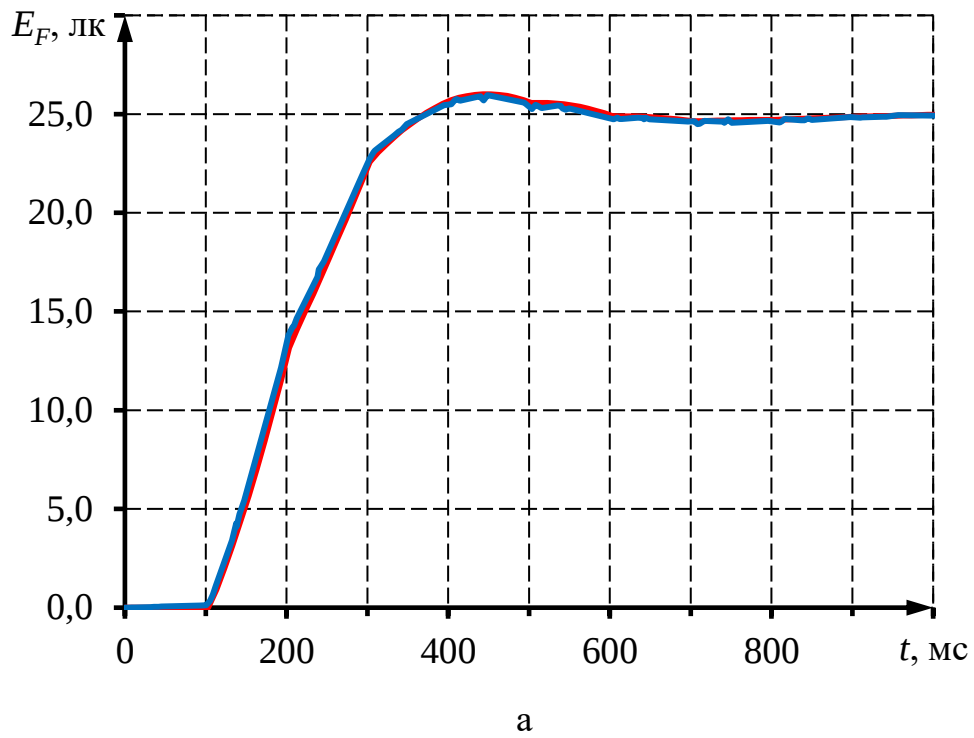


Рисунок Б.6 – Графики переходных процессов $E_N = f(t)$ при $E_Z = 25$ лк и $\Delta E_V = -2,5$ лк: а – по регулируемому воздействию; б – по возмущению

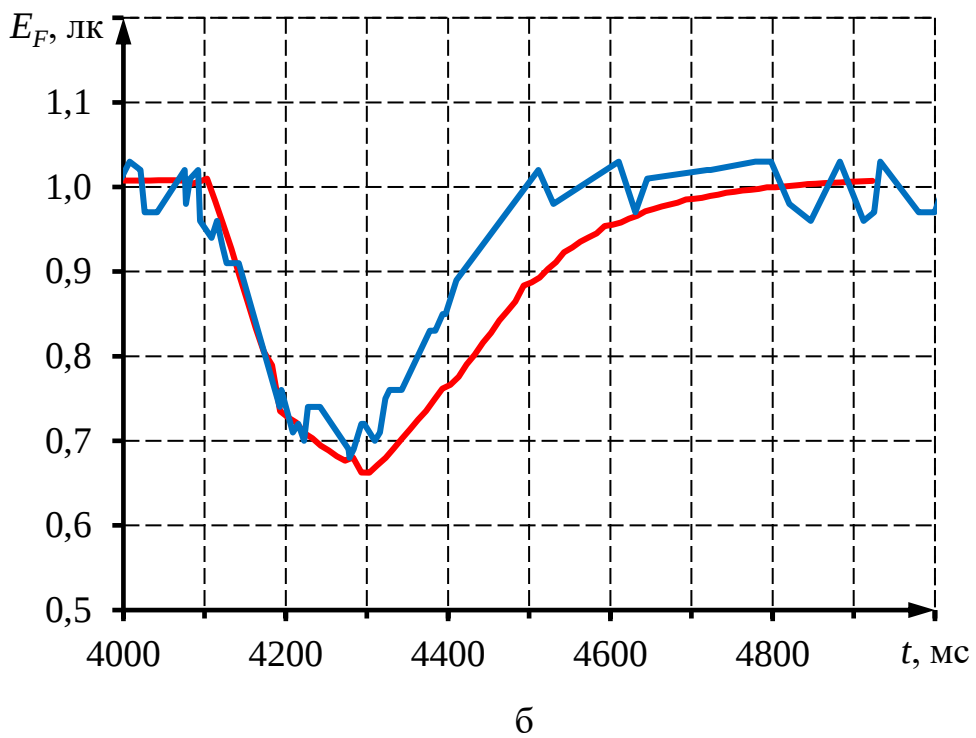
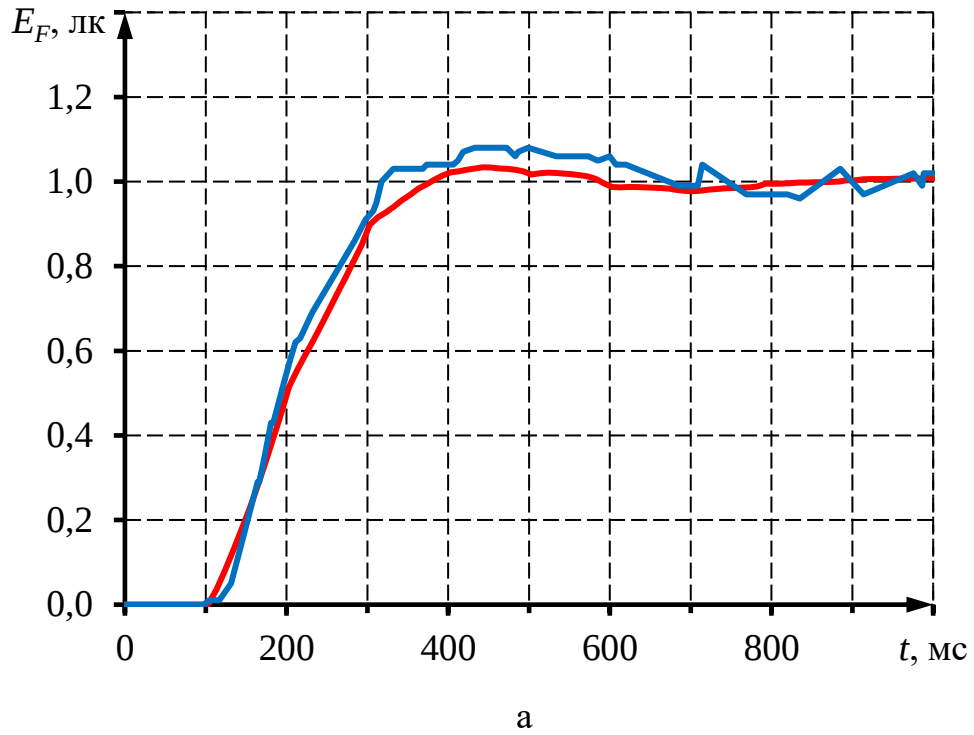


Рисунок Б.7 – Графики переходных процессов $E_N = f(t)$ при $E_Z = 1$ лК и $\Delta E_V = -0,5$ лК: а – по регулируемому воздействию; б – по возмущению