

На правах рукописи



Кузьменко Владимир Павлович

**Модели и методики обеспечения качества светодиодных осветительных
приборов**

Специальность 05.02.23 – Стандартизация и управление качеством
продукции

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена на кафедре электромеханики и робототехники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП).

Научный руководитель:

Солёный Сергей Валентинович

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой электромеханики и
робототехники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет аэрокосмического
приборостроения»

Официальные оппоненты:

Ашрятов Альберт Аббясович

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой источников света ФГБОУ ВО
«Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет им. Н.П. Огарёва»

Скамьин Александр Николаевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
Электроэнергетики и электромеханики ФГБОУ ВО
«Санкт-Петербургский горный университет»

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И.
Ульянова (Ленина)», 197376, г. Санкт-Петербург, ул.
Профессора Попова, дом 5.

Защита состоится «14» декабря 2021 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.233.04 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А. Автореферат и текст диссертации размещены на сайте университета <http://dissov.guap.ru>.

Автореферат разослан «22» октября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.233.04,
доктор технических наук, доцент



Фролова Е.А.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Приоритетными направлениями промышленной политики Российской Федерации являются повышение конкурентоспособности производства и эффективное продвижение наукоемкой продукции на внутреннем и внешнем рынках. В Послании Федеральному собранию 1 марта 2018 года Президент России обозначил особую роль новых технологий в развитии страны, назвав их одним из приоритетов государственной политики России.

Улучшение качества и потребительских свойств продукции, в совокупности определяющих ее качество, а также повышение технологичности продукции в целом или отдельных ее элементов, определяются внедрением цифровых технологий в рамках концепции «Индустрия 4.0» как на предприятиях, так и на локальных административных, бытовых и других объектах, что требует постоянного поддержания высокого уровня качества электрической энергии.

Согласно прогнозам, представленным в ежегодном Международном обзоре энергии 2019-2020 (World Energy Outlook 2019-2020) а также сценариям развития государственной политики стран с ведущими экономиками, глобальный спрос на электроэнергию будет расти на 2,1% в год до 2040 года, что вдвое превышает спрос на первичную энергию. Это увеличивает долю электроэнергии в общем конечном потреблении энергии с 19% в 2018 году до 24% в 2040 году. Развитие светодиодного освещения продолжается как в стране в целом, так и в отдельных регионах. Так государственная программа «Комплексное развитие систем коммунальной инфраструктуры, энергетики и энергосбережения в Санкт-Петербурге» (с изменениями на 16 октября 2020 года) предусматривает повышение комфортности и безопасности городской среды Санкт-Петербурга за счет развития систем наружного (уличного) освещения и увеличения доли светильников с энергосберегающими технологиями до 29% к 2024 году.

Наличие такого большого многообразия элементов, каждый из которых имеет значительное влияние на показатели качества и надежность изделия, обуславливает необходимость применения методик и доступных средств ускоренного проведения комплексного контроля качества светодиодных осветительных приборов на этапе приобретения и дальнейшей эксплуатации. Нормативными документами определено, что световая отдача любого источника света во время заявленного срока службы не должна снижаться более чем на 20%. В то время как конец срока службы определен как полный отказ устройства. Однако в случаях с светодиодными осветительными приборами возникает возможность продолжительной работы осветительного прибора, но с большим снижением светового потока. Следует также отметить растущие требования к безопасности светодиодных осветительных приборов с точки зрения фитобиологического влияния, с которыми можно столкнуться при длительном массовом использовании энергоэффективных осветительных приборов с высоким содержанием длин волн синего спектра света, что особенно актуально при применении данных изделий в учебных классах школ, а также на борту гермообъектов.

Данная работа посвящена исследованию параметров качества и характеристик светодиодных осветительных приборов отечественного производства, их основных элементов, таких как элементы защиты, источники питания, теплоотводы, элементы оптического воздействия.

Таким образом, актуальность темы диссертационного исследования обусловлена тем, что существует необходимость разрешения противоречия между потребностью повышения энергоэффективности систем освещения, которая на данный момент решается за счет массового внедрения светодиодного освещения, и ухудшением качества электрической энергии при массовом применении осветительных приборов со светодиодными источниками света, а также необходимостью комплексного научно-методического инструментария мониторинга качества и эффективного использования

светодиодной осветительной продукции с учетом ее возможности повышения безопасности и эффективности свечения.

Степень разработки проблемы. Значительный научный вклад в разработку процессов управления качеством внесли отечественные ученые Ю.П. Адлер, Б.В. Бойцов, В.А. Васильев, А.Г. Варжапетян, А.В. Гличев, М.М. Кане, В.А. Липатников, Е.Г. Семенова, Г.И. Коршунов и др.

Существует ряд стандартов по техническому регулированию и метрологии в области осветительных приборов с светодиодными источниками света (ГОСТ Р 55705—2013) по общим требованиям к надежности и энергоэффективности бытовых и электрических приборов (ГОСТ 26119-97) с точки зрения фотобиологической безопасности систем освещения и ламповых систем в настоящее время используется стандарт ГОСТ Р МЭК 62471-2013, который полностью идентичен международному IEC 62471:2006, с точки зрения контроля параметров и характеристики светодиодов используются стандарты ГОСТ Р 8.749-2011 и ГОСТ В 20.57.403-81 (СТ В СЭВ 0264-87).

Следует отметить проблему стандартизации при обеспечении качества светодиодного освещения, которая сопровождается тем, что отечественные производители и разработчики все еще используют зарубежное сборочное оборудование, которое, как правило, разработано на зарубежные стандарты и нормы обеспечения качества, а отечественное оборудование по выращиванию светодиодных кристаллов и вовсе отсутствует.

Таким образом, проблема обеспечения качества осветительных приборов с светодиодными источниками света и нехватка экспериментальных данных в области описанных проблем определили выбор темы, цели и задач диссертационной работы.

Цель работы и задачи исследования. Целью исследования является повышение эффективности процессов эксплуатации и производства светодиодных осветительных приборов на основе разработки моделей и методик обеспечения качества светодиодных осветительных приборов.

Для достижения цели исследования в работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Обоснование и дополнение номенклатуры показателей качества светодиодных осветительных приборов, путем разработки и введения новых критериев и аналитических выражений, с учетом существующих нормативных баз и жизненного цикла продукции.
2. Разработка квалиметрической модели оценки эффективности теплоотводов светодиодных осветительных приборов на основе исследования и моделирования их тепловых характеристик и с учетом разработанной номенклатуры показателей качества светодиодных осветительных приборов.
3. Разработка модели оценки рисков ускоренного старения основных элементов осветительных приборов со светодиодным источником света.
4. Разработка методики мониторинга качества сетей искусственного освещения с осветительными приборами со светодиодным источником света с точки зрения фотобиологической безопасности.
5. Разработка методики обеспечения качества эксплуатации осветительных приборов со светодиодным источником света.

Объектом исследования являются осветительные приборы со светодиодным источником света, системы их управления и система электроснабжения административных объектов.

Предметом исследования являются методы, критерии, процедуры и модели, обеспечивающие повышение качества эксплуатации и контроля характеристик осветительных приборов со светодиодным источником света.

Методы исследования. В ходе исследования использованы методы унификации, агрегатирования, натуральных испытаний, моделирования и статистики. В качестве

инструментов моделирования применяются современные пакеты прикладных программ: Solid Works, PTC Creo Parametric.

Экспериментальные исследования проводятся с использованием современных электроизмерительных и электронных приборов: трехфазный анализатор параметров электросетей, качества и количества электроэнергии С.А 8335 QUALISTAR PLUS, Люксметр-пульсметр АРГУС-07, Тепловизор FLUKE TI450, спектроколориметр ТКА-ВД/02, гониометр VISO LIGHTSPION, радиометр МКС-АТ6130, измеритель параметров цепей MZC-300.

Тематика работы соответствует пп. 1, 2, 3, 4, паспорта специальности – 05.02.23 Стандартизация и управление качеством продукции.

Положения, выносимые на защиту:

1. Дополненная номенклатура показателей качества светодиодных осветительных приборов, учитывающая современные требования национальных международных стандартов к осветительным приборам со светодиодным источником света в том числе параметров, оказывающих влияние на качество электрической энергии при массовом использовании данных изделий.

2. Квалиметрическая модель оценки эффективности теплоотводов светодиодных осветительных приборов на основе исследования и моделирования их тепловых характеристик и с учетом предложенной номенклатуры показателей качества светодиодных осветительных приборов.

3. Модель оценки рисков ускоренного старения, основанная на математической модели износа основных элементов светодиодного светильника, которая учитывает наличие бессвинцовых или смешанных паяных соединений.

4. Методика мониторинга качества сетей искусственного освещения с осветительными приборами со светодиодным источником света с точки зрения фитобиологической безопасности.

5. Методика обеспечения качества эксплуатации осветительных приборов со светодиодным источником света с учетом оптимизации уровней естественного освещения при замене или дополнении искусственным освещением.

Научной новизной обладают следующие результаты исследования:

1. Дополненная номенклатура показателей качества светодиодных осветительных приборов, учитывающая нормированные температурные режимы, параметры электромагнитной совместимости, и обновленные требования, содержащиеся в национальных международных стандартах и технических требованиях к осветительным приборам со светодиодным источником света.

2. Квалиметрическая модель оценки эффективности теплоотводов светодиодных осветительных приборов на основе моделирования их тепловых характеристик, включающая в себя математическую модель тепловых характеристик светодиодного осветительного прибора и развернутую номенклатуру показателей оценки технического уровня продукции.

3. Модель оценки рисков ускоренного старения основных элементов осветительного прибора со светодиодным источником света, отличающаяся тем, что обеспечила учет результатов аппроксимации расчетных кривых спада освещенности исследуемого осветительного прибора с светодиодным источников света и наличие бессвинцовых или смешанных паяных соединений.

4. Методика мониторинга качества сетей искусственного освещения с осветительными приборами со светодиодным источником света с точки зрения фитобиологической безопасности, отличающаяся тем, что позволяет контролировать объем негативного влияния длин вол синего света и содержит уточненные критерии фитобиологической безопасности. аналогично

5. Методика обеспечения качества проектирования и эксплуатации сетей искусственного освещения с осветительными приборами со светодиодным источником

света с учетом оптимизации уровней естественного освещения при замене или дополнении искусственным освещением, дополненная экспериментально полученными коэффициентами регрессионной линии спада освещенности, а также алгоритмами интеллектуального управления искусственным освещением, которые повысили эффективность использования сетей освещения.

Практическая значимость полученных научных результатов состоит в следующем:

1. Результаты использования основных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечили более точное выявление и, как следствие, сокращение несоответствий заявленных в паспортах изделия характеристик реальным в производстве светодиодных осветительных приборов и сокращение материальных, ресурсных и трудовых затрат в процессе эксплуатации изделий на 3-5%, что подтверждено актами внедрения.

2. Применение разработанной квалиметрической модели оценки эффективности теплоотводов светодиодных осветительных приборов на основе моделирования их тепловых характеристик позволило обосновать исключение из производства серийной продукции с недостаточным техническим уровнем теплоотвода, что привело к увеличению внешнего показателя качества и снижению уровня технических отказов на 5% в ООО «Резонит».

3. Применение разработанных моделей и рекомендаций по обеспечению качества продукции при производстве светодиодных осветительных приборов и автоматизированных систем освещения в ООО «Макро Солюшинс» позволило улучшить показатели отвода тепла и в светодиодных лампах до 4%.

4. Программные средства и алгоритмы управления и информационного взаимодействия элементов систем искусственного освещения, а также методики и методы комплексного контроля и анализа качества светодиодных осветительных приборов, использованы при проектировании системы управления светодиодным светильником с использованием алгоритмов автоподстройки на основе интеллектуального управления освещением, что позволило сократить уровень энергопотребления на 2%, а также обеспечить повышенную комфортность освещения. Разработанные модели и методики использованы при обосновании технического проекта по проектированию и монтажу сетей искусственного освещения и их автоматического управления в ООО «БМД-АЭТ».

5. Внедрение разработанных математических и квалиметрических моделей при прототипировании корпусов светодиодных осветительных приборов в АО «Силовые машины» позволило улучшить показатели отвода тепла до 5%.

6. Внедрение методик контроля и анализа качества светодиодных осветительных приборов, способствовали повышению уровня контроля качества на этапах эксплуатации продукции на 3% в МУ «ВРМЦ».

7. Разработан и зарегистрирован в Роспатенте патент на полезную модель «Устройство управления светодиодным светильником» №197321 от 21.01.2020 г.

8. Разработана и зарегистрирована в Роспатенте программа для ЭВМ, обеспечивающая математическое решение уравнений оптимального управления.

9. Разработана и зарегистрирована в Роспатенте программа для ЭВМ, обеспечивающая управление светодиодным светильником с элементом Пельтье.

Достоверность результатов диссертационной работы основана на корректном применении математического аппарата системного анализа, математической статистики и теории вероятности, комплексного оценивания и методов математического моделирования, а также результатами практического внедрения. Сопоставимость результатов теоретических исследований, результатов моделирования и экспериментальных данных достаточно высокая, что позволяет считать результаты диссертационной работы достаточно обоснованными и достоверными.

Личный вклад автора состоит в непосредственной разработке методов, методик обеспечения качества осветительных приборов с светодиодными источниками света, проведении исследований и натурных испытаний, статистической обработке полученных результатов и их анализе.

Внедрение результатов диссертационного исследования

Результаты основных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационном исследовании, использованы в методиках проведения испытаний светового оборудования ООО «Резонит», ООО «Макро Солюшнс», АО «Силовые машины», МУ «ВРМЦ», ООО «БМД-АЭТ», обеспечили сокращение времени разработки светодиодных осветительных приборов при выполнении требований к надежности и безопасности эксплуатации аддитивной установки, снижение материальных и трудовых затрат, в образовательном процессе ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», что подтверждено актами внедрения.

Получено свидетельство о государственной регистрации прав на объект авторского права «Устройство управления светодиодным светильником» рег. №197321 от 21.01.2020 г.

Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, обеспечивающей решение уравнений устройства управления объектом.

Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, обеспечивающей управление светодиодным светильником с элементом Пельтье.

Результаты диссертационного исследования отмечены серебряной, золотой и бронзовой медалью при участии в конференции международного общества автоматизации ISA в 2019-2021 г.

Апробация результатов работы. Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на различных конференциях, семинарах и круглых столах – XXII Международной научной конференции «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы», 2018-2020 г.

– XVIII Республиканской научно-технической студенческой конференции, посвященной 90-летию кафедры «Энергомеханические системы», 2019 г.

– ISA European student paper competition ISA District 12 (ESPC-2019-2021).

– II International Scientific Conference on Advanced Technologies in Aerospace, Mechanical and Automation Engineering - MIST: Aerospace – 2019 г.

– II Международной научно-практической конференция Международный форум «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» 2020 г.

– XX Международная научно-техническая конференция «Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых». Донецк, 2020 г.

– 15th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" (ER(ZR)-2020). Ufa, Russia, 2020 г.

– 24th International Conference «Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems» (WECNF 2020) 1-5 June 2020.

– III Международный форум «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» Санкт-Петербург 2021 г.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 13 международных научных конференциях.

По теме диссертации опубликовано 22 работы, из них: 6 – без соавторов, в том числе 6 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, 4 статьи в сборниках докладов, 9 статей в сборниках трудов конференций, в том числе 3 в научных изданиях Scopus и Web of Science, 3 свидетельства о государственной регистрации.

Структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка источников и приложений. Основной текст диссертации представлен на 182 страницах, включая 7 таблиц и 57 рисунков. Общий объем диссертационной работы с учетом приложений составляет 202 страницы.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель, основные задачи, объект и предмет исследования, отражена научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту, сведения об апробации и внедрении результатов работы.

В первом разделе «Технический обзор и анализ состояния проблемы обеспечения качества продукции в сфере светодиодных осветительных технологий» произведен анализ состояния и перспектив развития вопросов управления качеством искусственного освещения, влияния осветительных приборов со светодиодным источником света на процессы управления и контроля качества электрической энергии. Выявлена необходимость проведения исследований по ряду вопросов, связанных с формализацией процедур внедрения системы менеджмента проектирования сетей освещения, а также систематизации проведения измерений и мониторинга качества электрической энергии в сетях освещения с светодиодной осветительной нагрузкой. Произведенный анализ позволил выявить отрицательные моменты, оказывающие влияние за счет применяемых светодиодных драйверов, функционирующих по принципу импульсных источников питания, на качество электрической энергии, за счет генерации высокочастотных гармоник тока, импульсных и пусковых токов. Отмечены основные технические и экономические проблемы, с которыми могут столкнуться как потребители, так и поставщик электрической энергии. Выявлен факт того, что вопросы квалитетической оценки влияния светодиодной осветительной продукции на качество электрической энергии, как правило, остаются без внимания.

Для обеспечения решения выявленных проблем, сформулированы задачи, научных исследований в выбранном направлении:

1. Выявлена необходимость разработки новых критериев и дополнение существующей номенклатуры показателей качества светодиодных осветительных приборов.

2. Обоснована необходимость разработки квалитетических моделей, позволяющих проводить оценку эффективности теплоотводов светодиодных осветительных приборов на основе моделирования их тепловых характеристик.

3. Выявлена необходимость разработки моделей оценки рисков ускоренного старения основных элементов осветительного прибора со светодиодным источником света.

4. Установлена необходимость разработки рекомендаций для обеспечения мониторинга качества сетей искусственного освещения с осветительными приборами со светодиодным источником света, позволяющих контролировать объем негативного влияния длин волн синего света и содержащих уточненные критерии фитобиологической безопасности, а также обеспечивших оптимизацию уровней естественного освещения и возможностей применения алгоритмов интеллектуального управления искусственным освещением.

Во втором разделе «Экспериментальный менеджмент в области управления качеством электрической энергии в сетях с светодиодной осветительной нагрузкой» на основе полученных экспериментальных данных установлены основные параметры элементов ОПСИС, которые приводят к ухудшению качества электрической энергии и, соответственно, качества эксплуатации. Часть параметров использована для расширения существующих критериев оценки качества электрической энергии. Из полученных экспериментальных данных, выявлены явные изменения исследуемых параметров электрической сети (рис. 1 – рис. 2). По результатам проведения измерений в электрической сети исследуемого административного объекта обнаружено значительное преобладание высокочастотных гармоник тока сопоставимых по мощности с основной. У всех исследуемых ОПСИС обнаружено характерное постоянное преобладание в спектральном составе высших гармоник тока, выраженных от 5 до 30%, а также наличие импульсных и

пусковых токов до 0,5 кА и продолжительностью от 8 до 20 мкс. Значительная часть высокочастотных нечетных гармоник генерируется в результате присутствия нелинейных сопротивлений в электромеханической системе ОПСИС.

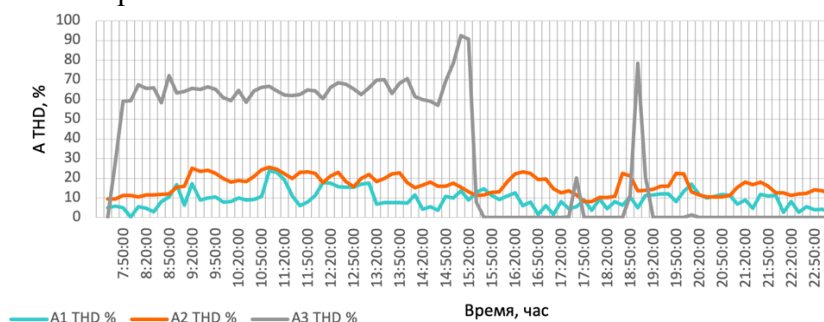


Рисунок 1 – График полного гармонического искажения в процентном соотношении, измеренного за период рабочего времени школы (15 часов), где A1 THD – процентное соотношение высокочастотной гармонической составляющей 5-го порядка для фазы А, A2 THD и A3 THD – для фазы В и С, соответственно

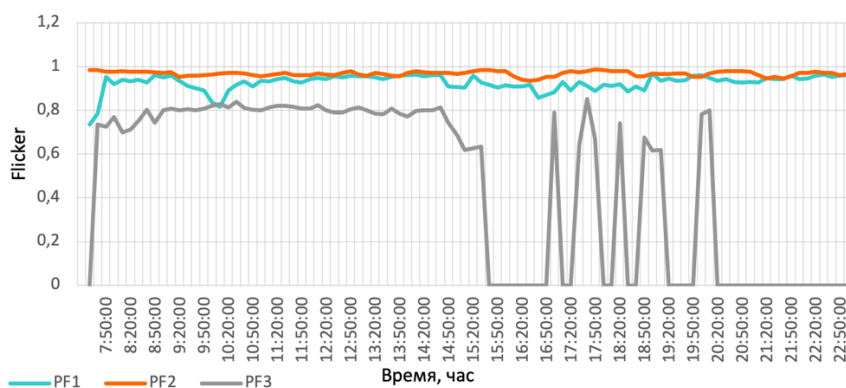


Рисунок 2 – Часовое распределение максимумов дрожания напряжения по фазам, выраженное через понятие «фликер», где PF1 – фаза А, PF2 и PF3 – фаза В и С соответственно

Установлено, что массовое применение ОПСИС является одной из причин снижения показателей, которые, согласно ГОСТ 32144-2013, оказывают прямое влияние на процессы управления качеством электрической энергии, что приводит к дополнительным затратам и перепотреблению реактивной мощности и подтверждается жалобами потребителей и обслуживающих организаций.

В результате испытаний бытовой светодиодной лампы малой мощности на надежность получены экспериментальные кривые нагрева и остывания светодиодной лампы и график постепенной деградации освещенности. Анализ характерных отказов в бытовых светодиодных лампах показал, что при нагреве до 98 °С, происходило небольшое снижение освещенности на 4-6 %, а при нагреве до 105 °С освещенность уменьшалась на 17 %. Что подтверждает нелинейность изменения интенсивности излучения светодиодного источника света.

При испытаниях выявлена зависимость изменения освещенности от прохождения циклов включения/выключения светодиодной лампы. Помимо деградации освещенности с увеличением прохождения циклов включения/выключения бытовой светодиодной лампы, возрастал и коэффициент пульсаций, возросший к концу испытаний с 13,2 % до 17,8%.

Третий раздел «Анализ и повышение результативности контроля качества светодиодных осветительных приборов на основе экспериментальных исследований и математического моделирования» посвящен разработке математических моделей направленных на моделирование параметров и условий, способствующих повышению качества изделий на этапе проектирования в жизненном цикле ОПСИС, в частности, в

области теплового менеджмента и снижения производственных рисков за счет прогнозирования отказов. Разработана и обоснована математическая модель, описывающая процесс выделения тепла светодиодом, при протекании через него электрического тока на различных тепловых уровнях в среде «подложка светодиода – кристалл, покрытый люминофором – корпус лампочки – воздух в плафоне». В математической модели тепломассопереноса для светодиодной лампы (рис.3) получены основные выражения тепломассопереноса.

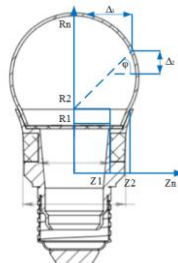


Рисунок 3 – Чертеж модели исследуемой светодиодной лампы

Уровень $0 < R < R_2$, $0 < Z < Z_1$ (подложка светодиода и ее границы):

$$\rho_1 C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right).$$

Уровень $0 < R < R_1$, $Z_1 < Z < Z_2$ (кристалл светодиода с люминофором и его границы):

$$\rho_2 C_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right) + \frac{Q}{V_{кр} t}.$$

Уровень $0 < \varphi < \varphi_m$, $0 < Z < Z_m$ (корпусе лампы, сферическая часть):

$$\rho_3 C_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial \varphi_1^2} \right).$$

Уровень $0 < R < R_4$; $Z_4 < Z < Z_5$ (воздух внутри плафона)

$$\rho_5 C_5 \left(\frac{\partial T_5}{\partial t} + u \frac{\partial T_5}{\partial r} + v \frac{\partial T_5}{\partial z} \right) = \lambda_5 \left(\frac{\partial^2 T_5}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_5}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_5}{\partial z^2} \right),$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{u}{r} = -\frac{1}{\rho_5} \frac{\partial P_5}{\partial r} + \nu_5 \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \beta g (T_5 - T_0),$$

$$\frac{\partial(ru)}{\partial r} + \frac{\partial(zv)}{\partial z} = 0.$$

u, v – составляющие скорости конвекции воздушных потоков проекции на ось r и z в цилиндрической системе координат, м/с;

r, z – координаты цилиндрической системы координат;

r, φ – координаты сферической системы координат;

t – время, с;

ρ – плотность, кг/м³;

P – давление, Н/м²;

ν – кинематическая вязкость, м/с²;

β – коэффициент термического расширения, К⁻¹;

g – ускорение свободного падения м/с²;

T – температура, К;

C – удельная теплоемкость, Дж/(кгК);

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(мК);

$V_{кр}$ – объем светодиода.

Q – количество тепла, которое выделяется при протекании электрического тока через кристалл светодиода.

В результате математического моделирования получена температурная зависимость в граничных условиях подложки светодиода smd 2835 0,2W (рис. 4).

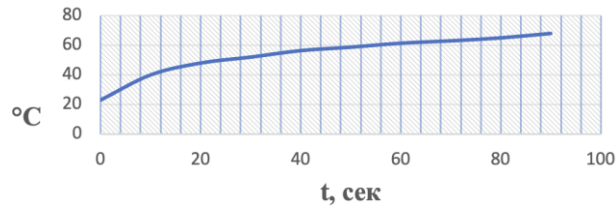


Рисунок 4 – Температурная зависимость в граничных условиях подложки светодиода

Расхождение рассчитанных значений по математической модели с результатами экспериментов составило $\sim 7\%$. Полученные математические модели за счет предварительного апробирования в выборе материалов и форм теплоотвода ~~невозмож~~ позволили увеличить динамику роста качества, а следовательно, и конкурентоспособность ОПСИС.

Полученные данные использованы для построения квалиметрических моделей оценки технического уровня изделия, в частности для оценки оптимальных теплофизических характеристик:

$$I_i = \sum_{j=1}^n \sum_{j=1}^m (\Pi_{ij} Z_j),$$

где I_i – оценка показателя технического уровня эффективности теплоотвода

Π_{ij} – формализованный показатель, входящий в критерий I_i ,

m – показатели более низкого уровня,

n – количество показателей первого уровня Z_i веса

$$Z_i = \frac{R_i}{R},$$

где R_i величина разброса по каждому показателю Π_i :

$$R_i = \frac{1}{k \Pi_j} \sum_{j=1}^k |\Pi_{ij} - \Pi_i|,$$

R – сумма величин разброса,

$k_1 \div k_5$ – количество основных показателей, входящих в обобщенный критерий I_i .

Расчет технического уровня продукции в соответствии с разработанным реестром характеристик для группы критериев I_4 происходит следующим образом:

$$I_4 = \sum_{j=1}^k q_1(I_{4j} v_j) + \sum_{j=1}^k q_2(I_{4j} v_j) + \sum_{j=1}^k q_3(I_{4j} v_j) + \sum_{j=1}^k q_4(I_{4j} v_j) + \sum_{j=1}^k q_5(I_{4j} v_j),$$

где $k_1 \div k_5$ – количество основных критериев, входящих в обобщенные критерии I_4 .

$$I_4 = \sum_{j=1}^k (\Pi_{4j} Z_j) + \sum_{j=1}^k (\Pi_{4j} Z_j) + \sum_{j=1}^k (\Pi_{4j} Z_j) + \sum_{j=1}^k (\Pi_{4j} Z_j) + \sum_{j=1}^k (\Pi_{4j} Z_j),$$

Разброс оценок по критерию определялся следующим образом:

$$R_i = \frac{1}{k \Pi_j} \sum_{j=1}^k |\Pi_{ij} - \Pi_i|.$$

При средней оценке по показателю для обобщенного критерия:

$$I_4 = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \Pi_{ij}.$$

Результаты анализа по выбранному критерию для нескольких бытовых светодиодных ламп малой мощности представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Оценка технического уровня по критерию эффективность теплоотвода для выбранных бытовых светодиодных ламп

Обозн. критерия	Общий критерий	Формализованный показатель			Вес показателя, P_{ij}		
		СД1	СД2	СД3	СД1	СД2	СД3
I ₄	Эффективность теплоотвода	Смоделированная температура подложки светодиодов спустя 90 секунд нагрева			0,93	1	0,98
		68,8	73,9	72,3			
		Смоделированная температура матрицы светодиодов спустя 90 секунд нагрева			0,91	1	0,97
		66,3	73,1	71,0			
		Смоделированная температура светодиодного драйвера спустя 90 секунд нагрева			0,92	0,99	1
		53,5	58,2	58,8			
		Смоделированная температура корпуса спустя 90 секунд нагрева			0,96	1	0,95
		40,3	42,1	40,1			
Наличие радиатора			0,67	0,67	0,67		
нет	нет	нет					
Среднее значение				0,878	0,93	0,914	
Сумма величины разброса, R				0,36	0,34	0,37	
Итоговый ранг за критерий				0,947	0,998	0,958	

Исходя из полученных данных и проведенного анализа сформирована шкала оценки технического уровня по рассматриваемому критерию (таблица 2). Так как основным критерием для оценки эффективности светодиодной лампы в данном случае является наименьшая температура нагрева при наибольшей эффективности свечения, то границы оценки технического уровня критерия I₄ сформированы таким образом, что наименьшая оценка отвечает наивысшему техническому уровню.

Таблица 2 – Шкала оценки технического уровня по критерию эффективность теплоотвода для выбранных бытовых светодиодных ламп

Оценка	Технический уровень критерия I ₄
$0,90 \leq I_4 \leq 0,94$	Очень высокий
$0,94 < I_4 \leq 0,96$	Высокий
$0,96 < I_4 \leq 0,98$	Средний
$0,98 < I_4 \leq 0,99$	Низкий

Предложена и обоснована методика оценки рисков ускоренного старения.

Полученной математической модели износа основных элементов светодиодного светильника на основе цепи Маркова соответствует следующая система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dP_{11}(t)}{dt} = -\sum_{j=1}^m \alpha_{i(t)} \cdot \lambda_{21j} \cdot \prod_{i=1}^{n_j} K_{эниj} \cdot (1 - [1 - p_{11}(t)]^m) \\ \frac{dP_{12}(t)}{dt} = -\sum_{j=1}^m \alpha_{i(t)} \cdot \lambda_{22j} \cdot \prod_{i=1}^{n_j} K_{эниj} \cdot (1 - [1 - p_{12}(t)]^m) \\ \frac{dP_{21}(t)}{dt} = \sum_{j=1}^m \alpha_{i(t)} \cdot \lambda_{21j} \cdot \prod_{i=1}^{n_j} K_{эниj} \cdot (1 - [1 - p_{11}(t)]^m) , \\ \frac{dP_{22}(t)}{dt} = \sum_{j=1}^m \alpha_{i(t)} \cdot \lambda_{21j} \cdot \prod_{i=1}^{n_j} K_{эниj} \cdot (1 - [1 - p_{12}(t)]^m) \\ P_{11}(t) + P_{21}(t) = 1 \\ P_{12}(t) + P_{22}(t) = 1 \end{cases}$$

где λ_{ij} – базовая интенсивность j-го потока отказов;

m – количество независимых потоков отказов;

$K_{эниj}$ – коэффициент, электрической нагрузки i-го компонента;

n_j – количество компонентов.

$\alpha_{i(t)}$ – коэффициенты, учитывающие влияние механических, климатических и прочих свойств объекта;

p_{11} и p_{12} – работоспособное состояние каждого из узлов упрощенной системы

p_{21} p_{22} – вероятность их отказа.

Графики, полученные при решении данной системы уравнений показаны на рисунке 5.

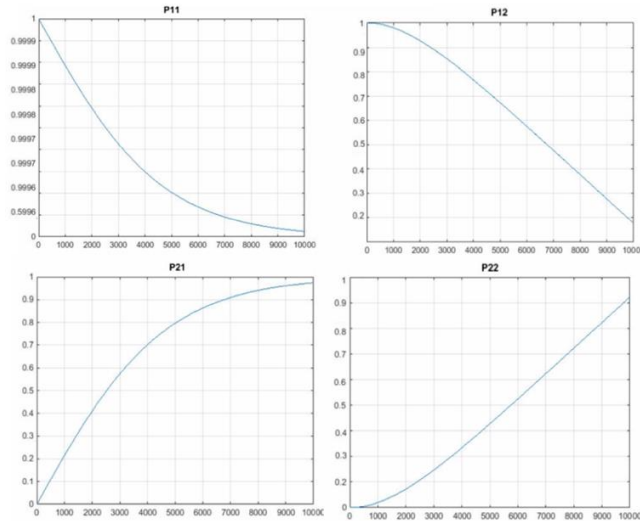


Рисунок 5 – полученные вероятности безотказной работы исследуемой системы

На основе данной математической модели предложена модель оценки рисков выхода из строя ОПСИС во время нормального эксплуатационного периода:

$$R_g = p_{ij} \cdot R_{pi} + p_{ij} \cdot G_i + p_{ij} \cdot TCR_i,$$

$$\begin{bmatrix} R_{p11} = p_{11} \cdot O_{p11} \cdot O_{t11} \\ R_{p12} = p_{12} \cdot O_{p12} \cdot O_{t12} \\ R_{p21} = p_{21} \cdot O_{p21} \cdot O_{t21} \\ R_{p22} = p_{22} \cdot O_{p22} \cdot O_{t22} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^4 R_{pi}$$

где R_{p1} – уровень показателя риска, O_p оценка вероятности работоспособного состояния элемента или узла, O_t оценка показателей тяжести последствий в результате происхождения риска, R_g – общая оценка риска, TCR_i – значение количества обращений на рынке, G_i – значение величины гарантийных затрат.

В четвертом разделе «Разработка методик повышения качества сетей искусственного освещения с светодиодным осветительным оборудованием» была обоснована актуальность и проведена разработка методик и инструментов управления и мониторинга качества сетей освещения с светодиодными осветительными приборами.

Предложена методика контроля светового потока ОПСИС в зависимости от температуры корпуса, структурная схема которой показана на рисунке 6.

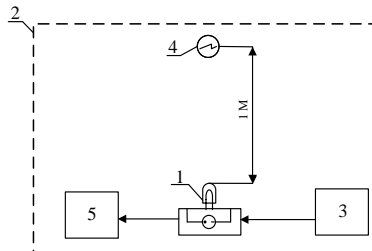


Рисунок 6 – Структурная схема измерения светового потока ОПСИС, где 1 – осветительный прибор, 2 – темный бокс или черный ящик, 3 – источник питания, 4 – люксметр, 5 – термопара.

Получено аналитическое выражение предварительной оценки ОПСИС с учетом генерации гармонической составляющей:

$$G_{эфТНД} = \eta / (K_{УТНД} + K_{ИТНД}),$$

где $K_{УТНД}$ и $K_{ИТНД}$ – суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения и тока соответственно.

Проведена аппроксимация экспериментальных данных по спаду освещенности от исследуемой светодиодной лампы. Рассматриваемые отрезки аппроксимации ограничены следующим образом: «а» – первый отрезок аппроксимации с диапазоном значений от 0 до

1200 циклов, «b» – второй отрезок аппроксимации с диапазоном значений от 1200 до 2500 циклов, «с» – третий отрезок аппроксимации с диапазоном значений от 2500 до 4000 циклов.

Полученное уравнение линейной регрессии для отрезка «a» имеет вид:

$$\hat{y}_a = -0,0842x + 1044,51.$$

для отрезка «b» и «с»:

$$\hat{y}_b = -0,2592x + 1261,6; \hat{y}_c = -0,1164x + 864,3.$$

При средней ошибке аппроксимации 5,3%.

На основе сформулированных требований к управлению качеством ОПСИС и системами освещения в целом, был предложен алгоритм функционирования современной системы освещения. График одного из предлагаемых сценариев динамического освещения, ориентированного на человека, изображен на рисунке 7.

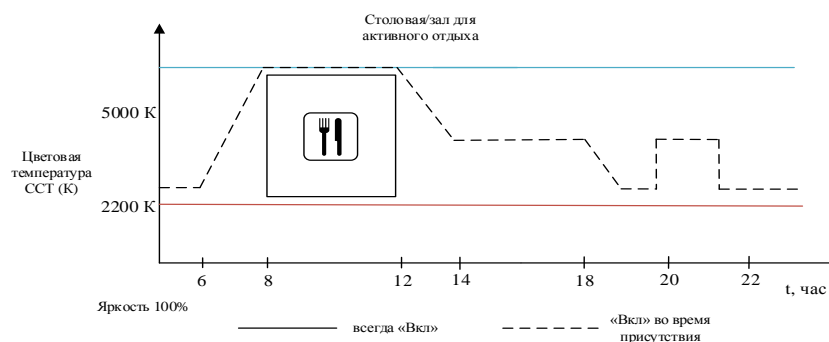


Рисунок 7 – Предлагаемый сценарий функционирования интеллектуального освещения в зоне «Активный отдых, столовая»

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе изложены и научно обоснованы новые технические и технологические решения, имеющие существенное значение для развития страны в соответствии с решениями Правительства Российской Федерации в области наукоемкого производства радиоэлектронной промышленности Постановления Правительства Российской Федерации от 17.02.2016 №110, №109 и Федеральным законом от 29.07.2018 N 255-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

В ходе проведенных исследований получены новые научные результаты:

- Квалиметрическая модель оценки эффективности теплоотводов светодиодных осветительных приборов на основе моделирования их тепловых характеристик, включающая в себя математическую модель тепловых характеристик светодиодного осветительного прибора и развернутую номенклатуру показателей оценки технического уровня продукции.

- Модель оценки рисков ускоренного старения основных элементов осветительного прибора со светодиодным источником света, отличающаяся тем, что позволяет учитывать результаты аппроксимации расчетных кривых спада освещенности исследуемого осветительного прибора с светодиодным источников света и наличие бессвинцовых или смешанных паяных соединений.

- Методика мониторинга качества сетей искусственного освещения с осветительными приборами со светодиодным источником света с точки зрения фитобиологической безопасности, отличающаяся тем, что позволяет контролировать объем негативного влияния длин волн синего света и содержит уточненные критерии фитобиологической безопасности.

- Методика обеспечения качества эксплуатации осветительных приборов со светодиодным источником света с учетом оптимизации уровней естественного освещения при замене или дополнении искусственным освещением, отличающаяся тем, что

дополнительно содержит экспериментально полученные коэффициенты регрессионной линии спада освещенности, а также рекомендации по построению алгоритмов интеллектуального управления искусственным освещением.

Применение разработанных моделей и методик контроля и обеспечения качества продукции при проектировании и эксплуатации светодиодных осветительных приборов позволило добиться сокращения затрат на электрическую энергию на 2%, снизить долю рассеиваемого света до 20%, снизить температуру нагрева на 4-5 °С, повысить результативность процессов проектирования на 4-5%, что подтверждено соответствующими актами внедрения.

IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах:

1. Кузьменко, В.П. Разработка методик повышения качества сетей искусственного освещения с светодиодным осветительным оборудованием / В.П. Кузьменко // Наука и бизнес: Пути развития. – 2021. – №7(121). – С. 56-60.
2. Кузьменко, В.П. Исследование влияния светодиодных прожекторов на процессы управления качеством электрической энергии и энергоэффективностью / В.П. Кузьменко, С.В. Солёный // Омский научный вестник. – 2021. – № 2(176). – С. 15-19.
3. Кузьменко, В.П. Анализ проблем повышения качества проектирования сетей искусственного освещения с светодиодным осветительным оборудованием / В.П. Кузьменко // Наука и бизнес: Пути развития. – 2021. – №2(116). – С. 67-70.
4. Кузьменко, В.П. Исследование воздействия жизненного цикла светодиодной продукции на окружающую среду / В.П. Кузьменко // Наука и бизнес: Пути развития. – 2020. – №12(114). – С. 91-94.
5. Кузьменко, В. П. Исследовательские испытания светодиодных источников света / В.П. Кузьменко, С.В. Солёный, В.Ф. Шишлаков, Е.С. Квас, О.Я. Солёная // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2019. – Т.62. – № 7. – С. 632-640.
6. Кузьменко, В.П. Измерение качества электроэнергии в системе электроснабжения со светодиодными осветительными устройствами / В.П. Кузьменко, С.В. Солёный, В.Ф. Шишлаков, О.Я. Солёная // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2019. – Т. 74. – №1. – С. 197-212.

Статьи в рецензируемых журналах, входящих в системы цитирования Scopus

7. Kuzmenko, V.P. Robot for Inspection and Maintenance of Overhead Power Lines. / V.P. Kuzmenko, S. Solyonyj, O. Solenaya, A. Rysin, E. Kvas // In: Ronzhin A., Shishlakov V. (eds). Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings». Smart Innovation, Systems and Technologies. – Singapore: Springer, 2021. – Vol. 187. – P. 487 - 497.
8. Kuzmenko, V.P. Definition and approximation of the light flux degradation of a LED lamp / V.P. Kuzmenko, S.V. Solyonyj, A.V. Rabin, O.Ya. Solenaya, A.V. Rysin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – 734 (1). – статья № 012197.
9. Kuzmenko, V. P. Modeling of the operation modes of the electric power system to improve its sustainability of functioning. / V.P. Kuzmenko, V.F. Shishlakov, O.Ya. Solenaya, S.V. Solyonyj, A.V. Rysin, E.S. Kvas // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – 1515 (5). – статья № 052083.

Список остальных работ, опубликованных по теме диссертации

10. Kuzmenko V.P. Mathematical modeling of thermal processes occurring during the operation of a LED light source / V.P. Kuzmenko // Известия кафедры UNESCO «Дистанционное инженерное образование»: сборник статей. – СПб.: ГУАП, 2021. – Выпуск 6. – С. 83-86.
11. Кузьменко В.П. Внедрение искусственного интеллекта в области проектирования, установки, ввода в эксплуатацию и настройки светодиодного осветительного оборудования / В.П. Кузьменко, С.В. Солёный, А.У. Давудян, А.П. Бобрышов // Технологические машины

и оборудование: сборник докладов XIX Республиканской научно-технической конференции, 24-26 ноября, 2020 г. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – С. 35-46.

12. Kuzmenko, V.P. Measurement of the quality of electricity in the power supply system with LED lighting devices / V.P. Kuzmenko, O.Y. Solenaja, A.V. Rysin, S.V. Solyonyj, E. Kvas // 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2020, Saint-Petersburg, 1 - 5 June 2020. – St. Petersburg: IEEE, 2020. – статья № 9131506.

13. Кузьменко, В.П. Современный подход к использованию микросетей постоянного тока в интеллектуальных зданиях / В.П. Кузьменко, С.В. Солёный, О.Я. Солёная, А.В. Рысин // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: тезисы докладов международного форума, Санкт-Петербург, 04 марта 2020. – СПб.: ГУАП, 2020. – С. 137-138.

14. Кузьменко, В.П. Исследование теплоотводов и радиаторов отвода тепла маломощных светодиодных светильников. / В.П. Кузьменко, С.В. Солёный, О.Я. Солёная // «Завалишинские чтения 2020»: сборник трудов 15-й международной конференции по электромеханике и робототехнике, Санкт-Петербург, 15-18 апреля 2020 г. – С.-Петербург: ГУАП, 2020. – С. 365-370.

15. Kuzmenko, V.P. The usage of dc-microgrid in intelligent buildings / V.P. Kuzmenko // Известия кафедры UNESCO «Дистанционное инженерное образование»: сборник статей. – СПб.: ГУАП, 2021. – Выпуск 5. – С. 89-93.

16. Кузьменко, В.П. Проблемы пульсаций современных OLED дисплеев и как это вредит органам зрения / В.П. Кузьменко, Е.С. Квас, А.П. Бобрышов // Технологические машины и оборудование: материалы XVIII Республиканской научно-технической студенческой конференции «Энергомеханические системы», 26-28 ноября 2019. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – С. 38-44.

17. Kuzmenko, V.P. Sustention of the light flow for led light sources / V.P. Kuzmenko // Известия кафедры UNESCO «Дистанционное инженерное образование»: сборник статей. – СПб.: ГУАП, 2019. – Выпуск 4. – С. 63-65.

18. Кузьменко, В.П. Проблемы интеграции систем освещения и компонентов IoT. / В.П. Кузьменко, С.В. Солёный, В.Ф. Шишлаков, Е.С. Квас, О.Я. Солёная // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: тезисы докладов международного форума, Санкт-Петербург, 04 марта 2019. – СПб.: ГУАП, 2019. – С. 224-227.

19. Кузьменко, В.П. Анализ влияния светодиодного освещения на показатели качества электрической сети. / В.П. Кузьменко, С.В. Солёный, В.Ф. Шишлаков, Е.С. Квас, О.Я. Солёная // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. Теоретический и научно-практический журнал. ИАЭП. – 2019. – Вып. 2(99) – С. 25-32.

Свидетельства о государственной регистрации

20. Кузьменко, В.П. Программа для управления светодиодным светильником с элементом Пельтье: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ / В.П. Кузьменко, С.В. Солёный, А.В. Рысин, М.Э. Создателяева // рег. № 2021615117 от 02.04.2021 г.

21. Кузьменко, В.П. Программа для решения уравнений оптимального управления объектом: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ / В.П. Кузьменко, С.В. Солёный, Ю.Г. Ефимов // рег. № 2021611831 от 08.02.2021 г.

22. Кузьменко, В.П. Устройство управления светодиодным светильником: свидетельство о гос. регистрации патента на полезную модель / В.П. Кузьменко, С.В. Солёный, О.Я. Солёная, А.В. Рысин, Е.С. Квас, В.Ф. Шишлаков // рег. №197321 от 21.04.2020 г.