

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ»

На правах рукописи



Кузьменко Владимир Павлович

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

05.02.23 – Стандартизация и управление качеством продукции

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Солёный Сергей Валентинович

Санкт-Петербург – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ТЕХНИЧЕСКИЙ ОБЗОР И АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ В СФЕРЕ СВЕТОДИОДНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	18
1. Анализ развития светодиодных осветительных технологий	18
1.2 Анализ существующей нормативной базы в области осветительных технологий	19
1.3 Анализ электроэнергетических характеристик электрических сетей со светодиодными осветительными приборами	26
1.3.1 Анализ влияния светодиодных осветительных приборов на изменение показателей качества электрической энергии и ЭМС.....	29
1.3.2 Анализ существующих способов поддержания заданного качества электрической сети с светодиодной осветительной нагрузкой	31
1.4 Сравнительный анализ солнечного и светодиодного освещения и его фитобиологического влияния	34
1.4.1 Анализ факторов, вызывающих негативное фитобиологическое влияние, белого светодиодного освещения в ночное время.....	38
1.5 Анализ состояния проблемы технического контроля изделий в области светодиодных осветительных технологий.....	43
Результаты и выводы по главе 1.....	46
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ В ОБЛАСТИ СВЕТОДИОДНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ.....	48
2.1 Исследование показателей качества электроэнергии административного здания, использующего светодиодные системы освещения.....	48
2.2 Процедура внедрения системы менеджмента измерений на основе испытаний бытовой светодиодной лампы малой мощности на надежность..	59
2.2.1 Характерные типы отказов.....	60

2.2.2 Сопоставление циклов включения светодиодной лампы с изменением освещенности	64
2.3 Внедрение методики оценки соответствия основных электротехнических и световых характеристик бытовых светодиодных ламп.....	72
2.4 Выявление негативных факторов, светодиодных источников света, влияющих на здоровье человека	75
2.5 Анализ существующих схемных/технических решений светодиодных источников света.....	77
2.6 Формализация критериев оценки технического уровня ОПСИС на основе произведенных экспериментов и исследований.	86
Результаты и выводы по главе 2.....	89
3 АНАЛИЗ И ПОВЫШЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВЕТОДИОДНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	92
3.1 Квалиметрическая модель оценки эффективности теплоотводов светодиодных осветительных приборов на основе моделирования их тепловых характеристик	92
3.2 Компьютерное моделирование полученной тепловой модели осветительного прибора	102
3.3 Разработка предложений и технических решений по оптимизации параметров теплообмена светодиодного светильника.....	106
3.4 Расчет показателей надежности основных элементов светодиодного осветительного прибора	121
3.4.1 Анализ статистических методов оценки показателей надежности невосстанавливаемых электронных узлов.....	123
3.4.2 Моделирование и расчет характеристик надежности невосстанавливаемых электронных узлов светодиодного светильника	125

3.4.3 Математическая модель износа основных элементов светодиодного светильника на основе цепи Маркова.....	127
Результаты и выводы по главе 3.....	132
4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СЕТЕЙ ИСКУССТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ С СВЕТОДИОДНЫМ ОСВЕТИТЕЛЬНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ.....	134
4.1. Разработка методики измерений световой отдачи светодиода при питании импульсным током с различными длительностями и температурой окружающей среды	134
4.2 Разработка методики контроля светового потока ОПСИС в зависимости от температуры корпуса.....	136
4.3 Разработка аналитического выражения для предварительной оценки ОПСИС с учетом генерации гармонической составляющей	137
4.4 Усовершенствование методики определения уровня спада светового потока светодиодных осветительных приборов и его результаты	139
4.5 Разработка методики контроля качества светодиодного осветительного прибора с учетом возможного причинения вреда для живых организмов	145
4.5.1 Расширение базы классификаторов светодиодных источников света.....	146
4.5.2 Формирование основных требований, предъявляемых к современному освещению с точки зрения поддержания нормального светового состояния окружающей среды.....	148
4.5.3 Разработка рекомендаций к оптимизации современных систем освещения с точки зрения безопасности здоровья человека.....	154
4.5.4 Разработка алгоритмов интеллектуальной системы освещения и методики контроля и оценки светодиодных осветительных приборов с точки зрения психофизиологических эффектов продолжительного воздействия на человека.....	157
Результаты и выводы по главе 4.....	164

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	166
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	168
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	169
Приложение А	183
Приложение Б.....	185
Приложение В	188
Приложение Г	190
Приложение Д	192

ВВЕДЕНИЕ

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 [1].

Улучшение 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.

С введением в России Федерального закона от 29.07.2018 N 255-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [2], стимулирующего потребителей к переходу на энергосберегающие технологии в действующих электроустановках, все больше происходит внедрения энергоэффективных осветительных приборов с светодиодными источниками света, такие как светодиодные светильники, аналоги ламп накаливания, светодиодные прожекторы и устройства подсветки. Однако используемые в данных устройствах импульсные источники питания являются генераторами нелинейных нагрузок, массовое применение которых может являться причиной заметного снижения качества электроэнергии в сетях административного и бытового назначения [3].

Применение энергоэффективных осветительных технологий также важная задача для объектов транспорта, пилотируемых космических аппаратов и других гермообъектов.

Необходимость проведения экспериментальных исследований, позволяющих изучить возможные проблемы и доказать отсутствие негативного влияния, с которым возможно столкнуться при длительном массовом использовании энергоэффективных осветительных приборов с светодиодными источниками света на борту гермообъектов, также говорит об актуальности и важности проработки темы обеспечения качества и безопасности как самих осветительных приборов, так и электрической сети с нагрузкой в виде данных устройств. Внедрение алгоритмов интеллектуального освещения в рамках концепции «Индустрия 4.0» также должно послужить триггером к развитию в данной области.

Стремительное развитие светодиодного освещения, которое согласно постановлению правительства РФ № 602 и № 898 относится к энергоэффективному, позволяет значительно уменьшить энергопотребление, однако сопровождается использованием различных светодиодных источников света, а также различными особенностями элементов защиты, источников питания, теплоотводов, светоотражающих и светорассеивающих элементов. 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.

Вопросы организации производства получили развитие в работах Г.И. Коршунова, Е.Г. Семеновой, В.М. Балашова, А.В. Кивелева, А.В. Сидорина, З.М. Селивановой, Б.В. Гнеденко, В.К. Беляева, А.Д. Соколова, Ю.Б. Зубарева, М.Г. Миронова, Е.Ф. Розмировича, М.В. Радлевского.

Способы проектирования систем цифрового управления и автоматизации производственных систем представлены в работах С.В. Богословского, В.А. Коневцова, С.Ф. Чермошенцева, Е.И. Яблочникова, Н.А. Демкович, В.А. Фетисова, В.П. Орлова, Б.С. Падуна, С.М. Вертешева, В.В.

Вороновой, Д.Д. Куликова, В.Ф. Шишлакова, И.С. Павловского, И.С. Ярлычева, С.В. Григорьевой.

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). Несмотря на наличие множества отечественных и зарубежных научных трудов и стандартов в области управления качеством, исходя из проведенного анализа сделан вывод о том, что точные модели и процедуры контроля и обеспечения качества осветительных приборов с светодиодными источниками света отсутствуют.

Проблема обеспечения качества и электромагнитной безопасности осветительной продукции также рассматривалась в повестке исследований, проводимых Центром электромагнитной безопасности [5], исследования Центра показывают, что «массовый переход на энергосберегающие источники света взамен ламп накаливания и люминесцентных, кроме значительного снижения потребления мощности на освещение, дополнительно усиливает загрязнение питающих сетей из-за применения импульсных источников питания в пускорегулирующих устройствах» [3, 5, 6].

В проводимых исследованиях также отмечена высокая вероятность в будущем «столкнуться с проблемой «загрязнения» распределительных сетей высшими по отношению к промышленной частоте гармониками тока и напряжения при условиях, когда мощность нелинейной нагрузки не превышает 10-15% мощности системы электроснабжения». [5]

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

Цель диссертационного 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 фитобиологической безопасности.

5. Разработка методики обеспечения качества эксплуатации осветительных приборов со светодиодным источником света.

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

Предмет исследования – 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.

Область исследования: 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 источниками 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 квалитметрических 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 «ЭЛЭМГРУПП», ООО «AVT&Co», ООО «РЕЗОНИТ», АО «Силовые машины», ООО «Макро Групп», 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 ФГАО 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 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:

- 67-й, 68-й, 69-й международной студенческой научно-технической конференции ГУАП, 2015-2017г.
- XXII Международная научная конференции «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы» 2018 г.
- Международная научно-практической конференции/ Уфимск. гос. авиац.технич. ун-т – Уфа: РИК УГАТУ, 2018 г.
- XVIII Республиканской научно-технической студенческой конференции, посвященной 90-летию кафедры «Энергомеханические системы», 2019 г.
- XXIII международная научная конференции «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы» 2019 г.
- XV ISA European student paper competition ISA District 12 (The International Society of Automation) and SUAI (SaintPetersburg State University of Aerospace Instrumentation) (ESPC-2019).
- II International Scientific Conference on Advanced Technologies in Aerospace, Mechanical and Automation Engineering - MIST: Aerospace – 2019.
- II Международная научно-практическая конференция Международный форум «Метрологическое обеспечение» «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» 2020.
- XX международная научно-техническая конференция «Автоматизация технологических объектов и процессов», 2020 г.
- XX научно-технической конференции аспирантов и студентов в г. Донецке 26-28 мая 2020 г. – Донецк, ДонНТУ, 2020 г.

- XVI ISA European student paper competition ISA District 12 (The International Society of Automation) and SUAI (SaintPetersburg State University of Aerospace Instrumentation) (ESPC-2020).
- 15th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" (ER(ZR)-2020).
- 14th International Scientific and Technical Conference "Vibration-2020. Vibration technologies, mechatronics and controlled machines" 2020.
- 5th International Scientific and Technical Conference "Electric drive, electrical technology and electrical equipment of industrial enterprises" 2020.
- 24th International Conference «Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems» (WECONF 2020).
- III Международный форум «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» Санкт-Петербург 2021г.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 15 международных научных конференциях.

По теме диссертации опубликовано 23 работы, из них: 6 – без соавторов, в том числе 6 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, 4 статьи в сборниках докладов, 10 статей в сборниках трудов конференций, в том числе 4 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 191 страницу.

1 ТЕХНИЧЕСКИЙ ОБЗОР И АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ В СФЕРЕ СВЕТОДИОДНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

1. Анализ развития светодиодных осветительных технологий

В настоящее время все больше и больше внимания уделяется применению экономных и надежных искусственных источников света, выполненных на основе светодиодов. Данные осветительные средства уже давно эксплуатируются в повседневной жизни человека.

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 мира, 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 [3, 4].

По многочисленным отчетам, доля старого оборудования, включая не только светильники, но и опоры, кабели, в России составляет более 60%. Схемы электроснабжения не обеспечивают необходимый уровень надежности установок наружного освещения.

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, увеличение доли светильников с энергосберегающими технологиями до 29% к 2024 году.

Стоимость светодиода за последние несколько лет значительно снизилась и продолжает постепенно снижаться, дополнительно ускоряет

вытеснение традиционных осветительных приборов на основе нитей накала и газоразрядных процессов.

В ночное время, в целях дополнительной экономии электроэнергии, допускается снижение освещенности улиц на 30-50 % (п. 7.44 СНиП 23-05-95). При наличии определенных источников питания (драйверов) ОПСИС дают возможность регулирования освещенности путем снижения напряжения питания или тока возбуждения светодиода, в то время как осветительных приборы с газоразрядными лампами при снижении напряжения выключаются [8].

Однако многие исследования также показывают, что ближайшая перспектива массового активного перехода на ОПСИС [9, 10, 11] с импульсными источниками питания, которые представляют собой нелинейную нагрузку, может повлечь за собой существенные экономические затраты если не учитывать особенности электромагнитной совместимости электрической сети с импульсными источниками питания (ИИП), используемыми в современных ОПСИС, их условия эксплуатации и показатели надежности [12].

1.2 Анализ существующей нормативной базы в области осветительных технологий

Так как определение достоверных и достаточно точных показателей надежности светодиодных систем освещения в настоящее время точно затруднительны, определение истинной экономической целесообразности массового перехода на данные технологии весьма затруднительно.

Для определения срока службы ОПСИС широко используются относительные показатели значений генерируемого светового потока за определенное количество часов эксплуатации. Зачастую при расчете показателей экономической эффективности используются заявленные

производителем параметры, которые могут существенно отличаться от полученных в ходе эксплуатации.

Очевидно, что завышенные или далекие от реальных условий показатели надежности могут сильно повлиять на экономическую выгоду конечного потребителя. В связи с этим, существует высокая необходимость в фиксации данных, полученных в результате эксплуатации, о надежности, времени наработки до отказа и пр., для последующего сравнения и анализа.

Также при реализации проектов по переводу действующих сетей освещения на более энергоэффективные светодиодные технологии в проектах, как правило, не предусматривается наличие элементов, значительно увеличивающих генерацию нелинейный гармоник тока, реактивной мощности в сети, импульсных токов в момент пуска [13]. Данные параметры также следуют фиксировать, так как их использование может в последствии значительно упростить анализ и подход к решению вопросов обеспечения качества электрической энергии в бытовых и административных сетях с существенной нагрузкой в виде сетей освещения.

Существующая на данный момент нормативная база, определяющая и регулирующая нормальные и предельно допустимые значения для основных характеристик ОПСИС таких, например, как деградация светового потока, искажение изначальной цветовой температуры основана только на опыте работы с осветительными приборами других типов, особенности которых в свою очередь далеко не всегда совпадают с ОПСИС. Также на данный момент не существует государственного стандарта, учитывающего и ограничивающего наличие генерации высших гармоник тока или коэффициента искажения синусоидальности по току ОПСИС. Поэтому нормирование данных величин попросту не производится [14, 15].

Действующие на территории Российской Федерации стандарты устанавливают для каждого измеряемого показателя качества электроэнергии три класса характеристик процесса измерения – «А», «S» и «B». Для каждого класса определены методы измерений и соответствующие требования к

характеристикам средства измерения: наиболее распространенным принят класс «S», данный класс исходя из нормативных документов «применяется при проведении обследований и оценке качества электрической энергии (КЭЭ) с использованием статистических методов, в том числе при ограниченной номенклатуре показателей» [15]. Хотя интервалы времени измерений показателей КЭЭ для классов «S» и «A» одинаковы, требования к характеристикам процесса измерения класса «S» снижены. «Класс «B» не рекомендован для вновь разрабатываемых устройств» [15].

Очевиден тот факт, что ОПСИС при высокой концентрации гармоник тока ухудшают качество электрической в сети и влияют на электромагнитную совместимость других потребителей этой электрической сети. Поэтому высока вероятность повышения значимости проблем и вопросов, связанных с управлением качеством электрической энергии в таких электроустановках.

Любые измерения показателя качества электрической энергии, проведенные двумя различными средствами измерений, должны при измерении одних и тех же сигналов обеспечивать получение воспроизводимых результатов с установленной для данного показателя неопределенностью.

Замеры провалов и скачков напряжения проводят на основе измерений в каждом канале среднеквадратических значений напряжения, обновляемых для каждого полупериода. Длительность периода должна определяться значением частоты измеряемого сигнала. В качестве значения частоты принимают последний немаркированный результат измерений частоты в системе энергоснабжения или результат, полученный иным методом, соответствующим требованиям к неопределенности измерений [16, 17].

Среднеквадратическое значение напряжения включает в себя гармоники, интергармоники, информационные сигналы в электрических сетях и т.д.

При обнаружении провалов напряжения считается, что:

- в однофазных системах электроснабжения провал напряжения начинается, когда значение падает ниже порогового значения провала напряжения, и заканчивается, когда значение равно или превышает пороговое значение провала напряжения плюс;

- в трехфазных системах электроснабжения провал напряжения начинается, когда значение в одном или более числе каналов падает ниже порогового значения провала напряжения, и заканчивается, когда значение равно или превышает пороговое значение провала напряжения плюс во всех каналах, в которых проводят измерения.

Значение остаточного напряжения часто является полезным для потребителей электрической энергии и может быть более предпочтительным, чем глубина провала, так как позволяет оценить близость напряжения к нулю. В то же время глубина провала напряжения часто является полезной для поставщиков электрической энергии, особенно применительно к высоковольтным системам электроснабжения или в случаях, когда используется скользящее опорное напряжение сравнения. Во время провала напряжения может возникать фазовый сдвиг, при этом фиксируется дата и время перехода порогового значения [18].

Помимо того, что существующие нормативные акты и методики по испытаниям ОПСИС не учитывают наличие генерируемых светодиодами драйверами гармоник тока, они также ограничены временем испытаний до 10000 часов, после чего предписано проводить экстраполяцию данных [19].

Процесс проведения экстраполяции данных дополнительно усложнен тем, что ряд определенных характеристик может отличаться в зависимости от модели изделия, к таким характеристикам относят изменение цветности свечения, конструктивные и технологические отличия, разницу рабочих температур и времени эксплуатации отдельных элементов устройства.

Подтверждение необходимости проведения исследований в области контроля качества ОПСИС дополнительно подтверждается и тем фактом, что

на данный момент критерий изменения цветности свечения ОПСИС не признан зависимым от срока службы изделия, другими словами, изменение цвета излучаемого света в процессе эксплуатации не считается отказом или нарушением номинального режима работы изделия.

Расстановка приоритетов при определении критериев срока службы ОПСИС в сторону световой отдачи возможно связана с тем, что стабильность цветовой температуры осветительного прибора в данном случае проблема больше эстетическая, в то время как стабильность светового потока может напрямую влиять на проблемы обеспечения безопасности жизни. Тем не менее, западные стандарты (L80 и TM 21-11) по испытаниям ОПСИС в качестве рекомендаций указывают на предпочтительные значения при изменении цветовой температуры ОПСИС.

Еще одним фактом, подчеркивающим проблему нехватки статистических данных анализа испытаний и наработки до отказа ОПСИС, является то, что производители могут не указывать минимальные уровни достоверности испытаний для требуемых параметров, в том случае, если не могут его обеспечить, ограничиваясь лишь необходимостью сообщить те параметры, которые неизменно действуют в течение определенного времени.

Необходимый набор средств, применяемых для определения срока службы ОПСИС также до сих пор не стандартизирован, а требования по выборке и соответствию изделий находятся в стадии разработок, также как и [19, 20].

Также согласно ГОСТ IEC 62612-2019 и его зарубежным аналогам «способы определения срока службы или методы его расчета, например, с использованием кратковременных измерений, все еще обсуждаются», а вместо подтверждения срока службы стандартом предлагаются «коды стабильности светового потока за заданное ограниченное время испытания» [19, 20].

Нормативными документами определено, что световая отдача любого источника света во время заявленного срока службы не должна снижаться

более чем на 20%. На данный момент конец срока службы определен как полный отказ устройства. Однако в случаях с ОПСИС возникает возможность продолжительной работы осветительного прибора, но с большим снижением светового потока.

В целом для светодиодных модулей срок службы предлагается рассматривать как время, за которое интенсивность свечения будет снижена на 70% от начального (номинального) значения [19,20].

Основным параметром, влияющим на срок службы ОПСИС принято считать деградацию светового потока, однако, получить полную информации о технических и надежность характеристик устройства, рассматривая отказы ОПСИС только в условиях снижения светового потока, независимо от причины (в т.ч. при катастрофических отказах).

Таким образом, при заявленном сроке службы 25 000 часов, 50% осветительных приборов спустя эти 25 000 часов будут генерировать только 50% или еще меньше относительно номинальных значений светоотдачи. Однако судить о деградации световых характеристик по данным фактам затруднительно, так как светоотдача оставшейся половины партии изделий может все еще находиться в допустимых от номинальных отклонений. Данный факт также говорит о том, что невозможно однозначно исключить и наличие промежуточных вариантов, которые даже не будут взаимоисключающими.

Для того чтобы внести некую определенность, в данном случае нормативные документы предлагают следующие показатели: снижение яркости V_{50} и V_{10} , а также стандартное время отказа электрической цепи F_{10} или F_{50} (выход из строя, соответственно, 10 или 50 % светильников). Оба показателя – V и F – следует измерять, используя полностью собранный светильник, чтобы учесть взаимодействие его компонентов.

Случаи V и F могут описывать следующие типы отказов светильников:

1. Все светодиоды включаются, но их уровень яркости понижен (определяется временем V_{xx}).

2. Имеется единичный катастрофический отказ светодиода, тогда как другие светодиоды сохранили функциональность, возможно, генерируя меньший световой поток (определяется временем B_{xx}).

3. У многих светодиодов произошли катастрофические отказы, однако другие светодиоды сохранили функциональность, возможно, генерируя меньший световой поток (определяется временем B_{xx}).

4. Ни один светодиод не включается из-за отказа самой системы (определяется временем F_{yy})» [19, 20].

Для световой отдачи описаны следующие рекомендованные значения при L_{70} и L_{50} :

1. « B_{xx} – срок службы, при котором у определенного процента светодиодов светоотдача падает ниже 70 % от номинального начального значения.

2. F_{yy} – время до электрического отказа, через которое, определенный процент массива светодиодов выходит из строя» [19, 20].

Стабильные показатели цветовой температуры и интенсивности света, а также деградации светового потока не могут быть определены одними характеристиками светодиода. Это связано применением различных решений по организации отвода тепла, электрических цепей, рабочую температуру, химическую сопоставимость материалов и пр.

Все описанные выше основные критерии отказа и методики испытаний светодиодных ламп собраны в нормативных документах, стандартах [19, 20] и обобщенно указывают следующие требования:

1. «Испытание на долговечность встроенного устройства управления. Поскольку лампа не может быть разобрана без неизбежного повреждения, встроенное устройство управления испытывают как часть укомплектованной лампы.

2. Лампа должна быть подвергнута испытаниям на циклическое изменение температуры и на переключения питающего напряжения:

а) испытание на циклическое изменение температуры. Лампу без подачи напряжения выдерживают при температуре минус 10 °С в течение 1 ч. Затем сразу лампу перемещают в камеру с температурой 50 °С и выдерживают в течение 1 ч. Должно быть выполнено минимум пять таких циклов;

б) испытание на переключения питающего напряжения. При испытательном напряжении лампа должна быть включенной на 30 с и выключенной на 30 с.

3. Число циклов должно быть равно половине нормируемого срока службы лампы в часах (пример: 12 500 циклов при нормируемом сроке службы 25 000 ч).

4. После испытаний по перечислениям а) и б) лампа должна работать и оставаться светящейся в течение 15 мин. Затем лампа должна работать при испытательном напряжении и температуре окружающей среды 45 °С до 25 % нормируемого срока службы лампы (с максимумом 6000 ч). По истечении этого времени и после охлаждения до комнатной температуры лампа должна оставаться светящейся в течение 15 мин» [19, 20].

Остальные требования по выборке и соответствию светодиодных осветительных приборов находятся на рассмотрении. Согласно описанным нормативным актам, измерение светового потока по МКО 84:1989 не оптимизировано для ОПСИС и требует дополнительных исследований и усовершенствований [19, 20, 21].

1.3 Анализ электроэнергетических характеристик электрических сетей со светодиодными осветительными приборами

Многие исследования показывают [22, 23, 24], что в последние годы происходит заметное ухудшение КЭЭ, особенно это отмечается в электрических сетях торговых центров, офисных, жилых помещений и других сетях административного и бытового назначения, а также сетях наружного и фасадного освещения. В качестве одной из причин ухудшения КЭЭ отмечают

планомерное увеличение использования ОПСИС в описанных типах электрических сетей [22]. Это происходит в результате процесса генерации в сеть высокочастотных гармоник пускорегулирующими устройствами ОПСИС. В таких пускорегулирующих устройствах (драйверах) нередко применяются импульсные обратногоходовые преобразователи, в которых при совместном использовании с LC-фильтрами (например, выпрямитель с емкостным фильтром), могут возникать значительные искажения тока, что неизбежно ведет к учащению возникновения проблем, описанных выше.

Появление высокочастотных гармоник оказывает неблагоприятное влияние на функционирование других потребителей данной электрической сети, может являться причиной существенного снижения качества в сетях каналов связи, ускоряет процессы старения изоляции из-за повышения номиналов токов в нулевом проводнике.

Известно, что «основным источником гармонических искажений в распределительных сетях являются нелинейные нагрузки крупных промышленных потребителей» [3, 4], однако в некоторых работах уже приведен анализ и описание процессов генерации высокочастотных нечетных гармоник в мощных ОПСИС, которые в некоторых случаях приводили к резонансу токовых гармоник [3, 4, 23].

Следует отметить, что нередко случаи заведомого ухудшения характеристик осветительных приборов, в силу применения некачественных материалов, что в целом оказывает отрицательное влияние на стратегию развития умного и энергоэффективного потребления электрической энергии [5].

Также описаны случаи, когда высокочастотные токовые гармоники приводили к увеличению погрешности электроизмерительных приборов, что может привести к увеличению погрешности, например, индукционных счетчиков активной и реактивной энергии, показатели которых окажут прямое влияние на экономические последствия при учете потребления электрической энергии [6].

Однако, наряду с большим количеством публикаций, которые описывают отрицательные последствия применения светодиодных ламп, с точки зрения появления недопустимых гармоник тока и искажений в сети. Также в различных источниках можно найти множество фактов, о том, что данные высокочастотные искажения являются несущественными.

Наличие данных противоречий можно объяснить различными условиями и режимами работы систем электроснабжения.

Однако, какими бы ни были условия, становится очевидна необходимость заранее проводить анализ, а в некоторых случаях и моделирование условий работы систем электроснабжения зданий при проектировании мер по переходу на энергоэффективное светодиодное освещение.

В частных случаях не редко появляется информация о том, что включение люстры с энергосберегающими лампами в комнате приводило к нарушению работы пульта дистанционного управления телевизором, а в другом случае расположение радиоприемника в непосредственной близости от светодиодного светильника приводило к сильному снижению качества приема сигнала. Данное явление может оказаться следствием того, что в ОПСИС сетевое напряжение переменного тока выпрямляется и попадает на фильтрующий конденсатор, после чего повышается его частота, дальше напряжение высокой, понижается до нужного уровня, выпрямляется, стабилизируется и подается на выход светодиодного драйвера. Предполагается, что именно конденсаторы в схемах светодиодных драйверов создают самую распространенную причину появления, описанных выше, проблем [6, 7].

В исследованиях также отмечают, что наличие в светодиодных драйверах малого размера схемных решений по коррекции высокочастотных гармоник может дополнительно повышать кратковременный пусковой ток до 30-50 номиналов [6, 7].

Как следствие, это приводит к появлению импульсной формы тока, перегрузки N-проводников в трёхфазных сетях с распределенной однофазной нагрузкой, появлению коммутационных процессов при включении устройств, не оборудованных токоограничивающими резисторами, нарушению условий электромагнитной совместимости и т.д.

Пусковые токи светового оборудования зависят не только от параметров светильника, но и от удаленности от источника питания, сечения кабелей распределительной сети, количества и характеристик других потребителей, наличия конденсаторной батареи компенсации реактивной мощности, не защищенной реакторами и сочетания других факторов. Все эти факторы влияют на появления нечетных гармоник тока в сети. Качественную оценку конкретных условий эксплуатации подключаемых светильников можно получить путем применения специальных устройств регистрации [13].

1.3.1 Анализ влияния светодиодных осветительных приборов на изменение показателей качества электрической энергии и ЭМС

Анализ элементов ОПСИС показывает, что светодиодные драйверы, установленные в данных устройства, функционируют на основе ИИП, имеют невысокую стоимость и массогабаритные показатели и могут обеспечивать широкий диапазон выходных напряжений, поэтому более выгодной замены для этих устройств на данный момент не представляется [23, 24].

Самое распространенное решения в светодиодных драйверах реализованы на преобразователях с мостовым выпрямителем и емкостным фильтром. Функционирование данных преобразователей зависит от входного напряжения выпрямителя VD1-VD4. Если напряжение конденсатора C , меньше, входное напряжение выпрямителя, то вентели закрыты, а ток нагрузки потребляется из сети разряде конденсатора, когда входное напряжение выпрямителя становится больше напряжения конденсатора. Ток конденсатора может ограничиваться либо балластным сопротивлением, либо,

что чаще всего, только внутренним сопротивлением конденсатора и динамическим сопротивлением вентилялей, как в случае на рисунке 1.1.

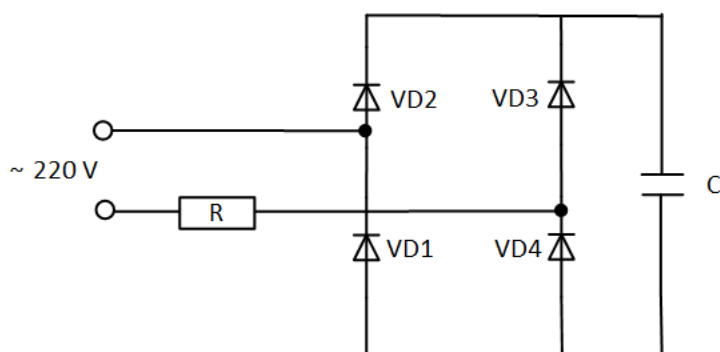


Рисунок 1.1 – Упрощенный пример однофазного мостового выпрямителя, с выходной емкостью

Из вышесказанного можно выдвинуть предположение, что при массовом включении в качестве нагрузки большого количества ИИП, с описанным характером потребления тока, возможно значительное искажение формы тока, что приведет к увеличению процентного соотношения высокочастотных нечетных гармоник, за счет массового протекания импульсных токов.

Очевидно, что это повлечет за собой уменьшение значения отношения активной составляющей к значению полной мощности и будет зависеть от величины емкости конденсатора, внутренних динамических сопротивлений дросселей и сопротивления нагрузки.

Чтобы можно было предметно оценивать несинусоидальность параметров сети, необходимо измерить спектральный состав несинусоидальных токов и напряжений. Также, оценку высокочастотных гармоник в электрической сети, принято определять не по частоте гармоники, а по ее порядку, выраженному через кратность частоты высокочастотной гармоники к основной.

Проведенные исследования показывают, что «большинство современных светодиодных осветительных приборов имеют в спектрах токов весьма существенную величину гармонической составляющей от 3-го и до 15-го, и несущественную величину (до 2 %) нечетных гармоник тока вплоть до

51-й. Также в последнее время наблюдается несущественное, однако нехарактерное для административных сетей и сетей освещения появление четных гармоник в пределах до 2 %) причем, если рассматривать мгновенные значения, то величины высших гармонических составляющих тока будут еще больше» [13].

При этом спектральный состав напряжения, на выводах ОПСИС не выходит за показатели предельно допустимых значений (до 12% гармонической составляющей напряжения нечетного порядка) согласно нормативным документам, описывающим КЭЭ в системах электроснабжения общего назначения [16].

Поэтому при модернизации и проектировании энергоэффективных сетей освещения на основе ОПСИС, следует уделять внимание мероприятиям, предусматривающим поддержание КЭЭ на должном уровне, в противном случае возникает риск значительного снижения надежности сети. Такими мероприятиями могут быть контроль и ограничение высокочастотной токовой гармонической составляющей, а также использование специальных компенсирующих устройств и устройств, предназначенных для фильтрации высокочастотных гармоник.

1.3.2 Анализ существующих способов поддержания заданного качества электрической сети с светодиодной осветительной нагрузкой

Из проведенного анализа был сделан вывод об отрицательном влиянии светодиодных драйверов, функционирующих по принципу ИИП, на качество электрической энергии, за счет генерации высокочастотных гармоник тока, импульсных и пусковых токов. Отмечены основные проблемы, с которыми могут столкнуться потребители электрической энергии.

Для следующего шага анализа состояния проблемы необходимо исследовать возможные способы подавления высокочастотных гармоник тока. Одним из широко распространенных способов подавления

высокочастотных гармоник является применение фильтро-компенсирующих устройств. Это могут быть широкополосные пассивные фильтры.

Для одновременного подавления нескольких гармоник высокого порядка целесообразно использовать широкополосные пассивные фильтры, которые являются более бюджетным вариантом и менее эффективным, или более дорогие и сложные устройства – активные фильтры.

Однако, эффективное применение фильтрокомпенсирующих устройств является сложной, так как система «фильтр – питающая сеть» образуют сложный резонансный узел цепи, в котором необходим учет взаимного влияния всех элементов цепи.

Например, отдельная ветвь фильтра может представлять собой параллельный индуктивный колебательный контур, который при резонансном частот может усилить амплитуду гармонической составляющей.

Поэтому, при проектировании пассивных фильтрокомпенсирующих устройств, рекомендуют обеспечить строгий контроль за показателями частотных характеристик системы во всем рабочем диапазоне [25].

Второй рекомендацией для более эффективного применения пассивных фильтрокомпенсирующих устройств является организация одновременного включения с нелинейной нагрузкой. Однако, данная задача усложняется при использовании пассивных фильтров с ОПСИС, так как прогнозирование количества срабатывания светодиодных драйверов в сетях освещения является достаточно сложной задачей.

Еще одним решением проблемы генерации высокочастотных гармоник тока может быть применение активных фильтров (частото-зависимых устройств с адаптивными характеристиками). «Алгоритм работы такого фильтра основан на генерации тока или напряжения в противофазе с гармонической составляющей, компенсируя таким образом ее амплитуду» [25, 26].

Как отмечалось выше, стоимость такого устройства будет значительно выше, чем у простого пассивного фильтра и вряд ли такое решение проблемы

будет экономически целесообразно. Поэтому, с развитием технологий «индустрии 4.0» появляется смысл использования в рамках концепции интеллектуального здания, или интеллектуальной сети с использованием центрального преобразователя или активного частото-зависимого устройства.

Очевидно, что в качестве более частного решения проблемы могут подойти такие устройства как изолирующие трансформаторы, позволяющие уменьшить гармоническую составляющую, последовательные заграждающие нулевые и фазные фильтры, позволяющие частично отсечь гармоническую составляющую токов, и другие устройства, предназначенные для управления нагрузкой электрической сети. Данный факт еще раз подчеркивает, что выбор наиболее подходящего решения по переходу на энергоэффективное светодиодное освещение должен быть подкреплен тщательным анализом электрической сети и характера нагрузки.

В тематических источниках сети интернет достаточно популярна тема срабатывания защитных автоматических выключателей при включении достаточно большого количества ОПСИС (от 10-12 шт), после того как была произведена модернизация сетей освещения в виде замены светильников. С развитием спроса на недорогое решение данной проблемы на розничном рынке стали появляться устройства, способные, по утверждению заводоизготовителей ограничить коротко-импульсные пусковые токи светодиодных светильников.

Как правило, принцип работа такого устройства сводится к последовательному включению резистора, уменьшающего на время включения скачок тока, в результате чего заряд сглаживающего конденсатора в светодиодном драйвере происходит медленнее, увеличивая таким образом время зажигания светодиодов. Однако очевидным недостатком такого устройства является негативное воздействие на элементы драйвера и избирательную совместимость с ними.

Проблему пусковых токов, которые имеют короткий импульсных характер и влияют на электропродку только если одновременно включаются

более десяти ОПСИС можно решить, используя драйвер с небольшой задержкой пуска, время будет различаться от экземпляра к экземпляру, а время задержки устанавливать случайным образом, либо по определенной статистической закономерности. В результате одновременный пуск двух и более ОПСИС будет маловероятен. Наличие такой функции безусловно увеличит ОПСИС, но окупится за счет экономии на монтажных работах и устройств защиты от импульсных токов (УЗИП). Или, в качестве частного решения, можно использовать выключатель с двумя парами контактов, в котором один контакт соединен последовательно с пусковым резистором, а второй, шунтирующий, замыкается с некоторой задержкой [27].

Проведенный анализ подтверждает то, что перечисленные способы поддержания заданного качества электрической сети с ОПСИС в качестве нагрузки не унифицированы и для их эффективного использования требуют дополнительной разработки и классификации.

1.4 Сравнительный анализ солнечного и светодиодного освещения и его фитобиологического влияния

В данном разделе произведен анализ существующих исследований, посвященных изучению возможных светобиологических воздействий ОПСИС. Особое внимание уделялось исследованиям, описывающим анализ ОПСИС на основе теории рисков и количественной оценки предельных норм воздействия на организм человека (особенно свет с длинной волны в диапазоне от 380 до 540 нм).

Существует распространенная гипотеза, что воздействие синего света ночью вызывает уменьшение выработки гормона мелатонина что может приводить к нарушению циркадных ритмов человека.

Несмотря на существующую гипотезу, ни Инженерное общество светотехники (Illuminating Engineering Society), ни Международная комиссия по освещению (International Commission on Illumination) не определяют

данный факт как какой-либо термин или марку безопасности в своих онлайн-словарях.

Российскими государственными стандартами предусмотрено понятие «опасности для сетчатки глаза, вызванной в результате фотохимической реакции вследствие облучения лучистой энергией в диапазоне длин волн от 400 до 500 нм. Этот механизм повреждения доминирует над механизмом теплового повреждения при времени воздействия более 10 секунд» [7].

Также в указанном стандарте рассмотрена возможность возникновения эритемы – эффекта, который вызывает покраснение кожи в следствие воздействия не только солнечных лучей, но и искусственного света и другие влияния различных длин волн света различного спектра на человеческий организм и в частности, известные заболевания глаз [7].

Показатель светобиологической безопасности определяют по предельному значению площади расширения зрачка, при этом наиболее опасное воздействие, согласно исследованиям, возникает при высоком излучении в диапазоне 435-440 нм [7].

Также было отмечено, что «доля синего света (460 нм) в спектре солнечного света для цветовой температуры 4000 К намного меньше, чем доза синего света 460 нм в спектре солнечного света при цветовой температуре 6500 К. А избыточная доля синего света в спектре светодиодного спектра по отношению к доле синего света в спектре лампы накаливания превышает более 55%» [111, 112, 121].

Многие исследования, например, [111] проводили сравнения спектров солнечного света и света белых светодиодов. Один из таких примеров показан на 1.2 [111].

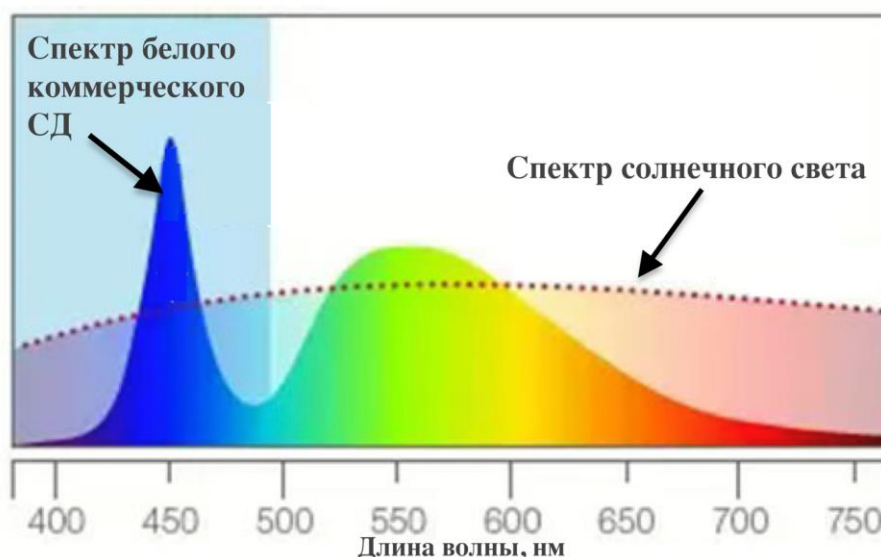


Рисунок 1.2 – Пример возможного сравнения спектра солнечного света ($T_K = 6500 \text{ K}$) с спектров белого светодиодного источника света ($T_K = 4000 \text{ K}$)

Реакция органов зрения на яркий свет формировалась у человека в течение огромного периода времени человеческой эволюции в условиях солнечного света. Поэтому, при реакции на солнечный свет происходит адекватное управление процессом сужения зрачка. Данный процесс представляет собой естественный механизм защиты клеток сетчатки глаза. Управление сужением диаметра зрачка позволяет обеспечивать снижение интенсивности попадающего на сетчатку света до 30 раз.

Однако данный процесс защиты не срабатывает также, как в случае с солнечным светом, при попадании спектра света белых светодиодов на сетчатку глаза. При светодиодном свете сужение зрачка происходит с меньшей скоростью и на меньший диаметр, что может привести к переизбытку попадания света на органы зрения.

Данные факты подтверждены исследованиями ФГБУН Института биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН [34].

На рисунке 1.3 и 1.4 показан эффект реакции зрачка на различные типы направленного освещения (при направленном свете светодиодного фонаря, аналогичного по мощности с лампой накаливания, а также при комбинированном светодиодном освещении и дополнительной засветкой светодиодным фонарем).

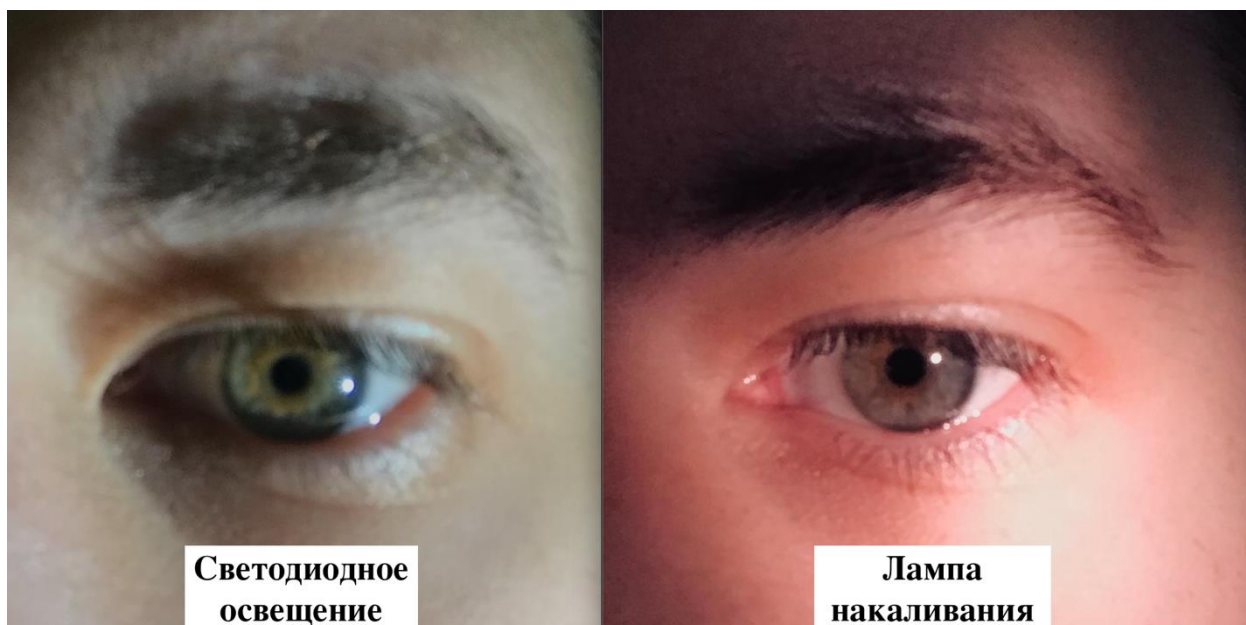


Рисунок 1.3 – Реакция зрачка при различном типе направленного освещения

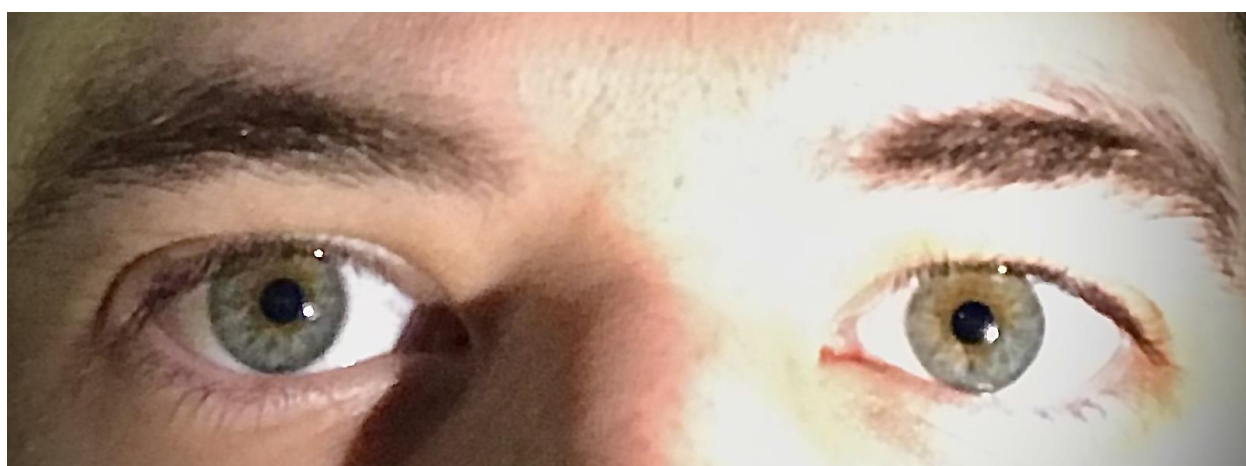


Рисунок 1.4 – Эффект неадекватности управления зрачком при направленном светодиодном освещении

Из рисунка видно, что при дополнительной засветке, воспроизводимой светодиодным источником света диаметр зрачка практически, не меняется, на дополнительный свет не реагирует.

Учет данного факта не был обнаружен в какой-либо нормативной или заводской документации, посвященной светодиодным источникам света. Однако данный факт представляет собой важный критерий, через который, путем вычисления разницы площадей проекции засветки и диаметра зрачка можно было бы привязать степень риска воздействия избыточной дозы синего света на органы зрения. Наличие таких данных позволит в будущем создать

методическую основу для количественных оценок качества ОПСИС с точки зрения риска получения избыточной дозы синего света.

В ходе экспериментов и измерений, проведенных НИИ НЦЗД РАМН было установлено, что «с уменьшением коррелированной цветовой температуры искусственных источников света увеличивается диаметр зрачка глаза, что создает предпосылки для негативного воздействия синего света на клетки и сосуды сетчатки. С увеличением коррелированной цветовой температуры искусственных источников света уменьшается диаметр зрачка глаза, но не достигает значений диаметра зрачка при солнечном свете. Избыточная доза УФ-синего света приводит к ускорению деградационных процессов, которые увеличивают риски раннего ухудшения зрения по сравнению с солнечным светом при прочих равных условиях» [111].

1.4.1 Анализ факторов, вызывающих негативное фитобиологическое влияние, белого светодиодного освещения в ночное время

В течение многих лет велись спорные дискуссии о количестве синего света в светодиодах. Медицинские исследования показали, что, в зависимости от количества, синий свет ночью нарушает циркадный ритм. В результате источники теплого белого света (<3000 К) часто рекламируются как решение для уличного освещения.

Несмотря на то, что светодиодные технологии позволили широко использовать дешевый свет с экономией энергии, эксплуатационных расходов и затрат на техническое обслуживание, привлекательный для муниципалитетов во всем мире, такой свет оказывается более ярким, более загрязняющим и разрушающим свет, чем тот, который он обычно заменяет, что вызывает много проблем.

Светодиодное освещение, применяемое в настоящее время, не всегда может считаться улучшением, в силу возможности вызывать раздражение ткани глаза, ухудшать качество сна, может вызывать сухость глаза и

дискомфорт, а также негативно влияет на флору и фауну, мешает эко- и астро-туризму и, наконец, увеличивает световое загрязнение.

Проще говоря, не имеет значения, насколько энергоэффективен источник света, какова его рабочая эффективность или насколько он экономичен в эксплуатации и обслуживании, если он вызывает деградацию и несет за собой негативные последствия, то это весьма косвенная экономия.

Дешевые и плохо сконструированные ОПСИС могут создавать неравномерное распределение света, нежелательные световые нарушения, мерцание и электромагнитные помехи. Кроме того, из-за интенсивности излучаемого света чипы в светодиодной матрице должны быть скрыты от невооруженного глаза. И хотя рассеивание света направлено вверх, короткие волны синего света, направленные на землю, легко возвращаются в атмосферу, усиливая световое загрязнение.

Биология на Земле развивалась с циклами свет / темнота, и, как и многие другие организмы, люди чрезвычайно чувствительны к свету. Здоровье человека также зависит от использования наименьшего количества разрушающего света ночью, а восстановительный отдых зависит от полной темноты. Это означает, что искусственный свет должен быть максимально биологически ответственным.

Из этих суждений можно сделать вывод, что идеальный уличный искусственный свет должен быть экранированный, непрямой, мягкий для глаз, равномерно распределенный и настолько тусклый, насколько это практически возможно, иными словами – только необходимое количество света в том месте, где и только когда это необходимо.

Светодиодные лампы должны быть не ярче, чем свет, который они заменяют, с аналогичным или улучшенным отношением скотопическое / фототопическое (S / P) от 0,4 до 0,6 (отношение S/P характеризует, сколько света, излучаемого источником света, полезно для человеческого глаза и сколько светового загрязнения можно ожидать).

Неспособность ведущих мировых производителей ОПСИС принять долгосрочную производственную стратегию для дисплеев и освещения, которая учитывала бы возможности автоматизации и стимулировала разработку и производство необходимого роботизированного оборудования, а также передача производства странам с низкой заработной платой, приводит к недальновидной и сумбурной экономической выгоде и энергетической эффективности, с последствиями которых в скором времени может столкнуться человечество.

На рисунке 1.5 показана относительная меланопическая чувствительность из отчета международной комиссии по освещению (CIE 2015), глядя на кривую видно, что спектральная чувствительность внутренних светочувствительных ганглиозных клеток сетчатки, также называемых светочувствительными ганглиозными клетками сетчатки или меланопсинсодержащими ганглиозными клетками сетчатки (представляют собой тип нейрона в сетчатке глаза млекопитающего) достигает максимума при 490 нм, а также простирается до ультрафиолетового края видимого спектра при 380 нм. Самое важное, что полностью половина спектральной чувствительности меланопсина также чувствительна и к зеленому свету.

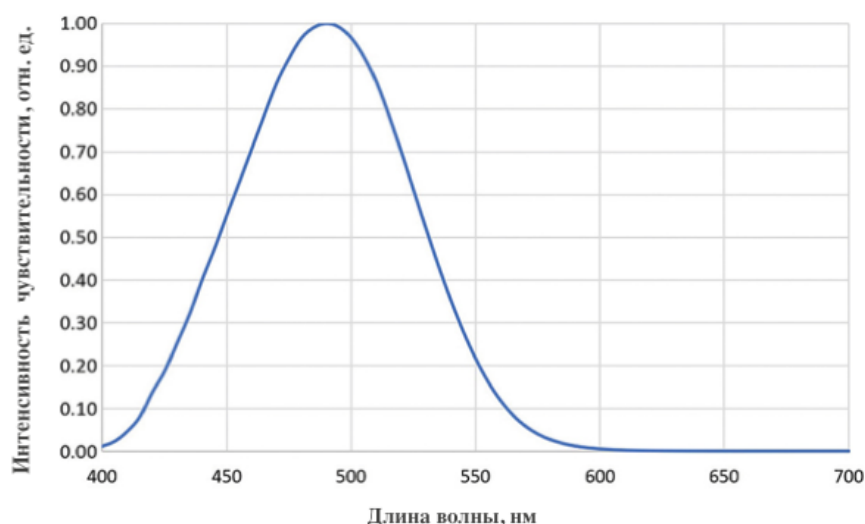


Рисунок 1.5 – Относительная меланопическая чувствительность

На рисунке 1.6 показаны относительные спектральные распределения мощности (SPD) типичных светодиодов белого света с коррелированными

цветовыми температурами (ССТ) 3000 К и 4000 К, масштабированные таким образом, что оба светодиода производят одинаковое количество светового потока.

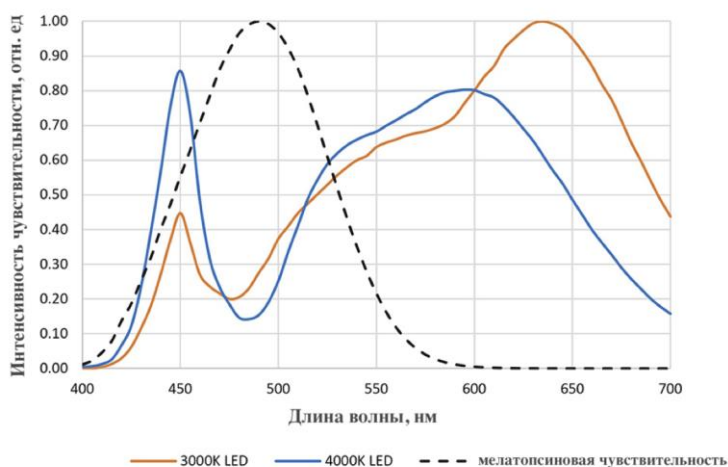


Рисунок 1.6 – Относительные спектральные распределения мощности (SPD) типичных светодиодов белого света с коррелированными цветовыми температурами (ССТ) 3000 К и 4000 К

Из рисунка видно, что светодиоды 3000 К производят меньше меланоцического потока, чем светодиоды 4000 К, когда они дают одинаковый световой поток. Однако разница составляет всего десять процентов, что находится в пределах допуска архитектурного и дорожного освещения. Таким образом, нельзя однозначно утверждать, что для того, чтобы минимизировать нарушение циркадного ритма, необходимо в ночное время придерживаться освещения с цветовой температурой на 3000 К. Разница в меланоцическом потоке не является здесь существенной. Скорее, это просто один из нескольких факторов, которые необходимо учитывать при разработке и определении систем освещения.

На рисунке 1.7 показано спектральное распределение мощности экрана Apple iPad и результирующий меланоцический поток, когда дисплей настроен на полный белый цвет (ССТ 6700 К), что несколько выше, чем белая точка 6500 К для большинства компьютерных мониторов.

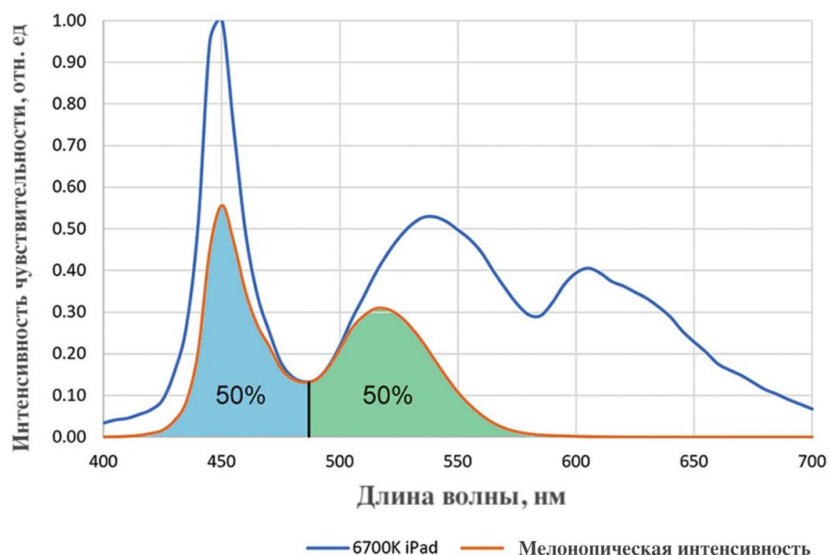


Рисунок 1.7 – Спектральное распределение мощности экрана Apple iPad и результирующий меланопический поток

Обратим внимание, что яркость экрана iPad составляет примерно 400 кд / м² (нит). Это примерно в 50-100 раз больше уровней света, рекомендуемых для уличного освещения жилых помещений. Если рассматривать жалобы, что из-за уличного освещения в спальнях нарушается свет, вызывающий недосыпание, то нельзя игнорировать влияние телевизоров, компьютерных мониторов и планшетов, на которые человек часто смотрит часами, прежде чем лечь спать, и в непосредственной близости.

В целом из проведенного анализа можно сделать вывод о том, светодиодное освещение с высоким содержанием синего цвета (до ~ 450нм) может оказывать негативное влияние на структурно-функциональную составляющую фоторецепторных клеток сетчатки и сосудистой оболочки глаза, а также на содержащийся в данном слое клеток пигмент меланин, отвечающий за поглощение попадающих в глаз лучей света.

1.5 Анализ состояния проблемы технического контроля изделий в области светодиодных осветительных технологий

Характерный ряд особенностей ОПСИС, например, сильная зависимость от температуры рабочей температуры и температуры р-п перехода, необходимость в оснащении специальными источниками питания, указывает на необходимость разработки специальных стандартов, которые бы учитывали данные характерные особенности ОПСИС, технологию производства и также способы измерения и контроля основных характеристик.

Большинство различных видов контроля происходят на этапе производства изделия. Однако в случае с ОПСИС глубина контроля а также и используемые методики, как правило, остаются конфиденциальными и не публикуются в открытых источниках. По данным крупных фирм («ТД Ферекс», LEDingrad, ViLed и др.) специальный контроль комплектующих ОПСИС (радиаторы, оптические элементы, термопроводящие материалы, качество клея и пайки) на соответствие заявленным в сопутствующей документации данным) практически не производится. Вместо чего, обычно осуществляют выборочный контроль на работоспособность ОПСИС и их циклические испытания [28,29,30].

Многие исследовательские работы показывают, что приводимые в паспортных данных изделий заводов изготовителей параметры могут значительно отличаться от параметров, полученных в результате независимого контроля измерений, проводимого в частных испытательных лабораториях. Например, выявлены случаи, когда в качестве номинальных были записаны значения светового потока, измеренные при температуре р-п перехода, равной температуре окружающей среды (25° С), а не рабочей температуре изделия [31-33].

Данный факт можно связать с тем, что испытательные лаборатории, выполняющие измерения при собственных небольших производствах, не

располагают необходимым для проведения входного контроля оборудованием, как правило в силу его высокой стоимости, а также, для проведения сертификации поставщиками представляются, как правило, лучшие светильники из партии.

Отсутствие качественного выходного контроля подчеркивает необходимость введения дополнительных регулирующих условий и разработки доступных методов контроля и испытательных установок.

Для определения основных показателей и характеристик ОПСИС (таких как световой поток или поток, выраженный через освещенность, коэффициент пульсаций (фликер), потребляемая мощность, рабочая температура горячей точки, температура и параметры теплоотвода и др.) возможно ограничиться приборами типа: люксметр-пульсметр, измеритель активной мощности и фазового сдвига тока ($\cos\phi$) и телевизора.

Стоимость данного оборудования относительно не высока по меркам 2020 года. Поэтому выпуск дополнительных рекомендации и методик по входному контролю с учетом более дешевого испытательного оборудования является наиболее востребованным [35].

Данные меры позволят расширить возможности ведения анализа статистики измерительных лабораторий в том числе лабораторий исследовательских центров и ВУЗов, которые в силу относительно небольшой стоимости минимального набора оборудования, будет более реально содержать.

Проведение измерений и испытаний в специализированных испытательных центрах позволит собирать более централизованную, полную информацию об характерных отказах и параметрах разных ОПСИС, с учетом их большого разнообразия, что решит проблему паспортизации ОПСИС. Таким образом сложность поставленной задачи будет заключаться только в необходимости разработать приемы и оценки для перехода от отдельного изделия и параметра к их интегральным критериям [35].

В связи с изложенным, очевидна необходимость разработки новых критериев, методик и программно-аппаратного обеспечения для проведения экспертизы и комплексного анализа об критериях и оценке ОПСИС.

Отсутствие стандартов цифрового управления в свою очередь оставляет нерешенными вопросы стандартизации и оценки качества электромагнитной совместимости ОПСИС для использования их в современных «умных» осветительных системах.

Результаты и выводы по главе 1

Проведенный анализ современного состояния функционирования и развития ОПСИС и систем освещения выявил ряд направлений в исследованиях, которые позволят повысить энергоэффективность и надежность ОПСИС. На основе вышеперечисленных фактов были сформулированы цель и задачи диссертационного исследования. Анализ показал необходимость проведения исследования во ряду вопросов связанных с организацией тепловых режимов и радиаторов отвода тепла как в мощных белых светодиодах, так и в бытовых маломощных аналогах, а так же по организации системы управления работой светодиодного освещения, входному контролю основных параметров изделий, разработке новых критериев оценки качества светодиодных источников света и светодиодных осветительных приборов в целом, разработке новых и уточнению существующих критериев, методик и средств для обеспечения заданного качества исследуемой продукции.

Для обеспечения решения данных проблем, выявленных, можно сделать следующие выводы о задачах, которые необходимо решить при проведении научных исследований диссертации:

1. Для повышения энергоэффективности ОПСИС и систем светодиодного освещения в целом необходимо осуществлять оптимизацию работы, как отдельных осветительных приборов, так и системы освещения в целом, а также использовать алгоритмы управления, позволяющие учитывать особенности данного вида изделия и окружающей обстановки.

2. Использование ОПСИС с импульсными источниками питания, с нелинейными характеристиками, вызывает существенное искажение в большей степени гармонической составляющей тока и в меньшей степени напряжения.

3. Учитывая растущую массовость применения ОПСИС с импульсными источниками питания, а также энергосберегающих

электроприемников, обладающих нелинейными вольтамперными характеристиками в целом, необходима разработка, поиск и расчет новых математических критериев, описывающих уровень влияния или возможность ухудшения качества электрической энергии, новых критериев и стандартов применения входного контроля данного оборудования для обеспечения необходимого уровня качества электрической энергии.

4. Для обеспечения фотобиологической безопасности, уменьшению негативного влияния длин волн синего спектра белых светодиодов необходимо проведение исследований и разработка стандартов и требований к освещению с точки зрения биологической опасности ОПСИС и определению их оптимальных режимов работы для человека и окружающей среды, с учетом смен природных циклов, суток, времени года и прочих условий, характерных для определенной местности.

5. При общем и местном искусственном освещении, создаваемом ОПСИС с белыми светодиодами, состоящими из синего кристалла, покрытого желтым люминофором, происходит заторможенное реагирование зрачка глаза на свет, пик данного эффекта приходится на дозу синего спектра света в диапазоне $\sim 480\text{нм}$.

6. Для решения задач, описанных выше, наибольшую результативность можно получить, исследуя реально существующие светодиодные системы освещения для их последующего моделирования и анализа.

Данные выводы согласуются с целью и задачами диссертационной работы.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ В ОБЛАСТИ СВЕТОДИОДНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Проведенный в предыдущей главе анализ открытых источников показал, что все большее внедрение энергосберегающих технологий при повышении эффективности потребления энергии, также приводит к повышению в электрической сети наличия высокочастотных нечетных гармоник. Поэтому, чтобы достоверно оценить характер и показатели качества электрической энергии было принято решение о проведении испытаний и измерений в электроустановках, с основной однофазной нагрузкой в сетях с использованием новых энергоэффективных осветительных приборов на основе светодиодных источников света.

2.1 Исследование показателей качества электроэнергии административного здания, использующего светодиодные системы освещения

Эксперимент по анализу качества электрической энергии в электроустановке проводился в административном здании учебного заведения МОУ «СОШ № 3» Всеволожского района, которое было полностью переведено на использование светодиодных систем освещения.

Основной процесс проводимых средств и измерений подробно изложен в [13, 38, 39,].

Основной задачей эксперимента являлось выявление негативного влияния нагрузки в качестве ОПСИС на спектральный состав токов и напряжения питающей сети, а также определения нелинейностей, возникающих в электрической сети из-за элементов драйвера светодиодных светильников.

В ходе эксперимента анализатор качества был включен непрерывно в течение 14 дней. Присоединение было выполнено поочередно к обоим питающим вводным кабелям (ввод №1 – 7 дней, ввод №2 – 7 дней).

Присоединение контактных колец прибора было выполнено пофазно, несмотря на переменную сеть, требования в инструкции прибора предписывают расположение контактных колец по направлению от питающих фидеров к отходящим линиям, согласно стрелкам, указанным на контактных кольцах прибора, как показано на рисунках 1 и 2.

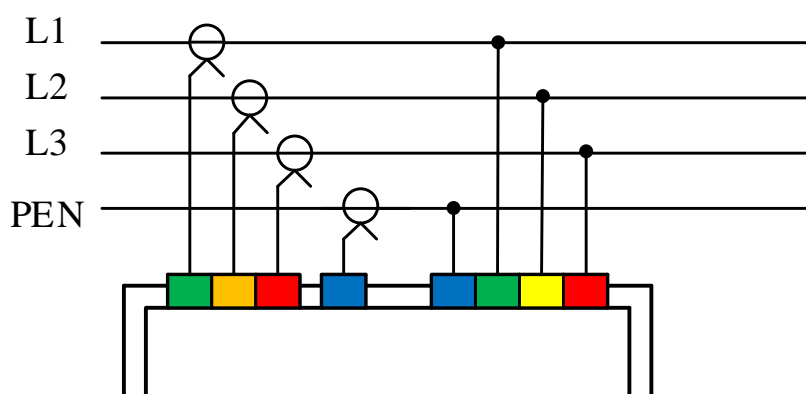


Рисунок 2.1 – Схема подключения измерительного прибора

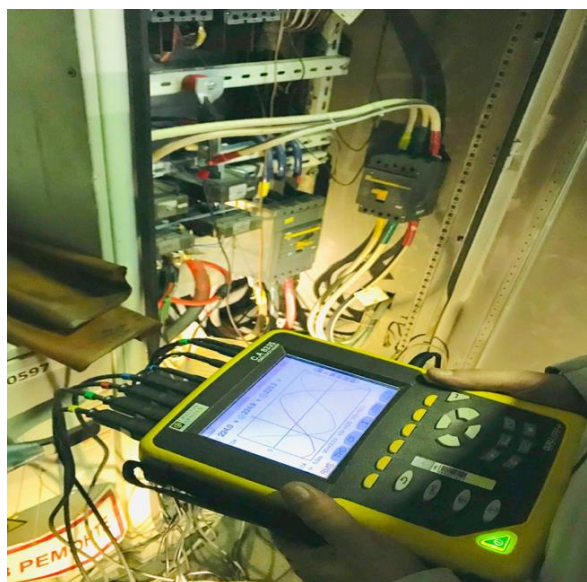


Рисунок 2.2 – Фотография подключения анализатора параметров электрической сети

В ходе проведения измерения проводилась непрерывная запись всех изменяемых параметров электрической сети. Запись велась поочередно – 7 дней на ввод №1 (основной), 7 дней на ввод №2, выполняющий функции резервного. Непрерывная регистрация параметров позволяет детально анализировать работу электроприемников с учетом распорядка дня учреждения.

Устройство сети освещения здания школы было постепенно переоборудовано на энергосберегающие осветительные технологии с использованием ОПСИС. Несмотря на это, в некоторых кабинетах встречались настольные светильники с лампами накаливания, а также ряд люминесцентных ламп в подсобных помещениях. Однако, общий процент таких источников света не превышал 5% от общего количества ОПСИС, установленных в данном здании.

Рекреационные зоны и большая часть учебных кабинетов оборудованы ОПСИС типа PPO 1200/L 40W 4000K IP20 (рис. 3). Административные помещения, а также некоторые кабинеты оборудованы ОПСИС типа PPL 600 40w 4000K IP40. На фасаде здания, а также на опорах, расположенных на прилегающей территории установлены светодиодные уличные прожекторы мощностью 90-100 Вт. Однако на них не производился акцент внимания, так как наличие данных осветительных приборов нельзя назвать массовым, в сравнении с описанными выше ОПСИС.

Характеристики светильника PPO 1200/L 40W сведены в таблицу 1 [40].

Фотография светильников с места установки показана на рисунке 2.3.

Таблица 2.1 – Характеристики светильников РРО 1200/L 40W

Источник света	светодиоды SMD2835
Количество светодиодов	38/76 шт.
Цветовая температура	4000 К, 6500 К
Угол освещения	120°
Индекс цветопередачи	Ra ≥ 75
Входная частота	50 Гц
Коэффициент пульсации	≤ 5%
Материал корпуса Материал плафона	алюминиевый сплав опаловый поликарбонат
Тип рассеивателя	опаловый
Температура эксплуатации	-20...+40 °С
Срок службы светодиодов	25 000 часов
Напряжение драйвера	входное 180-240В выходное: 30-42/90-100
Максимально допустимое количество светильников в линию	25 шт.
Драйвер типовой	PPS-CVP 12040 IP67
Мощность драйвера	40/60 Вт
Входное напряжение/ выходной ток	100/0,70...264/0,32...3,3



Рисунок 2.3 – Фото светильника РРО 1200/L 40W с места установки

Из накопленных отчетов с данными, записанными в результате проведения измерений, были составлены графики, наиболее явных изменений исследуемых параметров электрической сети (рис. 2.4 – 2.9).

Чтобы более детально понимать характер нагрузки в данной электрической сети приведем граф активной мощности, показанный на рисунке ниже (рис. 2.4).

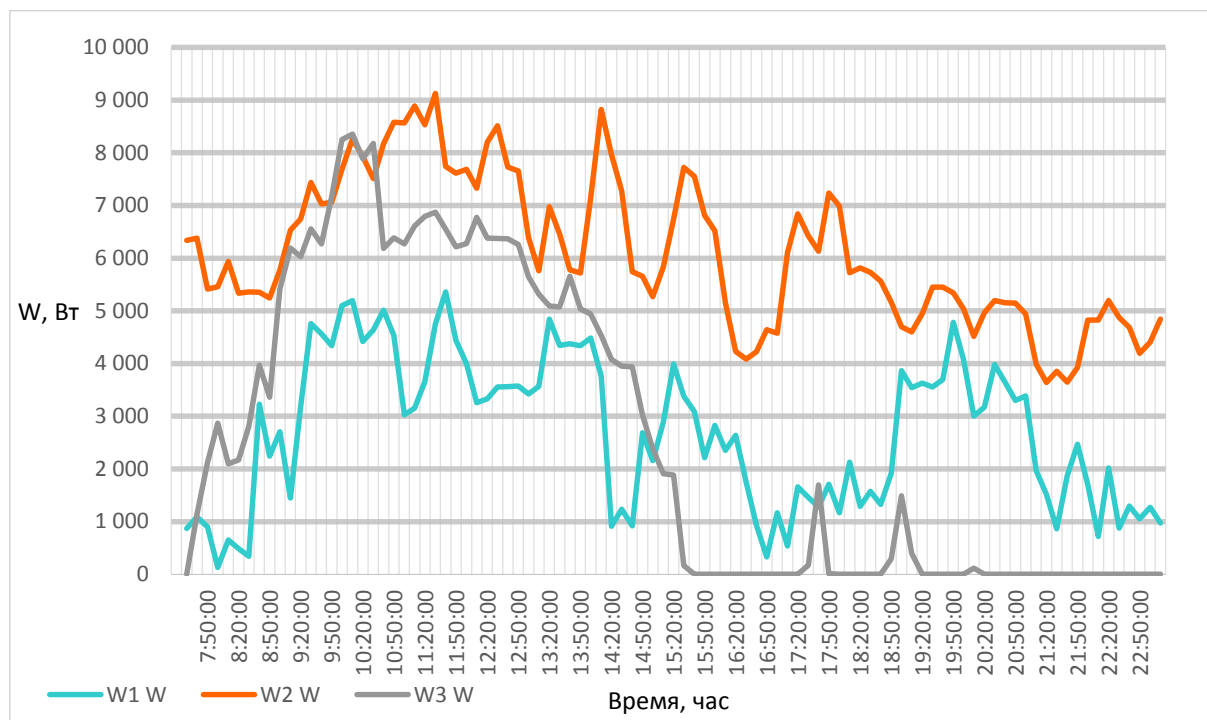


Рисунок 2.4 – График измеренной активной мощности за период рабочего времени школы (15 часов), где W1 – активная мощность фазы А, W2 – активная мощность фазы В, W3 – активная мощность фазы С

Подробный разбор и анализ кривых был проведен в [13]. В целом данные кривые позволяют делать выводы о характере распределения нагрузкой и времени загруженности фаз.

Помимо активной мощности, высокий интерес в данных исследованиях имеет график распределения реактивной составляющей, который показан на рисунке 2.5.

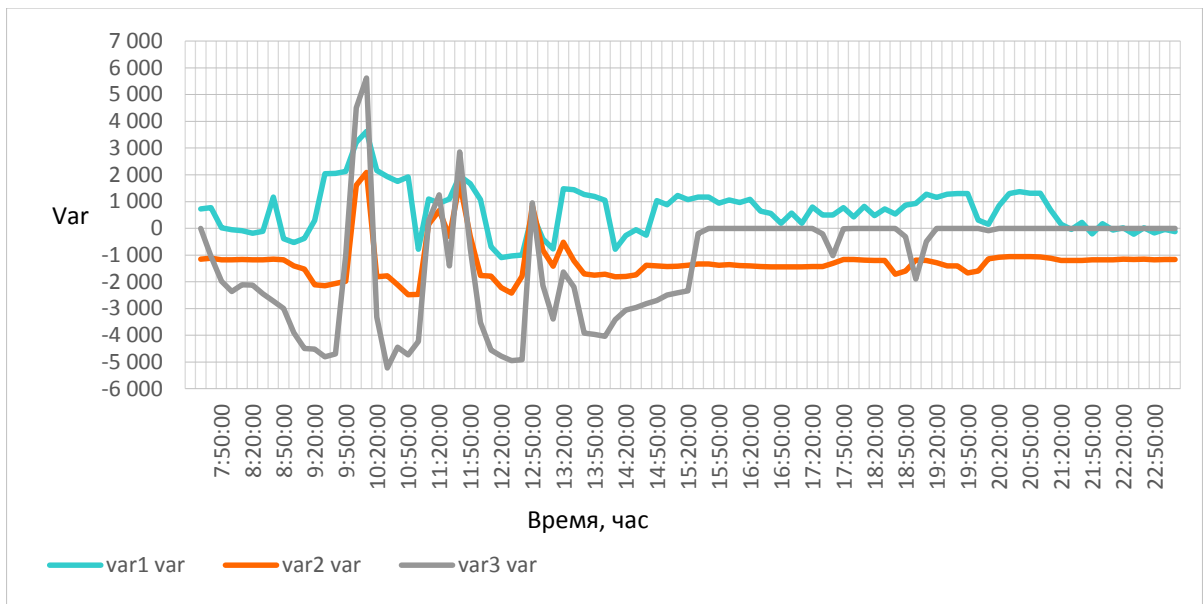


Рисунок 2.5 – График измеренной реактивной мощности за период рабочего времени школы (15 часов), где кривая var1 – фаза А, кривая var2 – фаза В, кривая var3 – фаза С

Из анализа полученных кривых можно сделать вывод о наибольшей выраженности реактивной мощности, проявляемой на фазе С, на которой, в свою очередь, сосредоточена практически вся осветительная нагрузка здания.

На рисунке 2.6 изображен график изменения значений тангенса $\text{tg}(f)$ по фазам.

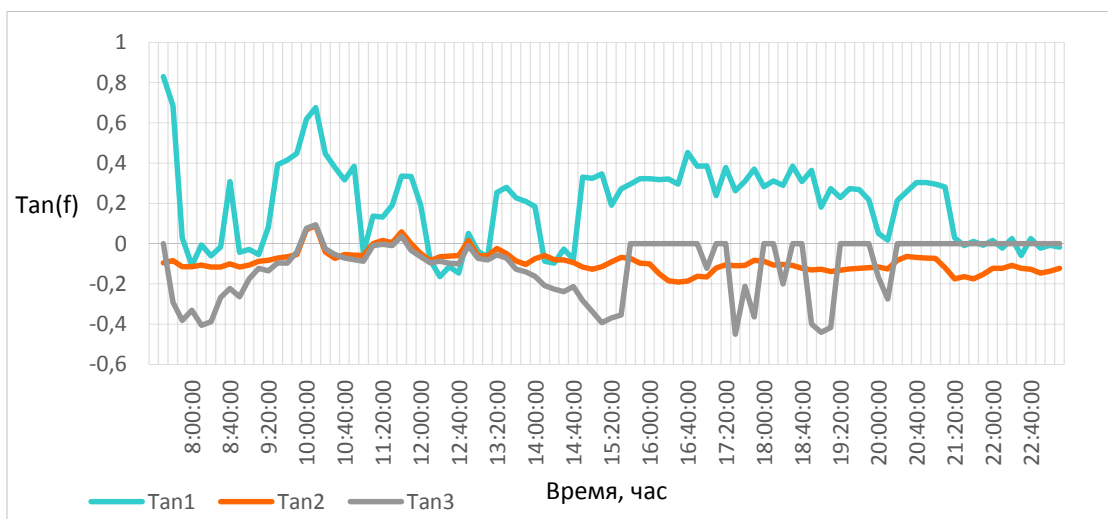


Рисунок 2.6 – График измеренного параметра $\text{Tan}(f)$ по фазам с течением времени за период рабочего времени школы (15 часов), где Tan1 – фаза А, Tan2 – фаза В, Tan3 – фаза С

По отрицательному $\tan(f)$ можно судить о значительном присутствии активно-емкостного характера нагрузки [41, 42]. В результате чего активная энергия за счет потребления электроприемниками преобразуется в другой вид полезной энергии, а реактивная, за счет свойств реактивных элементов накапливать энергию, может возвращаться в сеть, в результате чего будет происходить загрузка сети «вредоносными» составляющими реактивной энергии, что при значительном ее проявлении может повлечь за собой весомые экономические платы из-за повышения тарифов при потреблении или генерации реактивной энергии.

В данном случае даже применение компенсирующих устройств не будет являться положительным выходом из сложившейся ситуации. Так как осветительная нагрузка не аналогична двигателям, трудно прогнозируема и в результате чего применение компенсирующих устройств может оказаться либо дорогостоящим мероприятием, либо, в случае использования дешевых конденсаторных установок, привести к перекомпенсации.

Далее следует привести анализ гармонической составляющей по току и напряжению. Наличие общих высокочастотных гармонических искажений по напряжению в моменты пиковых нагрузок или бросков сети доходило до 12-14%, что находится с учетом возможных погрешностей можно отнести к допустимым пиковым пределам, с ограничением в 12% согласно нормативным документам. Поэтому приводить данные графики не представляет большого интереса.

Далее перейдем к рассмотрению процентного соотношения высокочастотной токовой гармонической составляющей. Высокочастотная гармоническая составляющая 3-го порядка представлена на рис. 2.7, 5-го порядка – на рис. 2.8.

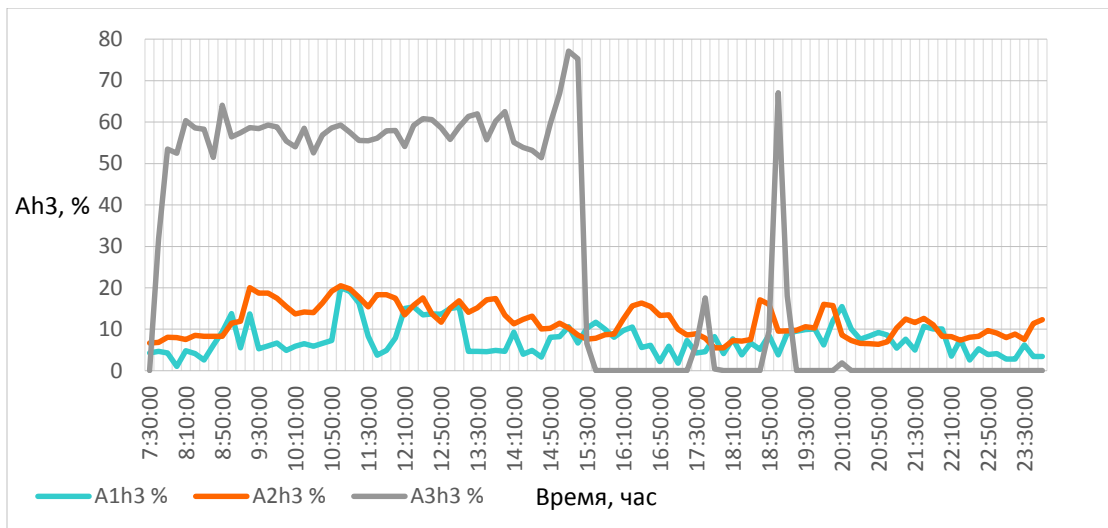


Рисунок 2.7 – Гармоническая составляющая 3-го порядка в процентном соотношении, измеренная за период рабочего времени электроустановки школы (15 часов), где A1h3 – процентное соотношение высокочастотной гармонической составляющей 3-го порядка для фазы А, A2h3 и A3h3 – для фазы В и С, соответственно

Из графика видно, что наличие высокочастотных гармоник тока в пиковые моменты доходило до 75% по фазе С, аналогично, но с меньшими значениями и для токовой гармонической составляющей 5-го порядка.

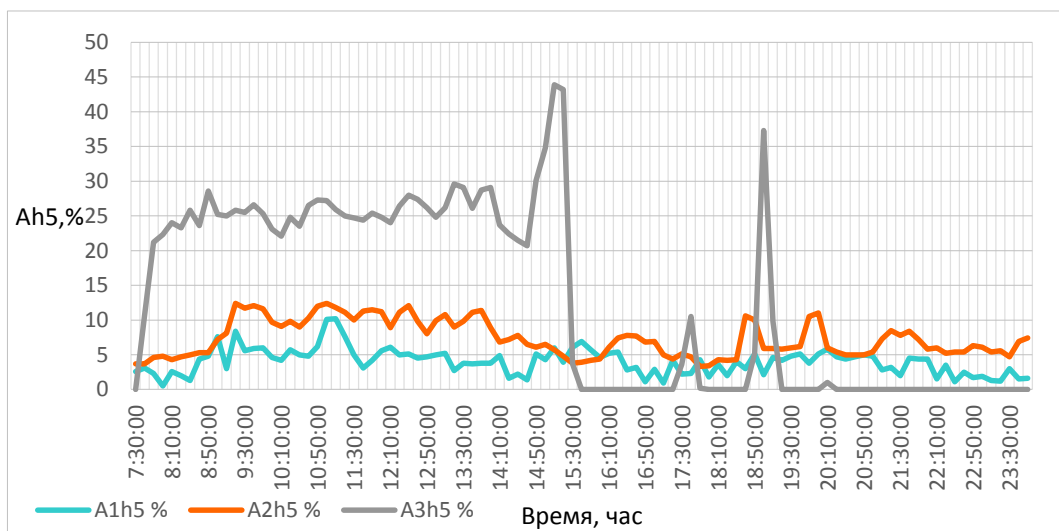


Рисунок 2.8 – Гармоническая составляющая 5-го порядка в процентном соотношении, измеренная за период рабочего времени школы (15 часов), где A1h5 – процентное соотношение высокочастотной гармонической составляющей 5-го порядка для фазы А, A2h5 и A3h5 – для фазы В и С, соответственно

Наличие четной гармонической составляющей оказалось невелико и составило от 1 до 0,02 %, поэтому считаем, что ею можно пренебречь, однако, следует отметить, что данный вид гармонической составляющей является нехарактерным для электрических сетей административного назначения и прослеживался вплоть до 50-го порядка.

Также целесообразно привести график полного гармонического искажения, который представлен на рисунке 2.9.

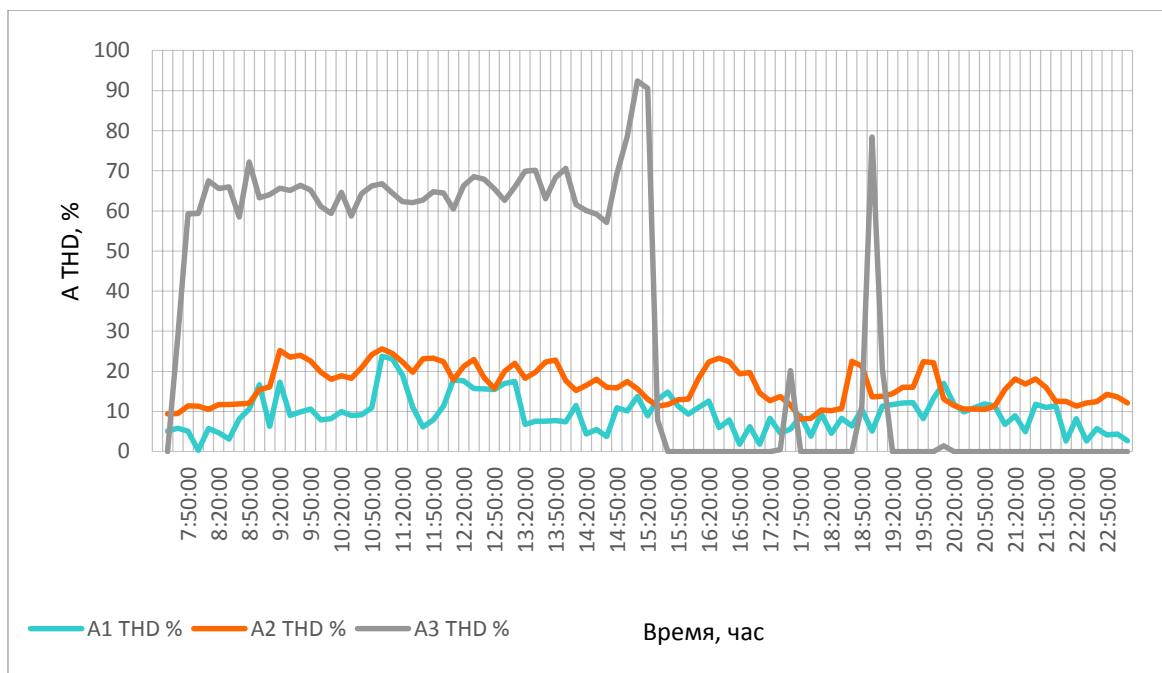


Рисунок 2.9 – График полного гармонического искажения в процентном соотношении, измеренного за период рабочего времени школы (15 часов), где A1 THD – процентное соотношение высокочастотной гармонической составляющей 5-го порядка для фазы А, A2 THD и A3 THD – для фазы В и С, соответственно

Также приведем среднеквадратичные значения напряжений по фазам (рис. 2.10).

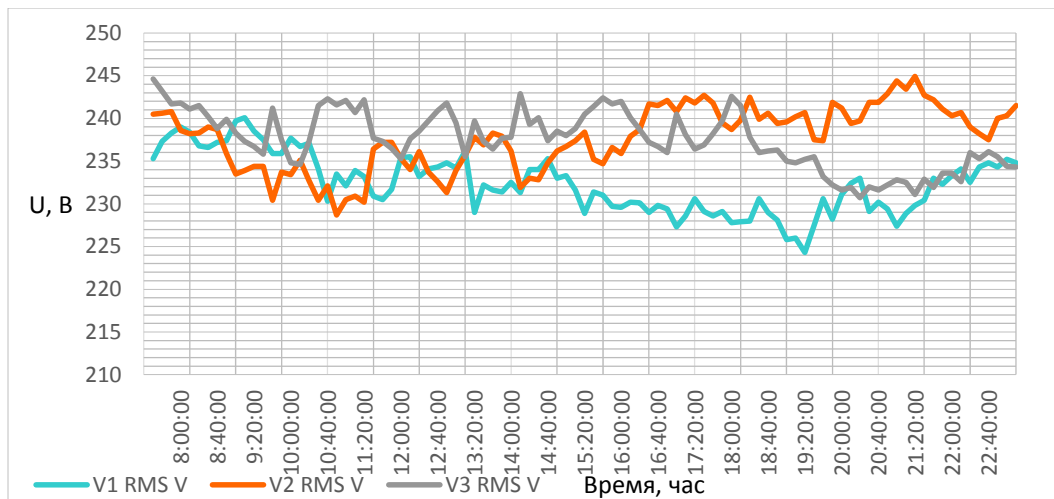


Рисунок 2.10 – Среднеквадратичные значения напряжения, измеренного за период рабочего времени школы (15 часов), где V1 RMS – среднеквадратичное напряжение фазы А, V2 RMS и V3 RMS – фазы В и С, соответственно

По графику, представленному на рисунке 2.10 можно отметить заметное падение напряжения с возрастанием нагрузки и в этом нет ничего необычного, однако интерес в данном случае представляют моменты, когда происходят резкие скачки напряжения до 242-245 В, что согласно нормальному распорядку дня для темного сезона (измерения проводились в конце октября/начале ноября) может говорить о том, что в данной электрической цепи ОПСИС являются потребителями ЭЭ с сильно выраженным переменным характером потребления мощности, который по своей амплитуде может быть сравним с потребителями ЭЭ в заводском цеху легкой промышленности [41, 46].

Еще одним важным показателем качества ОПСИС в порядке эксплуатации является характеристика фликера (flicker – от англ. «мигать», в данном случае показатель мерцания (колебания) свечения ОПСИС). На рисунке 2.11 представлен график максимумов фликера.

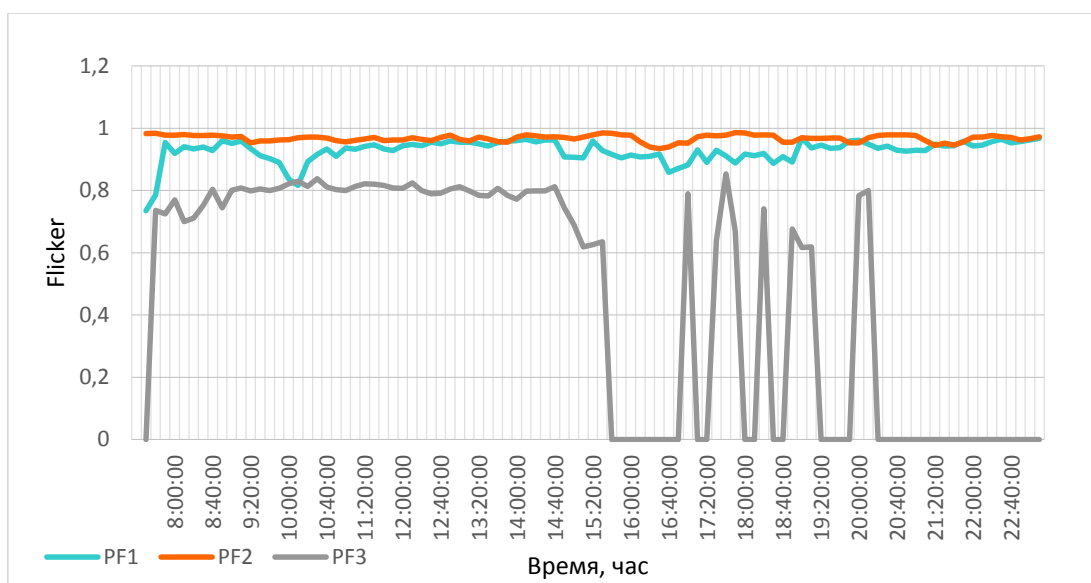


Рисунок 2.11 – Часовое распределение максимумов дрожания напряжения по фазам, выраженное через понятие «фликер», где PF1 – фаза А, PF2 и PF3 – фаза В и С соответственно

Согласно нормативному документу ГОСТ 13109-97 краткосрочные предельно допустимые значения дозы фликера ограничиваются 1,0, в то время как длительная доза фликера на интервале времени до 10 минут должна быть меньше равно 0,74. Из графика (рис. 2.11) видно, что интересующая нас фаза С, в зависимость от использования осветительной нагрузки не соответствует ГОСТ 13109-97 по параметрам длительно допустимой дозы фликера.

Явление фликера на осветительной нагрузке сказывается ощутимым мерцанием света, которое при этом может быть незаметно невооруженным глазом, однако, при работе в помещениях с дозой фликера, превышающей норму, со временем, могут возникнуть ощущения ухудшения самочувствия, психологической подавленности, раздражения, и головной боли [9].

Полученные диаграммы и графики экспериментально подтверждают факты и предположения о том, что массовое применение ОПСИС является причинами снижения коэффициента мощности, эмиссии высокочастотных токовых гармоник, генерируемых светодиодными драйверами, повышения дозы фликера, возникновения скачков напряжения [50, 51].

Исходя из проведенных измерений и данных из проведенного анализа, можно сделать вывод о том что, возможно, по-отдельности современные

ОПСИС могут удовлетворять существующим критериям и показателям качества, описанным в соответствующих нормативных документах, однако при массовом применении данных осветительных приборов могут возникать существенные проблемы, связанные не только с проблемами управления качеством ЭЭ, но и с негативными воздействиями на организм человека, а также, как следствие, экономическими убытками.

2.2 Процедура внедрения системы менеджмента измерений на основе испытаний бытовой светодиодной лампы малой мощности на надежность

Достоверные данные о показателях надежности и сроке службы ОПСИС в настоящее время получить весьма затруднительно. Это связано с необходимостью высокой продолжительностью испытаний, либо с применением критических и ускоренных методов испытаний, что тоже в данном случае не может достичь высокой точности из-за необходимости интерполяции ускоренных методов испытаний на реальные условия эксплуатации. Это означает, что определение истинной экономической выгоды от массового перехода на эргоэффективные светодиодные осветительные технологии пока невозможно. В результате чего возникает необходимость применения относительных значений исследуемых параметров для определения срока службы ОПСИС при заданной наработке до отказа (или выбранного критерия или соотношения отказа). Поэтому существует высокая необходимость в исследовании механизмов отказов и причин их возникновения в административных и бытовых электрических сетях с ОПСИС.

2.2.1 Характерные типы отказов

Качественные светодиодные источники света известны высокой продолжительностью срока службы и безотказной работой. Однако не редки случаи, когда ОПСИС не отработывает и 30-40 % заявленного срока службы. Данный факт может быть связан не только с тем, что проектируемые системы ОПСИС обладают значительной сложностью и насыщенностью электронными компонентами, но и с тем, что постепенная деградация источников света также является причиной отказа [52].

Рассмотрим наиболее частые и характерные причины отказов ОПСИС.

Перегрев. Если не учитывать отказы, связанные с перегревом отдельных элементов или целой системы, возникшие в результате нарушений в рамках технологического процесса, то вероятнее всего причиной перегрева будет неправильный тепловой режим, в следствие некорректной организации работы теплоотвода.

Нередко, для обеспечения высокой надежности светодиодных источников света, помимо наличия радиатора, также требуется отвод тепла для обеспечения нормальных условий работы драйвера в заданном тепловом режиме. Второй причиной перегрева могут быть повышенные токи и перенапряжения, превышающие допустимый управляющий ток, в результате чего электронные компоненты светодиодного драйвера могут выйти из строя раньше, чем наступит деградация светового потока или отказ светодиодного источника света.

По полученным данным от управляющих компаний и обсуживающих организаций основной причиной отказов, называемой среди крупных административных потребителей, является выход из строя светодиодного драйвера или его перегрузка, вызванная высоким нагревом от светодиодов. Также были названы случаи, когда было выявлено явное применение в светильниках несовместимых химических веществ, приводивших систему к появлению трещин и выходу из строя светодиода [14].

Однако проблема работы светодиодных источников света в критических режимах может возникать при скачках напряжения в питающей в сети, а также в результате наводок в нулевом проводнике. Из-за перегрева, перенапряжений и электрических наводок происходит ускоренное высыхание фильтрующих емкостей, что может привести к повышению фликера, а также к росту токов, питающих светодиодный модуль [13, 14].

Поэтому необходимо предъявлять требования к продукции, предписывающие производителю указывать вероятность и степень увеличения пульсаций частичном высыхании емкостных компонентов светодиодного драйвера.

Механические повреждения. Характерные отказы в результате механических повреждений могут возникать из-за деформации печатной платы. Возникшее в результате разделения заготовки механическое напряжение, которое может передаваться на кристалл через жесткую подложку и приводить к появлению микротрещин, в результате которых может происходить нарушение светового потока, его ускоренная деградация или электрический пробой.

Так, в источниках указывают, что «при установке светодиодов в корпуса изделий, например, подложки типа Printed Circuit Board (PCB), могут возникнуть нарушения электрических соединений из-за неисправности контактов при плохой пайке» [53, 54].

Кроме того, механические напряжения при сгибах контактных соединений, экстремальные тепловые воздействия во время процесса пайки, также могут служить причинами появления расслоений или микротрещин, что дополнительно увеличивает вероятность попадания пыли и других загрязнений внутри полых образований.

Несовместимость химических материалов и их старение. Химическая сопоставимость материалов также важный фактор в процессе производства и эксплуатации ОПСИС. Например, при различных коэффициентах расширения

материалов процесс пайки может быть весьма критичным и сильно влиять на снижение отказоустойчивости осветительных приборов. [55].

Еще одним фактором будут уже описанные последствия, связанные с разрушением электрических соединений в корпусе излучателя. Также возможно снижение производительности из-за повреждения отражающих поверхностей [56].

Еще одним типичным примером старения материалов служит влияние ультрафиолетового и теплового излучения на отражающие и светорассеивающие материалы, в результате чего происходит растрескивание и пожелтение материала, причем, при неправильных и сверхвысоких нагрузках или агрессивных условий эксплуатации данный эффект во многих случаях может наступить раньше, чем деградация люминофора светодиодной матрицы. Наряду с воздействием теплового и ультрафиолетового излучений наличие влаги внутри корпуса осветительного прибора, также ускоряет процесс появления микротрещин и полостей как в паяных соединениях, так и в в эпитаксиальных слоях на границе поверхностей элементов. Следует отметить, что существуют исследования, указывающие на то, что «прозрачные материалы для инкапсуляции, такие как силикон или эпоксидная смола, не позволяют добиться полной герметизации и, следовательно, не защищают от влаги и других вредных факторов» [57].

Деградация светового потока. **Процесс деградации светового потока — это тот фактор, который не всегда воспринимается как явный критерий отказа.** В процессе эксплуатации, со временем происходит естественный процесс повреждения кристаллической решетки светодиода, в результате чего происходит снижение мощности излучения источника света. При этом ток продолжает протекать через поврежденные области и кристалл все еще выделяет тепло. Данный процесс также может быть вызван протеканием токов, превышающих номинальный [57].

Старение люминофора. Деградация люминофора происходит под воздействием высоких температур, так как он наносится прямо на сильно

нагревающийся кристалл. При деградации люминофора помимо снижения яркости светодиода происходит изменение оттенка его свечения на более холодный, синий. Это происходит потому, что в спектре начинает преобладать собственное излучение кристалла. Данный процесс, также позволяет судить о том, что со временем, излучение светодиодных источников света с состаренным люминофором может наполнить вред органам зрения человека, за счет увеличения в своем спектре интенсивности синего излучения.

Обрыв электрической цепи. При данных типах отказов возможным характерным случаем является бессистемное зажигание и затухание одного или сразу нескольких светодиодов, данное явление возникает при неполном обрыве цепи и нарушениях контактов в электрической цепи лампы. При внешнем осмотре могут быть как обнаружены, так и не обнаружены визуальные повреждения и дефекты паяных соединений (ПС) или дорожек светодиодов. Нередки случаи плавления контактов питающих плату проводников или ножек фильтрующего конденсатора, как правило расположенного на печатной плате драйвера.

Пробой. Высыхание конденсатора. Короткое замыкание. Возможным характерным признаком данного типа отказа может являться кратковременное зажигание светодиодов и мгновенное затухание. Такое проявление работы светодиодов обычно связано либо с неисправностями драйвера (как правило это сгоревший резистор или пересохший конденсатор) либо с электрическим пробоем в кристалле одного из светодиодов в результате броска напряжения при пуске драйвера. Для данного случая возникновения отказа характерно слабое мерцающее излучение светодиодов с частотой несколько раз в секунду.

2.2.2 Сопоставление циклов включения светодиодной лампы с изменением освещенности

В качестве объекта испытаний была выбрана светодиодная лампа со встроенным устройством управления фирмы Rayet LED модели LED1629G5 с цоколем типа E27. Указанные в заводском паспорте изделия характеристики светодиодной лампы приведены в таблице 2.2 [14].

Таблица – 2.2 Характеристики лампы

Мощность, Вт	Аналогичная мощность лампы накаливания, Вт	Световой поток, Лм	Цветовая температура, К	Заявленное время наработки до отказа, час.
5 Вт или 5 кВт/1000 час.	35 Вт	400 Лм	2700 К	25000 час.

На рисунке 2.12 показан внешний вид и схема подключения исследуемой лампы к микроконтроллеру.

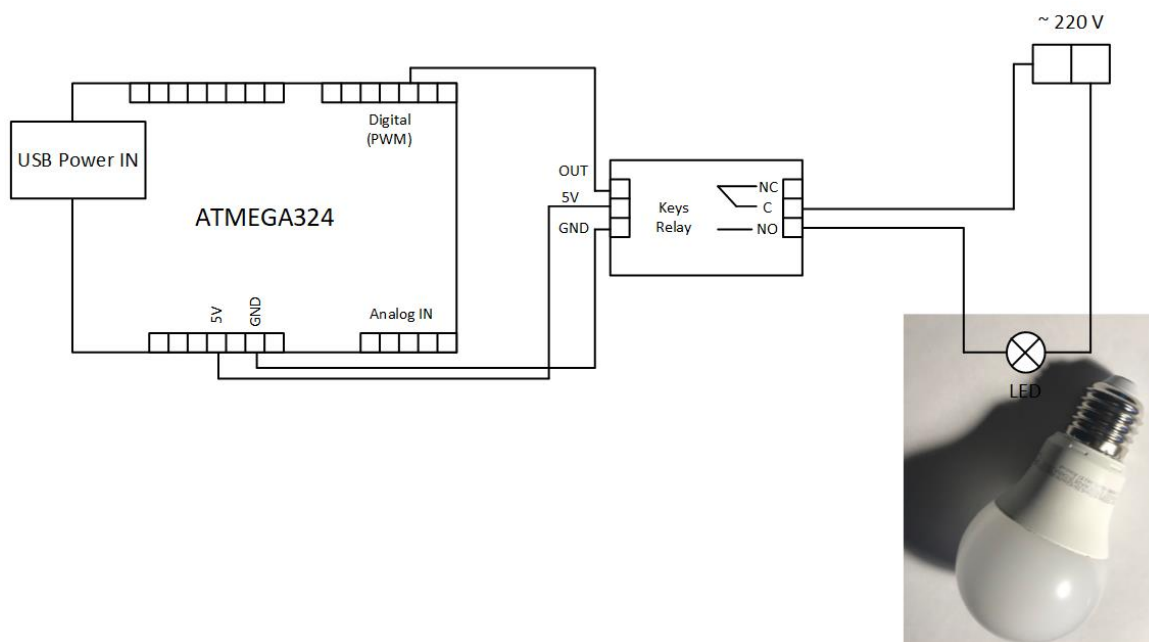


Рисунок 2.12 – Схема подключения исследуемой лампы к микроконтроллеру

Целью проводимых испытаний являлось исследование процессов, происходящих в электромеханической системе лампы в момент ее включения и выключения, определение степени влияния циклов включения/выключения

на повышение износа элементов системы, старение люминофора и деградацию светового потока источника света.

Для реализации данных испытаний была построена программа циклов включения/выключения лампы.

Чтобы исключить трудоемкие сопоставления ускоренных испытаний с реальными условиями эксплуатации, программа циклирования была рассчитана таким образом, чтобы приблизить условия испытания лампы к условиям, максимально близким к нормальным. Для этого был произведен замер установившегося теплового режима лампы.

На рисунке 2.13 показаны, установленная в лампу, плата и используемый микроконтроллер.

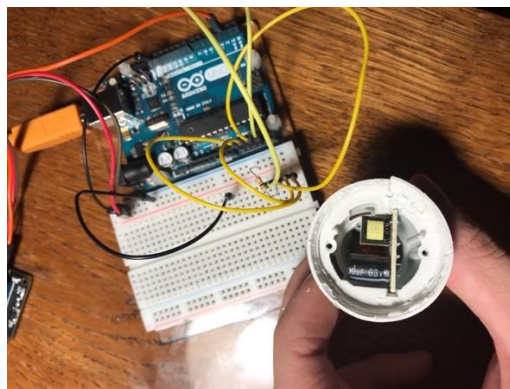


Рисунок 2.13 – Внешний вид платы, установленной, в лампу и используемого микроконтроллера

Проверка режима нагрева элементов светодиодной лампы проводилась путем телевизионного контроля, а также путем снятия температуры терморезистором, подключенным к контроллеру и установленным на обратной стороне поверхности печатной платы, которая является самым горячим элементом лампы после самого источника света [14].

Алгоритм проведения испытаний показан на рисунке 2.14

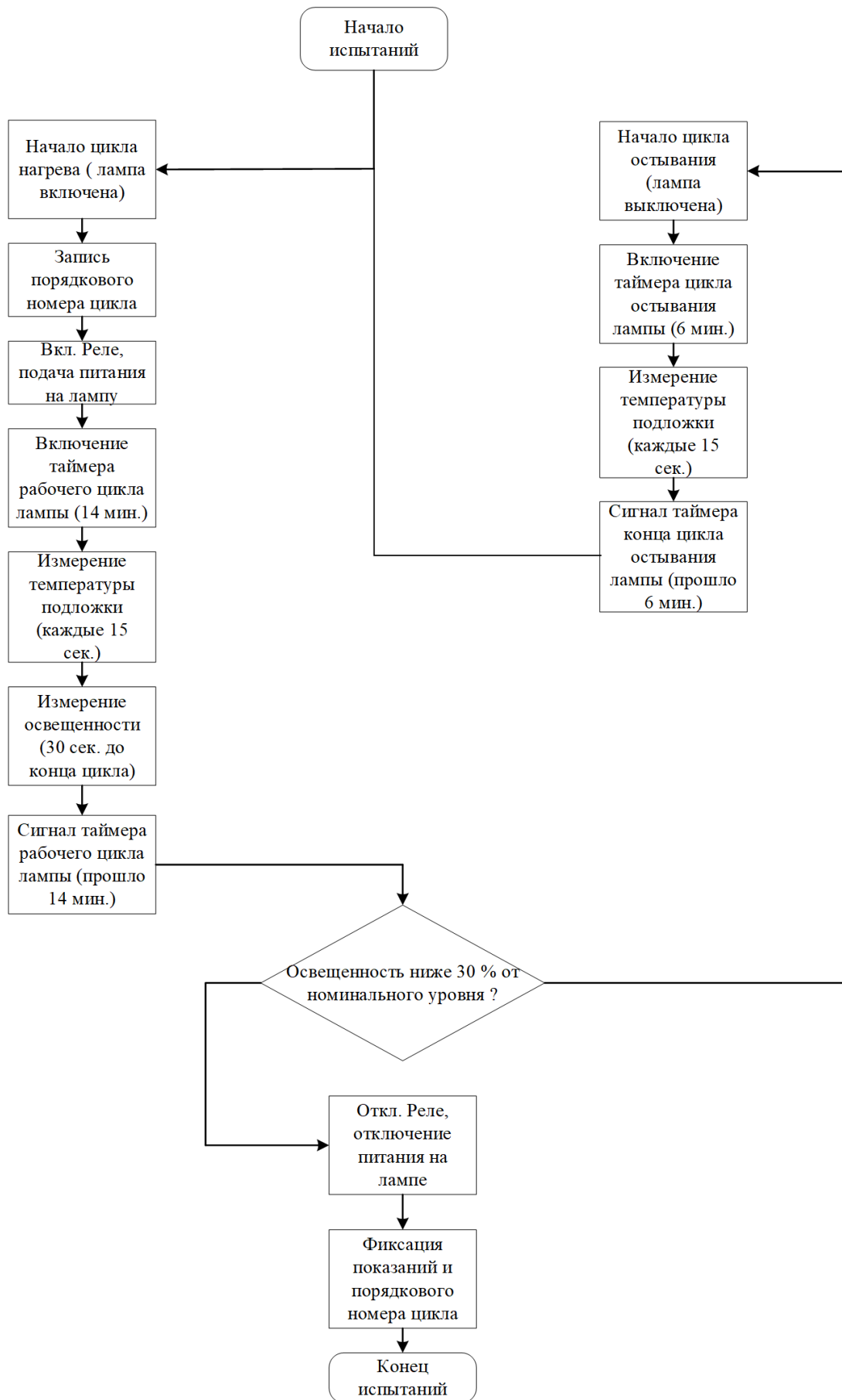


Рисунок 2.14 – Схема проведения испытаний нагрева и остывания лампы при циклах включения и выключения

Графики нагрева и остывания лампы с течением времени показаны на рисунке 2.15 и 2.16 соответственно.

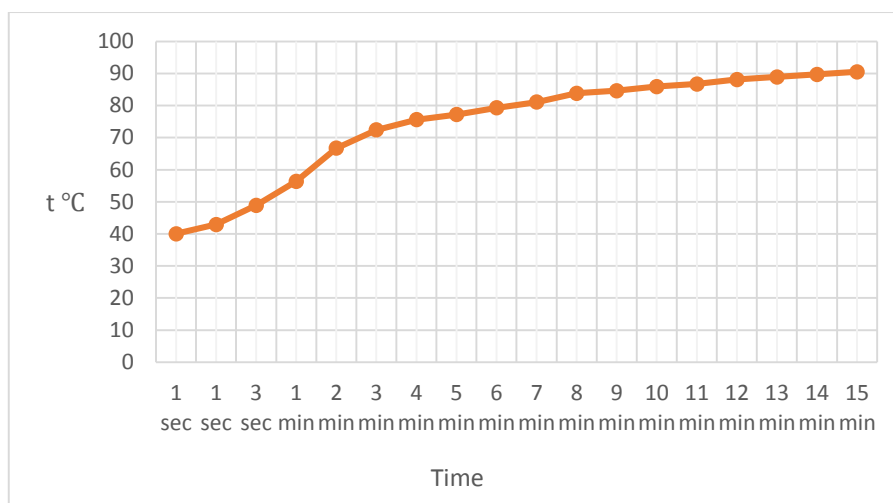


Рисунок 2.15 – График постепенного нагрева исследуемой лампы

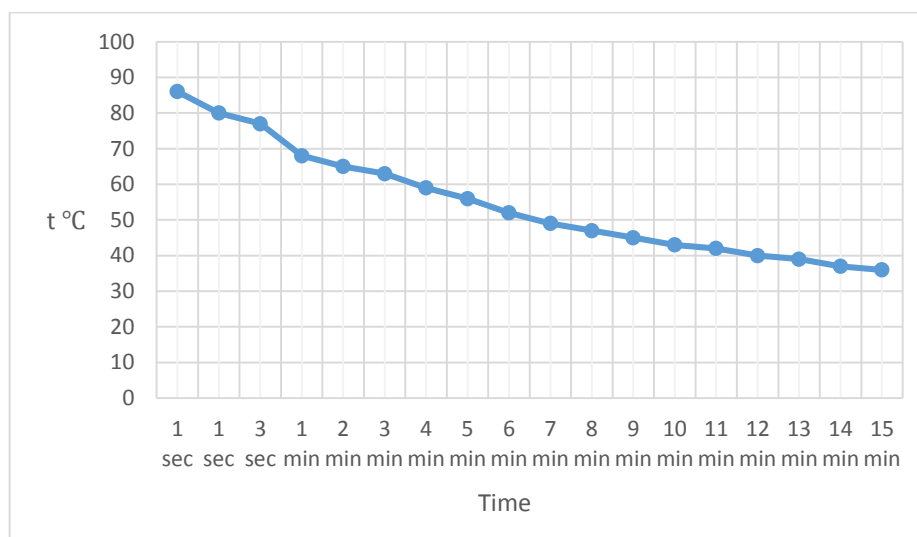


Рисунок 2.16 – График постепенного остывания исследуемой лампы

Из графиков видно, что, нагрев до номинальной температуры самой горячей точки лампы происходит приблизительно за 15 минут, дальнейший нагрев лампы с течением времени не происходил, либо был незначителен. Исходя из соображений подбора условий щадящего режима, максимально приближенных к нормальным, для лампы был выбран режим включенного состояния – 14 минут, в течение которого самая горячая точка лампы (температура сравнивалась с обратной стороной печатной платы) нагревалась до 85 – 86 °С, затем происходила остановка работы лампы, и ее остывание в

режиме выключенного состояния в течение 6 минут. За период выключенного состояния горячая точка лампы успевала остыть до 49 – 52 °С.

Установившаяся термограмма, в рамках максимально разрешенного по условиям эксперимента режима, показана на рисунке 2.17.

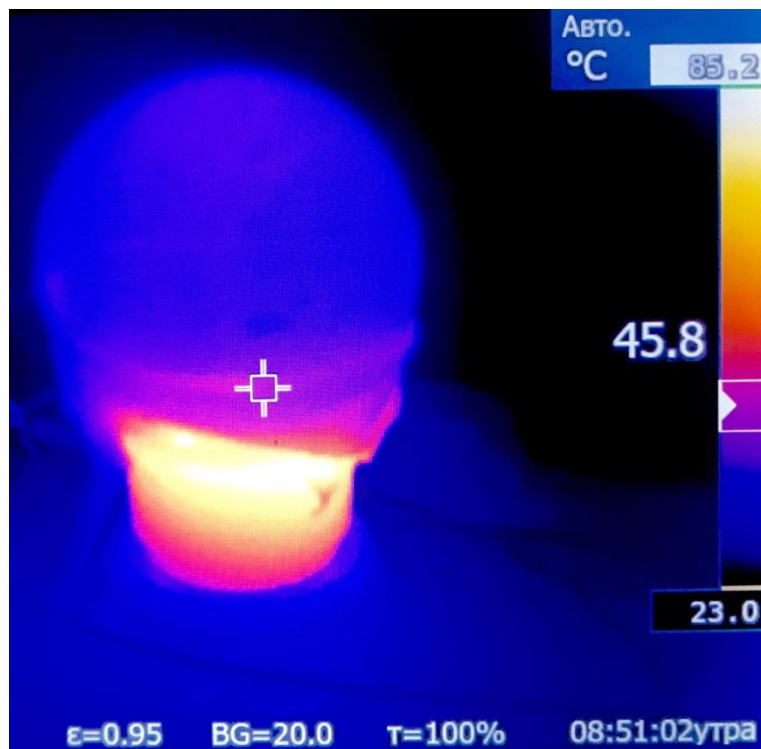


Рисунок 2.17 – Термограмма исследуемой светодиодной лампы

Основной целью испытаний являлась реальная проверка количества циклов включения/выключения светодиодной лампы, при которых лампа не изменит своих начальных характеристик более чем на 30%.

Испытания проводились согласно действующему на тот момент ГОСТ Р 54815-2011 и при нормальных условиях, с нахождением лампы в вертикальном положении цоколем вверх, в том числе в процессе измерения светового потока. Для измерения светового потока использовался прибор АРГУС-07, с действующим свидетельством о поверке.

Основным критерием отказа светодиодной лампы согласно ГОСТ Р 54815-2011 и ГОСТ Р МЭК 60598-1-2011 была принята деградация светового потока, более чем на 30% [59]. Так как исследование процессов деградации светового потока напрямую не представлялось возможным, было принято решение о сопоставлении процесса снижения освещенности черного ящика с

снижением светового потока за счет его деградации в результате прохождения циклов включения и выключения. Чувствительный элемент прибора устанавливался непосредственно над лампой, вертикально на расстоянии 1 м. Также производились измерения пульсаций от источника света.

График изменения освещенности черного ящика от исследуемой светодиодной лампы, показан на рисунке 2.18.

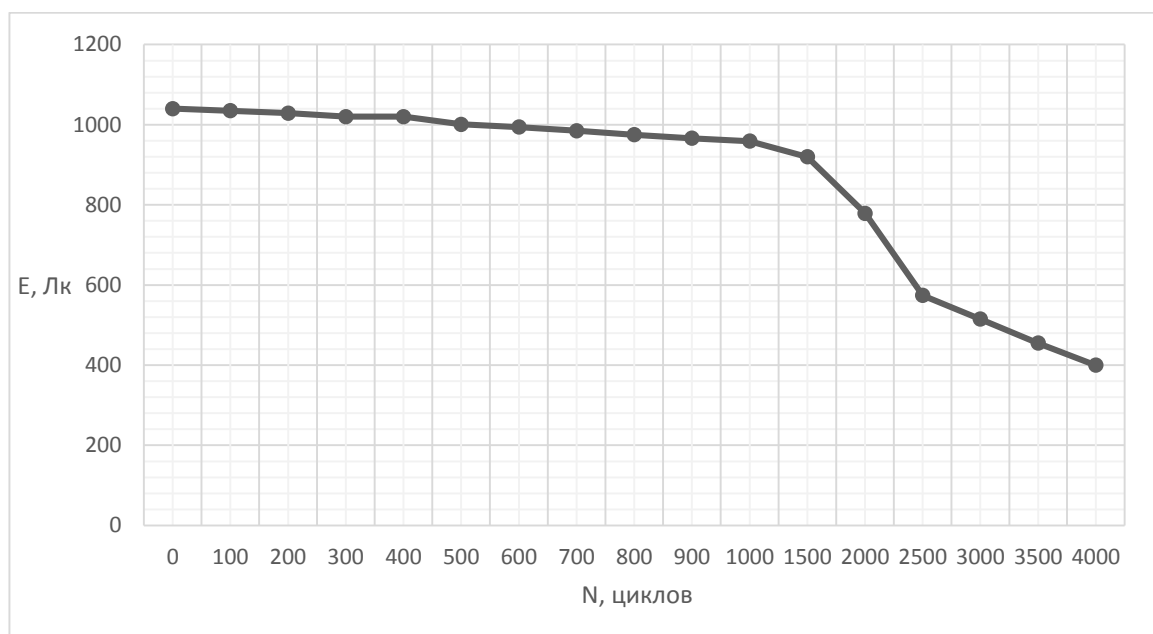


Рисунок 2.18 – График изменения освещенности черного ящика от исследуемой лампы

Анализируя графики нагрева и остывания, становится очевидным факты резкого нагрева в первую минуту включения. Температура элементов в самой горячей точке лампы достигала своего пика спустя 15 минут после включения и составляла ~ 98 °С.

Также было выявлено, что при нагреве от 25 °С до 98 °С, происходило небольшое снижение освещенности черного ящика на 4-6 %, при этом, был осуществлен дополнительный нагрев лампы до критической температуры 105 °С, в результате чего освещенности снизилась на 17 %, что может говорить о нелинейном характере изменения интенсивности излучения светодиодного источника света. Таким образом, для данной исследуемой лампы температура 95 °С была оптимальной по эффективности излучения светового потока.

По графику из рисунка 2.18 видно, что наиболее заметные изменения освещенности черного ящика наступили после прохождения приблизительно 800-900 циклов включения/выключения, в специально подобранном «щадящем» режиме.

После прохождения 1000 циклов наблюдалась ускоренная деградация светового потока.

На момент прохождения 2200 циклов включения/выключения уменьшение освещенности составило 30% (~700Лм) от измеренного в начале испытаний значения ~1040 Лм.

Также с увеличением циклов возрастал и коэффициент пульсации, индицируемый в единицах процентов и возросший с 13,2 % до 17,8%, что говорит о влиянии циклов включения/выключения не только на источник света, но и на элементы печатной платы (драйвера). Как правило основной причиной увеличения пульсаций является старение (высыхание) конденсатора, установленного в схеме преобразователя лампы [14].

Действующие нормы и требования касательно естественного, искусственного и совмещенного освещения жилых и общественных зданий описываются в таких стандартах как свод строительных и санитарных норм и правил, и ограничивают пульсацию приборов освещения при частоте пульсаций до 300 Гц. Так, например, в игровых комнатах детских садов, а также учебных классах, кабинетах, аудиториях учреждений образования этот показатель не должен превышать 10 %. Эти же нормативы действуют и для торговых залов супермаркетов, для парикмахерских, некоторых производственных и медицинских помещений. [60-63] Исследуемая светодиодная лампа уже на момент начала испытаний не соответствовала этим нормам. [14]

Процесс изменения цвета свечения лампы не производился. Однако по полученным данным можно сделать вывод, что стабильность параметров как светового потока, так и цвета свечения лампы, не могут определяться только параметрами источника света.

Из проведенного анализа отказов и данных, полученных в результате испытаний выявлена зависимость различий формирования теплоотвода электрических элементов лампы и ее источника света. Определен факт отличия условий работы источника света и электрической цепи пускорегулирующего устройства (драйвера) несмотря на одинаковое время эксплуатации и рабочую температуру, в результате чего применяемые в приборе компоненты, изнашиваются по-разному.

Существующие стандарты по испытаниям светодиодных светильников не распространяются на время испытаний, превышающее 10000 часов, дальнейшее определение характеристик получают в результате экстраполяции данных по методу наименьших квадратов (стандарт ТМ21-11) [14, 19].

К числу факторов, усложняющих экстраполяцию данных об изменении цвета, относятся различия в светодиодных решениях, материалах, процессах изготовления, оптических системах, а также в рабочих температурах и времени эксплуатации светодиодов.

В понятие срока службы не включено изменение цвета, даже несмотря на то, что в некоторых приложениях это изменение может рассматриваться пользователем как сбой в работе. Хотя стабильность цвета в целом влияет только на эстетическое восприятие, в паспортной документации изделий следует также указывать, как один из параметров, характеризующих общий срок службы изделия.

Неоднозначность требований и предписаний нормативных документов в силу разнящихся результатов испытаний и сложности проведения точных натуральных испытаний подтверждает тот факт, что требования по выборке и соответствию ОПСИС находятся в стадии рассмотрения. О чем также напрямую указано в нормативных документах МКО 84:1989 согласно стандарту ГОСТ Р 54815-2011 [65]. Следует также отметить, что с 01 мая 2020 года данный стандарт прекратил свое действие, взамен ему введен новый ГОСТ ИЕС 62612-2019, в котором все также методы измерения силы света, равно как и ее распределения все еще находятся в рассмотрении, а срок

службы ОПСИС определен только коэффициентом сохранения светового потока и сроком службы пускорегулирующего устройства (светодиодного драйвера). Применение предлагаемых методик управления качеством процессов работы ОПСИС позволит как потребителю, так и производителю производить анализ результативности и корректного функционирования существующей системы искусственного освещения на основе ОПСИС.

2.3 Внедрение методики оценки соответствия основных электротехнических и световых характеристик бытовых светодиодных ламп

На данный момент в России производится и поставляется огромное количество светодиодных бытовых ламп, с достаточно большим разбросом в цене и не меньшим разбросом в качестве. В связи с чем многие исследовательские лаборатории стараются накапливать как можно больше данных о данной продукции. Поэтому с целью уточнения требований и обозначения реальных характеристик бытовых светодиодных ламп было решено провести дополнительные исследования их характеристик.

Для сравнительных исследований было выбрано 4 светодиодных лампы прямого аналога лампам накаливания. Исследуемыми образцами были выбраны 2 лампы иностранного производства с более высокой стоимостью и мощностью 5 и 9 Ватт соответственно и 2 лампы российского производства с более низкой стоимостью и мощностями 3,5 и 11 Ватт соответственно.

Основной целью испытаний являлось проведение независимого сравнения фактических параметров и характеристик с заявленными. План испытаний проводился согласно существующей действующей нормативной документацией и состоял из следующих этапов (таблица 2.3)

Таблица 2.3 – план испытаний отобранных светодиодных ламп.

Исследуемый параметр	Критерии соответствия	Методика проведения
Потребляемая мощность	Отличие фактических электрических параметров от паспортных менее чем на 10%	ГОСТ Р 55702-2013 Источники света электрические. Методы измерений электрических и световых параметров
Световой поток	ГОСТ Р 62612-2019 п.9.1: «Начальный световой поток каждой СД-лампы в измеренной выборке не должен быть менее номинального светового потока более чем на 10%»	ГОСТ Р 55702-2013 Источники света электрические. Методы измерений электрических и световых параметров
Эквивалентная мощность лампы накаливания (эффективность)	Соответствие указанной эквивалентной мощности, существующей у лампы по ГОСТ ИЕС 60064-2019	ГОСТ Р 55702-2013 Источники света электрические. Методы измерений электрических и световых параметров
Цветовая температура	В соответствии с ГОСТ 54350-2015 п. 9.1: Измеренные значения КЦТ лампы не должны выходить за пределы допуска, указанные в таблице 9 ГОСТ 54350-2015 п. 9.1	ГОСТ Р 55702-2013 Источники света электрические. Методы измерений электрических и световых параметров
Индекс цветопередачи	В соответствии с ГОСТ 62612-2019 п. 9.2: «Измеренные фактические значения индекса цветопередачи должны быть не более чем на 5 единиц меньше нормируемого значения индекса цветопередачи»	ГОСТ Р 55702-2013 Источники света электрические. Методы измерений электрических и световых параметров
Коэффициент пульсации	Соответствие коэффициента пульсации заявленному в паспортных данных, а также соответствие с ГОСТ 33393-2015	ГОСТ 33393-2015 Здания и сооружения. Методы измерения коэффициента пульсации освещенности

Фотометрические данные (световой поток, цветовая температура, индекс цветопередачи, эффективность (количество Лм на Вт) измерялись гониометром Viso Lightspion, который соответствует новым правилам ЕС (EU No 1194/2012), в соответствии с которыми световой поток лампы должен быть измерен в диапазоне 90° или 120° и состоит из спектрометра, работающего в диапазоне видимого света 360-830 нм и гониометра. Данное устройство вычисляет индекс цветопередачи, цветовую температуру и полный световой поток в люменах.

Благодаря встроенному анализатору мощности прибор производит измерение напряжения и тока, вычисляет светоотдачу в люменах/ватт. Высокоточным мультиметром проводились измерения напряжения на выводах светодиодной матрицы.

Результаты тестирования приведены в таблице 2.4

Таблица 2.4 – результаты сравнения характеристик бытовых светодиодных ламп.

Исследуемая лампа	Мощность, Вт		Световой поток, Лм		Эффективность Лм/Вт		Цветовая температура, К		Индекс цветопередачи CRI		Коэф. пул., %
	заяв.	изм.	заяв.	изм.	заяв.	изм.	заяв.	изм.	заяв.	изм.	
IKEA 5w	5	5,2	400	383	80	86	2700	2885	80>	83	12
IKEA 10w	10	9,1	600	586	-	59,8	2700	2691	-	92	13
ASD 7w	7	5,3	630	441	-	82	3000	2980	-	74	10,5
ASD 11w	11	8,1	990	891	-	85	3000	2977	-	77	10

По данным таблицы видно, что у более дешевых ламп фирмы ASD заявленные характеристики мощности отличаются в худшую сторону а некоторых случаях более чем 25%. Параметры светового потока отличались на 10-20%. Аналогично выявлена проблема появления высоких пульсаций (приблизительно 10-12%), что не удовлетворяет требованиям санитарных норм и правил, но стоит отметить, что данной проблемы не наблюдается в потолочных светодиодных светильниках и светодиодных трубках (аналогов люминесцентных ламп) [61]. При измерениях напряжения на выводах светодиодной матрицы у всех ламп наблюдались показатели высокого

напряжения, колеблющееся в пределах 300 В. Что тоже является несколько противоречивым фактом.

Кроме того, заявленные производителем сроки безотказной работы службы светодиодной лампы ASD, 11 Вт, 220 В, E27 также вызывают некоторые сомнения, так как в малом объеме пластикового корпуса лампы, с низкой теплопроводностью выделяется значительная мощность. В результате чего работа компонентов лампы происходит на предельно допустимых температурах что неизбежно приведет к ускоренной деградации светодиодов и снижению времени безотказной работы. Данный факт можно также будет являться и основной причиной отказа ламп подобной конструкции.

Светодиоды в подобной конструкции работают на предельных температурах и их ресурс наработки до отказа снижается на сотни часов.

2.4 Выявление негативных факторов, светодиодных источников света, влияющих на здоровье человека

Светодиодные осветительные приборы уже давно перестали быть новинкой и являются общераспространенными, однако промышленные стандарты безопасности еще только находятся на стадии доработок.

В современном обществе человек значительно сократил время пребывания под открытыми солнечными лучами и лучами дневного света и теперь проводит большую часть времени под искусственным освещением.

На данном этапе развития систем освещения, все мировые тенденции по проектированию новых источников света показывают, что происходит достаточно радикальное снижение спектрального диапазона среды искусственного освещения, по сравнению с той средой, в которой развивались человеческие клетки ранее.

За последние 10 лет сильно набрал обороты процесс, который исключает практически все источники инфракрасного и близкого к инфракрасному излучения из систем искусственного освещения. Данное явление связано не

только с производством энергосберегающих ламп, но и с энергосберегающими NIR-окнами (окна, не пропускающие область волн, близких к инфракрасному излучению) так называемыми стеклопакетами.

Ультрафиолетовые спектральные области позволяют обеспечивать энергию для производства витамина D и С, однако высокоэнергетическое ультрафиолетовое излучение может нанести вред верхним тканям человеческой кожи и вызвать различные разновидности раковых заболеваний.

В светотехнической промышленности прослеживается тенденция, фокусирования только на работе с видимым излучением, то есть тем излучением, которое может воспринимать зрительная система человека (приблизительно от 390 нм до 740 нм). Данный диапазон излучения, особенно высокоэнергетический синий диапазон, может привести к повреждению органов зрения под фотооптическим воздействием циркадных сигналов.

Многие исследования указывает на взаимосвязь между воздействием света с высокой интенсивностью синего излучения в ночное время и возникновением нарушений сна, что говорит не только о вредоносном воздействии на органы зрения, но и о воздействии на нервную систему человека [108, 110, 111, 112, 125, 128].

Видимый свет, с преобладающим синим излучением подавляет секрецию мелатонина – гормона, который влияет на цикл дня и ночи. Показатели близорукости стремительно растут, особенно в азиатских странах, которые преимущественно используют светодиодное освещение [15]. В системы освещения аграрных отраслей часто добавляют инфракрасный и близкий к инфракрасному спектры излучения, чтобы увеличить темпы роста растений [16].

В отличие от растений, трудно точно оценить воздействие света на человека, когда он перемещается и ведет хоть сколько активный образ жизни. В целом, не хватает долгосрочных исследований, которые бы учитывали общее воздействие света на участников на ежедневной,

еженедельной и ежемесячной основе. В дополнение к отсутствию контролируемых исследований, медицинское сообщество заинтересовано в разработке методов лечения, которые могут проводиться в течение времени, связанного с посещением офиса, в то время как сообщество освещения мотивировано максимально ограничивать спектральный диапазон для экономии энергии [66].

Однако наряду с вредоносным воздействием, кратковременное коротковолновое излучение синего спектра может способствовать повышению продуктивности, концентрации внимания, поэтому в офисных помещениях в течение естественной продолжительности светового дня использование систем искусственного освещения, с безопасной долей синего спектра будет оказывать положительный эффект.

2.5 Анализ существующих схемных/технических решений светодиодных источников света

Для обеспечения устойчивости свечения в современном световом светодиодном оборудовании используются специальные запускающие и стабилизирующие устройства, которые принято называть драйверами. Основная функция драйвера – получение необходимого падения напряжения на светодиодной матрице, а также амплитуды тока для достижения для р-п перехода.

Упрощенно схему драйвера для питания светодиодного светильника от сети 220 В можно представить в виде пары «гасящих» резисторов и пары светодиодов, подключенных к резисторам по встречно-параллельному принципу представлена на рисунке 2.19

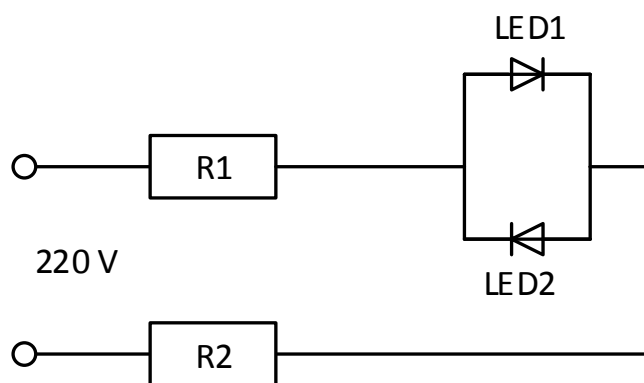


Рисунок 2.19 – Упрощенная схема питания ОПСИС

Такое включение ограничительных элементов обеспечивает защищённость схемы от обратных выбросов напряжения питания.

Одной из важнейших характеристик драйвера считается мощность, выдаваемая устройством в виде нагрузки.

На алгоритм расчета мощности драйвера влияет мощность каждого единичного светового источника, цветность свечения, (так как при прохождении электрического тока одинаковой величины через полупроводниковые кристаллы с разными цветовыми характеристиками светового потока, величина падения напряжения на кристаллах будет отличаться, в зависимости от цвета свечения кристалла) и общее число светодиодных матриц. Так величина падения напряжения на красном светодиоде при токе 350 мА составляет приблизительно 2В. У аналога зеленого цвета величина падения напряжения находится в пределах от 3 до 4В и при таком же токе мощность составит уже 1,25 Вт.

По типу устройства драйверы для светодиодов классифицируют на линейные и импульсные.

Драйвер линейного типа выполняет плавную стабилизацию тока при наличии неустойчивого напряжения на входе и представляет собой генератор тока на транзисторе с р-каналом. Такие драйверы отличаются простотой и дешевизной исполнения, но не отличаются высокой эффективностью, и не могут использоваться для светодиодов более высокой мощности.

Принцип работы импульсных драйверов, создающих высокочастотные импульсы в выходном канале построен на принципе широтно-импульсной

модуляции (ШИМ), где средняя величина тока зависит от отношения длительности импульса к числу его повторений. создают в выходном канале ряд высокочастотных импульсов.

Импульсные драйверы наиболее широко используются в светодиодном оборудовании. Такие преобразователи компактны, имеют высокий КПД и обширный диапазон величины входного напряжения. Однако, в драйверах данного вида наблюдается более высокий уровень электромагнитных помех.

Современные импульсные драйверы могут быть совместимы с устройствами, регулирующими яркость свечения светового оборудования. Такой драйвер называют диммируемым. Установка такого драйвера позволяет подключить светодиодный светильник к стандартному диммеру 220 В (управление TRIAC – полупроводниковый прибор, являющийся разновидностью тиристоров и используемый для коммутации в цепях переменного тока), с помощью которого можно осуществлять включение/выключение или уменьшение/увеличение яркости свечения светодиодного светильника. Что, позволяет получить более рациональное использование электроэнергии и экономию ресурса источника света.

Диммируемые драйверы бывают двух типов. Одни подсоединяются между блоком питания и светодиодными матрицами, другие осуществляют управление непосредственно самим источником питания светильника. Первый тип устройств управляет энергией, поступающей от источника питания к светодиодам посредством ШИМ-управления, где длительностью импульсов определяется максимальное и минимальное значение энергии.

Наибольшее применение такие драйверы нашли в светодиодных модулях с фиксированным напряжением (светодиодные ленты, бегущие строки).

Принцип работы диммируемых драйверов второго типа заключается в ШИМ-регулировании т.е в управлении величиной тока, протекающего через кристаллы. Такие драйверы применяются в светодиодных светильниках со стабилизированным током.

Сравнивая данные методы управления и регулирования, стоит отметить, что при регулировании величины тока наблюдается не только изменение яркости, но и цвета светового потока. Так, белые светодиоды при уменьшении тока излучают желтоватый свет, а при увеличении – передают синие оттенки.

Следует также отметить, что, осуществляя управление световым оборудованием через ШИМ-регулирование или ШИМ-управление, наблюдаются эффекты, которые негативно влияют на зрение, в следствие высокой интенсивности коротковолнового излучения с высокими значениями энергии синего и фиолетового спектров, которые считаются вредными для зрительной системы человеческого глаза.

Типовая схема источника питания светодиодного светильника представлена на рисунке 2.20.

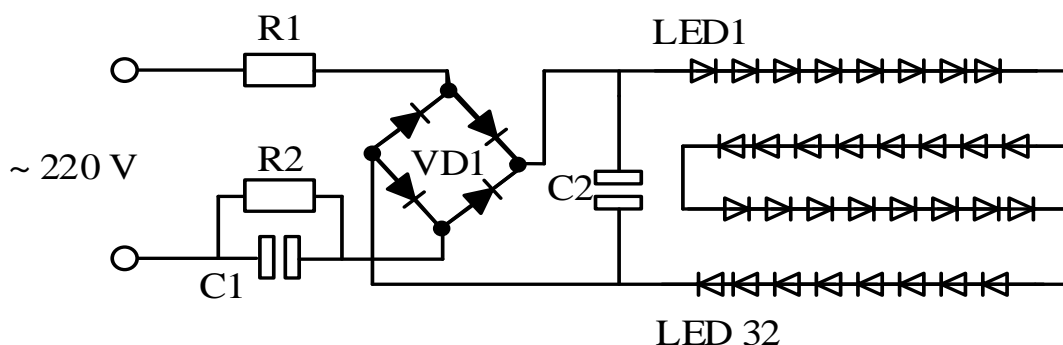


Рисунок 2.20 – Типовая схема источника питания ОПСИС

Функционирование данной схемы происходит следующим образом: переменное напряжение питающей сети 220 В подается через токоограничивающий конденсатор C1 на диодный мост VD1, с диодного моста выпрямленное постоянное напряжение подается на последовательно включенные светодиоды LED1-LED32; электролитический конденсатор C2 сглаживает пульсации выпрямленного напряжения, и позволяет исключить мерцание света с частотой 100 Гц, резистор R2 разряжает конденсатор C1, и таким образом исключается возможность удара электрическим током человека, в случае прикосновения к цоколю при наличии остаточного напряжения конденсатора в момент замены светодиодной лампы.

В данной схеме также отсутствует защитный резистор для конденсатора C2. Резистор в том месте цепи необходим для предотвращения пробоя в случае обрыва в цепи светодиодов. Со временем происходит уменьшение емкости конденсаторов, что приводит к увеличению частоты фликера. Количество последовательно включенных светодиодов данную схему может достигать до 80 шт. Данная схема не имеет гальванической развязки, и является небезопасной в следствие возможности поражения человека электрическим током.

Дополнительными недостатком данной схемы также являются частые скачки напряжения, которые могут приводить к мерцанию светодиодной лампы и вызывать необратимые процессы потери емкости и старения конденсаторов [68].

В настоящее время для управления пускорегулирующими устройствами часто используются ИМС, специально разработанные для питания мощных светодиодных источников света. предназначенных для управления мощными светодиодами. В даташитах таких ИМС приводят типовые схемы установки платы в цепь пускорегулирующего устройства. Примером одной и предлагаемых схем, является схема, представленная на рисунке 2.21.

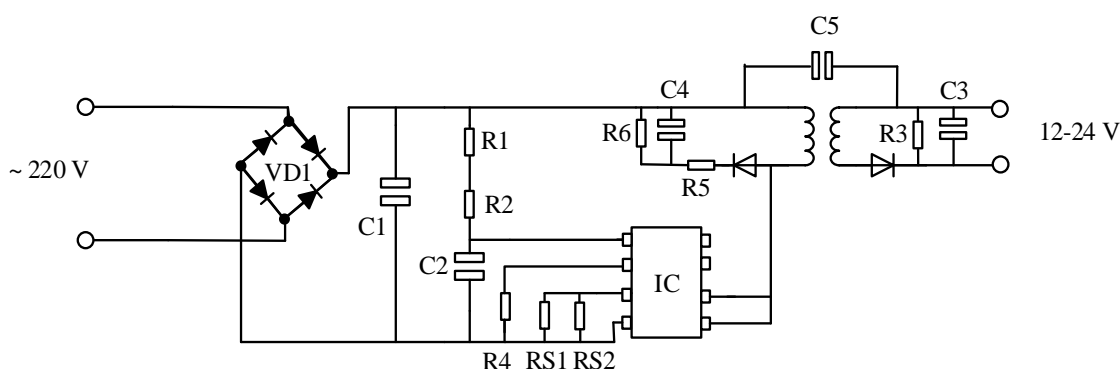


Рисунок 2.21 – Принципиальная электрическая схема пускорегулирующего устройства (светодиодного драйвера) ОПСИС с типовой ИМС

Драйверы на основе ИМС имеют небольшие габариты и не дешевы. ИМС как правило изготавливается в планарном исполнении с 8 выводами (SOIC-8) и имеет встроенный стабилизатор напряжения. Имеет встроенный стабилизатор напряжения, позволяющего достичь рабочего диапазона

напряжений от 12 до 500В от источника постоянного тока. Рабочий диапазон температур обычно указан от -40 до +85 °С, что говорит о пригодности использования для светильников наружного освещения с IP67 и выше.

Как правило работа светодиодного драйвера на основе такой типовой ИМС происходит по методу ШИМ. Как правило длительность паузы в данном случае величина постоянная, переменное напряжение выпрямляется за счет включения в цепь диодного моста, а затем сглаживается емкостным фильтром.

После процесса фильтрации напряжение поступает на вход VIN ИМС и запускается процесс формирования импульсов тока на выходе.

Ток на выходе является управляющим сигналом для силового транзистора. В момент, когда транзистор находится в открытом состоянии (время импульса ВКЛ) ток нагрузки протекает по цепи через диодный мост. В этот период катушкой индуктивности накапливается энергия, для дальнейшей передачи ее в нагрузку во время паузы. В момент времени, когда транзистор находится в закрытом состоянии (время импульса ВЫКЛ) энергия катушки обеспечивает ток нагрузки в цепи. Процесс носит циклический характер с импульсами пилообразной формы (рисунок 2.22), где наибольшее и наименьшее значение импульса зависит от индуктивности катушки и рабочей частоты.

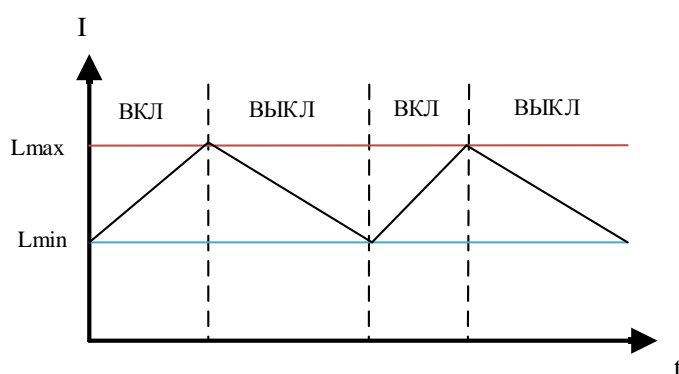


Рисунок 2.22 – График формы импульсов тока в процессе работы светодиодного драйвера

Описанная выше схема уже обеспечена гальванической развязкой, однако имеет большие массогабаритные параметры, в результате чего

дробление в виде последовательного соединения резисторов и параллельного соединения конденсаторов может значительно влиять на надежность устройства.

Важное значение для корректной работы светодиодных драйверов ОПСИС, работающих по принципу импульсных преобразователей, имеет наличие качественного заземляющего контакта и оптимальная длина проводников, во избежание дополнительных коммутационных помех и индукционных помех.

Приведем основные расчетные соотношения, влияющие на правильное функционирование светодиодного драйвера.

Для определения длительности паузы, которая задается внешним резистором используют формулу:

$$t_{\text{п}} = \frac{R_t}{66000 + 0,8}, \text{ мкс.}$$

Через коэффициент заполнения и частоту время паузы можно связать как:

$$t_{\text{п}} = \frac{1 - D}{f} \text{ (сек.)},$$

где D – коэффициент заполнения, представляющий отношение длины импульса к его периоду.

Номинал сопротивления выбирают исходя из амплитудного значения тока, протекающего через светодиод, и рассчитывают по формуле:

$$R_s = \frac{U_{cs}}{I_{LED} + 0,5I_{\text{пульс}}},$$

где U_{cs} – калиброванное опорное напряжение, которое чаще всего принимают равным 0,25 В;

I_{LED} – ток, протекающий через светодиод;

$I_{\text{пульс}}$ – величина пульсаций тока нагрузки, обычно не более 30% от номинальной величины тока нагрузки.

Трансформатор следует подбирать таким образом, чтобы ток дросселя плавно нарастал за время длительности импульса и убывал во время паузы. Как правило, задача выбора трансформатора сводится к обеспечению

компромисса между достаточным качеством выходного сигнала и небольшими размерами самой катушки.

Индуктивность можно рассчитать следующим образом:

$$L_{LED} = \frac{U_{SLED} \cdot t_{п}}{I_{пульс}},$$

Для обеспечения сглаживания выпрямленного напряжения, а также для фильтрации гармонических искажений в цепь могут устанавливаться несколько конденсаторов. Так как основные ИМС, применяемые для работы светодиодных драйверов, могут функционировать в широком диапазоне входного напряжения, а также из-за массогабаритных показателей, используются малые емкости от 01 до 30мкФ в зависимости от назначения и рекомендаций производителя ИМС, также производителями часто рекомендуется использование конденсаторов с малым эквивалентным последовательным сопротивлением (ESR – Equivalent series resistance – конденсаторы и катушки индуктивности, которые используются в электрических цепях, не являются идеальными компонентами, имеющими только емкость или индуктивность), для уменьшения высокочастотных помех, которые могут возникать во время работы драйвера. Как правило используемые конденсаторы должны выдерживать напряжение не менее 400В.

Диодный мост, выполняющий функцию выпрямителя, выбирается исходя возможных максимальных значений прямого тока и обратного напряжения. Как правильно, обратное напряжение принимается равным не менее 600В.

Величину прямого тока можно рассчитать через ток нагрузки по формуле:

$$I_{AC} = \frac{\pi \cdot I_{LED}}{2\sqrt{2}}, \text{ А.}$$

Так как работа преобразователя происходит в импульсном режиме, транзистор следует выбирать, учитывая его частотные характеристики и с как

можно меньшим временем восстановления, что позволит свести к минимуму влияние переходных процессов с частотой до 100 кГц.

Для того, чтобы ограничить пусковые токи драйвера, возможно установить терморезистор, который будет нести свою основную функцию, когда фильтрующий конденсатор разряжен и защищать диоды выпрямителя от пробоя в момент включения.

Рассчитать номинал резистора можно по формуле:

$$R_{TH} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{5I_{AC}}, \text{ Ом.}$$

Многие ИМС, используемые в драйверах светодиодных светильниках, например на основе CPC9909 (рисунок 2.23) и пр., позволяют обеспечить смягчение включения и постепенное нарастание яркости. ИМС с такой функцией хорошо применять в тех ОПСИС, где возможно резкое включение в ночное время, так как тогда не будет такого сильного давления на органы зрения человека, включающего свет в помещении в условиях полной темноты.

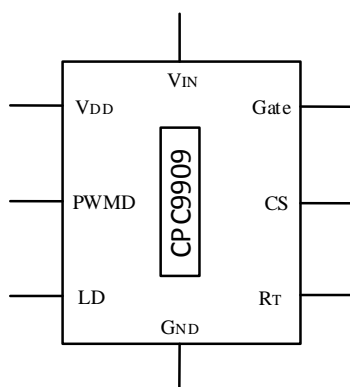


Рисунок 2.23 – Выводы ИМС, которые используются для формирования светодиодных драйверов

В данном случае плавный пуск можно реализовать, используя два постоянных резистора, которые должны быть подключены к выводу LD на плате.

Производители данных ИМС утверждают, что такое решение может продлить срок службы источника света. Через вывод LD также можно реализовать возможность аналогового диммирования, подключив к выводу

переменный резистор, за счет которого можно плавно изменять потенциал на LD-выводе ИМС.

На рынке также существуют решения ОПСИС с управлением свечением через импульсы прямоугольной формы. Для этого обычно используется микроконтроллер или генератор импульсов, которому, однако, потребуется дополнительная защита от перенапряжения на другой стороне микросхемы, поэтому важно предусмотреть разделение цепи, например, через оптопару.

2.6 Формализация критериев оценки технического уровня ОПСИС на основе произведенных экспериментов и исследований.

В общем случае в понятие технического уровня вкладывается нормальное функционирование изделия техники на протяжении его срока службы. Как правило, к группе основных критериев оценки технического уровня изделия относятся такие критерии как безопасность, надежность, функциональность, безвредность. На основе данных групп критериев в рамках проводимых диссертационных исследований был сформулирован и разработан реестр технических потребительских свойств для оценки технического уровня ОПСИС, который представлен в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Предлагаемые критерии оценки технического уровня ОПСИС

Обозн. критерия	Общий критерий	Формализованный показатель		Обозн. показателя	Характер влияния
		Для группы светильников	Для одного светильника		
I ₁	Безопасность	Доза фликера	Коэф. пул., %	P ₁₁ / P ₁₂	Обратн.
		Изменения среднеквадратичного значения напряжения, %	-	P ₁₃	Обратн.
		-	Наличие гальванической развязки	P ₁₆	Прям.
I ₂ /I ₃	Функциональность (ЭМС/Энерг. эффективность)	% Высокочастотной гармонической составляющей нечетного порядка по току	-	P ₂₁	Обратн.
		% Высокочастотной гармонической составляющей	-	P ₂₂	Обратн.

		нечетного порядка по напряжению			
		-	Отклонение от заявленной мощности, %	П ₃₁	Обратн.
		Tan (f)	Cos (f)	П ₃₂ / П ₃₃	Прям.
		% измеренной вносимой реактивной составляющей	-	П ₃₄	Обратн.
		-	Эквивалентная мощность лампы накаливания (эффективность)	П ₃₅	Прям.
I ₄ / I ₅	Надежность + эффективность теплоотвода	-	Тепловая характеристика подложки светодиодов	П ₄₁	Обратн.
		-	Тепловая характеристики матрицы светодиодов	П ₄₂	Обратн.
		-	Тепловая характеристика светодиодного драйвера	П ₄₃	Обратн.
		-	Тепловая характеристика корпуса	П ₄₄	Обратн.
		-	Наличие радиатора	П ₄₅	Прям.
		-	Прогноз ускоренного старения светового потока	П ₅₁	Обратн.
		-	Ремонтопригодность	П ₅₂	Прям.
		-	Зависимость изменения освещенности и коэф. пул. от циклов вкл./выкл.	П ₅₃	Обратн.
		% изменения цветопередачи со временем эксплуатации в группе светильников	% изменения цветопередачи со временем эксплуатации для 1 шт.	П ₅₄	Обратн.
I ₆	Безвредность + эстетическое восприятие	-	Индекс цветопередачи	П ₆₁	Прям.
		-	Гибкость управления	П ₆₂	Прям.
		-	Повышенное содержание спектра синего света	П ₆₃	Обратн.
		-	Вероятность вторичного использования компонентов	П ₆₄	Прям.

Основываясь на проведенных исследованиях и полученных экспериментальных данных выявлено, что в случае с ОПСИС определенные критерии следует рассматривать не только для одного изделия, но и для группы изделий. Поэтому в обобщенный критерий безопасности были включены такие критерии как коэффициент пульсаций, который измеряется для одного светильника, а для группы светильников схожий по свойствам параметр дозы фликера. Параметр изменения среднеквадратичного значения напряжения влияние на возможные просадки напряжения в сети, данный параметр также актуален для оценки технического уровня при подключении ОПСИС в группы. Критерий наличия гальванической развязки также напрямую связан с безопасностью ОПСИС с точки зрения поражения электрическим током.

Группа критериев по функциональности разбита на две подгруппы показателей одна из которых это электромагнитная совместимость изделия, включающая в себя такие параметры как генерация Высокочастотной гармонической составляющей нечетного порядка по току и напряжению, отклонение от заявленной мощности, процент измеренной вносимой реактивной составляющей, измеренный $\text{Cos}(f)$, $\text{Tan}(f)$, а также эквивалентная мощность лампы накаливания.

В группу критериев по надежности входят такие параметры как Прогноз ускоренного старения светового потока, ремонтпригодность, зависимость изменения освещенности и коэффициента пульсаций от циклов включения, процент изменения цветопередачи со временем эксплуатации как для одного светильника, так и для группы, а также различные параметры, позволяющие производить оценку эффективности тепловых характеристик ОПСИС.

Также, на основании проведенных исследований жизненного цикла ОПСИС, в группу критериев по безвредности было принято внести такие параметры как отличие от заявленного изменения индекса цветопередачи, который дополнительно может изменяться с течением времени эксплуатации ОПСИС, гибкость управления, (предполагается, что данный критерий должен

учитывать как возможности управления яркостью, цветовой температурой так и параметрами пуска драйвера и зажигания светодиодов), параметр содержания спектра синего света в наиболее вредоносной для человека области, а также вероятность и возможность вторичного использования компонентов ОПСИС.

Результаты и выводы по главе 2

1. В электрической сети исследуемого административного объекта было обнаружено значительное преобладание высокочастотных гармоник тока сопоставимых по мощности с основной. У всех исследуемых ОПСИС, было 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. Наиболее выраженными оказалась гармоническая составляющая 3-й гармоники тока, которая по своей амплитуде доходила до 45 % в пиковых значениях. Наличие 7-й гармоники тока, в моменты пика доходило до 15-19%, наличие 9-й, 11-й также находилось в зоне высоких значений, выходящих за пределы 7-10%. Также были обнаружены нехарактерные для такого вида нагрузки четные гармоники, их наличие в электрической сети варьируется от 0,5 % до 2,5 %. Чередуюсь от 2-го до 10-го порядка. Было выдвинуто предположение, что значительная часть высокочастотных нечетных гармоник генерируется в результате присутствия нелинейных сопротивлений в электромеханической системе ОПСИС.

2. По результатам сравнительных испытаний бытовых светодиодных ламп видно, что у более дешевых образцов заявленные характеристики мощности отличаются в худшую сторону, причем в некоторых случаях более чем 25%. Параметры светового потока отличались на 10-20% от заявленного. Аналогично выявлена проблема появления высоких пульсаций (приблизительно 10-12%), что не удовлетворяет требованиям санитарных

норм и правил, но стоит отметить, что данной проблемы не наблюдается в потолочных светодиодных светильниках и светодиодных трубках (аналогов люминесцентных ламп) [61]. При измерениях напряжения на выводах светодиодной матрицы у всех ламп наблюдались показатели высокого напряжения, колеблющееся в пределах 300 В.

3. Температура жизненно-важных элементов в электромеханической системе исследуемой бытовой светодиодной лампы в выбранном эксплуатационном режиме через 15 минут работы достигает ~ 95 °С. Было выявлено, что при нагреве до 98 °С, происходило небольшое снижение освещенности черного ящика на 4-6 %, также было установлено, что при нагреве до 105 °С, освещенность уменьшалась на 17 %. В результате чего был сделан вывод о нелинейном характере изменения интенсивности излучения светодиодного источника света. Таким образом, было обнаружено, что для исследуемой бытовой светодиодной лампы температура 95 °С являлась оптимальной по эффективности излучения светового потока.

Однако, данная температура является близкой к критическим показателям для системы ОПСИС, особенно в лампах с конструкцией без дополнительного теплоотвода, что может способствовать ускоренной деградации светодиодных источников света, а также остальных элементов системы и приводить к постепенному уменьшению яркости излучения.

Также была выявлена зависимость изменения освещенности в зависимости от прохождения циклов включения/выключения светодиодной лампы. Было обнаружено, что на момент прохождения 2200 циклов включения/выключения уменьшение освещенности составило 30% (~ 700 Лм) от измеренного в начале испытаний значения ~ 1040 Лм.

4. С увеличением прохождения циклов включения/выключения бытовой светодиодной лампы, возрастал и коэффициент пульсаций, возросший к концу испытаний с 13,2 % до 17,8%. В результате чего подтверждены предположения о влиянии циклов включения/выключения не только на светодиодный источник света, но и на компоненты светодиодного драйвера.

5. Средства определения срока службы в настоящее время не полностью стандартизованы, и многие например (методы определения интенсивности силы света ОПСИС) до сих пор находятся на стадии рассмотрения. Также, нормативными документами практически не учтены классификаторы по степени влияния светодиодных источников света на здоровье и нервную систему человека, что говорит о необходимости разработки и уточнения классификации светодиодных источников света по степени риска возникновения негативного влияния на человеческий организм.

3 АНАЛИЗ И ПОВЫШЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВЕТОДИОДНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

3.1 Квалиметрическая модель оценки эффективности теплоотводов светодиодных осветительных приборов на основе моделирования их тепловых характеристик

В настоящее время существует множество статей и исследований, посвященных построению математических моделей, описывающих или уточняющих процессы нагрева и теплообмена светодиодных источников света различных форм исполнения и мощностей. Однако всю полную картину протекающего процесса передать математической моделью очень непросто из-за необходимости принятия различного рода допущений и приближений для исследуемого протекающего процесса.

Существует большое количество тепловых моделей, основанных на идее тепловых сопротивлений кристаллов светодиода и его подложки, однако в данных исследованиях часто не учитывается факт закрытого пространства светодиода [73, 83, 84].

Примером такого пространства может являться не только сам корпус светодиодного светильника или светодиодной лампы, но и простой бытовой плафон, в который помещается светодиодная лампа. Опыт обслуживающих светодиодное освещение и эксплуатирующих организаций показывает, что помещенная в замкнутое пространство светодиодная лампа выходит из строя на 30% быстрее, за счет ухудшения процессов теплообмена и ускорения механизмов старения в химических веществах и гетероструктурах светодиодов.

Известно, что «распределение температуры и плотности мощности в гетероструктурах светодиодов является существенно неоднородным» [69].

Наиболее сильно эффект неоднородного распределения температуры и

плотности тока проявляются в динамических (импульсных) режимах [70]. Также известны достаточно существенные по своему масштабу влияния факторы окружающей среды на различные характеристики светодиода (энергетические – изменение светового потока, осевой силы света и др., электрические – изменение потребляемой энергии за счет перегрева, калориметрические – изменение спектральной эффективности света и др.) [69, 70].

В связи с этим предложен вариант задачи, в которой рассматривается процесс тепломассопереноса в светодиодном источнике света с учетом нахождения светодиода в замкнутом пространстве плафона и с использованием уравнений Пуассона.

Необходимо отметить, различие температур на поверхности кристалла и в области р-п-перехода. Данное замечание принципиально, так как от температуры на поверхности кристалла зависит срок службы источника света, а от температуры в области р-п-перехода – световая отдача (яркость светодиода падает, из-за уменьшения внутреннего квантового выхода посредством влияния колебаний кристаллической решетки).

Известно, что чем больше ток, протекающий через светодиод, тем больше световой поток, излучаемый данным источником света, и чем выше поднимается температура, тем быстрее наступает старение источника света. Это связано с увеличением тока в активной области при рекомбинации электронов и дырок в области р-п перехода, другими словами, за тот же промежуток времени число электронов, попадающих в данную зону, растет. Также, за счет повышения внутреннего сопротивления в области р-п перехода, происходит дополнительный нагрев элементов системы.

В светодиодных источниках света с белым свечением с ростом температуры наблюдается эффектом термического гашения, который оказывает негативное влияние на работу светодиода [71].

Нередко, эффект термического гашения наблюдают уже при 80-100 °С [72, 73].

Наиболее распространенным типом конструкции крепления светодиода на подложке является корпусная конструкция с односторонним отводом тепла [74]. Особенности конструкции большинства ОПСИС приводят к тому, что зачастую все источники тепла в системе расположены на тонком слое термокомпенсирующей прокладки и рядом с рабочей поверхностью полупроводниковой структуры.

Что касается контроля тепловых параметров ОПСИС, что нормативными документами, в настоящее время, единственным тепловым параметром ОПСИС, к которому предъявляются требования это тепловое сопротивление переход-корпус, через которое определяют отношение величины нагрева активной области светодиодов и температуры корпуса при рассеивании мощности 1 Вт [75,76].

С целью повышения достоверности отбраковки приборов с дефектами теплоотвода, ведется активная разработка методов и средств измерения теплового сопротивления отдельных слоев конструкции полупроводниковых приборов и в том числе ОПСИС. При реализации данных методов обычно принято решать задачу через идентификацию параметров тепловых схем замещения, для чего необходимым является интегральное измерение тепловых характеристик приборов.

Зададимся необходимыми допущениями:

- 1) Основным источником тепловой энергии в светодиоде является ток, протекающий через р-п переход в кристалле светодиода, в результате чего светодиод выделяет тепловую энергию в виде излучения, которая передается на остальные элементы системы.
- 2) Светодиод состоит из кристалла, покрытого люминофором, нагрев подложки, на которую установлен светодиод, происходит в основном за счет теплопроводимости кристалла.
- 3) Пиковая точка нагрева системы с течением времени возрастает, за счет чего происходит деградация люминофорного слоя и выхода светодиода из строя.

4) Люминофор – однородная среда с постоянными теплофизическими характеристиками.

5) Изменением запрещенной зоны кристалла светодиода с ростом температуры можно пренебречь.

Принятые допущения являются типовыми для построения такого рода тепловых моделей [83].

Для исследуемой математической модели светодиодной бытовой лампы в программной среде SolidWorks была построена трехмерная модель лампы физический аналог, которой испытывался ранее [14].

Ниже изображена модель исследуемой светодиодной лампы с учетом реальных размеров, электрических и тепловых характеристик физического аналога. Построение модели происходило в среде SolidWorks и показано на рисунке 3.1

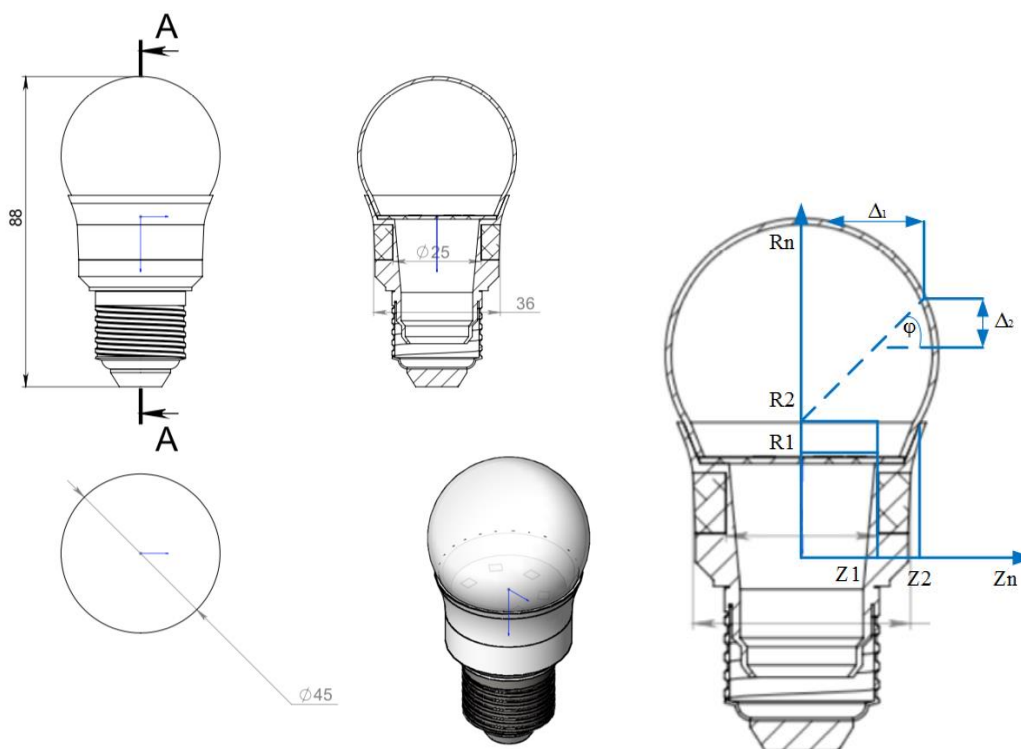


Рисунок 3.1 – Эскиз модели исследуемой светодиодной лампы

Из рисунка видно, что основную роль в трудоемкости задачи играет конфигурация источников света и наличие сферического замкнутого пространства.

Опишем количество тепла, которое выделяется светодиодом при

протекании через кристалл светодиода электрического тока на основе закона Джоуля-Ленца [77]:

$$Q = I^2 \cdot R t$$

где Q – количество тепла, которое выделяется при протекании электрического тока через кристалл светодиода, Дж;

I – сила тока, А;

R – электрическое сопротивление, Ом;

t – время, с.

Чтобы описать поставленные физические условия задачи в комплексе с процессами тепломассопереноса, которые рассматриваются в среде «подложка светодиода – кристалл, покрытый люминофором – корпус лампочки – воздух в плафоне» составим дифференциальные уравнения, образующие систему, на основании существующих источников, позволяющих описать уравнение энергии тепломассопереноса для подложки светодиода ($0 < R < R_2$; $0 < Z < Z_1$) [78]:

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

Уравнение энергии тепломассопереноса для кристалла, покрытого люминофором ($0 < R < R_1$; $Z_1 < Z < Z_2$):

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

Уравнение энергии тепломассопереноса для светодиода корпусе лампы (сферическая часть) ($0 < \varphi < \varphi_m$; $0 < Z < Z_m$):

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

Уравнение энергии тепломассопереноса для корпуса лампы в плафоне ($0 < R < R_3$; $\Delta_1 \leq R < R_3$ $\Delta_1 + Z_2 \leq Z < Z_3$ $Z_3 < Z < Z_4$):

$$\rho_4 C_4 \frac{\partial T_4}{\partial t} = \lambda_4 \left(\frac{\partial^2 T_4}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_4}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial \varphi_2^2} \right).$$

Уравнение энергии тепломассопереноса для воздуха внутри плафона

$(0 < R < R_4; Z_4 < Z < Z_5)$:

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

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

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

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.

В случаях с системами уравнений такого рода, полученный результат рекомендуют свести к виду стационарного уравнения теплопроводности с температурозависимыми коэффициентами теплопроводности $\lambda_i(T)$ [78].

Граничное условие на верхней границе структуры:

$$-\lambda_i(T) T_z(x, y, z) = \begin{cases} \frac{P}{S_m} (x, y) \in \Pi_m, \\ 0, (x, y) \in (\Pi_0 - \Pi_m) \end{cases},$$

где Π_0, Π_m – области поверхности полупроводниковой структуры и металлизации соответственно;

P – электрическая мощность, подводимая к светодиоду.

На нижней границе структуры, которая находится в контакте с корпусом светодиода, принимается условие растекания теплового потока:

$$-\lambda_i(T)T_z(x, y, 0) + \alpha\sqrt{\pi}\lambda_{\text{кор}}(T(x, y, 0) - T_0) = 0,$$

где α – эффективный коэффициент теплообмена, который выбирают в зависимости от экспериментальных данных величины перегрева структуры светодиода;

$\lambda_{\text{кор}}$ – теплопроводность корпуса.

Для определения температурного поля Θ^i в рассматриваемой системе при выполнении первого шага по времени выстраивается итерационный цикл.

В данном случае начальное приближение рекомендуют задавать через значения сеточной функции, взятые из предыдущего временного слоя.

Окончание цикла итераций обычно сводят к выполнению условия, а в случае высокой скорости тепломассопереноса дополнительно ограничена условием «усреднения итераций»:

$$\max|\Theta^i - \Theta^{i-1}| \leq \delta,$$

где δ – заданная точность, i – номер итерации.

Полученным промежуточным результатом решения, методом конечных разностей, описывающим поставленную математическую задачу, можно считать рассчитанную температурную зависимость для подложки светодиода smd 2835 0,2W, показанную на рисунке 3.2.

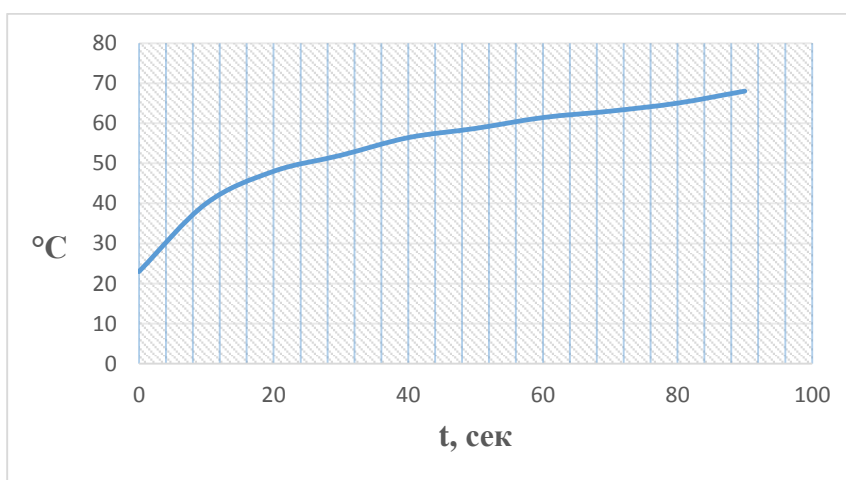


Рисунок 3.2 – Расчетная температурная зависимость в граничных условиях подложки светодиода

Полученные данные предполагается использовать для оценки технического уровня производится по квалиметрической модели на основе показателей тепловых характеристик изделия:

$$I_i = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m (\Pi_{ijk} Z_k),$$

где I_i – оценка показателя технического уровня эффективности теплоотвода

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

m – показатели более низкого уровня,

n – количество показателей первого уровня Z_k веса

$$Z_k = \frac{R_k}{R},$$

где R_k величина разброса по каждому показателю Π_{ijk} :

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

R – сумма величин разброса,

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

Приведем пример расчета технического уровня продукции в соответствии с разработанным реестром характеристик, подробно описанных в п. 2.6. данного диссертационного исследования, для критерия из группы надежности (подгруппа эффективность теплоотвода, обозначение критерия I_4).

Расчет происходит следующим образом:

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

Итогом применения разработанной квалиметрической модели и формализованных критериев будет оценка наиболее приемлемого для использования изделия из моделей рассматриваемой группы однотипного

оборудования, у которого значение итогового ранга в данном случае окажется наименьшим.

Следует отметить, что в таблице присутствуют показатели словесной оценки, которые приведены к числовым, как например показатель «Наличие радиаторов». Показатели, которые изначально характеризуются словесно рекомендуется также переводить в числовые параметры. Так как подавляющее большинство в группе критериев тепловой эффективности носят обратный характер, то есть чем меньше показатель – тем лучше, то для показателя «Наличие радиатора» примем числовое значение равное 0,67 при отсутствии радиатора и 0,33 при наличии.

В данном примере используются веса критериев, которые отражают разброс оценок, для этого следует произвести переход к безразмерным оценкам показателей. Так как в данном примере большинство показателей подлежат минимизации (обратный характер) то из показателей и оценки по данным критериям будет выбрана минимальная и поделена на все оценки по данному показателю.

Разброс оценок по критерию определим следующим образом:

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

Среднюю оценку по показателю для обобщенного критерия находим как:

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

Полученные расчеты сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Пример расчета оценки технического уровня по критерию эффективность теплоотвода для выбранных бытовых светодиодных ламп

Обозн. критерия	Общий критерий	Формализованный показатель			Вес показателя, P_{ij}		
		СД1	СД2	СД3			
I ₄	Эффективность теплоотвода	Смоделированная температура подложки светодиодов спустя 90 секунд нагрева			СД1	СД2	СД3
		68,8	73,9	72,3	0,93	1	0,98
		Смоделированная температура матрицы светодиодов спустя 90 секунд нагрева					
		66,3	73,1	71,0	0,91	1	0,97
		Смоделированная температура светодиодного драйвера спустя 90 секунд нагрева					
		53,5	58,2	58,8	0,92	0,99	1
		Смоделированная температура корпуса спустя 90 секунд нагрева					
		40,3	42,1	40,1	0,96	1	0,95
		Наличие радиатора					
		нет	нет	нет	0,67	0,67	0,67
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 можно сформировать шкалу оценки технического уровня по рассматриваемому критерию (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Шкала оценки технического уровня

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

На основе проведенного моделирования полученных оценок тепловых характеристик элементов светодиодных ламп следует вести разработку технических решений по улучшению эффективности отвода тепла в бытовых светодиодных лампах малой мощности и других ОПСИС.

3.2 Компьютерное моделирование полученной тепловой модели осветительного прибора

Как было сказано выше, построение тепловой модели происходило в среде SolidWorks. Геометрия расчетной области состоит из поликарбонатного корпуса и прозрачного светорассеивающего плафона, печатной платы из карбида кремния, драйвера и закрепленных на ПП 6 светодиодных матриц.

Как известно, по функционалу программы указание значений температур только на границе может быть нерациональным, в связи с принятием для всех других местоположений температуры с нулевым значением. При указании температуры только для границы, сначала может потребоваться создание и решение термического исследования для расчета температур во всех узлах. Аналогично описанным выше итерациям в Solidworks Simulation производится расчет по методу конечных объемов. В данной надстройке появляется возможность симулировать течение воздуха, при этом коэффициенты конвекции программа вычисляет самостоятельно.

Возможны также вычисления через анализ конечных элементов (АКЭ), который представляет собой цифровой метод анализа технических конструкций. В целом алгоритм решения заключается в создании геометрической модели объекта и делении ее на малые элементы простой формы, которые соединяются в узлы сетки. В АКЭ предполагается, что модель представляет собой набор дискретных связанных между собой элементов.

Важный этап в проведении компьютерного моделирования – правильное задание сетки с учетом глобальных размеров и характеристик сетки.

Программой определяются размеры элементов, объем модели, площадь поверхности и прочие геометрические характеристики.

Наличие контактных поверхностей обычно является источником нелинейности. Хотя нелинейные исследования обычно используются для решения задач контакта, программа позволяет использовать статические

исследования для решения задач контакта при малых или больших перемещениях.

Окно задания параметров теплового моделирования выглядит следующим образом (Рисунок 3.3). Здесь важно не перепутать координаты и не получить отрицательные значения Y-компоненты в разделе гравитация.

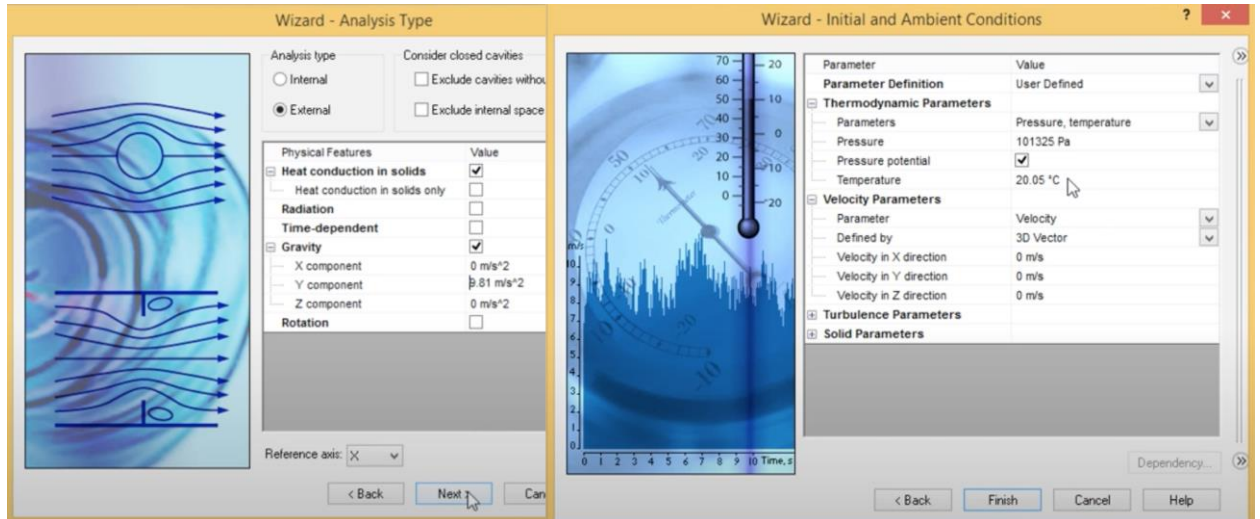


Рисунок 3.3 – Окна ввода основных параметров

Теплопроводность задавалась равной 1Вт/м/К. Граничное условие на тепловой поток задавалось под светодиодами, суммарное значение теплового потока было равно 6,5 Вт для всей лампы. На открытых границах ставились мягкие граничные условия с температурой 25 °С.

На рисунке 3.4 показано тепловое моделирование исследуемой светодиодной лампочки.

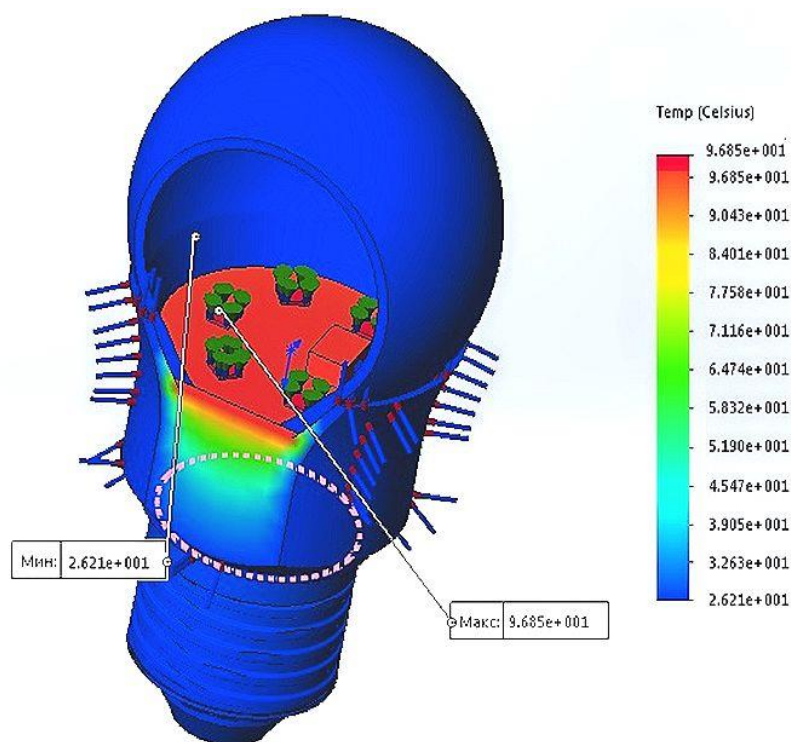


Рисунок 3.4 – Тепловое моделирование исследуемой светодиодной лампы

Результаты моделирования показывают, что основное тепло передается непосредственно от полупроводникового кристалла на его металлическую подложку (корпус лампы) за счет механизма теплопроводности. Лишь 5% тепла уходят в виде теплового (инфракрасного) излучения. Между экспериментальными и расчетными зависимостями температуры наблюдается удовлетворительное соответствие. Сходство между экспериментальными и расчетными значениями температуры является удовлетворительным, а погрешность связана с невозможностью точно определить геометрические и теплофизические характеристики структуры реальных СИД, а также погрешностью измерений.

При дальнейшем исследовании 3D модель лампы была условно перенесена в среду замкнутого имитирующего пространства плафона, было принято допущение, что внутреннее пространство плафона однородно, и что в рабочем состоянии воздух внутри плафона прогревается до 45 градусов Цельсия.

Полученные результаты моделирования показаны на рисунке 3.4.

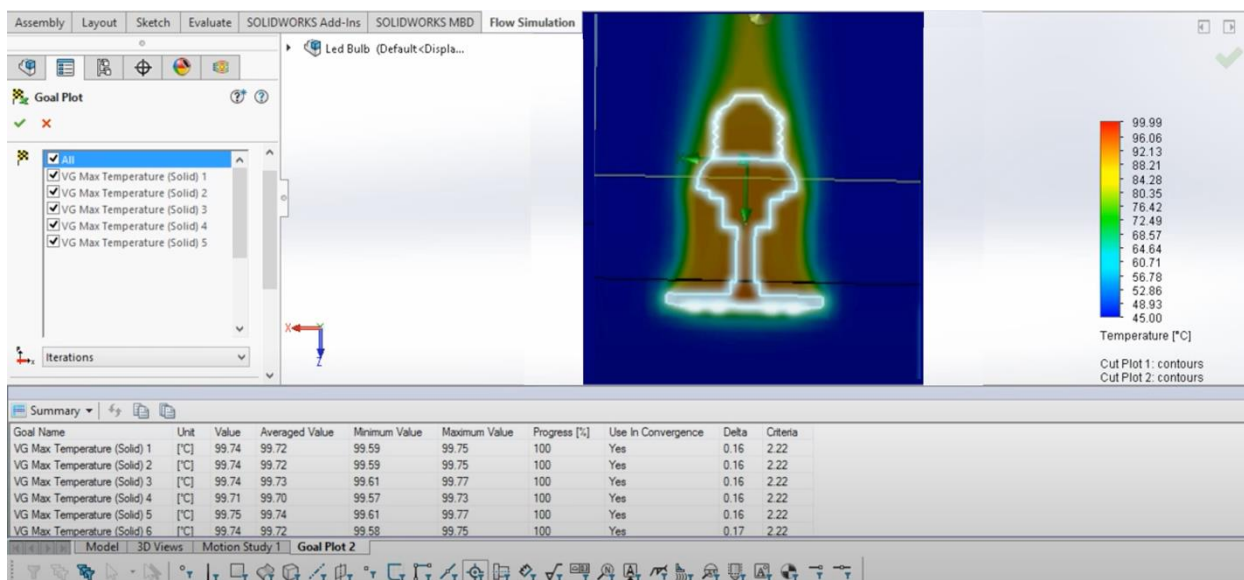


Рисунок 3.5 – Результаты теплового моделирования исследуемой светодиодной лампы в пространстве, нагретом до 45 градусов Цельсия

Как видно из моделирования максимальная температура стала выше на 3,1 градуса, что в данном случае может расцениваться как весьма критический результат.

Для измерения параметров тепловых моделей ОПСИС использовался экспериментальный образец, описанный в предыдущем разделе.

В результате работы была проведена оценка эффективности теплоотвода в пластиковых корпусах светодиодных ламп. По полученным тепловым моделям можно производить предварительное проектирование величины максимальной температуры с учетом теплопроводности и формы материалов корпуса и других элементов электромеханической системы светодиодной лампы.

На основе полученных данных можно сделать вывод о недостаточной теплопроводности элементов корпуса исследуемой лампы и необходимом увеличении теплопроводности материалов корпуса.

Результаты моделирования подтверждают проблему обеспечения рабочего теплового режима светодиодной лампы, обусловленную ограниченными размерами, удешевлением конструкции и необходимостью монтажа светодиодного драйвера.

Из проведенных исследований можно сделать вывод, что одним из способов повышения эффективности ОПСИС является точное проектирование и управление температурными режимами.

3.3 Разработка предложений и технических решений по оптимизации параметров теплообмена светодиодного светильника

Стремительный прогресс в создании все более мощных и миниатюрных ОПСИС породил ситуацию, когда отвод тепла, неизбежно возникающего при работе мощных и мощных светодиодов, стал одной из главных проблем для стабильной работы устройства. С повышением температуры кристалла (выше 80-100°C) его яркость падает, а дальнейшее увеличение температуры приводит к его пробою. Поэтому правильное охлаждение является центральным в процессе проектирования ОПСИС. Следствием несоблюдения тепловых режимов ОПСИС, помимо резкого сокращения срока службы, будет являться снижение световой эффективности, изменение цветовой температуры. Специалисты отмечают, что уже при температуре окружающего светодиодный модуль воздуха свыше 80 °C интенсивность свечения падает примерно на 15% от нормального (эквивалентного комнатной температуре 20°C) значения.

Исследования показывают, что «у светодиодов присутствует отрицательный температурный коэффициент прямого напряжения, т.е. при повышении температуры происходит уменьшение прямого напряжения светодиодов. Обычно этот коэффициент составляет от -3 до -6 мВ/К, поэтому прямое напряжение типового светодиода может составлять 3,3 В при +25 °C, но при этом будет составлять только 3 В при +75°C» [79].

Данный факт означает, что при выборе источника питания, с учетом режима работы ОПСИС при повышенных температурах окружающей среды, необходимо соблюдения условий, при которых будет допустимо снижение питающего тока на выводах светодиодов.

В противном случае, для корректной работы ОПСИС необходимо обеспечивать температуру области р-п-перехода и источника тока не более 80°C, иначе повышенная температура окружающей среды повлечет за собой потерю мощности свечения и снижение качества света. Проблемы разработки адекватной системы охлаждения для ОПСИС еще более усугубляются постоянным рыночным спросом на все более дешевую продукцию и уменьшения размеров ОПСИС.

В данном случае, особенно в конструкциях, где не предусмотрен радиатор явной проблемой управления отводом тепла является контактные полости и шероховатости, которые не позволяют обеспечить должный контакт для полноценного раскрытия теплопроводящих свойств материалов, а использование теплопроводящих паст не всегда возможно ввиду особенностей конструкции.

Процесс теплообмена между различными слоями конструкции изделия удобно разделять на уровни, для ОПСИС с радиатором обобщенное разделение на уровни передачи тепла показано на рисунке 3.6.

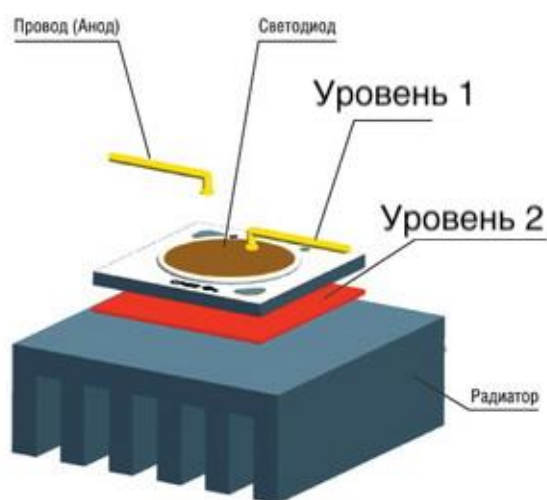


Рисунок 3.6 – Уровни теплопередачи в ОПСИС

На первом уровне происходит передача тепла от светодиода к его основанию (подложке) и далее на печатную плату. На этом уровне характерна значительное количество передачи теплового потока через относительно малую площадь поверхности. Для обеспечения эффективного процесса теплообмена на первом уровне необходимо использование материалов,

обеспечивающих наименьшее тепловое сопротивление. Дополнительно для этого следует использовать применение пайки, теплопроводящих клеев и паст с теплопроводностью до 7 Вт/м·К, однако, следует учитывать широкий диапазон рабочих температур ОПСИС, способных сохранять работоспособность от - 40 °С окружающей температуры, то до +105°С в «горячей точке» изделия. Нередки случаи, когда при использовании теплопроводящих паст, не способных поддерживать свои рабочие свойства в данных температурных режимах, происходило высыхание поверхностных слоев пасты, что приводило к выходу из строя светодиодного источника света [79].

На втором уровне происходит передача тепла от подложки светодиодного источника света, установленного на печатной плате на основание теплоотвода (если таковой имеется) или корпус. В конструкциях бытовых светодиодных ламп малой мощности в силу особенностей и размеров конструкции данный уровень характеризуется минимальной теплоотдачей на корпус изделия, при этом большая часть тепловой энергии передается на печатную плату светодиодного драйвера и в воздух внутри основания светодиодной лампы.

Тип корпуса для ОПСИС оказывает основное существенное влияние на процесс теплообмена. Подбор материала корпуса – одна из ключевых проблем в проектировании ОПСИС. В качестве примера можно привести светодиодные корпуса на основе свинцовой рамки и светодиодные корпуса на керамической основе, которые предлагают конструкторам различные подходы к передаче тепла.

В корпусах с основанием из свинцовой рамы полупроводниковый чип крепится непосредственно на саму раму, которая в большинстве случаев состоит из медного сплава с различными видами покрытия. Начиная с барьерного слоя, тепло рассеивается из через светодиодный модуль (печатную плату) и основание (рама). Количеством теплопередачи через соединительные провода, как правило, пренебрегают.

В ОПСИС на основе керамических подложек полупроводниковый чип прикреплен к металлизационному слою керамики. Достаточно неплохая теплопроводность керамики позволяет распространять тепло вместе со слоем металлизации. Тепло, выделяемое в полупроводнике, распределяется через металлизационный слой и керамический материал основания и передается на печатную плату через паяльную подушку.

С увеличением температуры воздуха увеличивается и температура печатной платы с установленными на ней светодиодами. Чтобы компенсировать рост температуры корпуса светодиода, необходимо увеличивать размер печатной платы и/или размер радиатора, что часто бывает затруднительно из-за ограничений в размере корпуса готового устройства, а радиатор и вовсе может отсутствовать.

Следует также отметить условие, что пиковая длина волны излучаемого света будет изменяться примерно на 0,1 нм с каждым градусом относительно комнатной температуры (25°C). Отмечают, что с увеличением температуры свечение начинает приобретать голубые оттенки.

Данный факт также подтверждает необходимость использования в ОПСИС радиатора, не только с целью повышения надежности ОПСИС бытового назначения, но и с целью повышения устойчивости цветности свечения и безопасности для зрения.

Таким образом, при невозможности снизить тепловое сопротивление основных элементов ОПСИС, а также при повышении температуры окружающей среды, возникает необходимость уменьшения прямого тока, проходящего через светодиод, что тоже может негативно сказаться как на сроке службы ОПСИС, так и на качественных характеристиках осветительных приборов. Поэтому наиболее эффективным решением в данном случае является разработка элементов корпуса, способствующих увеличению отвода тепла, этого можно добиться в результате применения теплопроводящих вставок.

Для проверки данной гипотезы была разработана и смоделирована алюминиевая теплопроводящая вставка, после чего уже исследованная тепловая модель была изменена в соответствии с доработкой (рисунок 3.7).

Эскиз детали алюминиевой вставки, выполняющей роль дополнительного радиатора представлен на рисунке 3.8.

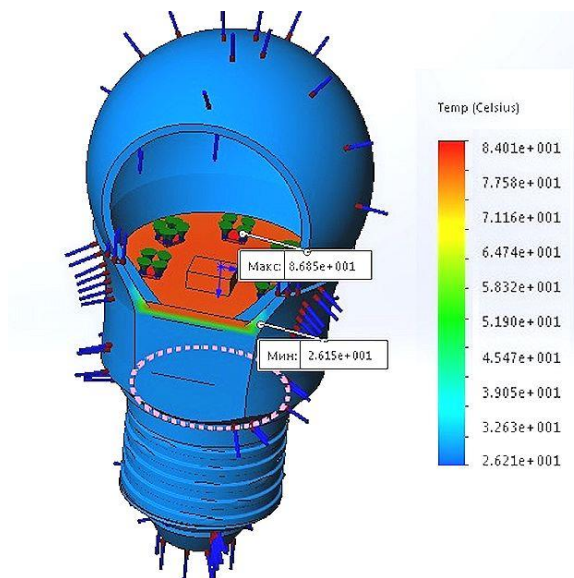


Рисунок 3.7 – Тепловая модель исследуемой светодиодной лампы с доработкой в виде алюминиевой вставки во внешней части корпуса

Как видно из графика распределения температуры, применение алюминиевой вставки во внешней части корпуса позволяет снизить максимальную температуру светодиодного модуля до 11%.

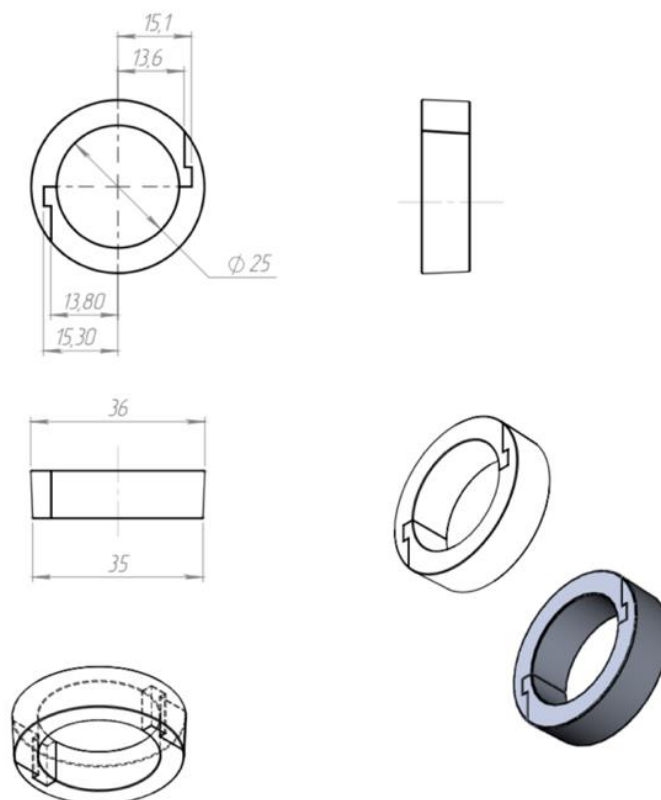


Рисунок 3.8 – Эскиз детали, выполняющей роль дополнительного радиатора

При проектировании сверхмощных светодиодных прожекторов, где использование классических металлических радиаторов и рефлекторов нецелесообразно из-за сильного увеличения веса, также имеет смысл применять внедрение в конструкцию алюминиевых вставок, комбинируя с корпусом из теплорассеивающих полимерных композитных материалов, которые позволяют повысить теплопроводность корпуса без существенного увеличения и утяжеления конструкции и имеют при этом тенденцию удешевления себестоимость изготовления.

Экономические особенности массового производства светодиодных источников света и светодиодных осветительных приборов вынуждают искать решения исполнения осветительных приборов с максимальной теплорассеивающей способностью при минимальной стоимости и габаритах.

Основное требование здесь – это соблюдение границы допустимого температурного диапазона для светодиодов и других элементов устройства, наиболее подверженных нагреву. Очевидно, что для такого рода устройств характерно исполнение радиаторов, имеющих достаточную обтянутую

площадь. Массовое производство и постоянный поиск способов удешевления продукции приводит к решению, производства бытовых светодиодных ламп малой мощности без радиатора или какого-либо направленного теплоотвода, однако, проведенные исследования показывают, что решения такого рода вызывают сомнения в долговечности осветительных приборов с таким исполнением, что неоднократно подтверждалось исследованиями [14].

Также заметна тенденция развития производства модульных ОПСИС, в которых единственным теплоотводящим элементом является сам корпус изделия, в результате чего возникло понятие «корпус-радиатор». На внутренних частях корпуса часто проектируют теплопроводящие ребра, улучшающие рассеивание тепла. Очевидно, что за счет стремления к модульному исполнению высота ребер должна быть достаточно малой, а частота их следования – наоборот большим и учитывать отсутствие какого-либо обдува, в том числе и естественного.

«Отвод тепла от кристалла светодиодов небольшой мощности происходит за счет распайки светодиодов на печатную плату с алюминиевым основанием и изолирующим диэлектрическим слоем, с теплопроводностью около 1 Вт/(м·К) выше» [80]. При таком исполнении эффективность отвода тепла будет пропорциональна площади платы, однако зачастую производители используют в качестве крепления светодиодную ленту или простые пластиковые патроны, в результате чего теплоотвод осуществляется гораздо хуже заявленного, даже в светильниках размером 1м².

Теоретические исследования, рассмотренные выше показывают, что основные конструкции радиаторов отвода тепла нуждаются в более детальной проработке и дифференциальном подходе. Так, не всегда даже массивный радиатор отвода тепла должным образом выполняет свои функции.

Примером такого случая может быть радиатор, представленный на рисунке 3.9, где видно, что ребра светильника практически не выполняют функцию отвода тепла от светового модуля и носят больше декоративный, чем функциональный характер.

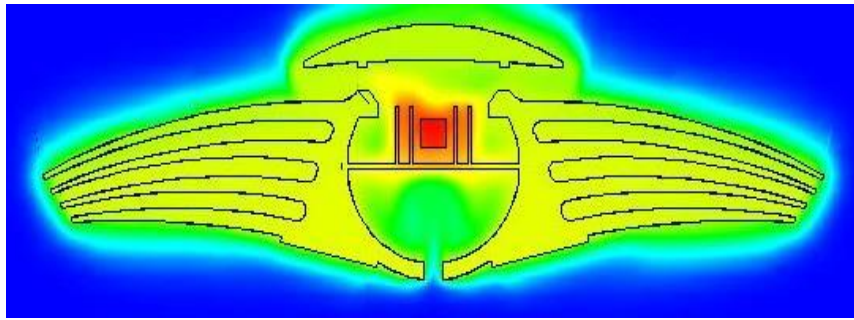


Рисунок 3.9 – Пример неудачного исполнения радиатора на модели процесса теплообмена ОПСИС

Рассмотрим процесс теплового сопротивления как разницу температур между поверхностью элемента, который выделяет тепло, и поверхностью, через которую происходит поглощение выделенного тепла. Данный процесс характеризуется следующим соотношением:

$$R_t = \frac{\Delta T}{P_{\text{выд.}}},$$

где ΔT – разность температур окружающей среды и средней, температуры поверхности, выполняющей функции поглощения тепла (например корпус или теплопроводящее основание текстолитовой подложки светодиодного источника света).

$P_{\text{выд.}}$ – выделяемая элементами тепловая мощность.

Если рассматривать процесс теплового сопротивления при конвективном теплообмене, то данный процесс будет характеризоваться данным выражением:

$$R_t = \frac{1}{\alpha \cdot S},$$

где α – коэффициент теплоотдачи, выраженный в единицах Вт/(м²К),

S – площадь теплового обмена поверхности, м².

Таким образом можно вывести зависимость разницы температур и выделяемой мощности от площади поверхности, участвующей в процессе теплового обмена:

$$\frac{\Delta T}{P_{\text{выд.}}} = \frac{1}{\alpha \cdot S},$$

или

$$S = \frac{P_{\text{выд.}}}{\alpha \cdot \Delta T}$$

Как правило, значение разности температур окружающей среды и радиатора (или объекта выполняющего функции радиатора, например корпус или теплопроводящее основание текстолитовой подложки светодиодного источника света, исследования показывают, что в данном случае « ΔT не должно превышать $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ » [83], в то время как при прохождении процесса естественной конвекции коэффициент α определяют в пределах «от 6 до $10\text{ Вт}/(\text{м}^2\text{K})$ » [82].

Рассмотрим встраиваемы (модульные) ОПСИС, например, небольшой плоский бытовой светильник, модель которого представлена на рисунке 3.10.

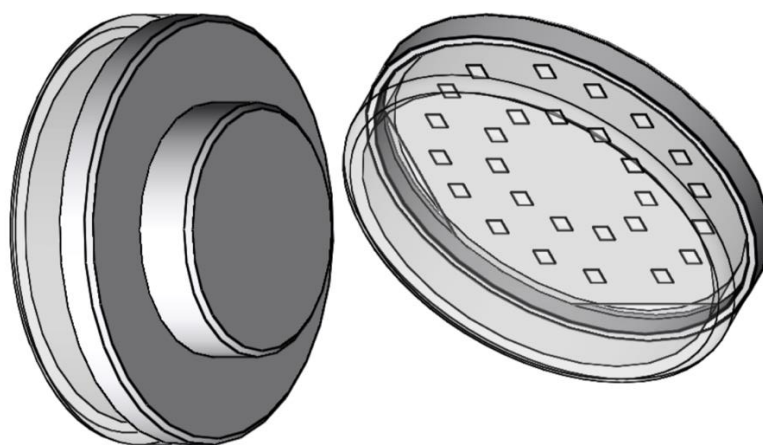


Рисунок 3.10 – Модель плоского круглого модульного светодиодного светильника

Глядя на конструкцию, уже можно предположить, что в таком исполнении для нормального радиатора просто может не оказаться места.

Поэтому для нормальной работы светодиодов в данном случае крайне важно применять материалы корпуса и подложки с повышенной теплопроводностью.

Такая конструкция является более удачным решением проблемы отвода тепла за счет большей площади свободного пространства между светодиодными источниками света, а вынесение драйвера за корпус

светильника в такой конструкции неприменимо по смысловой задумке и назначению светильника.

В ходе данных исследований была разработана специальная конструкция радиатора и построена тепловая модель для светодиодного светильника аналогичного типу PLED-ECO-GX53 6Вт 3000K FROST 460лм JazzWay, с сохранением габаритных размеров, мощности и физических свойств материалов корпуса, рассеивателя и светодиодов с подложкой. Моделирование распределения тепла, определение температуры светодиодного светильника и поиск самых подверженных нагреву областей устройства проводилось в приложении Flow Simulation программы SolidWorks. Тепловая модель модульного светодиодного светильника с плоским круглым корпусом без выполнения радиатора показана на рисунке 3.11.

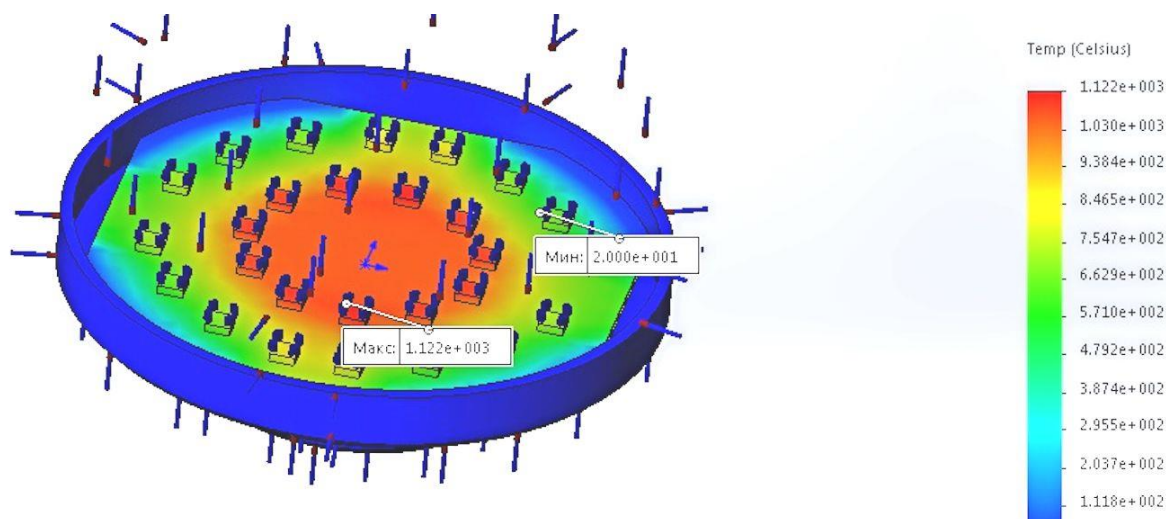


Рисунок 3.11 – Тепловая модель модульного светодиодного светильника типа «таблетка» с плоским круглым корпусом, выполненным без радиатора

Как видно из графика распределения температур максимальная температура в горячих точках достигала ~ 113 °С, что уже является критичной для светодиодов малой мощности. [14, 84, 85]

Рассмотрим теперь конструкцию данного светильника с разработанным радиатором. В качестве радиатора использовались алюминиевые цилиндры, установленные в зоне самых подверженных нагреву элементов устройства с обратной стороны подложки светового модуля на термоклей. Анализ

полученных результатов показывает значительное преимущество данного способа исполнения радиатора в конкретной модель светодиодного светильника. Конструкция радиатора в светильнике показана на рисунке 3.12

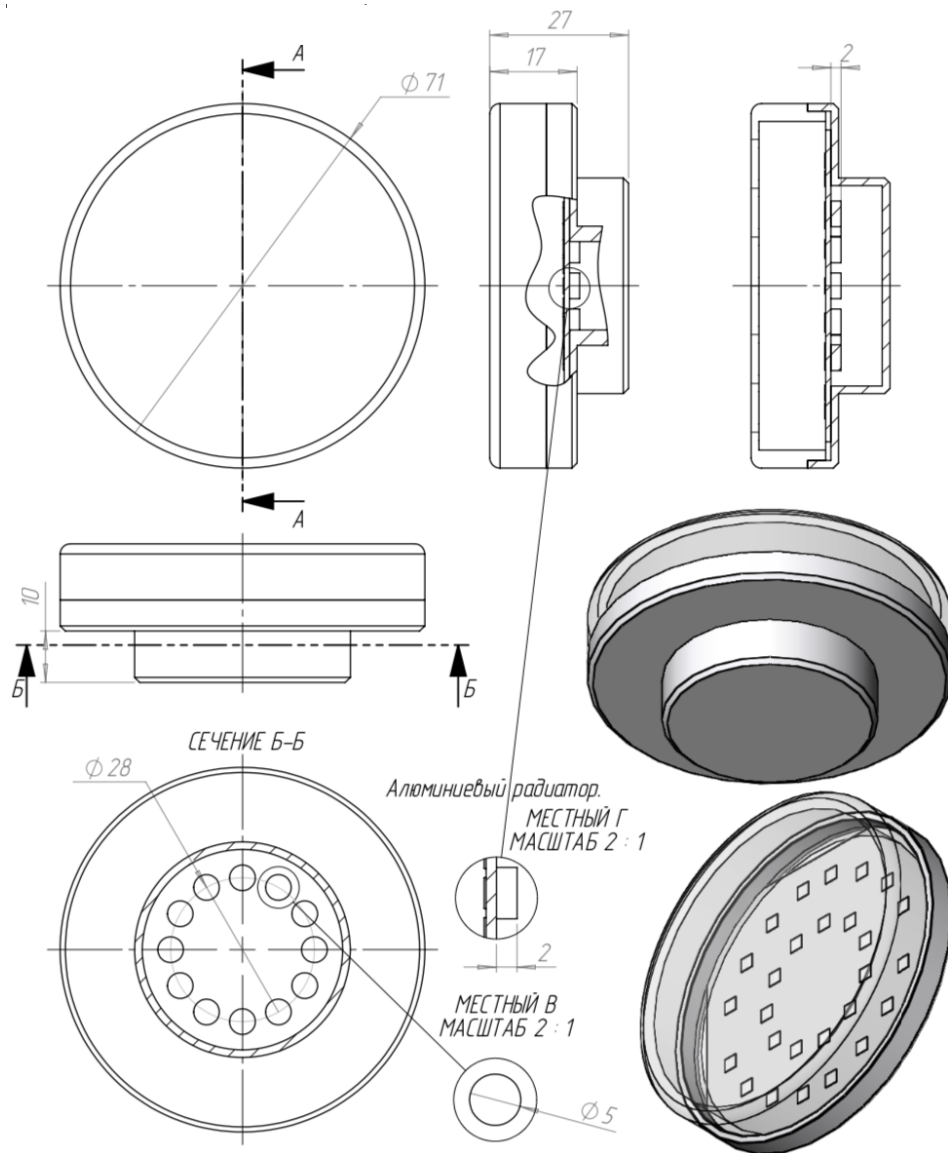


Рисунок 3.12 – Конструкция радиатора в корпусе плоского модульного светодиодного светильника типа «таблетка»

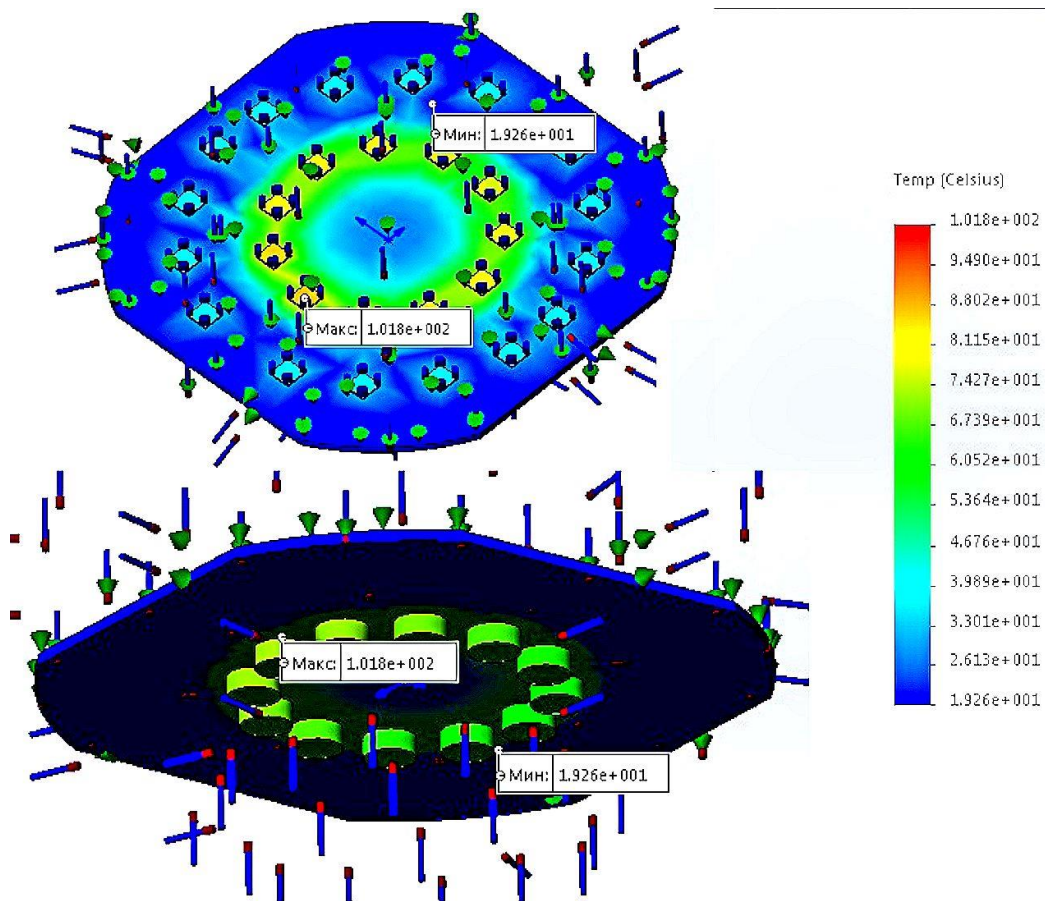


Рисунок 3.13 – тепловая модель модульного светодиодного светильника типа «таблетка» с разработанным радиатором.

В ходе проведения данных исследований также было разработано устройство управления светодиодным светильником с дополнительным охлаждением при помощи специально разработанной конструкции радиатора и элемента Пельтье. Задачей, на решение которой было направлено предлагаемое устройство являлось создание устройства, позволяющего повысить показатели эксплуатационной надежности и нормализовать тепловой режим светодиодного источника света. Так как основными недостатками исследуемых светодиодных осветительных приборов являлись: значительная разница температур между светодиодным источником света и поверхностью теплообмена, радиатором отвода тепла, либо излишняя материалоемкость, а в отдельных случаях и необходимости применения вентилятора для обдува радиатора отвода тепла.

Разработанное устройство управления светодиодным светильником содержит (рисунок 3.14): световой модуль, диммируемый драйвер, радиатор отвода тепла, элемент Пельтье, силовой ключ, микроконтроллер (МК), датчик температуры, датчик наружной освещенности, датчик внутренней освещенности, корпус.

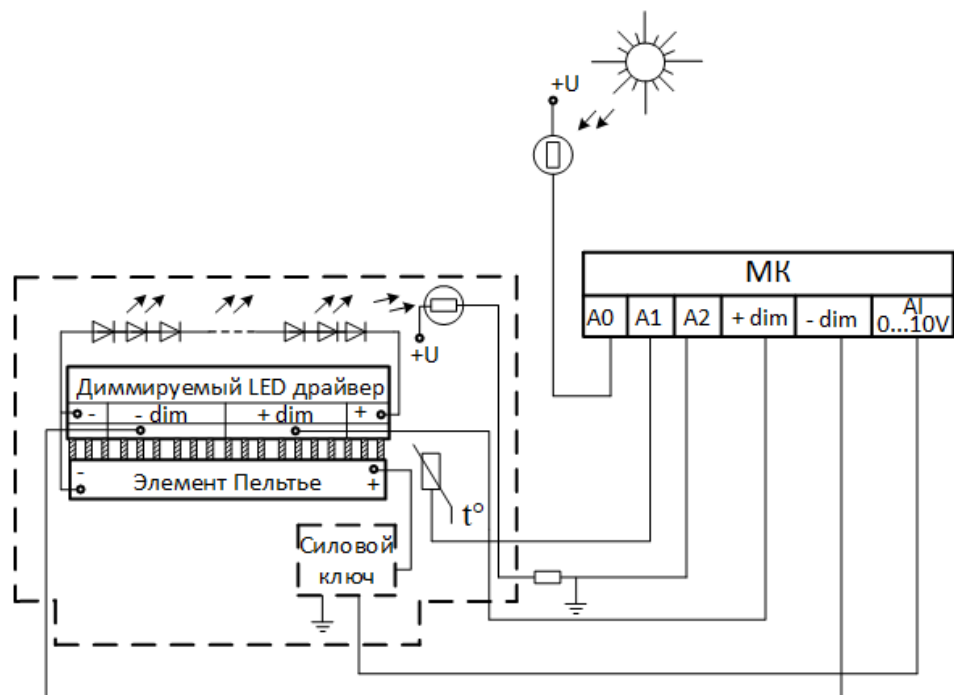


Рисунок 3.14 – Светодиодный светильник «таблетка» с устройством управления

Устройство управления светодиодным светильником содержит световой модуль, к которому прикреплен диммируемый драйвер, первый и второй входы светового модуля подключены соответственно к первому и второму выходам диммируемого драйвера. К подложке светового модуля на термоклей установлен радиатор отвода тепла, в качестве которого использованы алюминиевые цилиндры. К радиатору отвода тепла на термоклей прикреплен элемент Пельтье, датчик внутренней освещенности расположен внутри корпуса так, чтобы на него попадала часть светового потока от светового модуля. Все элементы устройства, кроме микроконтроллера и датчика наружной освещенности, жестко закреплены в корпусе.

В качестве микроконтроллера можно использовать, например, Raspberry Pi Model A+, или Pixel 2511-02-0. В качестве диммируемого драйвера – XS0812-12W LD22. В качестве силового ключа – микросхемы на основе IRLR8113/IRL8726, или NHG1-1/032F, которой также можно выполнить гальваническую развязку для защиты микроконтроллера от пробоя.

Устройство работает следующим образом (рисунок 3.15):



Рисунок 3.15 – Структурная электрическая схема устройства управления светодиодным светильником

В нормальном режиме работы электрический сигнал с датчика наружной освещенности 8 и датчика внутренней освещенности 9 поступает соответственно на второй и третий аналоговые входы микроконтроллера 6. После обработки сигналов микроконтроллером 6, сигнал с первого и второго управляющих выходов микроконтроллера 6 поступает на первый и второй управляемые входы диммируемого драйвера 2, в зависимости от полученного сигнала увеличивается или уменьшается ток возбуждения светодиодных источников света светового модуля 1. При значительном увеличении тока возбуждения светового модуля 1 происходит нагрев элементов устройства, который фиксируется датчиком температуры 7, сигнал с которого передается на первый аналоговый вход микроконтроллера 6. При критическом увеличении температуры элементов устройства, сигнал с датчика температуры 7 поступает на микроконтроллер 6, после чего с третьего

управляющего выхода микроконтроллера 6 поступает электрический сигнал на вход силового ключа 5, с напряжением, достаточным (в зависимости от типа силового ключа) для отпирания силового ключа 5 и возбуждения элемента Пельтье 4, который при возбуждении обеспечивает дополнительный отвод тепла от светового модуля 1 через радиатор отвода тепла 3.

Помимо основного технического результата устройство позволяет улучшить характеристики светоотдачи в широком диапазоне температур полупроводникового перехода светодиодного источника света, обеспечить устойчивую работу при значительном изменении внешней температуры, или при необходимости увеличения тока возбуждения светодиодов для компенсации уменьшения яркости свечения, вызванного старением внутренних компонентов и материалов светодиодного источника света.

Разработанное устройство позволяет уменьшить количество проводных и разъемных соединений у существующих аналогов и регулировать электрическую мощность элемента Пельтье, управляя тепловыми режимами светодиодного источника света, а конструкция радиатора отвода тепла позволяет обеспечить более эффективный отвод тепла от наиболее сильно подверженных нагреву элементов устройства.

Данное устройство также возможно выполнить без использования элемента Пельтье, микроконтроллера и диммируемого драйвера, позволяя использовать только особую конструкцию радиатора. В отличие от других вариантов радиаторов отвода тепла, которые применяются в светодиодных осветительных приборах, данный радиатор объединяет модули путем соединения подложки светового модуля или драйвера и корпуса. Основная задача такого радиатора – соединять модули между собой и таким образом отводить тепло в области самых подверженных нагреву элементов устройства.

Оптимизация конструкции, с точки зрения повышения эффективности отвода тепла, позволяет увеличить световую отдачу при неизменном потреблении электрической энергии, а повышение автономности работы

устройства за счет использования датчиков освещенности и микроконтроллера приводит к ее значительной экономии.

3.4 Расчет показателей надежности основных элементов светодиодного осветительного прибора

Как известно, надежность электронных узлов (ЭУ) обеспечивается за счет правильного проектирования и разработки конструкции, применения качественных материалов, соблюдения точности и стабильности технологий изготовления, а также применением адекватной системы контроля и обеспечения качества [86, 87].

Также известно, что существует вероятность присутствия в партии элементов, соответствующих нормативно технической документации (НТД), так и дефектных, которые могли оказаться в партии в результате проведения процедуры выборочного контроля, которая не предполагает полный набор контрольных испытаний для всех элементов устройства в партии.

Обычно в технических заданиях (ТЗ) на разработку, стандартах и технических условиях (ТУ) устанавливают следующие показатели надежности [88]:

1) $\lambda_{и}$ – интенсивность отказов при испытаниях, 1/ч, данный показатель позволяет охарактеризовать параметры групповой надежности изделий, а также служит для оценки уровня качества изделия в зависимости от применяемого технологического процесса изготовления изделия, типа конструкции, и качественных параметров материалов. Данный показатель вычисляется по формуле:

$$\lambda_{и} = \frac{d}{T_{\text{сум}}},$$

где d – полученное число отказов.

Если число отказов равно нулю, то значения $\lambda_{и}$ формуле:

$$\lambda_{и} = \frac{0,69}{T_{сум}}$$

2) $\lambda_{э}$, – интенсивность отказов при эксплуатации, 1/ч, данный показатель позволяет охарактеризовать параметры безотказности изделий, которые были изготовлены из одних и тех же материалов и имеют схожие функциональные, конструктивные и технологические характеристики, а также оценить зависимость качества изделия от режима работы и условий эксплуатации изделия.

Значение $\lambda_{э}$ предписывается определять по выражению [89]:

$$\lambda_{э} = m \cdot 10^{-n}, \text{ ч}^{-1},$$

где $m = 1, 2, 3, 5$;

$n = 6, 7, 8, 9, 10$ и т.д.

3) $\lambda_{хр}$ – интенсивность отказов при хранении, 1/ч, данный показатель не всегда указывается в паспортных данных изделия или технических условиях, однако позволяет охарактеризовать свойство изделия сохранять начальные параметры при определенных условиях хранения, складирования, транспортировки.

$T_{мин}^H$ – минимальная наработка до отказа, ч, данный показатель указывается для определенных режимов и условий эксплуатации.

$T_{\gamma}^{рес}$ – гамма-процентный ресурс, ч, показатель, который позволяет охарактеризовать вероятность, выраженную в процентах, при которой за определенное время наработки, изделие не достигнет определенного предельного состояния. Значение γ обычно задается с минимальной наработкой 5000 ч или больше, чем 90-95%. Также в общих случаях значение $T_{\gamma}^{рес}$ могут принимать как $2 T_{мин}^H$ [87].

$T_{мин}^{сх}$ – минимальный срок сохраняемости, ч, данный параметр позволяет охарактеризовать срок, за который изделие сохраняет свои свойства, необходимые для нормального функционирования при выполнении заданных условий работы.

$T_{\text{сум}}$ – суммарная наработка до отказа элементов, работающих под нагрузкой, ч;

$T_{\text{сум хр}}$ – суммарное время хранения элементов до отказа, ч.

Во многих справочках формула для определения параметров $T_{\text{сум}}$ и $T_{\text{сум хр}}$ представляется в виде [86, 87, 88]:

$$T_{\text{сум}}(T_{\text{сум хр}}) = \sum_{i=1}^n t_i ,$$

где n – число наблюдаемых элементов;

t – время наработки до отказа i -го элемента (при хранении – время хранения i -го элемента до отказа)

3.4.1 Анализ статистических методов оценки показателей надежности невосстанавливаемых электронных узлов

Уже было отмечено, что только основываясь на анализе большого объема статистических данных по результатам испытаний, можно получить достаточно достоверную оценку показателей надежности светодиодного источника света, а на практике всегда имеют место только ограниченные данные, которые по своей сути могут называться величинами случайными. Поэтому то прогнозируемое приближенное значение показателя надежности, которое получено в результате проведения испытаний, и называют оценкой этого показателя. Данная оценка должна быть рассчитана так, чтобы даже при небольшом объеме статистических данных ошибка от замены точного (вероятностного) значения показателя надежности его оценкой была как можно меньше.

В связи с тем, что в процессе испытаний не происходит восстановление элементов системы и их паяных соединений, то получение последующих данных может служить основанием для определения параметра потока отказов.

Механизм отказа ОПСИС укрупненно можно разделить на три части: отказ источника света (или деградация светового потока), отказ светодиодного драйвера, отказ других элементов системы, в том числе нарушение паяного соединения (ПС) или высыхание термопасты, нарушение работы светоотражателя или светорассеивателя.

Для прогнозирования уровня надежности паяных соединений часто используют математическую модель на основе χ^2 – распределения. Эта модель дает возможность количественной надежностной оценки паяных соединений при относительно малом времени испытаний и малой степени выборки по результатам испытаний, также по данной модели устанавливают связь между общепринятыми показателями надежности и результатами испытаний.

Как правило, оценки определения интенсивностей будут являться точечными. Определение значений верхних доверительных границ может осуществляться по статистическим таблицам χ^2 – распределения для определенных уровней значимости, например при (60% или 90%).

В источнике [91] приводятся данные исследований компании Analog Devices, которые показывают, что проведение испытаний длительностью 1000 часов при температуре 125 °С эквивалентно 87 600 часов (10 лет) испытаний при температуре 55°С [91]. Здесь необходимо отметить, что процесс ускоренных испытаний требует дальнейшего сопоставления результатов, что может являться нетривиальной задачей, требующей значительных трудозатрат.

Ведущие западные фирмы такие как Xilinx, Altera, и др. экспериментальную интенсивность отказов (Failure Rate), аналогичную параметру λ_n оценивают формуле [89]:

$$FR = \frac{\chi_{(x,v)}^2}{2NT_n \cdot K_y} \cdot 10^9, [FIT],$$

где $\chi_{(x,v)}^2$ – квантиль χ^2 – распределения;

N – количество испытываемых ЭС;

$T_{и}$ – время испытаний;

$K_{у}$ – обобщенный коэффициент ускорения;

x – доверительная вероятность, связанная с уровнем значимости C.L. (confidence level) соотношением: $1 - C.L.$

Фирмы Atmel и ADI в своих расчетах значения C.L. принимают 60% и 90% [89].

Среднюю наработку до отказа (MTTF – Mean Time to Failure) определяют как [89]:

$$MTTF = \frac{10^9}{FR}$$

Таким образом анализ показателей надежности показывает, что для прогнозирования уровня надежности ОПСИС при номинальных режимах работы и не критических условиях эксплуатации при показателях $T_{сум} = 10^4$ характерных для данных изделий, потребуется до 10 лет непрерывных испытаний. Поэтому возникает необходимость проведения ускоренных испытаний. Однако результаты таких испытаний могут оказаться сильно далекими от реальных условий эксплуатации в результате чего возникает необходимость экстраполяции данных на нормальные условия эксплуатации [90]. Поэтому следует рассмотреть возможность проведения моделирования и расчетов характеристик надежности невосстанавливаемых электронных узлов светодиодного светильника в смешанных режимах.

3.4.2 Моделирование и расчет характеристик надежности невосстанавливаемых электронных узлов светодиодного светильника

Так как западные технологии требуют применения технологии бессвинцовых паяных соединений, то в случае рассмотрения электронных узлов, в составе светодиодного светильника, следует учитывать наличие бессвинцовых или смешанных паяных соединений, для которых наиболее характерными являются отказы типа «обрыв».

Данный тип отказа также характерен и для самого светоизлучающего кристалла, в результате длительного превышения допустимой нормальной температуры эксплуатации и т.д. Расчет модели изнашивания будет рассматриваться именно для этого типа отказов с точки зрения выхода из строя паяного соединения или перегрева светодиода. Другим принципиально важным элементом нормального функционирования светильника считаем драйвер, для которого наиболее характерны отказы типа «перегрев», «электрический пробой», нарушение нормальной работы напряжения питания драйвера в следствии усыхания конденсатора.

Таким образом условно разделим «жизненно важные» узлы светильника, необходимые для нормального функционирования светодиодного источника света на две составляющие – нормальная работа драйвера и нормальная работа кристаллов светодиода.

Тогда представим математическую модель двух электронных узлов виде основной и $m-1$ зависимой систем, с количество n элементов в каждой системе. В таком случае вероятность безотказной работы системы $P_{cj}(t)$ и вероятность появления в ней отказа $Q_{cj}(t)$ будут:

$$P_{cj}(t) = \prod_{i=1}^n P_{ij}(t); \quad Q_{cj}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n P_{ij}(t).$$

Так как все элементы системы характеризуются равновероятными отказами, то:

$$\begin{cases} [P_n(t)]_m = 1 - [1 - p^n(t)]^m; \\ [Q_n(t)]_m = [1 - p^n(t)]^m. \end{cases}$$

Так как любой электронный узел уже является сложной системой, состоящей из определенного количества элементов, то для описания модели следует рассмотреть возможность применения метода декомпозиции, основанный на цепях Маркова.

3.4.3 Математическая модель износа основных элементов светодиодного светильника на основе цепи Маркова

Метод декомпозиции, основанный на цепях Маркова позволяет представить последовательность случайных событий в настоящем, не зависящим от прошлого, то есть при нынешнем высоком уровне технологического процесса производства электронных компонентов данный метод позволяет не делать основной упор на некачественное производство и освобождает от расчета событий, совершенных для объекта в прошлом.

В качестве схемы состояний примем, что первым электронным узлом будет являться матрица светодиода, а вторым – драйвер светодиодного светильника и бессвинцовое или смешанное паяное соединение.

Примем, что система и ее элементы могут находиться только в двух состояниях – работоспособном и неработоспособном. Так же данная система, состоящая из двух электронных узлов, считается нормально эксплуатируемой только в случае полной работоспособности каждого из двух узлов. Отказы элементов системы являются случайными и независимыми, а их интенсивности примем независимы от времени.

Будем считать, что выбранная система S является непрерывной Марковской цепью с однородным процессом, то есть система может переходить из одного состояния в другое случайным образом и в произвольный момент времени, а ее интенсивности перехода из одного состояния в другое не зависят от времени.

Представим данную задачу в виде Марковской цепи, показанной на рисунке 3.16, где работоспособное состояние каждого из узлов системы имеет вероятность p_{11} и p_{12} , а вероятность отказа p_{21} p_{22} соответственно.

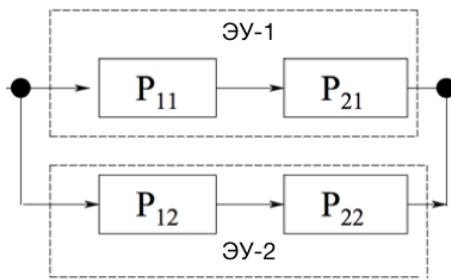


Рисунок 3.16 – Граф состояний невосстанавливаемой системы, состоящей из 2х независимых электронных узлов

В таком случае величину интенсивности перехода из состояния S_i в состояние S_j при с вероятностью p_{ij} в момент времени Δt можно рассчитать по формуле:

$$\lambda_{ij}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p_{ij}(t + \Delta t) - p_{ij}(t)}{\Delta t}$$

Если считать, что переход системы из состояния S_i в состояние S_j будет осуществляется по закону пуассоновского распределения потока. То переходную интенсивность с количеством элементов n можно записать в виде:

$$\lambda_{ij} = \sum_{x=1}^n \lambda_x.$$

На основании принятых условия постановки задачи и допущений можно составить систему дифференциальных уравнения Колмогорова, где первые части уравнений представляют собой скорости изменения вероятностей для каждого из электронных узлов системы.

Так как каждый из узлов системы можно считать сложным элементом суммарный поток отказов будет складываться из нескольких независимых частей.

В свою очередь базовая интенсивность отказов будет складываться из отдельных коэффициентов, влияющих на различные свойства ЭУ (коэффициенты, обуславливающие влияющие на интенсивность отказов под действием точечных дефектов, механических характеристик корпуса, теплоотвода, диэлектрических свойств подложки, а также коэффициентов, учитывающих влияние механических, климатических и других воздействий)

$$\lambda_{и} = \sum_{j=1}^m \alpha_{i(t)} \cdot \lambda_{бсгj} \cdot \prod_{i=1}^{n_j} K_{эниj},$$

где $\lambda_{бj}$ – 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.

Основываясь, на описанных выше данных, запишем дифференциальные уравнения с учетом коэффициентов интенсивностей отказа и вероятностей общего резервирования системы:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_{11}(t)}{dt} = - \sum_{j=1}^m \alpha_{i(t)} \cdot \lambda_{21j} \cdot \prod_{i=1}^{n_j} K_{эниj} \cdot (1 - [1 - p_{11}(t)]^m) \\ \frac{dP_{12}(t)}{dt} = - \sum_{j=1}^m \alpha_{i(t)} \cdot \lambda_{22j} \cdot \prod_{i=1}^{n_j} K_{эниj} \cdot (1 - [1 - p_{12}(t)]^m) \\ \frac{dP_{21}(t)}{dt} = \sum_{j=1}^m \alpha_{i(t)} \cdot \lambda_{21j} \cdot \prod_{i=1}^{n_j} K_{эниj} \cdot (1 - [1 - p_{11}(t)]^m) \\ \frac{dP_{22}(t)}{dt} = \sum_{j=1}^m \alpha_{i(t)} \cdot \lambda_{21j} \cdot \prod_{i=1}^{n_j} K_{эниj} \cdot (1 - [1 - p_{12}(t)]^m) \\ P_{11}(t) + P_{21}(t) = 1 \\ P_{12}(t) + P_{22}(t) = 1 \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Для решения данной системы уравнений была составлена программа в среде Matlab, для учета особенностей проектирования и функционирования ОПСИС были выбраны коэффициенты исходя справочных данных, по группам изделий (значения интенсивностей отказов у полупроводниковых излучателей, ИМС) коэффициентов надежности паяных соединений и пр. [92]

Алгоритм проведения вычислений показан на рисунке 3.17.

Графики, полученные при решении данной системы уравнений показаны на рисунке 3.18.

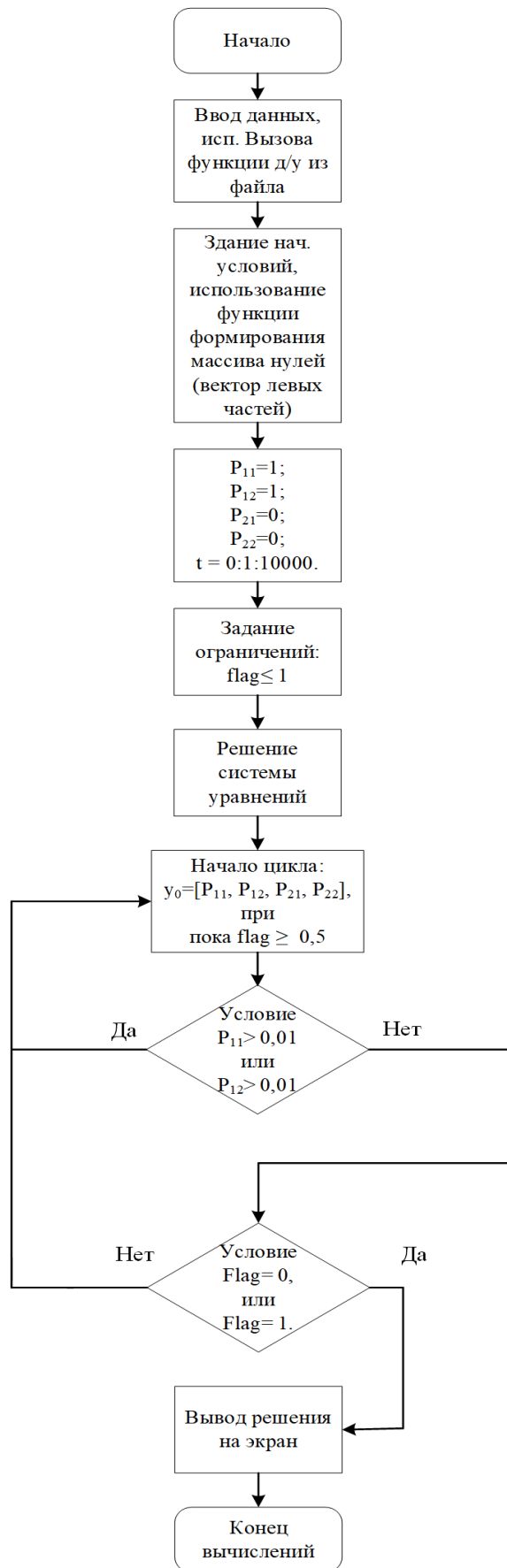


Рисунок 3.17 – Алгоритм программы вычислений, полученной системы уравнений

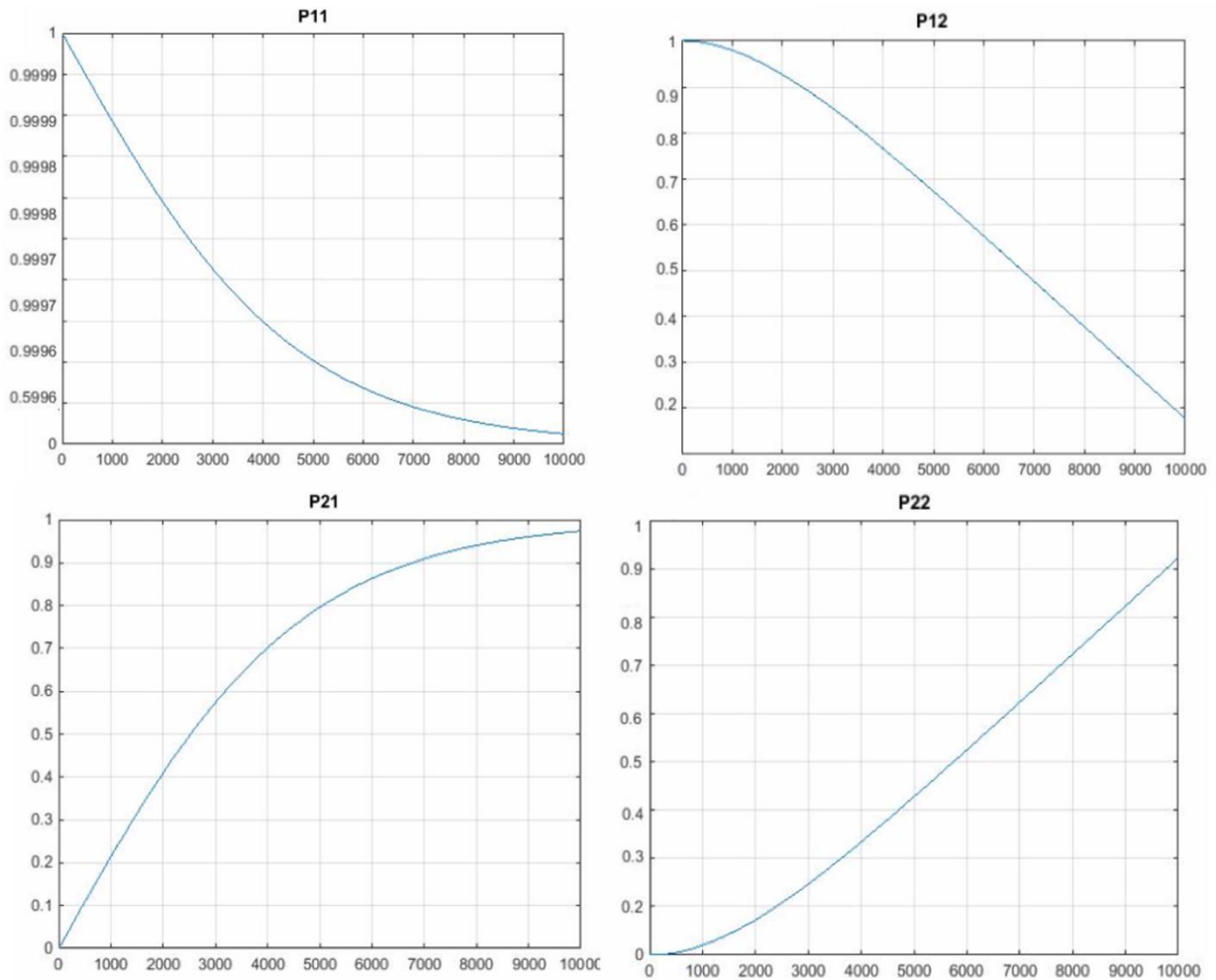


Рисунок 3.18 – Графики, описывающие систему уравнений 3.1, где P_{11} – вероятность безотказной работы узла 1, P_{12} – вероятность безотказной работы узла 2, P_{21} – вероятность возникновения случайного отказа в узле 1, P_{22} – вероятность возникновения случайного отказа в узле 2.

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

Предлагаемая математическая модель оценки рисков выхода из строя ОПСИС во время нормального эксплуатационного периода выглядит следующим образом:

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

Где R_{pi} – уровень показателя риска, O_p оценка вероятности работоспособного состояния элемента или узла, O_t оценка показателей тяжести последствий в результате происхождения риска.

Предлагаемая модель оценки общего уровня риска имеет вид:

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

где R_g – общая оценка риска,

TCR_i – значение количества обращений на рынке,

G_i – значение величины гарантийных затрат.

Результаты и выводы по главе 3

1. Разработана математическая модель для оценки эффективности теплоотвода в пластиковых корпусах светодиодных ламп. По данной тепловой модели можно судить о зависимости величины максимальной температуры нагрева изделия от величины теплопроводности материалов и формы корпуса. Расхождение рассчитанных значений по математической модели с измеренными составило ~ 11%.

На основе полученных данных можно сделать вывод о недостаточной теплопроводности элементов корпуса исследуемой светодиодной лампы и необходимости повысить условия отвода тепла в корпусе изделия.

2. Предложен вариант, и разработана модель улучшения теплоотвода для бытовых светодиодных ламп в пластиковом корпусе. При использовании разработанных вариантов улучшения теплоотвода, возможно достигнуть снижения максимальной температуры нагрева до 5-6°C

3. Разработана математическая модель износа основных элементов светодиодного светильника на основе цепи Маркова. Полученная модель позволяет прогнозировать отказы основных элементов ОПСИС и учитывать деградацию светового потока. При решении полученной системы уравнений выявлено, что вероятность сохранения светодиодами номинального уровня светового потока после 7000 часов работы составляет менее 60%.

4. Полученные результаты и зависимости хорошо согласуются как с существующими исследованиями, так и с экспериментальными результатами [72, 73, 77, 94].

4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СЕТЕЙ ИСКУССТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ С СВЕТОДИОДНЫМ ОСВЕТИТЕЛЬНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

4.1. Разработка методики измерений световой отдачи светодиода при питании импульсным током с различными длительностями и температурой окружающей среды

В светодиодных осветительных приборах значение световой отдачи зависит от режима работы светодиодов. [93, 94] Данный параметр, также, как и световой поток, является одним из определяющих энергоэффективность осветительного прибора [94, 95]. Как правило, заводом изготовителем в паспортных данных на светодиод приводятся зависимости относительного светового потока от температуры при заданном питающем токе, а также зависимость необходимой величины питающего тока от определенной фиксированной температуры р-п перехода.

Очевидно, что каждая из зависимостей оказывает разное влияние на интенсивность света и величину светового потока.

Для определения оптимальных режимов работы светодиодного осветительного прибора необходимо независимое определение влияния температуры р-п перехода, температуры люминофора, а также силы и плотности тока, протекающего через р-п переход.

При работе с импульсным током

Для получения зависимости светового потока от температуры р-п перехода, при работе источника питания светодиодов в импульсном режиме следует использовать однократные импульсы, чтобы не допустить саморазогрева светодиодов. Время длительности импульса следует выбирать не более 1 секунды, так как при длительности импульса от 1 сек. и более наблюдался самонагрев р-п перехода. Измерения светового потока проводить в заданном диапазоне температур от комнатной либо среднесуточной

(среднегодовой уличной) до температуры на 25% превышающей номинальное значение с шагом в 5-10 °С. Задание и регулирование силы тока производить в зависимости от номинальных значений пропускной способности светодиода и свойств нанесенного люминофора. Обычно значения силы тока принимают от 150 мА до 1А с шагом 50 мА.

Чтобы проводить оценку влияния температуры р-п перехода, и плотности тока на показатели интенсивности светового потока, при питании импульсным током важно соблюдать условия, при которых источник света помещается в термокамеру с оптическим окном и получает от источника питания одиночные импульсы длительностью не более 1 сек.

Излучение светодиода через комплект нейтральных фильтров подается на фотоэлектронный умножитель, сигнал от которого передается на осциллограф, который может отображать интенсивность излучения в Вольтах.

Как было сказано выше, кроме температуры необходимо производить регулирование силы тока светодиодов, в случае если источник питания не позволяет получить силу тока на светодиоде больше, чем номинальная, следует воспользоваться усилителем.

Основные методы измерения фотометрических характеристик светодиодов изложены в документах и стандартах государственной системы обеспечения единства измерений, где описаны в основном предписания, без обозначения конкретной методики измерения спектральных характеристик излучения светодиодного осветительного прибора [96].

Измерение спектральных характеристик следует проводить в следующем порядке: на светодиодный источник света в светонепроницаемом кожухе от источника питания подавать ток в диапазоне от 150 мА до 1 А, при этом температуру регистрировать термопарой или аналогичными средствами, сразу после подачи питания, значения силы тока держать неизменными до тех пор, пока температура подложки и напряжение на выводах не достигнет фиксированных значений. После этого можно фиксировать значение

спектрального распределения, изменяя затем значение силы тока и повторяя измерения для следующих значений.

Оценивать относительное излучение светодиода и люминофора имеет наибольший смысл в диапазонах длин волн, соответствующих голубому и синему свечению от 400 нм до 780 нм, так как данный диапазон имеет наибольшее влияние на хрусталик глаза.

На основе кривых спектрального распределения энергии источника света с изменением силы тока и температуры, можно рассчитать значения интенсивностей излучения по формуле [96]:

$$\Phi_e \approx \int_{380}^{780} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda,$$

где $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$ – спектральная плотность лучистого потока на длине волны λ .

4.2 Разработка методики контроля светового потока ОПСИС в зависимости от температуры корпуса

Для упрощения процедуры проведения измерений светового потока осветительных приборов можно использовать процедуру измерения освещенности площадки (рис. 4.1) под или над светильником и пересчет полученных результатов в световой поток [14].

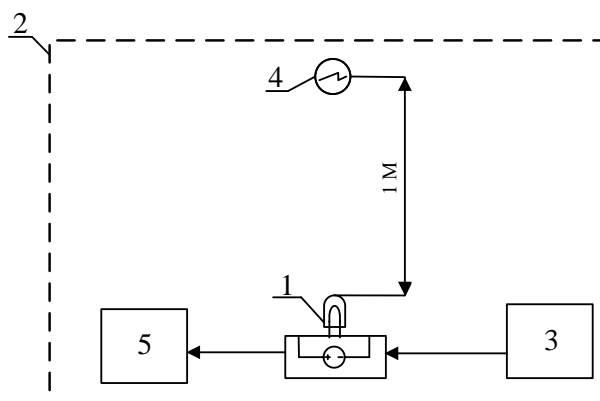


Рисунок 4.1 – Структурная схема измерения светового потока ОПСИС, где 1 – осветительный прибор, 2 – темный бокс или черный ящик, 3 – источник питания, 4 – люксметр, 5 – термопара.

Методика проведения измерений, следующая:

Исследуемый осветительный прибор (светодиодная лампа) 1, расположить в темном боксе 2 так, чтобы расстояние от источника света до чувствительного элемента люксметра было 1 м, с источника питания 3 на лампу подавать постоянный ток от 150 мА до 500 мА с принятыми ограничениями в зависимости от указанных в ТУ, освещенность измерять люксметром 4, после перехода осветительного прибора в установившийся работы согласно данным завода изготовителя, температуру корпуса измерять с помощью термопары 5 или телевизора.

Фиксирование результатов, осуществлять следующим образом: на осветительный прибор после подачи питающего тока фиксировать первые значения освещенности и температуры, спустя 1-5 минут, затем каждые 5 минут фиксировать показания температуру подложки и корпуса изделия

Измерения продолжать до тех пор, пока показатели освещенности не снизятся на 30% относительно начальных.

Сопоставление результатов измерения проводить путем сравнения полученных данных, с освещенностью, создаваемой контрольной или светоизмерительной лампой по ГОСТ 10771-82 (СТ СЭВ 2786-80) с известными световыми потоками [96].

4.3 Разработка аналитического выражения для предварительной оценки ОПСИС с учетом генерации гармонической составляющей

Определение характеристик эффективности ОПСИС, как правило, содержит понятия оценки светового потока и светоотдачи. Однако если рассматривать корреляцию между мощностью и световым потоком, то по проводимым исследованиями она является недостоверной ($r=0,47$; $P < 0,95$) [97]. Исходя из этого достоверной интегральной характеристикой оценки ОПСИС принято считать светоотдачу, а не мощность или световой поток [97].

Что же касается проведения экспресс оценки с точки зрения гармонической составляющей, то единственное что регламентируется нормативными документами на данный момент в нашей стране это высокочастотная гармоническая составляющая напряжения, генерируемая одним ОПСИС. В силу того, что увеличение генерации высокочастотной гармонической составляющей ОПСИС уже подтверждено экспериментально, а наличие генерации гармоник тока в электрическую сеть пока не регламентируется, следует рассмотреть возможные варианты разработки математического выражения для проведения экспресс-оценки общей гармонической составляющей, генерируемой ОПСИС.

Для этого следует определить суммарные коэффициенты K_{UTHD} и K_{ITHD} гармонических составляющих напряжения и тока, генерируемых ОПСИС, как среднее арифметическое показателей гармоник тока и напряжения для наиболее выраженных нечетных гармоник например порядком 3, 5, 7, 9, 11.

После чего можно вывести соотношение, которое будет представлять собой коэффициент эффективности с точки зрения генерации нечетных гармоник тока и напряжения в сеть, например:

$$G_{эфTHD} = \eta / (K_{UTHD} + K_{ITHD}).$$

Таким образом появится возможность охарактеризовать оценку эффективности ОПСИС с точки зрения вносимых искажений в виде общей гармонической составляющей в сеть. Таким образом, чем выше коэффициент $G_{эфTHD}$, тем более качественно выполнен ОПСИС и тем меньше будут искажения, вносимые с электрическую сеть данным изделием.

Погрешность определения $G_{эфTHD}$ будет определяться точностью измерений либо точность представленных параметров производителем ОПСИС. В целом суммарная погрешность определения значений коэффициента $G_{эфTHD}$ может составлять $\pm 5 - 15 \%$, и складываться из достоверности предоставленных либо измеренных данных о световом потоке и потребляемой мощности светильника и измеренном процентном соотношении величины нечетных гармоник тока и напряжения, генерируемых

ОПСИС. Такая величина погрешности вполне приемлема оценочного этапа. А внедрение данного коэффициента в техническую и нормативную документацию облегчит задачу проектирования и реконструкции осветительных сетей с применением ОПСИС.

Апробация предложенного метода оценки показывает возможность существенного расширения значений интегральных оценок ОПСИС, повышая таким образом чувствительность метода и достоверность оценки, позволяя учитывать до этого не рассматриваемые характеристики изделия. Таким образом суть предложения сводится к учету как гармонической составляющей по напряжению, так и по току. Данное расширение базы классификаторов позволит отбраковывать заведомо некачественные образцы светодиодной продукции. Также решить вопрос формирования гармонического искажения возможно при организации подключения ламп в группы с дифференциальной коммутацией.

4.4 Усовершенствование методики определения уровня спада светового потока светодиодных осветительных приборов и его результаты

Проще всего судить о динамике светового потока по косвенному показателю – освещенности с дополнительным измерением температуры корпуса и «горячих» точек ОПСИС. Величина спада освещенности косвенно отражает величину температуры р-п перехода светодиодов в светильнике и соответственно уровень снижения светоотдачи. Поэтому данный параметр можно рассматривать в качестве информативного.

Известно, что освещенность измерить относительно просто и не дорого, в отличие от светового потока. При измерении светового потока один вариант – это подготовиться фотоприемник с формой в виде полой сферы и одинаковой светочувствительностью в любом участке поверхности этой сферы, для чего будет необходимо проведение трудоемкой калибровки.

Еще одним вариантом измерения светового потока может быть измерение диаграммы направленности излучения и последующее ее интегрирование. Но и это непросто: возникает необходимость поместить источник света в темное помещение достаточно большого размера с близкими к абсолютной темноте стенами, а также использовать гониометрическую головку с двумя осями и автоматическим приводом, чтобы не допускать значительной погрешности при ручном выставлении углов для множества точек. В данном случае возникает необходимость применения различного рода допущений, например, одним из наиболее распространенных частных случаев является допущение возможности использования такого излучателя, яркость которого не будет зависеть от угла между нормалью к его поверхности и направлением на наблюдателя.

Такое допущение называют частным случаем использования косинусного излучателя.

Диаграмма направленности такого излучателя будет определяться только видимой площадью поверхности.

Соотношение между световым потоком и силой света в направлении нормали к плоскости в данном случае будет иметь вид:

$$I_v = \frac{\Phi_v}{\pi}.$$

Таким образом, для получения величины светового потока, будет необходимо вычислить произведение значения освещенности, измеренной на расстоянии одного метра от источника и числа π .

Данный способ также возможно применять и в случаях, когда расстояние не равно одному метру, тогда необходимо будет учесть излишки или недостачу по закону обратных квадратов. Однако, существуют и ограничения, так источник света должен быть значительно меньше, чем расстояние до люксметра, в противном случае применение закона обратных квадратов будет невозможно.

В случае с небольшими светодиодными источниками света типа SMD 5730, 2835, 5050, 3030 и т.д., пересчетом по методу косинусного излучателя можно добиться точности до 85-09%. Следует отметить, что для любых светодиодов с линзой, а также для светодиодов без люминофора с возможностью менять цветность на основе RGB, такой метод не подойдет в силу того, что диаграмма направленности данных источников света имеет значительные отличия от косинусной.

В большинстве случаев процедуру можно разделить на два основных случая изменения светового потока ОПСИС во времени. Первый – стабилизация светового потока за относительно короткий период времени. В первые секунды включения и в течение первых С 60 минут световой поток ОПСИС может падать до 5-10% от номинального значения. Стабилизация светового потока завершается приблизительно через полтора часа. Однако установить точное время полной стабилизации весьма затруднительно, так как в сети постоянно происходят случайные события в виде фоновых колебаний напряжения сети. Для проведения исследований с более высокой точностью необходимо предусмотреть стабилизацию напряжения сети и размещение ОПСИС в камере, с устойчивой температурой, не зависимой от нагрева ОПСИС. Таким образом, перед проведением исследовательских испытаний световых характеристик ОПСИС следует принимать во внимание время стабилизации ($t_{\text{стаб.}}$) светового потока равное минимум 60 минутам с момента включения ОПСИС, а измерение начального значения следует осуществлять не ранее чем через 2-5 секунд в силу инерционности используемого оборудования.

Второй случай изменения светового потока с течением времени связан с необратимыми процессами деградации жизненно-важных элементов ОПСИС, отвечающих за светоотдачу, и занимает гораздо более продолжительную часть времени. Данное понятие часто называют деградацией светового потока, ее также следует связывать с количеством циклов включения и выключения ОПСИС.

При проведении измерений освещенности от светодиодных источников света люксметром следует проверить корректность кривой спектральной чувствительности.

Очевидно, что в реальных условиях эксплуатации возможны как установившиеся режимы работы ОПСИС, для которых можно использовать формулу для определения величины спада освещенности в виде:

$$\partial_{\text{спада}} = \frac{E_{\text{нач.}} - E_{\text{конечн.}}}{E_{\text{нач.}}} \cdot 100\%,$$

Так и режимы работы с наличием определенного количества циклов включения и выключения ОПСИС, тогда формула для определения величины спада освещенности будет иметь вид:

$$\partial_{\text{спада}} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{i_{\text{вкл.}}} - E_{i+1_{\text{вкл.}}}}{\sum E_{\text{вкл.}}} \cdot 100\%.$$

Погрешность определения спада освещенности может быть определена по формуле:

$$\delta_{\text{спада}} = \left(1 - \frac{\partial_E}{\partial_E + 1}\right) \cdot 100\%.$$

где ∂_E – относительное значение спада освещенности светильника, измеренное с течением времени.

Используя данные выражения, было обнаружено, что погрешность при обнаружении уменьшения уровня освещенности на 5% от номинального, составляет 20%. При спаде светового потока в 10% погрешность определения уровня спада освещенности уменьшается до 10% и лишь при предельных его значениях можно говорить о более точных измерениях.

Результаты аппроксимации кривых спада освещенности исследуемой светодиодной лампы

Как уже говорилось ранее, для определения срока службы непосредственно именно самого светодиода можно использовать западные стандартами от IESNA (общество светотехники – некоммерческое

образованное в Нью-Йорке общество, основанное на поддержке промышленности) типа LM-80-08 и TM-21-11, которые предписывают производить исследования ОПСИС в течение 10 тысяч часов, а далее производить аппроксимацию деградации светового потока до 70% и 50% спада от начального значения.

Однако из графика измерения спада освещенности от исследуемой светодиодной лампы видно, что при аппроксимации полученных значений следует рассматривать отдельные отрезки функции и применять частичную аппроксимацию. В данном случае, для полученную кривую графика можно условно разделить на три части (рисунок 4.2). И к каждому из отрезков применить линейную аппроксимацию.

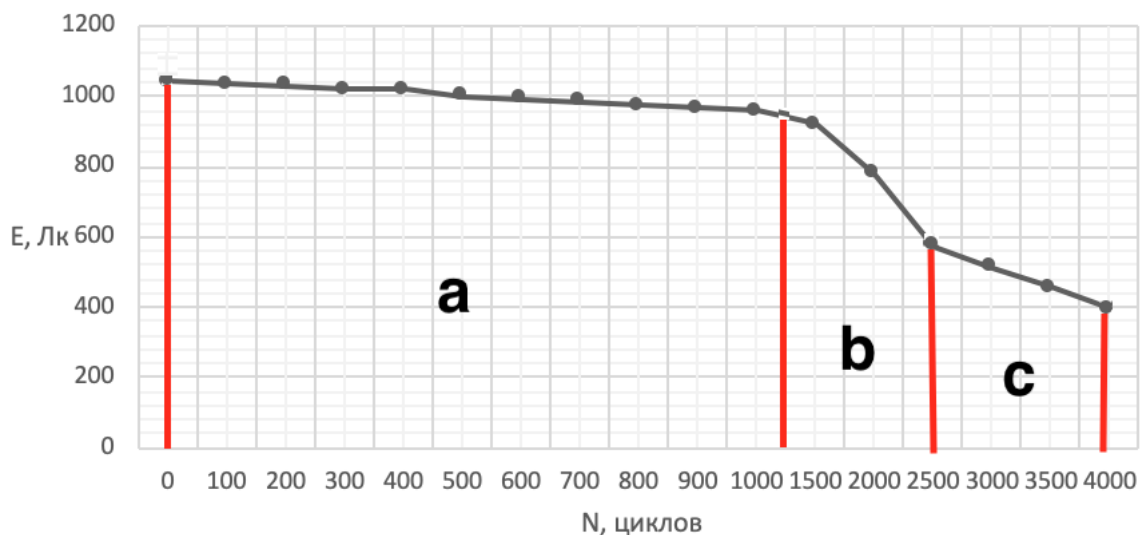


Рисунок 4.2 – Разделение полученной кривой на графике на три отрезка аппроксимации

На рисунке 4.2 «а» – первый отрезок аппроксимации с диапазоном значений от 0 до 1200 циклов, «б» – второй отрезок аппроксимации с диапазоном значений от 1200 до 2500 циклов, «с» – третий отрезок аппроксимации с диапазоном значений от 2500 до 4000 циклов.

Выполним нахождение и анализ уравнения линейной регрессии для отрезка «а» на графике рисунка 4.2, для этого вычислим коэффициенты a и b уравнения линейной регрессии:

$$a = \frac{\sum x_i \sum y_i - n \sum x_i y_i}{(\sum x_i)^2 - n \sum x_i^2} = \frac{7010 \cdot 11944 - 12 \cdot 6808500}{7010^2 - 12 \cdot 6100100} \approx -0,0842;$$

$$b = \frac{\sum x_i \sum x_i y_i - \sum x_i^2 \sum y_i}{(\sum x_i)^2 - n \sum x_i^2} = \frac{7010 \cdot 6808500 - 12 \cdot 6100100}{7010^2 - 12 \cdot 6100100} \approx 1044,51.$$

Следовательно, искомое уравнение линейной регрессии для отрезка «а» имеет вид:

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

Аналогично, для отрезка «b» и «с»:

$$\hat{y}_b = -0,2592x + 1261,6;$$

$$\hat{y}_c = -0,1164x + 864,3.$$

При средней ошибке аппроксимации:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100\% = \frac{0,2115}{4} \cdot 100\% \approx 5,3 \%$$

Исходя из полученных значений коэффициентов уравнения линейной регрессии, можно применять регрессионную линию для прогнозирования уровня спада освещенности в зависимости от количества циклов включения и выключения светодиодной лампы, в пределах исследуемого количества циклов. Также, для оценки доверительного интервала необходимо использование средней величины стандартной ошибки \bar{A} . Полученные коэффициенты позволяют более точно прогнозировать изменение освещенности с увеличением количества рабочих циклов светодиодной лампы. Однако, следует учитывать, что значение прогнозируемой освещенности, полученное с применением данных коэффициентов, должно иметь поправку на величину стандартной ошибки и погрешности измерений оборудования и лабораторных условий. [98]

4.5 Разработка методики контроля качества светодиодного осветительного прибора с учетом возможного причинения вреда для живых организмов

С быстрым ростом полупроводниковых световых технологий, светодиодное осветительное оборудование приобрело весьма внушительный размах разнообразия спектрально-энергетических характеристик. Все большее количество научных статей указывает на различного рода зависимости биологических воздействий ОПСИС от их спектрального состава света [99, 100].

Также известно, что на данный момент линейной зависимости между спектральным составом света и оптимальными уровнями освещенности различных помещений не установлено [101].

В связи с этим, возникает необходимость определения характерных психофизиологических эффектов воздействия на живые организмы, общую работоспособность и утомление органов зрения, в зависимости от выбранного динамического светодиодного освещения.

Следует также отметить чувство утомления, которое, как известно также наступает из-за нарушения сна, в результате чего снижается общая работоспособность человека, меняется острота чувств, органов зрения, восприятие в целом в результате чего увеличивается среднеквадратичное число количества ошибок человека.

Утомления может возникать в результате несовпадения естественных суточных ритмов освещения с графиком труда и отдыха в помещениях, где находится человек. [102] Однако, для определения кратковременного влияния описанных эффектов необходимо проведение сложного моделирования с воспроизведением полностью контролируемых условий окружающей среды и многосуточное пребывание живых организмов в гермокамерном помещении.

4.5.1 Расширение базы классификаторов светодиодных источников света

Очевидно, что для светодиодных источников света необходимо вводить расширенную классификацию, связанную с различными уровнями риска воздействия определенных длин волн и спектра световых лучей, излучаемых светодиодом на человеческий организм. Современные стандарты [7] достаточно широко рассматривает возможное негативное влияние источников искусственного света на человеческий организм, однако, не приводит классификацию светодиодных ламп по уровню опасности или степени риска возникновения негативного этого влияния.

Возможным было бы применение уточненной классификации светодиодных источников света по степени риска возникновения негативного влияния на человеческий организм.

Основой к такой классификации могут послужить западные стандарты по безопасности органов зрения ИЕС (Международная электротехническая комиссия, МЭК) /EN 62471 (Eye Safety) [103] в которых светодиодные источники света с голубым свечением могут подразделяться на четыре группы риска:

– 0 риск (отсутствие риска). Когда максимальное время воздействия излучаемого света может быть более 10000 сек и не несет за собой каких-либо негативных последствий для человеческого организма.

– 1 группа риска (низкий риск). Когда максимальное время воздействия излучаемого света в течение времени от 100 до 10000 сек не несет за собой негативных последствий, а фотобиологическая опасность определяется нормальными поведенческими ограничениями.

– 2 группа риска (умеренный риск). Когда максимальное время воздействия от излучаемого света в течение времени от 0,25 до 100 сек не представляется опасным из-за реакции отвращения на яркий свет или тепловой дискомфорт.

– 3 группа риска (высокий риск). Когда максимальное время воздействия от излучаемого света в течение времени от 0,25 сек опасно даже для кратковременного воздействия.

Данный стандарт указывает длину волны света, которая может вызвать определенные заболевания, а стандарт [7] приводит формулы для расчета функции опасности влияния инфракрасного, ультрафиолетового или синего излучения.

Поэтому было бы вполне уместно объединить два данных стандарта и установить требования для производителей светодиодных источников света по маркировке их оборудования соответствующими обозначениями для группы риска, которая будет присвоена источнику света, в зависимости от его изучающей способности и характеристик, а также изменения спектра излучения в зависимости от старения люминофора.

Таким образом, введя простые обозначения от 0 до 3, с использованием промежуточных, к примеру 1-2, будут вносить предупреждающую информацию и дополнительную ясность для потребителя, обозначая то, что при деградации люминофора, допустим на 30% данный источник света будет определяться уже не 1-й группой риска, а 2-й, при взаимодействии с человеком на расстоянии от 20 см.

Следует отметить, что в настоящее время не существует светодиода, излучающего только белый свет. Поэтому белого или бело-желтого свечения добиваются сочетанием трех светодиодов разного свечения, (красный, зеленый, синий). За счет того, что спектр их излучения отличается сильной линейчатостью, такие источники света часто применяются при производстве современных дисплеев, на основе светодиодных источников света. В таких дисплеях интенсивность свечения позволяет изменять цвет пикселей.

Есть еще один способ, который позволяет добиться белого или бело-желтого свечения – это использование эффекта фотолюминесценции. Данный способ широко распространен и заключается в покрытии светодиодов люминофором, который, пропуская через себя свет, позволяет добиться

смещения излучения в другой диапазон. Очевидно, что чем выше качество люминофора, тем выше будет качество спектра излучения. Как правило, для белых светодиодных источников света используют синий, фиолетовый и ультрафиолетовый излучатели в связке с люминофором, за счет которого получится выполнить смещение света в нужный диапазон и с нужной цветовой температурой. Поэтому, чем качественней покрытие светодиода, тем качественней будет излучение и тем дороже будет осветительный прибор и тем меньше визуального негативного воздействия он будет производить.

4.5.2 Формирование основных требований, предъявляемых к современному освещению с точки зрения поддержания нормального светового состояния окружающей среды

Многие исследования показывают, что одним из важнейших факторов способным привести к ухудшению самочувствия и функционирования органов зрения и чувств, вызывающее снижение работоспособности, является неадекватное, неадаптированное под необходимые условия труда и окружающей среды освещение.

Известно, что наибольшую чувствительность к искусственному освещению, имеют органы зрения, в тоже время, недостаточное количество света может привести к ухудшению функциональной активности клеток сетчатки.

Так в исследованиях [104, 106] описано снижение активности клеток сетчатки при регистрации ЭРГ-ответов, проводимой у жителей северных регионов в периоды поздней осени и зимы. Данное явления связано с снижением продолжительности дня. Исследования также показывают, что недостаток естественного освещения эффективно устраняется за счет адекватного совмещения естественного и искусственного освещения.

По результатам исследований [107, 108] ультрафиолетовое излучение оказывает на 70% больше фототоксичного действия на сетчатку глаза, чем

простое синее. Механизмы фотоповреждения сетчатки связаны с окислением зрительных пигментов и присутствующих в них пигментов старения (липофусциновых частиц), образующих при стимуляции ультрафиолетовым светом активные формы кислорода [109].

В первой главе данной диссертации уже говорилось о наиболее распространенных белых светодиодных источниках света, в которых в значительной мере преобладает длина волны, соответствующая интенсивности синего свечения (~420–480 нм). Исследования [110, 111, 112], показывают, что данная интенсивность вызывает наибольшую фотохимическую активность в отношении ретинального пигментного эпителия. Также было выяснено, что при умеренном синем свечении, воздействующем на животных, происходила перегрузка метаболизма сетчатки до 150% по сравнению с лампами накаливания, что может приводить к ускорению процессов старения и снижению функциональной активности регуляции обменных процессов между кровью и тканями.

Источники [113, 114] также подтверждают гипотезу о том, что наличие в спектре света с интенсивности сине-голубой длины волны может приводить к значительно большему ускорению процессов фотохимического повреждения сетчатки, чем остальные части спектра света, что дополнительно подтверждает необходимость регулирования количества в спектре излучения ОПСИС света с длиной волны 420-480 нм.

Основываясь на проведенных исследованиях, сформулируем основные критерии повышения безопасности ОПСИС.

Исходя из вышеизложенного, *первым критерием* для повышения безопасности светодиодного динамического освещения следует принять минимизацию излучаемых световых волн в области (420 – 480 нм).

Однако, важно отметить, что известно снижении симптомов астенопии при преобладании синего цвета в свете и стимулирующее влияние светодиодного излучения на зрительную работоспособность в коротких промежутках времени (60-90 минут), что значительно превосходит

эффективность люминесцентного освещения той же цветности (3000К, 4000К и 5000К) и освещенности (200, 400 и 1000 лк). Данные факты позволяют говорить о гипотезе временного повышения остроты зрения и замедлении процесса зрительной утомляемости, за счет коэффициента преломления оптических сред глаза для видимого излучения с разной длиной волны.

Таким образом, на основе данных положений можно сформулировать **второй предлагаемый критерий** обеспечения безопасности органов зрения человека, который говорит о том, что при необходимости высокой зрительной активности необходимо соблюдать соответствующую цветовую температуру.

Применение светодиодного освещения приводит к снижению реакции человеческого зрачка на солнечный свет, который присутствует, как естественный фон постоянно, что может привести к травматизму, который настанет внезапно, т.к. реакция зрачка со временем ухудшалась под воздействием светодиодного освещения.

Во всех источниках, где подробно указывается тип ОПСИС используются светильники с малоэффективными матовыми светорассеивателями, для которых характерно искажения света, ускоренное старения, а в некоторых случаях и хроматические аберрации по краям. Многообразии различных видов конструкции и материалов светорассеивающих стекол вызывает дополнительные затруднения при экстраполяции данных, полученных для конкретной модели светильника, что обуславливает постоянную необходимость в получении новых данных и проведении новых экспериментальных исследований. [114]

При рассеивании свет может снижать цветовую контрастность, не создавать теней и ухудшать распознавание реального размера помещения, и предметов, что неизбежно приводит к увеличению количества ошибок человека и влияет на снижения работоспособности [115].

Таким образом, можно сформулировать **третий предлагаемый критерий** обеспечения безопасности органов зрения человека, который говорит о необходимости более детального подбора характера ОПСИС с точки

зрения рассеяния света, его направленности и выборе светорассеивающих материалов с необходимыми характеристиками светопропускания и его искажения.

Ощущение пространства не менее важный фактор, который важно учитывать при проектировании систем освещения и ОПСИС. Несмотря на то, что он может показаться достаточно субъективным, исследования, проводимые в условиях гермообъектов, показывают, что «ощущение простора и комфортности замкнутого пространства может быть достигнуто при определенном взаимном расположении источников света и уровнях освещенности» [116]. В данных исследованиях также говорится, что для достижения эффекта субъективного расширения пространства необходимо учитывать равномерность освещения стен и потолка, так как традиционное размещение светильников на потолке может восприниматься более темным и тесным при одинаковых условиях освещенности.

Основываясь на анализе субъективного восприятия освещенности замкнутого пространства, можно сформулировать **четвертый предлагаемый критерий** обеспечения безопасности ОПСИС для человека – при котором следует учитывать геометрию замкнутого пространства, с учетом производимой деятельности человеком в этом пространстве.

Данный критерий особенно важен при проектировании систем освещения с использованием ОПСИС в объектах с относительно малым замкнутым пространством, которые также важно разделять по виду деятельности человека и времени пребывания в помещении. К таким объектам следует относить летательные аппараты, морские суда подводные лодки и пр.

Нормативными стандартами страны определено, что для отсеков гермообъектов необходимо обеспечить освещенность в 200 лк [117-120]. Однако, существуют исследования, которые говорят об устарелости данных требований, которые, по мнению специалистов, не могут обеспечить комфортных условий для поддержания нормальной работоспособности

внутри гермообъекта, а также не учитывают возможности современных энергоэффективных осветительных приборов [121-123].

Пятый предлагаемый критерий, выдвигаемый для современной системы освещения, должен учитывать соответствие системы освещения географическому расположению объекта, с учетом количества естественного света и продолжительности дня и его смены с учетом сезонности с учетом автоподстройка сетей освещения при взаимодействии с технологиями искусственного интеллекта.

Шестой предлагаемый критерий, выдвигаемый для современных системы освещения, должен предполагать наличие норм и правил по световому загрязнению, в результате которого происходит рассеивание света в нижних слоях атмосферы, которое приводит к засвечиванию ночного неба, что оказывает пагубное влияние на точность астрономических наблюдений и изменяет биоритмы живых существ. Значительная часть городских и промышленных сетей освещения неизбежно в той или иной степени перенаправляется или отражается вверх, что приводит к появлению над городами так называемых световых засветок или куполов. Это связано с неоптимальным выбором параметров конструкции при проектировании и делает менее эффективным использование систем освещения, что неизбежно приводит к перепотреблению электрической энергии.

Эффект засветки неба усиливается за счет распространения в воздухе частиц пыли и аэрозолей. Эти частицы дополнительно преломляют, отражают и рассеивают излучаемый свет.

Очевидно, что данный критерий в первую очередь касается крупных городов и промышленных комплексов, наибольшую роль в световом загрязнении играет уличное освещение, архитектурное, светящиеся рекламные щиты и прожекторы.

Световое загрязнение также оказывает влияние на поляризацию лунного света в небе, в присутствии городского освещения, где поляризованный лунный свет не может быть увиден многими животными, которые используют

свет для навигации. На данный момент уже зарегистрировано несколько сообщений о гибели целых выводках континентальных черепах, которые ориентировались на свет городских уличных фонарей вместо лунного.

Для реализации шестого критерия предлагается применять схемы по оценке класса темноты неба, предлагаемый вариант распределения уровней светового загрязнения неба изображен на рисунке 4.3, в рамках урбанизации и проектирования иллюминации больших городов необходимо принимать во внимание мощность распространения света (рисунок 4.4) и возможность негативного влияния его на живые организмы окружающей среды, флоры и фауны. Характерные вопросы для определения степени засветки неба указаны в приложении А.



Рисунок 4.3 – Уровни светового загрязнения неба

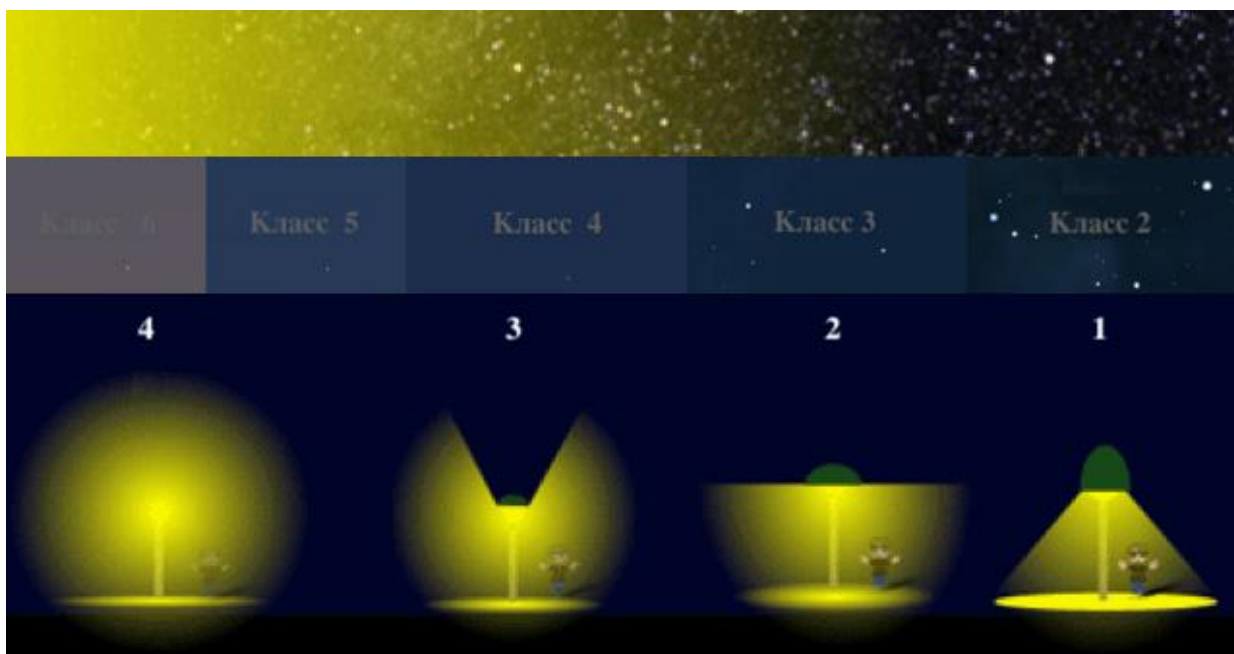


Рисунок 4.4 – Сравнение уровней светового загрязнения неба с уровнями ограничительной части плафонов светильников уличного освещения

4.5.3 Разработка рекомендаций к оптимизации современных систем освещения с точки зрения безопасности здоровья человека

На данный момент конкретная определяющая медико-биологические требования нормативная база применительно к светодиодным осветительным приборам, недостаточно проработана.

Нормативные требования, регламентирующие фотобиологическое воздействие ОПСИС описаны в стандарте ГОСТ Р МЭК 62471-2013. Требования к искусственному освещению в помещениях изложены в СП 2.2.1.1312-03, а также СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03.

Нормативные требования, предъявляемые к искусственному освещению в гермообъектах нормируются только с точки зрения уровней освещенности [117].

В настоящее время многие из приводимых требований в описанных нормативных документах заметно устарели и нуждаются в доработке [122, 123].

Так, например, минимальные уровни освещенности, описанные в ГОСТ Р 50804-95 и ГОСТ 26387-84 почти в два раза меньше, чем минимальные, установленные в СП 2.2.1.1312-03, СНиП 23-05-95.

Предположительно, такое несоответствие обусловлено тем, что описанные нормативные документы разрабатывались на основе параметров энергопотребления и световой отдачи люминесцентных и прочих осветительных приборов используемых в конце 90х годов. Очевидно, что ОПСИС позволят при таком же уровне энергопотребления получить заметно более высокие уровни освещенности [123]. Однако некая медлительность в массовом переходе при применении светодиодных технологий в гермообъектах дополнительно подчеркивает необходимость проведения структурного анализа влияния ОПСИС на организм человека, а также КЭЭ и разработки на основе полученных данных современных стандартов, регламентирующих качество ОПСИС и санитарно-гигиенические норм к помещениям с искусственным освещением на основе энергоэффективных светодиодных технологий.

Имеются данные [123], указывающие на то, что постоянное освещение не может универсально учитывать индивидуальные потребности человека и может оказывать различающееся влияние в зависимости от возраста и пола человека, находящегося в условиях данного искусственного освещения, а также времени суток.

Предположения о сезонной специфике влияния искусственного освещения также подтверждается многочисленными исследованиями [124, 125].

Например, в исследованиях [125] приводятся данные о влиянии яркого света (1000 лк) повышение устойчивости к сонливости днем, но при этом может развивать заметное психологическое утомление в вечернее и ночное время суток. В исследованиях также отмечается повышение продуктивности во время решения абстрактных логических задач, однако в то же время отмечаются повышение состояние рассеянного внимания [125].

В исследованиях [126] описано влияние цветовой температуры на общую работоспособность. Так при общем искусственном освещении с цветовой температурой 6000К описывается повышение работоспособности человека в вечернее время в сравнении с такими же условиями освещения с цветовой температурой 2700К. При этом описан тот факт, что заметной разности в дневное время не выявлено [126].

Отдельно отмечается световое воздействие цифровых гаджетов на органы зрения, в результате которого человеком воспринимается информация на экране, зрачок сужается не полностью, человеческий глаз моргает гораздо реже, и избыточная доза света проникается в органы зрения. В итоге чем ярче свет дисплея, тем вреднее будет его воздействие.

Основываясь на сформулированных требованиях к отдельным ОПСИС и системам освещения в целом, можно выделить основной подход к построению современной системы освещения, такая система освещения должна включать в себя:

1. Возможность генерировать свет с постоянными спектрально-энергетическими характеристиками.
2. Возможность регулирования яркости в зависимости от освещенности помещения и параметров естественной освещенности с учетом характера окружающей среды;
3. Возможность воспроизводить естественную суточную цикличность.
4. Возможность изменения цветовой температуры, для воспроизведения необходимого суточного цикла.
5. Иметь схожую корреляцию параметров, соответствующих весеннему дню.
6. Иметь возможность моделирования формы и расположения светильника (имитация естественного освещения) в зависимости от параметров помещения.

4.5.4 Разработка алгоритмов интеллектуальной системы освещения и методики контроля и оценки светодиодных осветительных приборов с точки зрения психофизиологических эффектов продолжительного воздействия на человека

Для того, чтобы проводить достоверную оценку психофизиологических эффектов воздействия искусственного освещения, воспроизводимого через ОПСИС, необходимо наличие адекватных методик. Общепринятыми методами оценки психической работоспособности считаются методы оценки продуктивности и качества тестовой деятельности человека к роли оператора.

Поскольку регулярный циркадный ритм является своевременным требованием для пожилых людей с умеренной деменцией и медсестринским персоналом с длительным рабочим временем, необходимо определить циркадные практики в домах престарелых на основе наших выводов в предыдущих разделах, в соответствии с которыми используются две основные стратегии обсуждается ниже. Во-первых, следует дополнительно изучить эффективные методы поддержания циркадного ритма. Такой пример включает в себя оптимизацию уровней естественного освещения с заменой и / или дополнением электрического освещения для искусственного стимулирования циркадной системы человека. Таким образом, циклы естественного света и темноты улучшаются, чтобы облегчить сон, в то время как естественный световой спектр смещается с добавлением искусственного освещения в течение 24 часов.

Для проведения более детального анализа предлагается проводить определенные исследования, методика которых состоит в следующем:

- 1) Потенциально подходящим местом исследования могут являться дома престарелых и пансионаты, или любые другие места, которые будут включать в себя жилые комнаты, не связанные с работой, коридоры без окон, места общего пользования, коммунально-бытовая среда, где основной акцент деятельности сконцентрирован на отдыхе.

2) Для мрачных пространств с плохим проникновением дневного света могут быть применены современные системы динамического управления освещением, чтобы искусственно эмулировать цикл динамического света с естественными цветовыми сдвигами, рассчитанными на циркадную поддержку.

3) Цикл динамического освещения можно применять для обеспечения настраиваемых длин волн усиленного синего или белого света с целью повышения производительности и получения определенных поведенческих результатов.

4) Система динамического освещения для исследования должна состоять из настраиваемых светодиодных светильников, с возможностью иметь встроенный многофункциональный интерфейс для управления через интеллектуальные устройства совместно с настенными переключателями и датчиками обнаружения/присутствия (например, движение человека, направление движения, неподвижность, падение человека, повышенная температура).

5) Предлагаемые стратегии динамического освещения, ориентированного на человека изображены ниже:

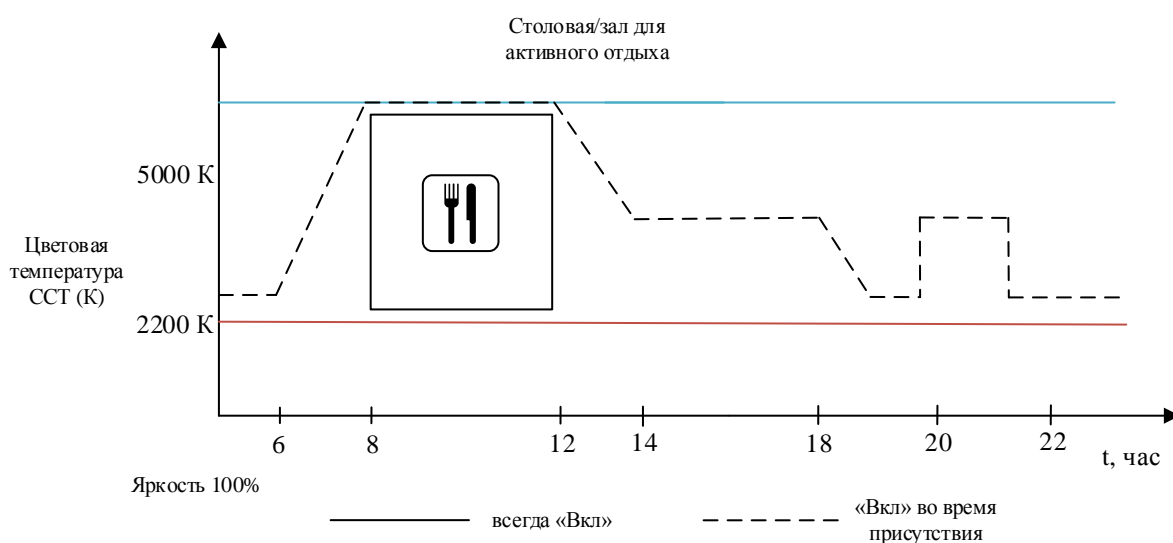


Рисунок 4.5 – Предлагаемый алгоритм функционирования интеллектуального освещения в зоне «Активный отдых, столовая»

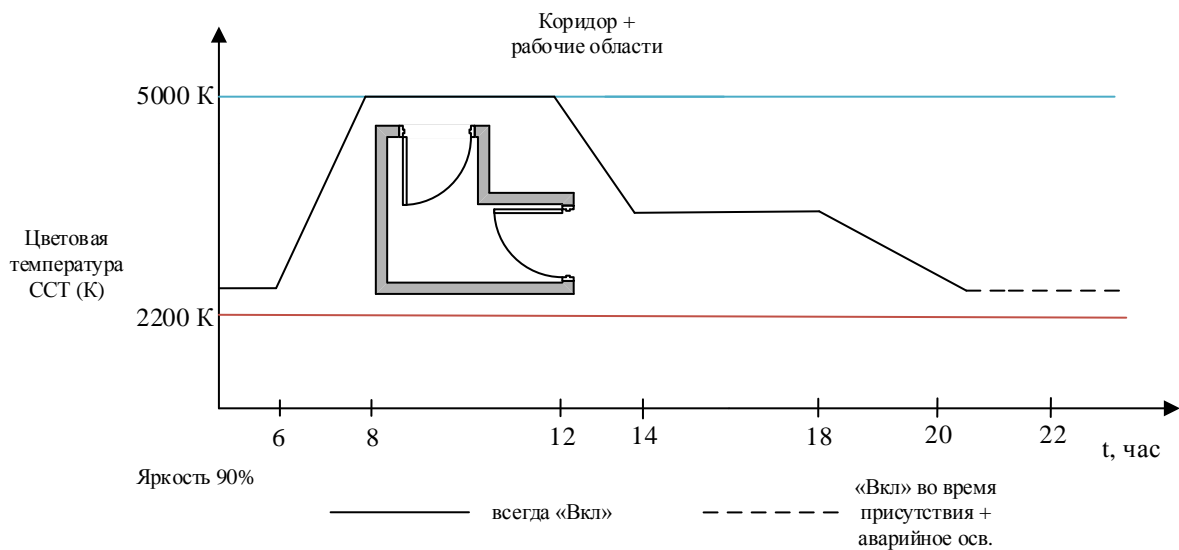


Рисунок 4.6 – Предлагаемый алгоритм функционирования интеллектуального освещения в зоне «Коридор, функциональные помещения»

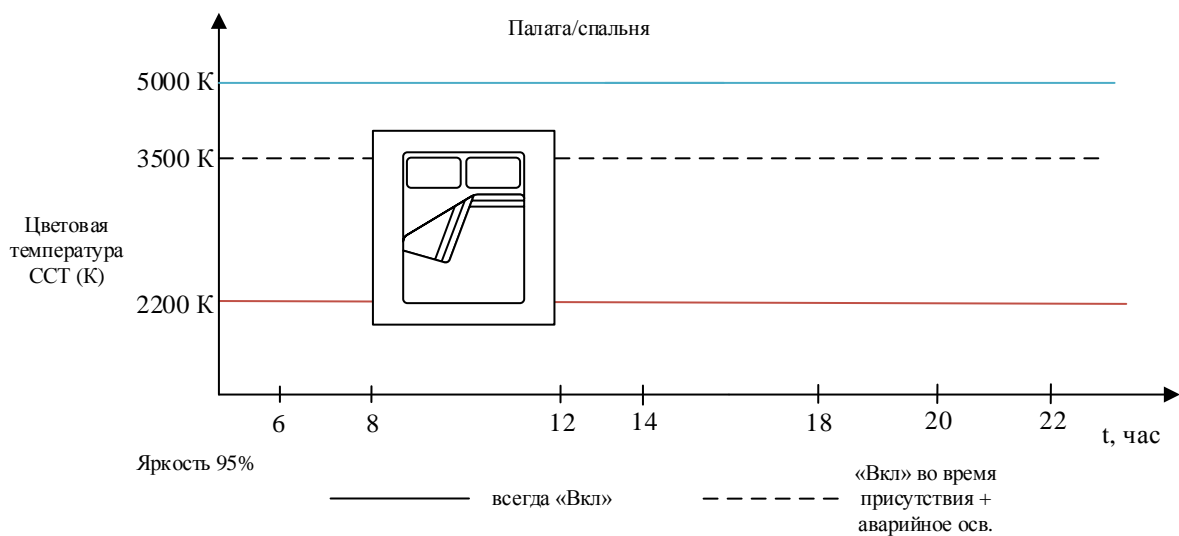


Рисунок 4.7 – Предлагаемый алгоритм функционирования интеллектуального освещения в зоне «Спальня»

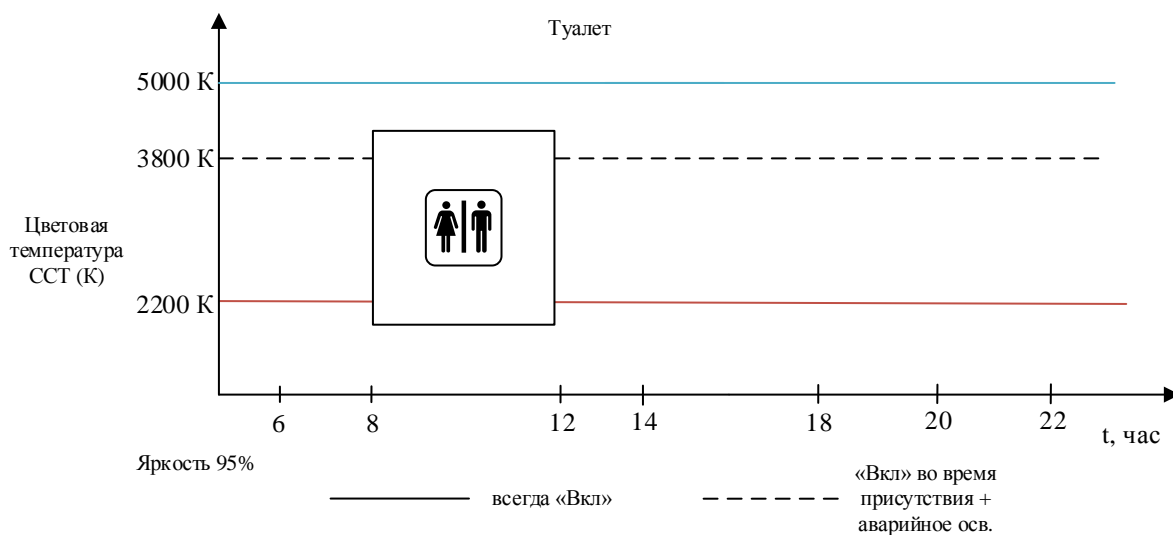


Рисунок 4.8 – Предлагаемый алгоритм функционирования интеллектуального освещения в зоне «Санитарных помещений»

Программно-аппаратным обеспечением для выполнения функций интеллектуального освещения по приведенным стратегиям может служить разработанное устройство управления светодиодным светильником, описанное в предыдущих главах. Предложенный код для программы управления такими устройствами приведен в приложении Г.

б) Структурная схема методики контроля и оценки рабочих и психофизических показателей воздействия динамического освещения, ориентированного на человека, представлена на рисунке 4.9.



Рисунок 4.9 – Структурная схема методики контроля и оценки рабочих и психофизических показателей воздействия светодиодного освещения

7) После установки и ввода в эксплуатацию должен происходить этап настройки динамического освещения с выбранными стратегиями, исследования следует проводить в течение от одного до двух месяцев, в разное время года.

8) Особый интерес представляет проведение такого рода исследований в замкнутых пространствах и помещениях, имитирующих пространство гермообъектов. В рамках проведения исследований с имитацией пространства гермообъектов имеет смысл подразделять исследуемую группу на две подгруппы – испытуемых жителей и испытуемых работников (модель поведения «пансионат», где исследуемую выборку людей делят на подгруппы для выполнения определенных заданий с наличием определенной формы подчинения). Данную манипуляцию с подгруппами имеет смысл производить для того, чтобы более конкретно определить влияние динамического интеллектуального освещения на группу людей в рамках не только определенного времяпрепровождения, но и социально-рабочей атмосфере, предполагающей наличие повышенной ответственности у одной из подгрупп.

9) Предлагаемый список вопросов, для определения восприятия динамического освещения, раскрыт в приложении Б.

Выделим несколько основных характеристик, по которым следует определять оценку психофизиологических эффектов светодиодного освещения:

- **профиль настроения** (Profile of mood states) [127], данный метод широко используется для проведения экспериментов в изолированных гермообъектах. Здесь основное внимание следует уделять интегральному показателю перемены настроения;

- **профиль выполнения простейших задач**, (работа с приборами и средствами измерения, перевод взгляда с помещения на улицу и обратно, решение простых математических и тестовых задач, черчение, рисование);

- **профиль засыпания** (определение субъективного ощущения качества сна в зависимости от взаимодействия человеческого глаза с светодиодными осветительными приборами по методике лидского списка вопросов для оценивания качества сна (Leeds Sleep Evaluation Questionnaire, LSEQ), (анализируемые показатели засыпание, пробуждение, восприятие света при

внезапном пробуждении и засыпание после внезапного пробуждения, качество сна, состояние после пробуждения);

- **профиль бодрствования** (определение дневной сонливости по каролинской шкале сонливости (Karolinska Sleepiness Scale, KSS). Также необходимо выделять возрастные группы, пол, вид основной деятельности человека.

- **профиль индивидуального восприятия** (определение зависимости одного и того же спектра видимого света) данный профиль может быть связан как с изменениями процессов восприятия света в результате старения (например за счет снижения коэффициента пропускания глазом коротковолновой части спектра видимого света) исследования [124] показывают что цветовая коррелированная температура от 3800 до 4000 К десятилетним ребенком воспринимается как холодный или нейтральный белый свет, в то время как человек в возрасте тридцати лет воспринимает данную цветовую температуру как более теплый свет (3500К), а пожилому человек шестидесяти пяти лет такая же цветовая температура будет казаться желтоватым светом (менее 3000К) [124]. Это происходит за счет изменения восприятия синей части света, в результате чего коэффициент пропускания света с длинной волны 400 нм падает до 33% от значения принятого номинальным (возраст 12 лет) 500 нм – до 46% 700 нм – до 52% [124]. В данном профиле следует также учитывать, что одно и то же искусственное освещение может иметь различное воздействие в зависимости от пола человека. Так, в исследованиях [124, 128, 129] приведены данные, подтверждающие большую восприимчивость у женщин к параметрам освещения, чем у мужчин. Например, нейтральный белый свет может способствовать повышению когнитивных способностей и настроению у женщин, когда для мужчин, более эффективным является воздействие «холодного» (более 4000К) освещения.

Опираясь на проведенный анализ и предложенные профили, можно сделать вывод о том, что развитие подобного рода методик применения

интеллектуального динамического освещения и контроля его длительного воздействия на психофизическое состояние человека может оказать позитивное влияние на работоспособность человека и комфорт условий его пребывания.

Результаты и выводы по главе 4

1. На основе проведенных исследований и анализа профилей настроения и влияния естественного освещения, разработан алгоритм интеллектуальной системы освещения, сформированы критерии влияния освещения, воспроизводимого через светодиодные источники света на человека и окружающую среду. Разработаны рекомендации и новый подход к оптимизации современных систем освещения с точки зрения безопасности здоровья человека.

2. Установлено, что возрастное изменение проницаемости света различной длины волны через органы зрения может искажать субъективное восприятие цветопередачи одного и того же источника света. Снижение коэффициента пропускания света с длиной волны 500 нм достигает 45% от номинальных значений.

3. Разработана методика контроля обеспечения светового потока ОПСИС в зависимости от температуры его корпуса. Даны рекомендации по усовершенствованию методики определения уровня спада светового потока светодиодных осветительных приборов и сопоставлению изменения уровня освещенности с изменением светового потока.

4. Произведен расчет коэффициентов уравнения линейной регрессии в процессе аппроксимации кривых спада освещенности исследуемой светодиодной лампы, которые позволяют применять регрессионную линию для прогнозирования уровня спада освещенности в зависимости от количества циклов включения и выключения светодиодной лампы, в пределах исследуемого количества циклов. На основе полученных выражений сделано

предположение, что погрешность определения спада освещенности в 5% составляет приблизительно 20%. При спаде светового потока в 10% погрешность определения уровня спада освещенности уменьшается до 10% и лишь при предельных его значениях можно говорить о более точных измерениях.

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:

- Обоснована и дополнена 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.

- 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 источниками 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.

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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ОПСИС – светодиодный осветительный прибор;

ИВП – источник вторичного питания;

ИИП – импульсный источник питания;

ИМС – интегральная микросхема;

КЭЭ – качество электрической энергии;

ПП – печатная плата;

ПС – паяное соединение.

СИД – светодиод, светоизлучающий диод;

СИ – средства измерения;

ЭУ – электронный узел;

ЭМС – электромагнитная совместимость;

ТОС – тепловая обратная связь;

ТУ – технические условия;

ТП – технологический процесс;

ТЗ – техническое задание;

УЗИП – устройство защиты от импульсных перенапряжений;

ШИМ – широтно-импульсная модуляция;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента Российской Федерации от 09.05.2017 г. №203 – О стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017 – 2030 годы.
2. Федеральный закон от 29.07.2018 N 255-ФЗ "О внесении изменений в статьи 7 и 22 Федерального закона "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации"
3. Темербаев С.А., Боярская Н.П., Довгун В.П. Анализ качества электроэнергии в городских распределительных сетях 0,4 кВ // Журн. Сибир. Федер.- ун-та. – 2013. – № 1. – С. 107–120.
4. Боярская Н.П., Довгун В.П., Кунгс Я.А. Проблемы компенсации высших гармоник в распределительных сетях агропромышленного комплекса/ Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2012. – 123 с
5. Фазлиева Я. С., Ахмадеева О. А. Проблемы энергосбережения и энергоэффективности зданий в России // Молодой ученый. – 2016. – №7. – С. 1020-1022. – URL <https://moluch.ru/archive/111/27864/> (дата обращения: 08.11.2018).
6. Международное энергетическое агентство. Тщетные усилия свет: Стратегии энергоэффективного освещения, ОЭСР: МЭА, 2008. – 7с.
7. ГОСТ Р МЭК 62471-2013 Лампы и ламповые системы. Светобиологическая безопасность.
8. Международная программа использования светодиодов для освещения городских улиц и помещений «LEDCity» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.magazinesvet.ru/analytics/33195/>
9. И.И. Карташев [и др.]; под ред. Ю.В. Шарова. Управление качеством электроэнергии /: Изд. дом МЭИ, 2006. – 320 с.

10. Степанов В. М., Базыль И. М. Влияние высших гармоник в системах электроснабжения предприятия на потери электрической энергии // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. №12-2.

11. Дребенцов, В. Прогноз развития мировой энергетики до 2030 года [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://ecpol.ru/2012-04-05-13-45-47/2012-04-05-13-46-05/901-energokartina-mira-k-2030-godu.html> (дата обращения: 06.04.2019)

12. Исследование характеристик светодиодного светильника RC-R251-001 / В. Е. Сактоев, А. И. Баташов, Э. Н. Чередов // Вестн. Вост.-Сиб. гос. ун-та технологий и упр. - 2017. - № 1. - С. 49-55. - ISSN 2413-1997

13. Кузьменко В. П., Солёный С. В., Шишлаков В. Ф., Солёная О. Я. Измерение качества электроэнергии в системе электроснабжения со светодиодными осветительными устройствами / Научный вестник НГТУ, том 74, № 1, 2019, с. 197-212.

14. Кузьменко В. П., Солёный С. В., Шишлаков В. Ф., Квас Е. С., Солёная О. Я. Исследовательские испытания светодиодных источников света / Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 7. С. 1-10.

15. ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008) Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии.

16. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

17. ГОСТ 33073-2014 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

18. Кравцов, А. В. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Показатели качества электроэнергии / А. В. Кравцов. – 2004. – Режим доступа: <http://khomovelectro.ru/articles/filtry-garmonik.html>. (дата обращения: 07.11.2018).

19. Mark Hodapp, CRE Senior Application Engineer. Philips Lumileds. IESNA LM-80-08 and TM-21-11.

20. ГОСТ Р IEC 62612-2019. Лампы светодиодные со встроенным устройством управления для общего освещения на напряжения свыше 50 В. Эксплуатационные требования.

21. Шепелев А. О., Киселев Б. Ю., Лысенко В. С. и др. Пути решения проблемы применения светодиодных источников света//Международный научно- исследовательский журнал. – 2016. – No 5-3(47) – С.211–213. URL: <https://research-journal.org/technical/puti-resheniya-problemy-primeneniya-svetodiodnykh-istochnikov-sveta/> (дата обращения: 08.04.2019).

22. С. С. Ананичева, А. А. Алексеев, А. Л. Мызин. Качество электроэнергии. Регулирование напряжения и частоты в энергосистемах: учебное пособие /; 3-е изд., испр. Екатеринбург: УрФУ. 2012. 93 с.

23. Высшие гармоники в сетях электроснабжения 0,4 кВ // Новости ЭлектроТехники. 2002–2003. № 6(18) – 1(19).

24. Кузьменко В. П., Солёный С. В., Шишлаков В. Ф, Квас Е. С., Солёная О. Я. Проблемы интеграции систем освещения и компонентов IoT/ Метрологическое обеспечение инновационных технологий: тезисы// Международный форум. СПб.: ГУАП, 2019. С. 224-227.

25. Колмаков, В. О. Активная фильтрация гармоник в контактной сети / В. О. Колмаков // Тр. XV науч.-техн. конф. КриЖТ ИрГУПС: в 2 т. / под ред. А. И. Орленко; КриЖТ ИрГУПС. – Красноярск, 2011. – Т. 1. – С. 9–11.

26. Боярская Н.П., Довгун В.П., Дербенев А.М. Адаптивный алгоритм формирования управляющих сигналов для активных фильтров гармоник. 9й международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии: Труды симпозиума. – С. Петербург, 2011, с. 84-89.

27. Кузьменко В. П., Солёный С. В., Квас Е. С. «Влияние светодиодных источников света на потребителей электрической сети» Электротехнические

комплексы и системы: материалы Международной научно-практической конференции/ Уфимск. гос. авиац.технич. ун-т – Уфа: РИК УГАТУ, 2018.

28. Потапкин Н.Н., Вишневский С.А., Ашрятов А.А. Повышение энергоэффективности осветительных установок общественных помещений // Современные проблемы науки и образования. 2015. – No 2. URL: <http://www.science-education.ru/122-20831> (дата обращения: 06.04.2019)

29. Айзенберг, Ю. Б. Современные проблемы энергоэффективного освещения // Энергосбережение. – 2009. – No 1. – С. 42–48.

30. Климов В. П., Москалев А. Д. Проблемы высших гармоник в современных системах электроснабжения общего назначения. М. Стандартинформ. 2014. 16 с.

31. Рейтинг промышленных светодиодных светильников // Современная светотехника. - 2013. - No 4. - С. 3-23.

32. Рейтинг светодиодных ламп-ретрофитов // Современная светотехника, 2013.- No5.-С.9-22.

33. Рейтинг светильников для подвесных потолков типа «Армстронг» и «Грильято» // Современная светотехника. – 2014. - No 1. – С. 2-17.

34. Age-related adaptive responses of mitochondria of the retinal pigment epithelium to the everyday blue LED lighting. Sereznikova N.N., Pogodina L.S., Lipina T.V., Trofimova N.N., Gurieva T.S., Zak P.P. в журнале Doklady Biological Sciences, издательство Pleiades Publishing, Ltd (Road Town, United Kingdom), том 475, № 1, с. 141-143

35. Тукшаитов Р.Х., Петрушенко Ю. Я. Некоторые методологические аспекты современной светотехники // Современная светотехника. - 2010. - No 3. - С. 76-80.

36. Резонансные явления в электроустановках зданий как фактор снижения качества электроэнергии // Новости ЭлектроТехники. 2003. № 6(24)

37. Куско А., Томпсон М. Качество энергии в электрических сетях: пер. с англ. – М.: Додэка-XXI, 2008. – 336 с.

38. ГОСТ IEC 61010-1-2014 Безопасность электрических контрольно-измерительных приборов и лабораторного оборудования.
39. ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008) "Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии"
40. Официальный сайт торговой марки Jazzway, производителя светодиодного оборудования. – URL: <https://www.jazz-way.com/> (дата обращения: 14.11.2018)
41. Розанов, Ю. К. Силовая электроника: учебник и практикум для СПО / Ю. К. Розанов, М. Г. Лепанов; под ред. Ю. К. Розанова. – М.: Издательство Юрайт, 2018. – 206 с. – (Серия: Профессиональное образование). – ISBN 978-5-534-05204-6.
42. Розанов, Ю. К. Силовая электроника: Учебник для вузов. 2-е изд., стереотип. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 632 с.: ил. – ISBN 978-5-383-00403-6.
43. Исследование характеристик светодиодного светильника RC-R251-001 / В. Е. Сактоев, А. И. Баташов, Э. Н. Чередов // Вестн. Вост.-Сиб. гос. ун-та технологий и упр. - 2017. - № 1. - С. 49-55. - ISSN 2413-1997.
44. ГОСТ 33073-2014 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
45. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
46. С. С. Ананичева, А. А. Алексеев, А. Л. Мызин. Качество электроэнергии. Регулирование напряжения и частоты в энергосистемах: учебное пособие /; 3-е изд., испр. Екатеринбург: УрФУ. 2012. 93 с.
47. ГОСТ Р 55710-2013 Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений.

48. ГОСТ Р 51317.3.2-2006 (МЭК 61000-3-2:2005) Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе).

49. Аррилага Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах: пер.с англ. – М: Энерго-атомиздат, 1990.

50. Колмаков, В. О. Качество электрической энергии в системах электро-снабжения со светодиодными светильниками / В. О. Колмаков, В. И. Пантелеев // Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований: Мате-риалы V Междунар. науч.-практ. конф., г. Норт Чарльстон, США, 22–23 декабря 2014 г. – С. 144–149. – ISBN: 978-1505897326.

51. Колмаков, В. О. Влияние полупроводниковых систем освещения на питающую сеть / В. О. Колмаков // Техническое творчество как средство развития конкурентоспособности и повышения качества инженерной деятельности: сб. тр. IV Всеросс. науч.-практ. конф. / под ред. Ю. Е. Жужговой. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2012. – Вып. 3 (186). – С. 97–102.

52. Официальный сайт ООО «Элекс – светодиодные технологии» URL: https://led-displays.ru/neispravnosty_svetodiodov.html. (дата обращения: 18.01.19).

53. Официальный сайт LED professional the global information hub for lightning technologies полупроводниковых излучателей URL: <https://www.led-professional.com/resources-1/articles/led-failure-modes-and-methods-for-analysis> (дата обращения: 18.01.19).

54. Гурин С.Ю., Гриценко Б.П., Акимов Б.В., Лукаш В.С. Исследование влияния конструкции светодиодного светильника на его тепловые поля // Известия ВУЗов. Физика. – 2013. – Т.56. – No 12/2. – С. 11-16.

55. Макаров, В.Г. Промышленные термопласты: справочник/ В. Г. Макаров, В. Б. Коптенармусов. – М.: Химия, 2003. – С. 120–133.

56. Светодиоды и их применение для освещения. Под общей редакцией ак. АЭН РФ Ю. Б. Айзенберга. М.: Знак, 2012.

57. K.C. Yung, H. Liem, H.S. Choy, Heat transfer analysis of a high-brightness LED array on PCB under different placement configurations, International Communications in Heat and Mass Transfer, Volume 53, April 2014, Pages 79–86.

58. Особенности эксплуатации светодиодов / В. Константинов, Е. Вставкая, А. Вставский, М. Пожидай // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – №5. – С. 56-57.

59. ГОСТ Р МЭК 60598-1-2011 Светильники. Часть 1. Общие требования и методы испытаний.

60. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95.

61. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.

62. Энергоэффективное электрическое освещение: Учеб. пособие / С. М. Гвоздев, Д. И. Панфилов, В. Д. Поляков и др.; Под ред. Л. П. Варфоломеева. М.: Изд. дом МЭИ, 2013. 288 с.

63. Внедрение энергосберегающих светодиодных систем освещения в государственных и частных сетях России // Полупроводниковая светотехника. 2009. № 2.

64. Хейз К. Современные подходы к качественному и недорогому энергоэффективному освещению // Современная светотехника. 2013. № 6. С. 59-61.

65. ГОСТ Р 54815-2011. Лампы светодиодные со встроенным устройством управления для общего освещения на напряжения свыше 50 В. Эксплуатационные требования.

66. Seguridad y Medio Ambiente journal №128. Godley BF, Shamsi FA, Liang FQ, Jarrett SG, Davies S, Boulton M. Blue light induces mitochondrial DNA damage and free radical production in epithelial cells. J Biol Chem 2005;280:21061-21066.

67. Behar-Cohen F, Martinsons C, Vienot F, Zissis G, Barlier-Salsi A, Cesarini JP, Enouf O, García M, Picaud S, Attia D. Light-emitting diodes (LED) for domestic lighting: Any risks for the eye? *Prog Retin Eye Res* 2011; 30:239-257.

68. Электронный ресурс, электронный журнал «passportbdd.ru» <https://passportbdd.ru/tehnologii/shema-podklyucheniya-draivera-i-4-led-chno-takoe-draiver-dlya-svetodiodov-i-kak/>

69. Бугров В.Е., Виноградов К.А. Оптоэлектроника светодиодов. СПб.: Национальный исследовательский университет, 2013. 174 с.

70. Никифоров С. Температура в жизни и в работе светодиодов // компоненты и технологии. – 2006 – №1 – С. 40-47.

71. К.А. Виноградова, В.Е. Бугров, А.А. Ковш, М.А. Одноблюдов, В.И. Николаев, А.Е. Романов. «Падение напряжения в белых и синих светодиодах при длительном времени работы на номинальном и повышенном постоянном токе» *Известия вузов. Приборостроение*. 2013. с. 93–101.

72. Виноградова Ксения Анатольевна, Бугров Владислав Евгеньевич, Ковш Алексей Русланович, Одноблюдов Максим Анатольевич, Николаев Владимир Иванович, Романов Алексей Евгеньевич. Дegradaция белых и синих светодиодов при длительном времени работы // *Приборостроение*. 2013. №11. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/degradatsiya-belyh-i-sinih-svetodiodov-pri-dlitelnom-vremeni-raboty> (дата обращения: 05.02.2019).

73. I.N. Ivukin, V.E. Bougrov, A.R. Kovsh, M.A. Odnoblyudov, A.G. Shalkovskiy, A.E. Romanov Heat transfer simulation and retrofit LED lamp plastic heat sink material optimization. *MPM e-journal* No 2, Vol. 17, 2013. p.178-182. URL: http://www.ipme.ru/e-journals/MPM/no_21713/contents.html (дата обращения: 10.04.2019).

74. Каталог светодиодов фирмы cree [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cree.com/led-chips/>

75. Лампы светодиодные с цоколем без встроенного устройства управления. Часть 2. Эксплуатационные требования. Разработка ГОСТ Р. Прямое применение проекта 34/А/1353/НР (2009-06) МЭК 62663-2.

76. Источники света электрические. Методы измерения световых и электрических параметров. (Взамен ГОСТ 17616-82 на территории РФ).

77. Байнева И.И., Байнев В.В. Программная модель для оценки эффективности и надежности светодиодных источников света и приборов // Полупроводниковая светотехника. – 2011.– №3.– С. 40-42.

78. Г. Карслоу, Д. Егер. Теплопроводность твердых тел. М., 1964 г., 488 стр. с ил. Теплопроводность твердых тел. Перевод со второго английского издания под редакцией проф. А.А. Померанцева

79. A. Lakshmanan, R. Satheesh Kumar, V. Sivakumar, M.T. Jose // Indian Journal of Pure & Applied Physics 49 (2011) 303.

80. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Том 3. электричество. М.: Наука. 1977. – 704 с.

81. Кисилев В., Черкашн В. Двухфазные теплопередающие системы для охлаждения светодиодных светильников // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – №3. – С. 27-31.

82. Смолянский В. Светильники с активным охлаждением. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.startbase.ru/knowledge/>

83. Григорьева С.В., Бакланов А.В., Яковлев А.Н. Математическое моделирование тепломассопереноса в системе теплоотвода для высокой мощности // Вестник Карагандинского университета. Серия Физика. – 2015. – №4(80). С. 31-38.

84. Гурин С.Ю., Гриценко Б.П., Акимов Б.В., Лукаш В.С. Исследование влияния конструкции светодиодного светильника на его тепловые поля // Известия ВУЗов. Физика. – 2013. – Т.56. – No 12/2. – С. 11-16.

85. Гурин С.Ю., Гриценко Б.П., Влияние тока светодиодов на температурные режимы светильника // Известия ВУЗов. Физика. – 2014 Т.57. – No 9/3. – С. 25 – 28.

86. Шпер В. Реферативный аналитический обзор / В. Шпер // Надежность: вопросы теории и практики. 2006. No3. С. 122-148.

87. ГОСТ В 20.57.403-81 (СТ В СЭВ 0264-87) Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Контроль качества и правила приемки. Введ. 01-01-1982. М.: Изд.-во стандартов. 35 с.

88. Иевлев, В. И. ИЗО Качество и надежность электронной компонентной базы ЭВМ специального назначения: учебное пособие / В. И. Иевлев, Г. А. Филиппов. – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – 102 с.

89. Бородин, С. М. Обеспечение надежности при проектировании РЭС: учебное пособие / С. М. Бородин. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – 106 с.

90. В. П. Кузьменко, В. П. Пашков Анализ причин отказов электронных узлов. Шестьдесят девятая международная студенческая научная конференция ГУАП: сб. докл.: В 2 ч. Ч I. Технические науки/ СПб.: ГУАП., 2016.

91. Строгонов А. Долговечность интегральных схем и производственные методы ее прогнозирования / А. Строгонов // Chip News. 2002. No 6. С. 44-49.

92. Боровиков С. М. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств. Учеб.-метод. пособие / С. М. Боровиков, И. Н. Цирельчук, Ф. Д. Троян., под ред. С. М. Боровикова. – Минск: БГУИР, 2010., – 68 С. :ил.

93. Шуберт Ф. Светодиоды / Пер. с англ. Под ред. А.Э. Юновича – 2-е издание. - М. ФИЗМАТЛИТ, 2008. - 496с.

94. Выбор оптимального режима работы светодиодных излучателей / Т.А. Барбасова, Е.В. Вставская, В.И. Константинов, В.О. Волков // Вестник ЮУрГУ. – 2010. – No2. – С. 48-51.

95. Маняхин Ф.И., Кудряшов В.Е., Туркин А.Н., Юнович А.Э. // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Том 33. – Вып. 2. – С.224-232.

96. ГОСТ Р 8.749-2011 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Светодиоды. Методы измерения фотометрических характеристик.

97. Joe-Air Jiang, Jen-Cheng Wang, Kun-Chang Kuo, Yu-Li Su, Jyh-Cherng Shieh, Jui-Jen Chou, Analysis of the junction temperature and thermal characteristics of photovoltaic modules under various operation conditions, *Energy*, volume 44 (2012), Pages 292-301.

98. V. P. Kuzmenko, S. V. Solyonyj, A. V. Rabin, O. Ya. Solenaya, and A. V. Rysin (2020). Definition and approximation of the light flux degradation of a LED lamp. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 734. 012197. 10.1088/1757-899X/734/1/012197.

99. Зуева, М.В. Нарушения физиологических ритмов при нейродегенеративных заболеваниях: проблемы и перспективы световой терапии [Текст] / М.В. Зуева, С.И. Рапопорт, И.В. Цапенко, Ю.А. Бубеев, О.М. Манько, А.Е. Смолеевский // *Клиническая медицина*. – 2016. – Т. 94. – № 6. – С. 427-433.

100. Краснов В.Н. Проблемы современной диагностики депрессии. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. Спецвыпуски. 2012; 112(11):3-101.

101. Архангельский Д.В., Снетков В.Ю. Исследование влияния света на циркадные ритмы человека // *Вестник МЭИ*. 2012. № 5. С. 104-108.

102. Алякринский, Борис Сергеевич. По закону ритма / Б. С. Алякринский, С. И. Степанова; Отв. ред. О. Г. Газенко. – М.: Наука, 1985. – 176 с.; 20 см.

103. IEC/EN 62471 (Eye Safety).

104. Altimus CM, Guler AD, Alam NM, Arman AC , Prusky GT , Sampath AP , and Hattar S. (2010) Rod photoreceptors drive circadian photoentrainment across a wide range of light intensities. *Nat Neurosci* 13:1107-1112.

105. Burgess HJ (2010) Partial sleep deprivation reduces phase advances to light in humans. *J Biol Rhythms* 25:460-468p.

106. Dijk DJ and Archer SN (2010) PERIOD3, circadian phenotypes, and sleep homeostasis. *Sleep Med Rev* 14:151-160p.

107. Вандевалле Г., Шварц С., Гранджин Д., Вийом С., Балто Э., Дегельдре С., Шабус М., Филлипс С., Люксен А., Дейк DJ и Макет П. (2010) Спектральное качество света модулирует эмоциональные реакции мозга у людей. *Proc Natl Acad Sci USA* 107: 19549-19554.

108. Vandewalle G., Schmidt C., Albouy G., Sterpenich V., Darsaud A., Rauchs G., Berken PY, Balteau E., Degueldre C., Luxen A., et al. Brain reactions to human exposure to violet, blue and green monochromatic light: the prominent role of blue light and the brain stem (2007 b) . *PLoS One* 2: C.124.

109. В. Н. Островский. Комментарий на тему: «Снижение энтропии при ионно-атомных столкновениях». *Physical Review A* 73, 016702 (2006).

110. Исследование механизмов фотомодуляции митохондриальной цитохром с оксидазы при действии низкодозового синего (450 нм) облучения. Донцов А.Е., и соавторы. Бутлеровские сообщения, изд. Бутлер. наследие (Казань), том 55, № 9, с. 22-28. – 2018 г.

111. Капцов В.А., Дейнего В.Н. Синий свет светодиодов - новая гигиеническая проблема // Анализ риска здоровью. 2016. №1 (13). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/siniy-svet-svetodiodov-novaya-gigienicheskaya-problema> (дата обращения: 27.01.2020).

112. Капцов Валерий Александрович, Дейнего Виталий Николаевич Транспортная светотехника: риски здоровью персонала и пассажиров // Анализ риска здоровью. 2016. №3 (15). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/transportnaya-svetotekhnika-riski-zdorovyu-personala-i-passazhirov> (дата обращения: 27.01.2020).

113. Исследования опасности синего света на живых крысах [Электронный ресурс] / БУЛЕНГЕЗ [и др.] // Светотехника. – 2015. – №6. – С. 10-13. – Режим доступа: <https://rucont.ru/efd/363048>

114. Lee, H.S. Influence of Light Emitting Diode-Derived Blue Light Overexposure on Mouse Ocular Surface [Electronic resource] / H.S. Lee, L. Cui, Y. Li, J.S. Choi, J.H. Choi, Z. Li, G.I. Kim, W. Choi, K.C. Yoon // *PLOS ONE* | DOI: 10.1371/journal.pone.0161041. – 2016. –18 p.

115. Danilenko, K.V. Dawn simulation vs. bright light in seasonal affective disorder: Treatment effects and subjective preference [Text] / K.V. Danilenko, I.A. Ivanova // Journal of Affective Disorders. – 2015. – Vol. 180. – P. 87-89.

116. Flynn, J.E. The effect of light source color on user impression and satisfaction [Text] / J.E. Flynn, T.J. Spencer // Journal of the Illuminating Engineering Society. – 1977. – Iss. 6. – P. 167- 179.

117. ГОСТ Р 50804-95. Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате. Общие медико-технические требования.

118. ГОСТ 12.0.002-2014. Система стандартов безопасности труда. Термины и определения [Текст]. - Введ. – 2016-06-01. – М.: Стандартиформ, 2014. – 47 с. 39.

119. ГОСТ 26387-84. Система «человек-машина». Термины и определения [Текст]. – Введ. 1986-01-01. – М.: Стандартиформ, 2006. – 7 с. 40.

119. ГОСТ Р 50804-95. Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате. Общие медико-технические требования [Текст]. - Введ. 1996-07-01. – М.: Издательство стандартов, 1995. – 118 с.

121. Дейнего, В.Н. Влияние света и физических полей на риск дисгармонизации синтеза мелатонина в шишковидной железе [Текст] / В.Н. Дейнего, В.А. Капцов, А.И. Сорока // Анализ риска здоровью. – 2014. – № 2. – С. 30-41.

122. Богатова, Р.И. Исследование пороговых характеристик восприятия визуальной информации оператором при регулировании параметров световой среды в период проведения 105 суточного эксперимент с изоляцией [Текст] / Р.И. Богатова, С.М. Гвоздев, В.П. Сальницкий, И.В. Кутина, А.В. Леонов, Н.Д. Садовникова, А.Е. Артюхова, А.А. Ливенцева, И.В. Тятых // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2011. – № 3. – С. 30-34.

123 Бизяк, Г. Спектры излучения и фотобиологическое действие светодиодов [Текст] / Г. Бизяк, М. Кланичек-Гунде, М.Б. Кобав, К. Маловр-Ребек // Светотехника. – 2013. – № 2. – С. 20–24.

124. Huiberts, L.M. Shining light on memory: Effects of bright light on working memory performance [Text] / L.M. Huiberts, K.C.H.J. Smolders, Y.A.W.de Kort // Behavioral Brain Research. – 2015. – Vol. 294. – P. 234-245.

125. Küller, R. The impact of light and colour on psychological mood: a cross-cultural study of indoor work environments [Text] / R. Küller, S. Ballal, T. Laike, B. Mikellides, G. Tonello // Ergonomics. – 2006. – Vol. 49. - Iss. 14. – P. 1496-1507.

126. Smolders, K.C.H.J. Investigating daytime effects of correlated colour temperature on experiences, performance, and arousal [Text] / K.C.H.J. Smolders, Y.A.W. de Kort // Journal of Environmental Psychology. – 2017. – Vol. 50. – P. 80-93.

127. McNair, D.M. EdITS manual for the Profile of mood states [Text] / D.M. McNair, M. Lorr, L.F. Droppleman - San Diego, California: EdITS/ Educational and industrial testing service, 1992. - 40 p.

128. Knez, I. Effects of indoor lighting on mood and cognition [Text] / I. Knez // Journal of Environmental Psychology. – 1995. – Vol. 15. – Iss. 1, – P. 39-51. 175.

129. Knez, I. Effects of colour of light on non-visual psychological processes [Text] / I. Knez // Journal of Environmental Psychology. – 2001. – Vol. 21. – Iss. 2. – P. 201-208.

Программа для расчета системы уравнений математической модели

износа основных элементов светодиодного светильника

```
function [dy] = PPPP(t, y) %vizov sistemy iz faila
dy=zeros(4,1); %vector levih 4astei
dy(1)=-0.00023*exp(-2790*0.00002)*(1-abs(1-y(1)))^2);
dy(2)=0.00023*exp(-2790*0.00002)*(1-abs(1-y(1)))^2);
dy(3)=-0.00000005*( 1-abs(1-(1-y(1))))^2);
dy(4)=0.00000005*( 1-abs(1- (1-y(1))))^2);
end
```

Программа и полученные данные:

```
P11=1;
P12=1;
P21=0;
P22=0;
flag=1;
y0=[P11,P12,P21,P22];
while flag>=0.5
t=0:1:10000;
y0=[ P11,P12,P21,P22];
[T,Y]=ode45(@PPPP,t,y0);
P11=P11-0.00023;
if P11>0.01
flag=0;
else
```

```
flag=1;
end
end
figure();
plot(T,Y)
grid
figure();
plot(T,Y(:,1))
title('P11')
grid
figure();
plot(T,Y(:,2))
title('P12')
grid
figure();
plot(T,Y(:,3))
title('P21')
grid
figure();
plot(T,Y(:,4))
title('P22')
grid
```


Предлагаемый список вопросов и описаний для определения степени засветки неба

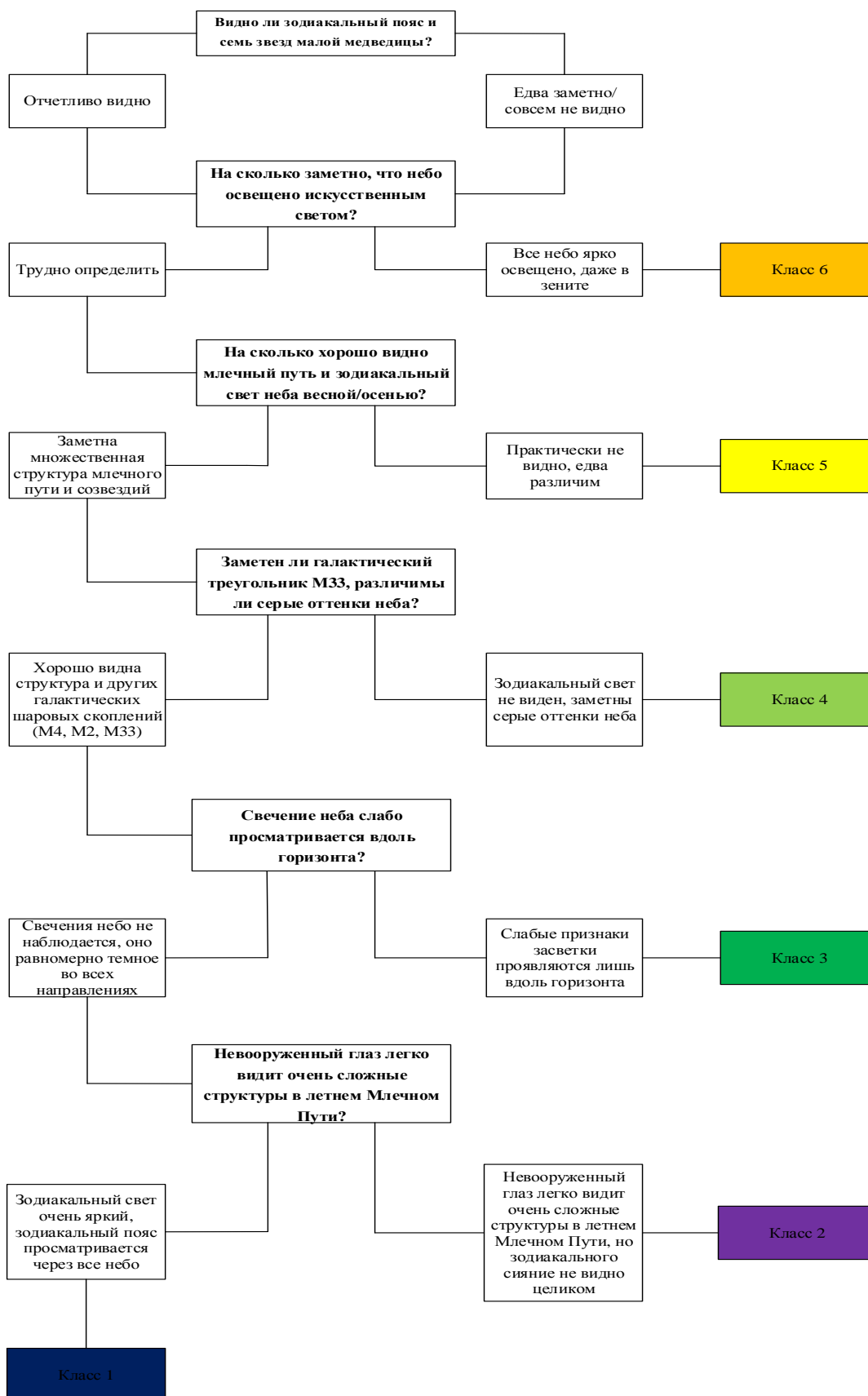


Таблица Б.1 – Предлагаемая классификация степени засветки неба

Порядковый номер класса степени засветки	Характерные цветовые оттенки	Восприятие небесных созвездий
Класс 6	(Характерный оттенок – оранжевый; характерное урбанистическое расположение: «небо над мегаполисом»)	Небо кажется серым, с желтыми или сиреневыми оттенками, может казаться бурым. Из созвездий возможно распознать только самые яркие, типа Большой Медведицы, Ориона, Кассиопеи. Млечный путь не доступен для наблюдения без специальных средств, невооруженным глазом.
Класс 5	(Характерный оттенок – желтый; Переход от пригородного неба к небу большого города)	Млечный путь все еще не виден без специальных средств наблюдения. Небо серое с оттенками розовато-серого серо-желтого неба на горизонте или белесое, рыжеватое, на небесном горизонте видны свечения городского пространства. Видимость звезд сильно зависит от текущей чистоты воздуха. В ясную зимнюю погоду с ясным небом и полным отсутствием смога появляется возможность различать двойные звезды, или спутники Юпитера с использованием 8-10 кратного бинокля.
Класс 4	(Характерный оттенок – зеленый; яркое пригородное небо)	Уже можно различить млечный путь в зените, ближе к горизонту он не виден. Облака все еще ярче неба, все еще заметны серые оттенки неба.
Класс 3	(Характерный оттенок – Темно-зеленый, характерное урбанистическое расположение: «деревенское небо»)	Млечный путь виден в зените уже хорошо и немного просматривается к горизонту. Облака примерно той же яркости, что и небо, также могут быть слабо освещены возле горизонта - там, где небо ярче, - но над головой они темные.

Класс 2	(Характерный оттенок – фиолетовый; истинно темное небо)	Млечный путь виден уже и у горизонта, но зодиакального сияние не видно целиком. Невооруженным глазом уже хорошо различимы более мелкие звездные скопления, например Плеяды. С помощью специальных средств наблюдения можно рассмотреть галактику в созвездии Андромеды.
Класс 1	(Характерный оттенок – темно-синий превосходно темное небо)	Структура Млечного пути кажется сложной и хорошо различима. Свет ярких звезд дает заметные тени на светлых облаках. Густые облака кажутся темнее чистых мест на небе.

Вопросы, связанные с определением восприятия интеллектуального динамического светодиодного освещения

- Q1: Испытуемые жители могут заснуть в течение 30 минут в постели в ночное время, как и в прошлые месяцы?
- Q2: Испытуемые жители могут с легкостью передвигаться ночью
- Q3: Испытуемые работники могут с легкостью передвигаться ночью, выполняя свои задачи?
- Q4: Испытуемые жители чувствуют себя в безопасности при перемещении с уровнями освещения в течение ночи?
- Q5: Какой свет, какую цветовую температуру предпочитают испытуемые жители для освещения палаты/спальни в вечернее/ночное время.
- Q6: Испытуемые работники могут с легкостью работать, обслуживая испытуемых жителей в условиях ночного освещения?
- Q7: Испытуемые жители могут легко выполнять свои задачи в условиях освещения в комнате для занятий в течение дня?
- Q8: Испытуемые жители чувствуют себя комфортно в условиях освещения в комнате для занятий в течение всего дня?
- Q9: Какой свет, какую цветовую температуру предпочитают испытуемые жители в комнате для мероприятий в вечернее/ночное время?
- Q10: Какой свет, какую цветовую температуру предпочитают испытуемые жители в игровой комнате в течение дня?
- Q11: Испытуемые работники могут обеспечить уход за жильцами в игровой комнате с текущим освещением в вечернее/ночное время?
- Q12: Какой свет, какую цветовую температуру предпочитают испытуемые работники в комнате для деятельности в течение ночи?
- Q13: Какой свет, какую цветовую температуру предпочитают испытуемые в комнате для занятий в дневное время?

- Q14: Испытуемые могут легко найти путь к туалету ночью?
- Q15: Светильники обеспечивают достаточную и равномерную яркость для испытуемых в туалетах в ночное время?
- Q16: Светильники обеспечивают достаточную и равномерную яркость для испытуемых в туалетах в течение дня?
- Q17: Какой свет, какую цветовую температуру предпочитают испытуемые в туалете ночью?
- Q18: Какой свет, какую цветовую температуру предпочитают испытуемые в туалете в течение дня?
- Q19: Зеркала и кафель не вызывают слепящего блика (отраженного света) в течение всего дня?
- Q20: Светильники обеспечивают достаточную и равномерную яркость для жителей коридора в течение дня?
- Q21: Какой свет, какую цветовую температуру предпочитают испытуемые жители в коридоре в течение дня?
- Q22: Светильники обеспечивают достаточную и равномерную яркость для испытуемых в коридоре в течение ночи?
- Q23: Какой свет, какую цветовую температуру предпочитают испытуемые для освещения в коридоре в ночное время?
- Q24: Светильники обеспечивают достаточную и равномерную яркость для испытуемых работников в коридоре в течение дня?
- Q25: Какой свет, какую цветовую температуру предпочитают испытуемые работники в коридоре в течение дня?
- Q26: Светильники обеспечивают достаточную и равномерную яркость испытуемых работников в коридоре ночью?
- Q27: Какой свет, какую цветовую температуру предпочитают испытуемые работники в коридор в ночное
- Q28: Мешает ли отражение и блики в коридоре?

**Программа управления интеллектуальным устройством управления
светодиодным светильником**

```

#include <math.h>
#define DO1 1 //Подключение 1 выхода контроллера к диммируемому
драйверу 2
#define DO2 2 //Подключение 2 выхода контроллера к диммируемому
драйверу 2
#define DO3 3 //Подключение 3 выхода контроллера к силовому ключу 5
#define AI1 A1 //Подключение 1 входа контроллера к датчику температуры 7
#define AI2 A2 //Подключение 2 выхода контроллера к датчику
освещенности 8
#define AI3 A3 //Подключение 3 выхода контроллера к датчику
освещенности 9
int Lux = 900; //Минимальное допустимое освещение
int Temp = 30; //Максимальная температура светильника без охлаждения
void setup() {
pinMode (AI1, INPUT);
pinMode (AI2, INPUT);
pinMode (AI3, INPUT);
pinMode (DO1, OUTPUT);
pinMode (DO2, OUTPUT);
pinMode (DO3, OUTPUT);
}
void loop() {
int T = 1/(log(map(analogWrite(AI1), 0, 1023, 0, 5) / 2.5) / 4300 + 1/298) - 273;
if (analogWrite(AI3)>Lux){
digitalWrite(DO1, LOW);
digitalWrite(DO2, LOW);
digitalWrite(DO3, LOW);
}
}

```

```
} else if (analogWrite(AI2)<=analogWrite(AI3)&&T<=Temp){
analogWrite(DO1, map(LuxOut, 0, 1023, 255, 0));
analogWrite(DO2, map(LuxOut, 0, 1023, 255, 0));
digitalWrite(DO3, LOW);
} else if (analogWrite(AI2)<=analogWrite(AI3)&&T>Temp){
analogWrite(DO1, map(LuxOut, 0, 1023, 255, 0));
analogWrite(DO2, map(LuxOut, 0, 1023, 255, 0));
analogWrite(DO3, map(T, 30, 100, 0, 255));
} else if (analogWrite(AI2)>analogWrite(AI3)&&T<=Temp){
digitalWrite(DO1, LOW);
digitalWrite(DO2, LOW);
digitalWrite(DO3, LOW);
} else if (analogWrite(AI2)>analogWrite(AI3)&&T>Temp){
digitalWrite(DO1, LOW);
digitalWrite(DO2, LOW);
analogWrite(DO3, map(T, 30, 100, 0, 255));
}
}
```

197022, г. Санкт-Петербург,
ул. Инструментальная,
дом 3 Литера К, парадная №4,
Б11 «Кантемировская»
+7 (812) 677-80-80
spb@rezonit.ru

УТВЕРЖДАЮ
ООО «РЕЗОНИТ»

Ген. директор А.А. Резов
«15» 09 2020 г.

АКТ РЕАЛИЗАЦИИ

результатов диссертационной работы Кузьменко Владимира Павловича «**Модели и методики обеспечения качества светодиодных осветительных приборов**», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.23 – Стандартизация и управление качеством продукции

составили настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы Кузьменко В.П. на тему «**Модели и методики обеспечения качества светодиодных осветительных приборов**», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены в технологический процесс:

- 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. Применение разработанной квалиметрической модели оценки эффективности теплоотводов светодиодных осветительных приборов на основе дополненной номенклатуры показателей качества светодиодных осветительных приборов и 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 3% в ООО «РЕЗОНИТ».

15.09.2020

*Управляющий
СПО дирекция*



Резов А.А.

УТВЕРЖДАЮ
ООО «Макро Солюшнс»
Руководитель направления
промышленной автоматизации
«27» ноября 2020 г.

АКТ РЕАЛИЗАЦИИ

результатов диссертационной работы Кузьменко Владимира Павловича «**Модели и методики обеспечения качества светодиодных осветительных приборов**», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.23 – Стандартизация и управление качеством продукции.

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Кузьменко В.П. на тему «**Модели и методики обеспечения качества светодиодных осветительных приборов**», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук и представленные в диссертации:

- Калиметрическая 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.

- 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, отличающаяся тем, что дополнительно содержит экспериментально полученные коэффициенты регрессионной линии спада освещенности, а также разработанные алгоритмы интеллектуального управления искусственным освещением, которые обеспечивают большую эффективность использования сетей освещения.

Применение разработанных моделей, методик и рекомендаций по обеспечению качества продукции при производстве светодиодных осветительных приборов и автоматизированных систем освещения в ООО «Макро Групп» позволило улучшить показатели отвода тепла в светодиодных осветительных приборах на 4%.

Руководитель направления
промышленной автоматизации



(Комаров И.В.)

УТВЕРЖДАЮ
Технический директор
завода «Электросила»
АО «Силовые машины»

А.А. Гребенников
2021 г.



АКТ РЕАЛИЗАЦИИ

результатов диссертационной работы Кузьменко Владимира Павловича **«Модели и методики обеспечения качества светодиодных осветительных приборов»**, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.23 – Стандартизация и управление качеством продукции.

Настоящий Акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Кузьменко В.П. на тему **«Модели и методики обеспечения качества светодиодных осветительных приборов»**, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук; в части представленной к рассмотрению математической модели тепломассопереноса и квалитметрической модели оценки эффективности теплоотвода с различных полупроводниковых приборов что позволило улучшить показатели отвода тепла до 5%. Предложенные в работе решения позволили повысить надежность эксплуатации приборов за счет оптимизации геометрии пассивных элементов системы охлаждения.

Заместитель главного конструктора по
проектированию электрических машин



Железняк И.Н.

УТВЕРЖДАЮ
Начальник отдела
материально-технического обеспечения
МУ «ВРМЦ»
Д. О. Делло
« 15 » _____ 2021 г.



АКТ РЕАЛИЗАЦИИ

результатов диссертационной работы Кузьменко Владимира Павловича «**Модели и методики обеспечения качества светодиодных осветительных приборов**», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.23 – Стандартизация и управление качеством продукции

Комиссия в составе:

Председатель –

заместитель начальника отдела – Свириденко О.П.

Члены комиссии:

инженер по ремонту – Никифоров А.Ю.

специалист отдела – Дейнега Л.Э.

составили настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы Кузьменко В.П. на тему «**Модели и методики обеспечения качества светодиодных осветительных приборов**», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены в процесс организация работ и контроль за техническим состоянием зданий и сооружений, за строительством, текущим и капитальным ремонтом объектов образования:

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, способствовали повышению уровня контроля качества на этапах эксплуатации продукции на 3%.

Применение методики 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 позволило сократить расходы электрической энергии в сетях освещения на 3%.

Председатель комиссии

Члены комиссии



Свириденко О.П

Никифоров А.Ю.
Дейнега Л.Э.

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

"БМД - АЭТ"

Россия, 196240, Санкт-Петербург, 5-ый Промысловый пр., д. 3
Р/с 40702810172000000456 в ЦАО Банк ВТБ г. Санкт-Петербург
Кор/с 3010181020000000704 г. Санкт-Петербург
БИК 044030704 ОКВЭД 33.20 ОГРН 1027800519427
ИНН 7801071711 КПП 780101001
Т. +7 (812) 375-75-23; e-mail: bmd-aet@yandex.ru




АКТ РЕАЛИЗАЦИИ

результатов диссертационной работы Кузьменко Владимира Павловича «**Модели и методики обеспечения качества светодиодных осветительных приборов**», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.23 – Стандартизация и управление качеством продукции

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Кузьменко В.П. на тему «**Модели и методики обеспечения качества светодиодных осветительных приборов**», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, 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».

Гл. инженер ООО "БМД-АЭТ"


/ Жилияков С. Н. /

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по образовательным
технологиям и инновационной
деятельности ГУАП

д.т.н., профессор,
В.Ф. Шишлаков

2021 г.



об использовании результатов диссертационной работы аспиранта кафедры электромеханики и робототехники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Санкт-Петербургского Государственного университета аэрокосмического приборостроения Кузьменко Владимира Павловича в учебном процессе Санкт-Петербургского Государственного университета аэрокосмического приборостроения

Мы, нижеподписавшиеся, доцент кафедры электромеханики и робототехники к.т.н. В.В. Булатов, доцент кафедры электромеханики и робототехники, к.т.н., доцент А.А. Мартынов, доцент кафедры управления в технических системах, к.т.н., доцент В.С. Акопов составили настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы Кузьменко В.П. на тему «**Модели и методики обеспечения качества светодиодных осветительных приборов**», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены в учебный процесс университета, а именно:

1. Дополненная номенклатура показателей качества светодиодных осветительных приборов с учетом существующих нормативных баз и жизненного цикла продукции.

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

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

4. Методика обеспечения качества эксплуатации осветительных приборов со светодиодным источником света.

Разработанные программные и технические решения, реализующие

процессы управления качеством электрической энергии и сетей освещения, используются в учебном процессе по направлению: 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника», 27.03.04 (220400) – «Управление в технических системах» при выполнении дипломного проектирования, в лекционных курсах и лабораторном практикуме учебных курсов «Электрические системы и сети», «Электроснабжение объектов отрасли», «Электромагнитная совместимость» «Математические методы исследований», «Технико-экономические риски при создании новой техники».

Полученные математические модели и разработанный алгоритм интеллектуальной сети освещения использовались в натуральных экспериментах и лабораторном практикуме и позволили наглядно продемонстрировать возможности автономной работы сетей освещения, построения сложных конфигураций и способов проектирования модульных светодиодных светильников, повысить интерес обучаемых к предмету.

Доцент кафедры электромеханики
и робототехники, к.т.н.

В.В. Булатов

Доцент кафедры электромеханики
и робототехники, к.т.н., доцент

А.А. Мартынов

Доцент кафедры управления в
технических системах, к.т.н., доцент

В.С. Акопов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 197321

УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫМ СВЕТИЛЬНИКОМ

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения" (RU)*

Авторы: *Кузьменко Владимир Павлович (RU), Солёный Сергей Валентинович (RU), Солёная Оксана Ярославовна (RU), Квас Евгений Станиславович (RU), Рысин Александр Владимирович (RU), Шишлаков Владислав Федорович (RU)*

Заявка № 2020102374

Приоритет полезной модели 21 января 2020 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 21 апреля 2020 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 21 января 2030 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021611831

Программа для решения уравнений оптимального управления объектом

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (RU)*

Авторы: *Солёный Сергей Валентинович (RU), Кузьменко Владимир Павлович (RU), Ефимов Юрий Геннадьевич (RU)*

Заявка № 2021611177

Дата поступления 08 февраля 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 08 февраля 2021 г.



*Руководитель Федеральной служ бы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0x02A5CFBC00B1ACFE5940A2F08092E9A118
Владелец *Ивлиев Григорий Петрович*
Действителен с 15.01.2021 по 15.01.2035

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021615117

Программа управления светодиодным светильником с элементом Пельтье

Правообладатель: **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (RU)**

Авторы: **Солёный Сергей Валентинович (RU), Кузьменко Владимир Павлович (RU), Рысин Александр Владимирович (RU), Создателева Мария Эдуардовна (RU)**

Заявка № **2021614355**

Дата поступления **02 апреля 2021 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **02 апреля 2021 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0x02A5CFBC00B1ACFE5940A2F08092E9A118
Владелец **Ивлиев Григорий Петрович**
Действителен с 15.01.2021 по 15.01.2035

Г.П. Ивлиев