

Восточно-Казахстанский государственный технический университет
им. Д. Серикбаева

УДК 681.5

На правах рукописи

ГРИГОРЬЕВА СВЕТЛАНА ВЛАДИМИРОВНА

**Оптимизация светодиодных систем освещения с элементами робастного
управления**

6D070200 –Автоматизация и управление

Диссертация на соискание ученой степени
доктора философии (PhD)

Научные консультанты:

доктор технических наук,
профессор, академик КазНАЕН
Квасов А.И.
доктор PhD, профессор
Györök György

Республика Казахстан
Усть-Каменогорск, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ СВЕТОДИОДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОСВЕЩЕНИЯ	12
1.1 Особенности применения светодиодов в осветительных системах	12
1.2 Анализ существующих систем контроля и управления светодиодным освещением	21
1.3 Применение теории робастности в электронных системах управления	25
1.4 Выводы по разделу, постановка задачи	30
2 ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В СВЕТОДИОДНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ	31
2.1 Разработка математической модели тепломассопереноса для типичных светодиодных конструкций	31
2.2 Численное решение нестационарных дифференциальных уравнений тепломассопереноса	39
2.3 Алгоритм численного моделирования	52
2.4 Выводы по разделу	54
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕТОДИОДНОЙ СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ	55
3.1 Компьютерное моделирование конструктивных параметров светодиодной матрицы с целью повышения теплоотдачи	55
3.2 Разработка новой конструкции светодиодного осветительного прибора	60
3.3 Обеспечение равномерности освещения рабочих помещений методом статистического моделирования конструктивных решений	65
3.4 Выводы по разделу	83
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ С ЭЛЕМЕНТАМИ РОБАСТНОСТИ	85
4.1 Разработка схемы регулирования системы светодиодного освещения	85
4.2 Разработка экспериментальной установки светодиодного освещения.	93
4.3 Разработка программного обеспечения автоматизированной системы управления LED освещением	98
4.4 Анализ экспериментальных данных	101
4.5 Выводы по разделу	106
5 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ	107
5.1 Исследования системы освещения в эксплуатационных условиях	107
5.2 Анализ полученных результатов, оценка эффективности работы управления системой светодиодного освещения	114
5.3 Выводы по разделу	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	118
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	119

ПРИЛОЖЕНИЕ А – Акты внедрения	131
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Свидетельство о государственной регистрации прав на объект авторского права	133
ПРИЛОЖЕНИЕ В – Отчет госбюджетной НИР МОН РК	134
ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Технические параметры осветительных приборов	136

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы следующие стандарты:

– СН РК 2.04-02-2011 Государственные нормативы в области архитектуры, градостроительства и строительства. Естественное и искусственное освещение. Издание официальное. Агентство Республики Казахстан по делам строительства и жилищно–коммунального хозяйства. – Астана: РГП «КазНИИССА», 2011. – 102 с.

– ГОСТ 7.32-2001 – Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. «Отчет и научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления». – Астана, 2001. – 21с.

– Инструкция по оформлению диссертации и автореферата. Министерство образования и науки Республики Казахстан, Высший аттестационный комитет. – Алматы, 2004.

– ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 166с.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ВВП – валовый внутренний продукт
ЖКХ – жилищно-коммунальное хозяйство
ДН – диаграмма направленности,
КПД – коэффициент полезного действия
КСС – кривая силы света
ЛЛ – люминесцентные лампы
МКО – Международная комиссия по освещению
МЭА – Международное энергетическое агентство
ОП – осветительный прибор
СД – светодиод
СДС – светодиодный светильник
СНГ – содружество независимых государств
СУО – система управления освещением
ТПМ – теплопроводящий материал
ШИМ – широтно-импульсная модуляция
ЭВМ – электронно-вычислительная машина
LED – light emitting diode
SMD – surface mounted device

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Проблема рационального использования электроэнергии в условиях ограниченности энергетических ресурсов и роста их потребления одна из самых актуальных, а ее решение становится стратегической задачей для многих государств. Продолжительный мировой экономический кризис, неуклонный рост цен на природные энергоресурсы, вопросы охраны окружающей среды, снижения выбросов вредных веществ и парниковых газов в атмосферу диктуют необходимость решения вопросов энергосбережения и энергоэффективности.

Президент Республики Казахстан Н.Назарбаев в своем Послании народу Казахстана отмечает: «Мы должны приложить все усилия для реализации, провозглашенной Казахстаном Глобальной энергоэкологической стратегии» [1], т.е. ставится задача снижения энергозатрат и экономии национальных энергоресурсов казахстанскими потребителями, эта мысль подчеркивается и в книге Главы государства «Глобальная энергоэкологическая стратегия устойчивого развития в XXI веке» [2].

Затраты на электроэнергию растут пропорционально потребностям населения. 1% роста ВВП в Казахстане приводит примерно к 0,5% росту потребления электроэнергии [3]. По расчетам Министерства индустрии и новых технологий РК за период с 2010 г. по 2020 г. потребление электричества в Казахстане увеличится на 50%. Такие данные говорят, что вопрос повышения энергоэффективности становится более актуальным. Для Казахстана совокупный потенциал по снижению энергопотребления оценивается на уровне 30%-35% [4]. Сфера освещения относится к числу направлений с наибольшим потенциалом энергосбережения. Ежегодно в Казахстане на нужды освещения расходуется одна девятая часть от общего потребления, поэтому одним из приоритетных направлений по снижению энергопотребления является снижение энергозатрат на освещение.

Если рассмотреть потребление электроэнергии в Казахстане за 1 квартал 2016 года по статистики энергетической службы Energyprom.kz потребление составило 24,4 млрд.квт.час. При расчете затрат электроэнергии на освещение получается около 3,2 млрд.квт.час. Для экологии это означает, что количество выбросов СО было произведено приблизительно 1,6 млн.тонн. Такое количество угарного газа приводит к многочисленным болезням, а также изменению климата. Очевидно, что снижение энергопотребления на освещение позволит значительно улучшить экологическую обстановку по выбросам парниковых газов. В связи с этим актуальным становится задача повышения эффективности систем освещения. В целом это положительно скажется на энергетическом балансе страны и экологической ситуации, создаваемой работой электростанций. Внедрение современных технологий, обеспечивающих эффективное расходование энергетических ресурсов, позволит избежать дефицита электроэнергии.

46 стран, в том числе Казахстан, утвердили программы стимулирующие экономию электроэнергии, а также переход на энергосберегающие технологии освещения. В настоящее время для внедрения энергоэффективного освещения в Казахстане утвержден закон «Об энергосбережении и повышении энергоэффективности», принята программа «Энергосбережение – 2020». Об актуальности повышения энергоэффективности и энергосбережения постоянно выделяется в ежегодном послании Президента Республики Казахстан народу Казахстана и в Государственной программе по форсированному индустриально-инновационному развитию Республики Казахстан. Реализация данных программ стимулирует развитие энергоэффективных систем освещения.

Существенная экономия освещения может быть достигнута благодаря применению новых полупроводниковых (светодиодных) источников света и разработке световых приборов на их основе. Мировой опыт свидетельствует, что уличное и внутриофисное освещение на основе автоматизации светодиодных технологий улучшает качество жизни, одновременно обеспечивая энергоэффективность, т.е. экономическую выгоду и экологическую безопасность. Лидер в области светодиодной технологии компания Philips Lighting намерена продать к 2020 году 2 млрд. светодиодных установок. Данная компания, внедрившая LED технологии в 15-ти этажном здании The Edge в Амстердаме, где установлено 6,5 тыс. ламп с экономическим эффектом 100 тыс. евро в год, уличное освещение в Лос-Анджелесе с годовым эффектом 10 млн. долларов утверждает, что развитию отрасли препятствует: недостаточное финансирование; необходимость постоянного совершенствования технологии; неудовлетворительное освещение в средствах массовой информации полученных результатов.

Основным элементом полупроводниковой светотехники является светодиод. Светодиоды обладают высокими технико-экономическими показателями (высокая световая отдача, длительный срок службы, высокая надежность, простота в обслуживании, экономическая эффективность), имеют широкую гамму цветов, конфигурации и мощности. В отличие от традиционных источников света полупроводниковая светотехника обладает рядом преимуществ по условиям применения: экологически безопасна, имеет высокую механическую прочность и виброустойчивость, в излучаемом свете отсутствует вредное ультрафиолетовое излучение и стробоскопический эффект, инерционность при включении светильников и хорошо работает при пониженной температуре. Отдельно следует выделить возможность регулирования светового потока светодиода в широкой полосе частот. Именно благодаря этим качествам светодиода полупроводниковая светотехника является одними из перспективных направлений развития освещения.

Существующие энергоэффективные светодиодные системы освещения имеют ряд недостатков, которые снижают темпы их внедрения – несоответствие заявленного срока службы за счет в первую очередь перегрева светодиодов и несовершенства конструкций светодиодных ламп.

Поэтому поставленная в диссертации задача оптимизации работы интегрированных светодиодных технологий освещения устраняет отмеченные недостатки путем автоматизации управления режимами работы светодиодной лампы с применением элементов робастности в управлении, получая при этом существенный экономический эффект, что является, бесспорно, актуальным.

Идея работы – совместить в «интегрированной» системе освещения новые светодиодные осветительные установки, учитывающие их тепловой режим и автоматизированные системы управления с элементами робастности.

Цель работы. Разработка автоматизированной энергоэффективной светодиодной системы освещения с элементами робастного управления.

Объект исследования – светодиодная система освещения.

Предмет исследования – технология оптимизации режимов работы и управления светодиодной системой освещения.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1) Провести анализ современного состояния функционирования и развития светодиодной технологии освещения.

2) Исследовать тепломассоперенос в типичных мощных белых светодиодах.

3) Смоделировать светодиодную систему освещения с целью получения оптимальных параметров.

4) Разработать экспериментальную установку автоматизированного управления светодиодным освещением с элементами робастности.

5) Провести натурные эксперименты автоматизированной системы управления светодиодным освещением с целью анализа полученных результатов и оценки ее эффективности.

Методы исследования. Методология исследования базируется на системном подходе к обоснованию комплекса теоретических и экспериментальных результатов, полученных при помощи методов математического и статистического анализа, математического и физического моделирования, светотехнических и фотометрических методов. В качестве инструментов моделирования и разработки программного обеспечения применяются современные пакеты прикладных программ: DIALux, STATISTICA, MATLAB, Solid Works, Autodesk Inventor, SCADA TRACE MODE. Экспериментальные исследования проводятся с использованием современных электроизмерительных и электронных приборов.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту

1) Методика теоретического расчета тепломассопереноса в осветительном устройстве с использованием нестационарных дифференциальных уравнений, описывающих комплекс взаимосвязанных процессов тепломассопереноса.

2) Модель тепловых характеристик осветительного светодиодного устройства с использованием современных программных средств «Solid Works» для получения оптимальных теплофизических характеристик осветительного прибора.

3) Модель оптимизации технологии освещения для обеспечения равномерного освещения рабочего помещения

4) Автоматизированные системы управления светодиодным освещением с элементами робастности, обеспечивающая надежные, эффективные характеристики системы освещения

5) Комплексное программное обеспечение, реализующее разработанные модели и алгоритмы энергосберегающего управления светодиодами новой конструкции.

Научная новизна работы

1) Разработана математическая модель тепломассообмена учитывающая особенности системы «основание светодиода – кристаллик – линза – окружающий воздух» для конструкции светодиодного осветительного устройства.

2) Разработана модель температурных режимов светодиодного осветительного прибора с целью получения оптимальных теплофизических характеристик.

3) Разработан новый подход к повышению надежности и долговечности светодиодной системы освещения за счет автоматизации управления температурным режимом светодиода.

4) Предложена методика повышения устойчивости светодиодной системы освещения на базе теории робастности.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в работе, базируются на комплексном использовании современных теоретических, экспериментальных методах исследования и общих подходах к моделированию сложных систем с учетом существующих неопределенностей, влияющих на работу системы управления светодиодным освещением. Сопоставимость результатов теоретических исследований, результатов моделирования и экспериментальных результатов достаточно высокая, что позволяет считать результаты диссертационной работы достаточно обоснованными и достоверными.

Практическая ценность работы

Результаты работы направлены на создание производства регулируемых высокоэффективных светильников и автоматизированных систем их оптимального энергосберегающего управления. Были созданы регулируемые светодиодные световые приборы, предназначенные для совмещенного освещения промышленных, жилых помещений и других объектов ЖКХ и обладающих повышенной световой эффективностью, надежностью и долговечностью за счет применения активных систем охлаждения.

Разработка новых энергосберегающих светодиодных осветительных установок позволит увеличить срок работы светильников и довести его до 50-100 тыс. часов, заявленного ведущими производителями светодиодов.

Внедрение автоматизированных систем управления освещением, реализующих разработанные модели и алгоритмы оптимального энергосберегающего управления позволит снизить энергопотребление на 55%.

Реализация результатов работы. Основные научные и практические результаты диссертационной работы приняты для внедрения ТОО «Айрон-Техник», казахско-французским предприятием ТОО «Лаборатория альтернативной энергетики»». Акты внедрения приведены в приложении А.

Получено свидетельство о государственной регистрации прав на объект авторского права под названием «Система автоматизированного управления светодиодным освещением с элементами робастности (программа для ЭВМ)» за №2336 от 9.11.2016г. (Приложение Б).

Представлен макет автоматизированной светодиодной системы освещения с элементами робастности на выставке «Неделя ВКО, посвященная ЭКСПО-2017» (г.Астана, ноябрь 2016).

Связь с государственными программами. Тематика диссертационной работы основана на приоритетных направлениях, выделенных в Постановлении Правительства Республики Казахстан «Об утверждении Программы «Энергосбережение – 2020» от 29 августа 2013 года № 904, направленное на снижение потребления электроэнергии за счет внедрения энергосберегающих технологий в области освещения.

Научные исследования, представленные в диссертации, проводились в рамках грантового финансирования МОН РК по теме «Оптимизация энергопотребления в светодиодных установках совмещённого освещения с автоматизированным управлением: алгоритмы, программное обеспечение, демонстрационный макет на ЭКСПО 2017» (№ госрегистрации 0113РК00822), 2013-2015гг, где диссертант являлся исполнителем (Приложение В).

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на: Международной конференции «Вычислительные и информационные технологии» (Усть-Каменогорск, 2013); Международной научно-практической конференции «Зеленая экономика – будущее человечества» (Усть-Каменогорск, 2014); Десятой Международной Азиатской школе-семинаре «Проблемы оптимизации сложных систем» (Чолпан-Ата, Кыргызская Республика, 2014); IV Международной научно-практической конференции «Академическая наука - проблемы и достижения» (Москва, Россия, 2014); 9th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas (Szekesfehervar, Hungary, 2014); XI международной Азиатской школе-семинар «Проблемы оптимизации сложных систем» (Чолпан-Ата, Кыргызская республика, 2015); IX Международной конференции «Эффективное использование ресурсов и охрана окружающей среды – ключевые вопросы развития горно-металлургического комплекса» и XII Международной научной конференции «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов» (Усть-Каменогорск, 2015); II Всероссийской студенческой научной конференции с международным участием «Студент: наука, профессия, жизнь» (Омск, Россия, 2015); Международной научно-технической конференции студентов, магистрантов и молодых ученых «Творчество молодых - инновационному развитию Казахстана» (Усть-Каменогорск, 2015);

11th International Forum on Strategic Technology (IFOST) (Novosibirsk, Russia, 2016); VIIth International Symposium and Young Scientists School «Modern problems of laser physics» (Novosibirsk, Russia, 2016); 11th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas (Szekesfehervar, Hungary, 2016).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 17 научных работ, в том числе 1 статья в журнале индексированном в базе данных Thomson Reuters, 1 статья в журнале индексированном в базе данных Scopus, 6 работ в изданиях рекомендуемых Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК, 8 работ в сборниках международных конференций, в том числе 2 статьи в изданиях дальнего зарубежья (Венгрия).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка использованных источников из 189 наименований, изложенных на 139 страницах компьютерного текста, включает 75 рисунков, 7 таблиц и 4 приложения.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ СВЕТОДИОДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОСВЕЩЕНИЯ

1.1 Особенности применения светодиодов в осветительных системах

С появлением светодиодов белого света [5] открылась возможность использования таких светодиодов в системах освещения. При этом необходимо было решить две основные задачи – обеспечить стабилизированный ток светодиода и отвод тепла от кристалла светодиода. В случае, когда эти задачи при проектировании системы освещения не решены, происходит постепенная деградация светодиода, приводящая к разрушению кристалла.

Первая задача была решена с помощью использования в источниках питания (драйверах) микроконтроллеров [6]. Такая технология позволила создать недорогие источники питания с достаточно высокой стабилизацией тока [7,8].

Важность источника питания в системе светодиодного освещения подтверждается данными консорциума надежности светодиодных систем (LSRC) департамента энергетики США (рисунок 1.1). Видно, что основная причина сбоев в работе светодиодных светильников заключается в выходе из строя источника питания. Именно источник питания определяет надежность осветительного прибора и влияет на эффективность работы всей системы освещения.



Рисунок 1.1 – Причины выхода из строя светодиодных систем освещения [9]

Вторая задача имеет также очень большое значение. Решена она путем использования пассивных радиаторов в промышленных светодиодных светильниках. Однако большие перепады температуры внешней среды от -40°C до $+50^{\circ}\text{C}$ приводят к повышению температуры кристалла и его деградации.

Кроме этого на рисунке 1 можно выделить параметры, влияющие на температурный режим работы светодиода, а именно качество пайки и попадание влаги с коррозией. При некачественной распайке светодиода может увеличиться сопротивление контакта пайки, а, следовательно, возрастет тепловая мощность. Аналогично к повышению температуры приведет попадание влаги, и коррозия радиатора. Поэтому влияние данных параметров приводит к выходу из строя светодиодного прибора раньше времени.

Рассмотрим примеры решения этих задач в промышленных устройствах светодиодного освещения.

Производителями интегральных микросхем предлагается много решений источников питания с микрочипами для мощных белых светодиодов [10 – 14]. Можно выделить фирмы Texas Instruments (США), Microchip(США),Maxim (США), ON Semiconductor (США),STMicroelectronics (Швейцария), ZETEX Semiconductors (Великобритания), MeanWell (Тайвань), Makroblock (Тайвань), Rohm Semiconductor (Япония).

Все выше перечисленные фирмы предлагают на рынке готовые драйверы для светодиодов различной мощности. Данные драйверы представляют залитые эпоксидной смолой схемы включения микросхемы или выполнены в виде металлического корпуса, внутри которого собран драйвер, обычно без каких-либо регулировок параметров драйвера и функций управления. В обоих случаях в готовых модулях имеются только входные и выходные контакты, к которым подключаются с одной стороны линейка светодиодов, а с другой – напряжение питания.

При использовании готовых источников питания невозможно использовать нестандартные режимы включения светодиодов, различные конфигурации конструкций осветительных приборов (ОП). Кроме этого об оптимизации работы таких устройств в системах освещения речи не идет. Поэтому для оптимизации питания светодиодных приборов освещения, а также для обеспечения управления работой светодиодами приходится создавать собственные конструкции источников питания с подключением к внешнему контроллеру управления системой освещения. В связи с этим нами были проанализированы не готовые модули источников питания, а интегральные микросхемы ведущих фирм производителей.

Фирма Rohm Semiconductor [15,16] выпускает линейку микросхем, обеспечивающую питание до 247 светодиодов. Все микросхемы имеют ШИМ регулирование и высокую стабилизацию тока (при 350мА точность составляет $\pm 4\%$). Данные микросхемы в основном используются для подсветки жидкокристаллических экранов, архитектурно-декоративного освещения.

Линейка микросхем фирмы ON Semiconductor [17,18] используется для светодиодов мощностью от 1Вт до 7Вт, регулировка тока осуществляется за счет изменения напряжения. При этом только одна микросхема CAT4101 имеет ШИМ регулирование и предназначена для питания светодиодов мощностью более 5Вт. По точности установки тока фирма изготовитель дает значение $\pm 10\%$. В микросхемах реализована гистерезисная защита от перегрева, которая

срабатывает при температуре 160°C . КПД преобразователя составляет 87%. Данные микросхемы часто используются в автомобильной промышленности.

Популярные микросхемы для питания и управления светодиодами производит фирма Texas Instruments [19, 20]. Предназначены для питания светодиодов мощностью 1Вт-3Вт, при этом точность стабилизированного тока составляет 8%. Особенностью является встроенный усилитель ошибки обратной связи, а также генератор опорного тока, вырабатывающий ток в зависимости от входного напряжения. Микросхемы имеют защиту от перенапряжения. Можно отметить недостаток в виде имеющихся пульсаций выходного тока больше на несколько процентов, чем в других аналогичных микросхемах. И хотя данный недостаток можно устранить путем увеличения мощности конденсатора во вторичной цепи скорость обработки изменений тока в обратной связи понизится.

Недорогим и эффективным понижающим драйвером управления белыми светодиодами являются микросхемы фирмы Makroblock [11,22]. Представляют собой частотно-импульсный понижающий преобразователь с гистерезисным методом управления по выходному току. Данный метод управления исключает потребность в цепях компенсации контура регулирования и уменьшает количество используемых компонентов, что упрощает проектирование источника питания. Драйвер имеет высокое значение эффективности до 96% при входном напряжении 12В и нагрузки состоящей из цепочки трех последовательных светодиодов с током 350мА. В тоже время несмотря на хорошие характеристики по управлению стабилизация тока составляет более 10%, что ухудшает режим работы светодиода, а следовательно и время его работы.

Близкими характеристиками обладают микросхемы фирмы ZETEX Semiconductors [23]. Данные микросхемы в основном предназначены для мощных светодиодов от 1Вт до 6Вт. Имеют ШИМ регулирование и систему защитных мер от короткого замыкания и перегрева корпуса. Типовая точность выходного тока составляет 4%. К недостаткам можно отнести влияние входного напряжения на характеристики и стабильность выходного тока.

Для питания светодиодов также можно использовать понижающие стабилизаторы напряжения STMicroelectronics [24,25]. Для преобразования данных устройств в стабилизатор тока необходимо значительно изменить схему включения. При этом обычно снижается общий КПД устройства за счет выделения дополнительной мощности в цепочки обратной связи. Если поставить цель не уменьшать КПД устройства то, тогда необходимо использовать дополнительно в схеме питания светодиодов операционный усилитель для усиления напряжения датчика тока. Поэтому, несмотря на низкую стоимость микросхем данной фирмы, использование требует усложнение схемы включения. Фирма также имеет линейку микросхем, выдающими на выход стабилизированный ток. Микросхема выпускается с выходным током 0.5А, 1,5А и 2А. Микросхемы имеют напряжение питания от 4,5В до 40В, что не удобно при работе в сети переменного напряжения 220В.

Широкий диапазон использования для светодиодных осветительных систем имеют микросхемы фирмы MeanWell [26–28]. На основе данных микросхем созданы драйверы для светильников различных мощностей от 1Вт до 100Вт. Отличаются от других аналогичных микросхем высоким КПД и эффективным управлением мощностью светодиодов с использованием трех вариантов регулирования мощности – ШИМ регулирование, регулированием внешним постоянным напряжением и регулирование с помощью подстроечного резистора. Единственным недостатком линейки микросхем фирмы MeanWell является относительно высокая цена. И при этом обычно фирма продает драйвер целиком, а не отдельно микросхемы.

Микросхемы фирмы Maxim [29,30] предназначены для работы со светодиодами в широком диапазоне мощностей. Преимущества заключаются в низкой стоимости, простоты включения, а также высокой точности стабилизации тока. Отклонения от установленного тока составляет от 2% до 5%. Однако для реализации драйверов при включении микросхемы необходим дополнительный каскад для понижения напряжения питания микросхемы.

Можно выделить широко используемые микросхемы драйверов фирмы Microchip (ранее фирма Supertex) [31 -33], которые нашли широкое применение в драйверах для мощных белых светодиодов благодаря простоте схемного решения и низкой стоимости. Использование микросхем Microchip позволяет создавать драйверы без гальванической развязки от сети и без корректора коэффициента мощности. Выходной каскад типовой микросхемы имеет каскадную схему включения, что позволяет снизить потери при переключении по высокому напряжению, тем самым поднять общую эффективность преобразователя. Драйверы имеют защиту от обрыва цепи светодиодов, от перенапряжения на выходе и от перегрева. Следует отметить, что понизить тепловыделение микросхемы можно включив в цепь питания стабилитрон на 100В - 200В, и на эту величину понизить напряжение питания микросхемы, а соответственно снизить рассеиваемую мощность. В настоящее время микросхемы фирмы отличаются от других лучшими характеристиками по точности и стабильности поддержания выходного тока. При разработке собственной светодиодной системы освещения нами был создан драйвер [34] на основе микросхемы HV9910 компании Microchip.

Причины отклонения по току фирмами изготовителями не приводятся. Однако следует заметить, что, по-видимому, основной причиной является температурные изменения кристалла светодиода и как следствие изменение вольтамперных характеристик светодиода. Имеются также и дополнительные возмущения, приводящие к флуктуациям тока. Это может быть нестабильность внешней сети питания, колебания температуры микросхемы, изменения внутренних сопротивлений, индуктивности и емкости микросхемы. В связи с этим организация системы с элементами робастного управления, отслеживающей внутренние и внешние неопределенности, позволит обеспечить более стабильный ток и продлить время работы светодиода.

Вторая задача изначально решалась с применением пассивного

охлаждения, а именно с использованием обычных медных или алюминиевых радиаторов [35-38]. Однако даже при использовании светодиодов мощностью 1Вт не во всех случаях пассивное охлаждение позволяет поддерживать температуру кристалла светодиода ниже допустимой ($80^{\circ}\text{C} - 85^{\circ}\text{C}$) [39]. Это обстоятельство подтолкнуло к проведению множества теоретических и экспериментальных исследований теплопереноса от кристалла светодиода к подложке и радиатору.

Большинство работ по исследованию тепловых характеристик светодиодов применяют приближенные расчеты на основе метода тепловых сопротивлений [40-45]. Более точные расчеты основаны на использовании моделирования распространения тепла в кристалле и подложке светодиода. Одним из таких методов является использование модели электрической подсистемы, предложенной М. Романовским и С.Еханиным в статье [46].

Для моделирования тепловых процессов в светодиоде с импульсным питанием С.Шибайкиным и А.Мышонковым в работе [47] предлагается использовать уравнение баланса энергии подводимой к кристаллу и отводимой от него с помощью излучения и теплопередач. При этом изучение изменения температуры активной области светодиода с использованием данного метода является не совсем корректным. Данный подход более подробно описан А.Мышонковым в диссертации [48].

Классический подход для расчета изменения температуры в системе кристалл–подложка–окружающая среда осуществляется с помощью построения математической модели основанной на уравнении теплового баланса. В статье [49] А.В. Пуговкиным, В.С. Степным, А.Ю. Антоновым и М.А. Еремич изложен данный подход, однако методы решений не описаны. Также в других работах [50-52] используется приближенные формулы решения уравнения теплового баланса.

Из последних работ можно выделить работу О. Руденко и П. Стрижак [53]. В данной работе проводится численное решение тепломассопереноса, но для конструкции отличной от рассматриваемой в диссертации и без описания методики решений этих уравнений.

В диссертации нами рассматриваются процессы тепломассопереноса в светодиоде, изложенные в статьях [54,55] и доложенные на международных конференциях [56,57].

К настоящему времени существует большое количество производителей белых мощных светодиодов. Однако необходимо выделить несколько фирм, выпускающих светодиоды с высокими показателями энергоэффективности, световых характеристик и надежности: Nichia (Япония)[58]; OSRAM Opto Semiconductor (Германия) [59]; Philips Lumileds Lighting (США) [60]; Seoul Semiconductor (Ю.Корея) [61]; Cree (США) [62]; Prolight Opto (Тайвань) [63]; Edison Opto Corporation (Тайвань) [64]; Led Engin (США) [65]. На основе проведенного сравнительного анализа и изучения характеристик светодиодов вышеперечисленных производителей во всех исследованиях диссертационной работы были использованы белые мощные светодиоды фирмы Nichia.

Разработчики постоянно улучшают светотехнические характеристики светодиодов, повышают КПД и световую отдачу, увеличивают мощность излучения кристалла. Увеличение мощности светодиода приводит к росту теплового потока, что требует увеличение площади поверхности теплообменника (радиатора) для достижения требуемого уровня теплового режима кристалла. В настоящее время предлагается большое разнообразие конструктивных решений радиаторов, материалов и способов их изготовления. При использовании пассивных методов теплообменник охлаждается за счет естественной конвекции. Высокая температура окружающего воздуха, запыленность теплорассеивающей поверхности могут снизить эффективность работы системы и привести к деградации кристалла. Кроме этого большие габаритные размеры, а также дизайн предлагаемых решений сужают области их применения. Конструкции осветительных приборов с использованием мощных светодиодов на основе радиаторов в настоящее время заняли сектор внешнего освещения.

Представляемые на рынок новинки мощных и сверхмощных светодиодов демонстрируют высокие показатели светового потока при стабильных рабочих параметрах во времени, увеличение эффективности при уменьшении габаритных характеристик светодиода и печатной платы. Однако потенциальные возможности указанные разработчиками не гарантируют их достижение в реальных осветительных конструкциях. Это, прежде всего, связано с высокой концентрацией выделяемого тепла светодиодом. Реализация свойств мощных белых светодиодов требует применения высокоэффективных механизмов рассеивания тепла, к которым относятся методы активного охлаждения. Можно выделить жидкостное охлаждение, принудительное воздушное охлаждение, термоэлектрическое охлаждение, тепловые трубки, а также комбинированные системы охлаждения, одновременно использующие вышеперечисленные системы охлаждения [66,67].

По системам принудительного воздушного охлаждения имеется много работ. Наиболее наглядно показаны результаты воздушного охлаждения в работе [68]. Здесь показано, что при использовании светодиодов мощностью 2Вт без воздушного охлаждения с использованием обычного радиатора температура светодиода со временем 10-20 минут достигает 62⁰С, то при использовании воздушного радиатора температура светодиода за 1-2 минуты достигает значения 32⁰С и поддерживается в течение остального времени.

Недостатком воздушного охлаждения является использование механических узлов вентилятора, что сокращает срок службы работы всей системы освещения. Кроме этого, воздух, имея низкую теплоемкость и теплопроводность, не позволяет добиться требуемой температуры кристалла. Намного эффективнее с задачей отвода тепла от светодиода справляются системы использующие жидкости, теплопроводность которых намного выше.

В работах [69-71] китайскими учеными Xiaobing Luo и Sheng Liu приводятся результаты экспериментальных исследований применения водяного охлаждения для управления температурным режимом светодиодной матрицы

высокой мощности, а также рассматривается численное моделирование конструкции теплообменника. Эксперименты проводились на лабораторной установке моделирующей замкнутую систему водяного охлаждения при различных мощностях светодиодов. В работе приводятся экспериментальные данные влияния водяного охлаждения на температуру в различных вариантах. Показательным является график, который отражает поведение температуры без водяного охлаждения и резким изменением температуры кристалла при включении водяного насоса. Видно, что после включения светодиода без охлаждения температура за 2 минуты достигает 70°C . В момент включения воды температура за 20-30 секунд падает до значения 35°C и при этом остается постоянной на протяжении длительного времени. Эксперименты, проведенные с диодами различных мощностей, показали, что предлагаемая система имеет хорошие показатели охлаждения. При водяном охлаждении светодиодной матрицы мощностью 9.3Вт температура будет поддерживаться постоянной на уровне 55°C . При использовании светодиодной матрицы 6Вт температура поддерживается постоянной на уровне 46°C , а при мощности 2,5Вт на уровне 35°C . На основе экспериментальных данных авторами проведено численное моделирование для оптимизации устройства охлаждения. Такие исследования помогают подобрать оптимальные конструкции радиатора водяного охлаждения (диаметр отверстий, скорость потока, материал устройства) светодиодной матрицы высокой мощности.

В работе [72] Н. Sorensen приводит результаты исследования с радиаторами водяного охлаждения различной конструкции. При этом в этой работе показано, что при оптимизации конструкции водяного радиатора при различных давлениях воды в системе разница между потоком воды 6,4мл/с и 27,5мл/с составляет всего 100К. Это говорит, что в системах водяного охлаждения эффективнее использовать маломощные малогабаритные насосы. Недостатком является усложнение конструкции радиатора и соответственно его стоимости, а также использованием водяных насосов, которые также имеют высокую стоимость. Поэтому в целом вся система освещения становится дорогой, а время его работы будет зависеть от износа водяного насоса.

Для более эффективного охлаждения в последнее время находят большое применение системы охлаждения с использованием термоэлектроохладителей (модулей Пельтье). Данный метод имеет большие перспективы в отличие от других методов. Применение модулей Пельтье в охлаждающих конструкциях позволяет достичь разницы температур 60°C - 75°C при температуре окружающей среды 25°C . Бесшумны, имеют высокую надежность, безотказный срок работы составляет более 200 тыс. часов, что в четыре раз превышает срок работы вентиляторов. Имеют маленькие размеры, что позволяет разрабатывать компактные осветительные устройства. В конструктивном исполнении не имеет значение их расположение в пространстве, что снимает ограничения при эксплуатации светильников. С экономической точки зрения они не проигрывают другим охладителям. Например, стоимость модулей равнозначна стоимости вентиляторов.

Основное преимущество рассматриваемого метода – возможность использования эффекта Пельтье не только для охлаждения и установления определенной температуры кристалла светодиода, но и управление температурой в широком диапазоне. Это связано с тем, что модули Пельтье могут быть одновременно охладителями, нагревателями и датчиками температуры. Другие системы охлаждения не обладают возможностью управления температурными режимами мощных светодиодов.

К недостаткам можно отнести большие затраты энергии для получения большой разницы температур между окружающей средой и светодиодом. В связи с этим необходим мощный источник питания для работы самого модуля Пельтье. Однако в диапазоне небольших колебаний температур энергоэффективен.

Несмотря на существующие проблемы, интерес к данной технологии охлаждения возрастает, что подтверждается рядом статей за последние 2015-2016гг. Так наиболее серьезные экспериментальные исследования температурных характеристик светодиодов высокой мощности были исследованы в работах [73-76]. В этих работах подробно исследованы конструкции светодиодных систем освещения с внешним охлаждением.

В статье [73] подробно рассмотрены вопросы реализации охлаждения мощных светодиодов с помощью элемента Пельтье при дополнительном воздушном охлаждении и водяном охлаждении. Интересными являются полученные результаты зависимости температуры кристалла светодиода от времени для обеих рассматриваемых конструкций. Приводятся графики зависимости температуры от тока светодиода, от тока элемента Пельтье и зависимость температуры при комбинированном использовании элемента Пельтье с воздушным и водяным охлаждением. Данная работа направлена на изучение мощных белых светодиодов с мощностями 3Вт, 5Вт для использования в фарах автомобилей. Это обстоятельство сужает значение работы и полученные результаты сложно перенести в системы внутреннего освещения.

В работе [74] исследованы системы охлаждения мощностью 15Вт и 30Вт. Приводятся экспериментальные зависимости температуры по времени в различных схемах охлаждения: с использованием вентилятора и только пассивного охлаждения. При использовании активного охлаждения чипов светодиодов температурный режим устанавливается 1 – 2 минуты и в дальнейшем температура остается постоянной. Однако при отсутствии активного охлаждения температура кристаллов матрицы светодиодов даже за 12 минут не устанавливается постоянной и достигает 65⁰С, тогда как с активным охлаждением рабочая температура устанавливается 25⁰С-30⁰С. Здесь также следует отметить, что проведенные исследования позволяют реализовать оптимальные осветительные системы высокой мощности, но практически не могут быть использованы для организации внутреннего освещения. Такие системы более выгодно использовать для внешнего освещения или в больших промышленных цехах и ангарах.

В работе [75] детально исследуются характеристики прибора светодиодного освещения с использованием комбинированной системы охлаждения, включающей элемент Пельтье, металлический радиатор и вентилятор. В осветительном приборе было установлено 6 светодиодов мощностью по 3Вт каждый. Приводятся подробные температурные характеристик, которые показывают, что при использовании комбинированного охлаждения можно обеспечить температуру светодиодов до 9°C . Использование элемента Пельтье позволяет уменьшить температуру кристалла светодиода на 17°C . Данная работа показывает, что применение элемента Пельтье в системах освещения позволяет создавать системы управления по температуре.

Mika Maaspuro в работе [76] проводит исследование температурных режимов светодиодов при использовании пассивной системы охлаждения (радиатора) и активных систем охлаждения (воздушного охлаждения и термоэлектрического компонента). Экспериментальная установка включает драйвер светодиода, который управляет параметрами питания. В результате экспериментов со светодиодным модулем типа XLAMP CXA2011 (фирмы Cree) мощностью 14.1Вт было получено, что при использовании радиатора совместно и вентилятора температура светодиода устанавливается через 700 сек. на уровне 40°C . При включении модуля Пельтье в системе с радиатором и воздушным охлаждением температура устанавливается за промежуток времени 600 сек. на уровне 23°C (при температуре окружающей среды 24°C) с рабочим током 2А. Такие характеристики обеспечивают возможность использования мощных и сверхмощных светодиодных матриц. При этом данные светодиоды будут не подвержены деградации при длительной эксплуатации. Полученные экспериментальные данные по изменению температуры светодиода со временем с использованием различных систем охлаждения хорошо согласуются с приведенным численным моделированием методом тепловых сопротивлений.

С учетом рассмотренных систем охлаждения было разработано и создано большое количество осветительных приборов, имеющих высокие светотехнические характеристики [77-80].

Отдельно можно выделить направление по повышению эффективности охлаждения светодиодов, связанное с оптимизацией конструкции самого кристалла светодиода, которое осуществляется путем нанесения на подложку нескольких кристаллов светодиодов [81] или расчета матрицы [82,83].

В связи с текущей тенденцией увеличения использования светодиодных систем освещения управление температурным режимом становится обязательным для достижения оптимальной производительности и надежности системы.

1.2 Анализ существующих систем контроля и управления светодиодным освещением

По данным Международного энергетического агентства (МЭА) на сетевое электрическое освещение в среднем расходуется 19% мирового производства электроэнергии [84]. Расход всей вырабатываемой в мире электроэнергии приведен на рисунке 1.2. Потребление энергии на освещение ответственно за 6-8% выбросов парниковых газов[85].

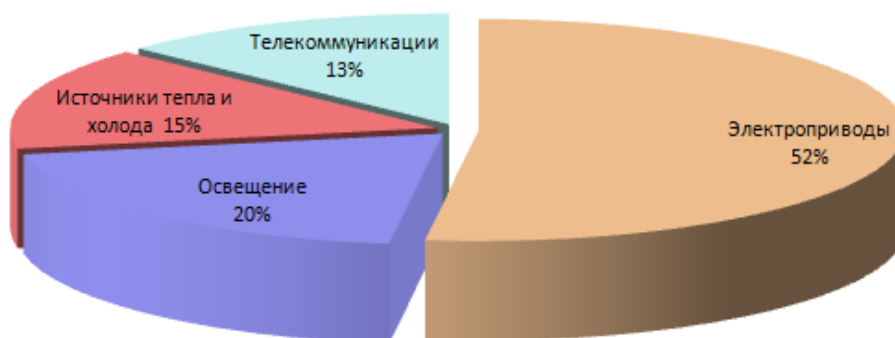


Рисунок 1.2 – Расход вырабатываемой в мире электроэнергии [86]

В Казахстане на искусственное освещение приходится 12-14% общего энергопотребления [87]. Данные расхода электроэнергии по отраслям экономики показывают (рисунок 1.3), что основным потребителем электроэнергии в Казахстане является промышленность до 70%. Расходы на освещение промышленных предприятий составляют 10%. Второе место по потреблению электрической энергии занимает жилищно-коммунальное хозяйство – 12,5%. Доля потребления электроэнергии осветительными приборами в общественных и жилых зданиях составляет 40%-60% [88], что в 2-3 раза выше, чем в европейских странах [89,90].

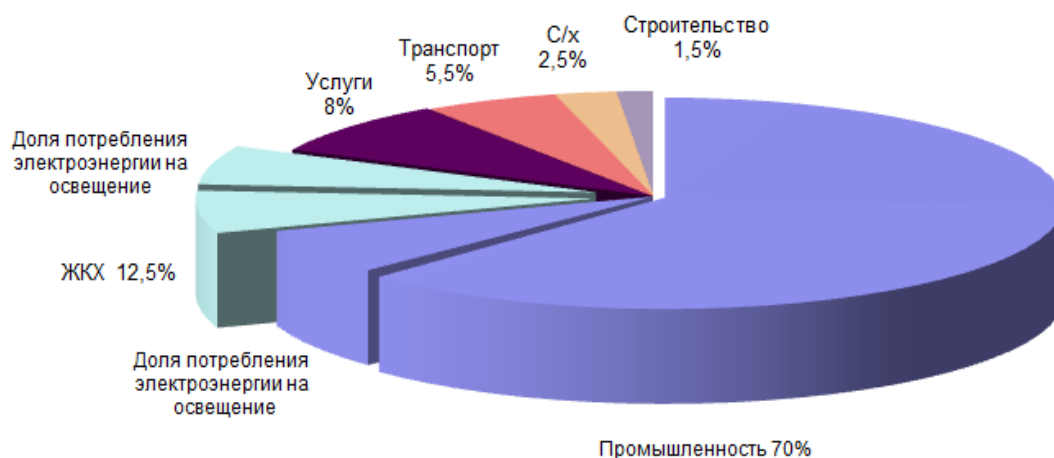


Рисунок 1.3 – Среднестатистическое потребление электроэнергии в Казахстане по отраслям экономики [91]

Проведенный МЭА анализ существующих в мире тенденций экономического развития и энергоэффективности позволил спрогнозировать повышение спроса на искусственное освещение на 60% в течении ближайших 20 лет. Без усовершенствования технологий и внедрения политики энергоэффективности такие темпы наращивания производства электроэнергии приведут к увеличению потребления энергоресурсов, большинство из которых невозобновляемые, а также ухудшению экологической ситуации связанной с увеличением объемов выбросов углеводородного топлива.

В связи с такими значительными затратами актуальным становится задача повышения эффективности освещения. В целом это положительно скажется на энергетическом балансе страны и экологической ситуации, создаваемой работой электростанций.

Существуют два направления технического развития в области электрического освещения. Первое заключается в совершенствовании светоизлучающих компонентов и конструкций осветительных приборов: увеличении световой отдачи источника света, уменьшение удельной мощности; улучшении светотехнических и энергетических параметров. Второе направление связано с разработкой методов и режимов эксплуатации светотехнических изделий: оптимизация размещения ламп в зависимости от назначения зрительных задач; эффективное использование естественного света с учетом суточного цикла, времени года и светоклиматического района; внедрение систем управления освещением (СУО).

Системы управления освещением делятся на автоматические и автоматизированные с ручным управлением и под управлением ЭВМ.

Для обеспечения необходимых режимов в СУО требуется сложная схема корректировки работы множества параметров ОП. Типичными факторами отслеживаемые автоматическими СУО являются контроль мощности осветительного прибора и времени его работы. Работа таких систем в основном сводится к включению/выключению ОП по заданному режиму и зачастую не обеспечивает требуемый уровень освещенности с учетом естественного освещения. Кроме этого автоматические СУО сложно адаптировать к изменениям в конструкциях ОП и введение в эксплуатацию новых осветительных систем. При этом стоимость таких систем достаточно высока. В связи с этим автоматические СУО нашли широкое практическое применение в системах наружного освещения (магистраль, уличное освещение), освещения производственных помещений (бытовые помещения, цеха) и жилищно-коммунальном секторе (освещение подъездов, лифтов, коридоров).

К системам освещения общественных и жилых зданий предъявляются требования в зависимости от назначения. Помещения имеют большой разброс нормируемого значения уровня освещенности в зависимости от выполняемых в них функций. Дополнительно системы освещения должны учитывать потребительские и экономические требования (цветовая среда, наличие людей в помещении, управление режимами освещения и т.д.). Решение описанных требований возможно при внедрении автоматизированных СУО.

Автоматизированные СУО предоставляют значительные возможности экономии электроэнергии в общественных и жилых зданиях за счет реализации типичных функций [92].

Поддержка требуемого уровня освещенности в помещении. Реализуется при помощи фотоэлемента (датчика освещенности), установленного внутри помещения и контролирующего уровень освещенности, создаваемый ОП в соответствии с нормируемым значением. Внедрение этой функции позволяет экономить электроэнергию за счет регулировки мощности ОП и устранения «излишек освещенности».

Учет естественной освещенности помещения. Экономия электроэнергии достигается за счет уменьшения мощности ОП вследствие поддержания требуемого уровня освещенности с учетом уровня естественного освещения. Датчик освещенности отслеживает суммарную освещенность. Внедрение этой функции имеет наибольший показатель энергоэффективности и составляет от 20 до 40%.

Учет периода суток и циклов рабочий день-выходной. Внедрение алгоритма отключения ОП в помещении в определенные часы (обеденные перерывы, конец рабочего дня), а также не рабочие дни позволяет дополнительно экономить электроэнергию. Реализуется путем внедрения в СУО таймера реального времени.

Учет наличия в помещении людей. Внедрение датчика присутствия (движения) в СУО можно отключать/включать ОП в зависимости от наличия в помещении людей. При внедрении этой функции необходимо учитывать назначение помещения. Может производить не приятные ощущения для человека и в некоторых случаях повлиять на работу самого ОП. Экономия электроэнергии может составить до 30% [93].

Дистанционное управление осветительными приборами. Функция не относится к классу автоматизированных, но часто внедряется в СУО благодаря простоте реализации и возможности управления ОП.

Перечисленные функции автоматизированных СУО базируются на самодиагностике устройства освещения в реальном времени с использованием различных видов датчиков (освещенность, время, движение). Управление такой системой в классическом случае осуществляется за счет контроллера, поддерживающего требуемые режимы работы светодиодов.

Автоматизированные системы в настоящее время используются в системах освещения в основном в автономном режиме без участия человека, а только под контролем специализированных программ с выводом информации по аварийным ситуациям. Со временем алгоритмы работы автоматизированных систем совершенствуются и к настоящему времени используются интеллектуальные системы, контролирующие не только мощность и время ОП, а также температуру ОП, уровень освещенности с учетом естественного света.

Рассмотрим современные автоматизированные системы управления светодиодным освещением. Примером может служить комбинированная система управления офисным освещением [94] реализованная в лицей г. Санкт-

Петербурга, которая была создана совместно с компанией Simple House. Основной задачей была демонстрация возможностей системы управления осветительной светодиодной системы для решения задачи снижения энергопотребления на 75%. Это стало возможным за счет двух факторов. Первый, использование светодиодов, что снизило энергопотребление на 35%. Второй – предложенная система управления. Основной особенностью данной системы является компараторный принцип, т.е. учет естественного уровня освещения через оконные проемы и сравнения его с требуемым уровнем освещения в помещении. При этом осуществляет выработку управляющего сигнала на осветительный прибор для поддержания заданного уровня освещения. Аппаратно данная система была основана на использовании промышленного щита управления серийно выпускаемого ЗАО «Светлана оптоэлектроника» (Россия). Наибольшую эффективность данная система показывает при измерении по месяцам, так как при этом учитывается и дневной свет и время выходных дней, когда освещение не включается. В тоже время в данном проекте вопросы, связанные с продолжительностью работы системы освещения и деградации светодиодов со временем за счет температурных изменений не описаны. Поэтому можно сделать вывод, что исследования по оптимизации работы как системы освещения, так и системы управления в данном случае не было проведено.

Можно выделить разработки систем автоматизации освещением фирмы Zumtobel [95], которые решают задачи снижения энергопотребления, используя комплексный подход. Предлагают как локальные системы, которые предназначены для одного помещения, так и системы высокого уровня интегрированные в централизованную систему управления зданием. Последние имеют широкий спектр функциональных возможностей на основании снятия сигналов с датчиков освещенности и присутствия, а также алгоритмов работы контроллера: учет положения солнца относительно световых проемов, времени суток и режима работы сотрудников, контроль работы жалюзи и т.д. СУО оснащены ручным и автоматическим режимами управления. Большое значение фирмой уделяется световому комфорту и качеству освещения.

Также была получена экономия электроэнергии с использованием систем автоматизации фирм Philips [96], Osram [97], Vossloch-Schawbe [98], Thorn [99]. Приводятся данные о снижении энергозатрат на освещение общественного здания до 80% и общего энергопотребления на 30%.

Все рассмотренные выше автоматизированные СУО применяют цифровые сигналы форматов «DALI» и «DSI», что позволяет закладывать алгоритмы обратной связи для мониторинга состояния подключенных компонентов системы и светильников.

На территории СНГ распространена система автоматизации на базе транспортного логического терминала серии МУР 1001[100]. Не все существующие технологии освещения допускают диммирование, поэтому возможности управления будут ограничиваться включением/выключением ОП. Предлагаемая СУО на основе контроллера TLT с комплектом датчиков

наиболее эффективна в реализации со светодиодной технологией освещения. Простейшая схема построения системы включает интеллектуальный драйвер, который управляет светодиодным светильником при помощи широтно-импульсной модуляции и подключен к локальному контроллеру TLT. Схема построения многоуровневой системы включает локальный контроллер TLT, который управляет группой светильников по протоколу передачи данных DMX-512 и включен в единую систему под управлением многофункционального контроллера МУР 1001. Такое решение позволяет управлять многоуровневой системой, как контроллером, так и интегрированным в систему ЭВМ. Алгоритмы, предусмотренные в СУО, основаны на мониторинге показаний уровня освещенности и присутствия людей в помещении, а также продолжительности светового дня. К недостаткам данного проекта можно отнести отсутствие обратной связи от неисправных компонентов системы, регулирования при комбинированном освещении и отсутствие контроля температуры светодиодов в осветительных приборах.

Внедрение рассмотренных автоматизированных СУО стало возможным при использовании новых свойств осветительных диодов, позволяющих осуществлять управление в широкой полосе частот, а также производить изменение мощности при использовании ШИМ регулирования. Где ток в импульсе не меняется, что обеспечивает устойчивую работу диода и устраняет деградацию.

Использование таких систем достаточно эффективно, однако при длительной эксплуатации возникают внутренние и внешние возмущения (неопределенности), которые приводят к частичной или полной деградации светодиодов. В связи с этим актуальным становится вопрос оптимизации режимов работы светодиода и создание системы управления, компенсирующей возникающие неопределенности, т.е. системы управления с элементами робастности.

1.3 Применение теории робастности в электронных системах управления

В настоящее время электронные системы управления характеризуются достаточно высокой степенью сложности объекта управления, определяющейся неполнотой априорной информации о параметрах объекта и действующих на него внешних возмущений. Неполная информация о параметрах управляемого объекта обусловлена недостаточной точностью описания его математической модели и нестабильностью его внутренних параметров. Также необходимо учитывать негативное влияние на процесс работы системы внешних возмущений, имеющих различную природу возникновения.

В классических методах теории автоматического управления применяются законы управления заданные в явной форме на основании предположении, что характеристики управляемого процесса известны, модели объекта и регулятора

имеют постоянные параметры. В условиях неопределенности для обеспечения требуемого качества управления такие методы малоэффективны.

Развитие электронной техники требует создание надежных электронных систем, которые реализуются путем расширения адаптивности к внешним и внутренним факторам (неопределенностям). Пупков К.А. в своей работе [101] характеризует современный период развития теории управления постановкой и решением задач, учитывающих неточность наших знаний об объектах управления и действующих на них внешних возмущений.

Выделяют основные причины, вследствие которых возникает неопределенность систем управления: изменение параметров и характеристик объекта управления во времени и в зависимости от условий работы; наличие неконтролируемых возмущений; применение законов управления упрощенных моделей процессов, протекающих в объекте; сложность идентификации объекта на этапе проектирования систем управления [102, 103].

В связи с тем, что методы классической теории автоматического управления дают плохие результаты, возникает необходимость разработки особого подхода, который позволял бы проектировать работоспособную систему в условиях неопределенности. Терновая Г.Н. в своей работе [104] описывает два основных подхода к проблеме управления неопределенными объектами существующих в современной теории управления. Первый предусматривает использование методов адаптивного, а второй – робастного управления. Робастные и адаптивные алгоритмы управления требуют малую априорную информацию при разработке, а недостающие данные получают непосредственно в процессе работы.

Адаптивное управление применяется для объектов с широким диапазоном изменения динамических свойств при неполной априорной информации об условиях работы системы. Для достижения требуемых параметров работы системы в процессе ее функционирования определяют необходимые характеристики, на основании которых перестраиваются параметры и структура регулятора. Процесс получения дополнительной информации о функционировании системы во времени и применение этих сведений для управления является характерной чертой адаптивных систем управления. Реализация адаптивного управления позволяет оптимизировать режимы работы объекта, использовать регуляторы для работы с различными видами однотипных объектов, обеспечивает работоспособность и надежность всей системы при изменении свойств объекта.

Общие принципы построения адаптивных систем управления широко освещены в [105-109]. Следует отметить, что предлагаемые адаптивные алгоритмы с хорошими теоретическими показателями в большинстве случаев невозможно реализовать для реальных систем из-за сложности этапа проектирования. Кроме того большинство известных схем адаптивного управления предусматривают высокую размерность регулятора, что может привести к удорожанию системы управления, к возможному запаздыванию в управлении. Трудности реализации на практике и плохие динамические

свойства контура адаптации не позволяют повсеместно применять теорию адаптивного управления. Внимание исследователей начинает привлекать проблема обеспечения работоспособности адаптивных систем при нарушении идеальных условий, т.е. при наличии внешних возмущений, нестационарности неизвестных параметров или наличии паразитной динамики. Создание систем с высокой степенью адаптации, толерантностью к ошибкам проектирования и работоспособных при изменившихся условиях функционирования в пределах допустимой погрешности может быть реализовано с применением теории робастного управления [110].

Методы синтеза систем, не являющихся адаптивными, но обеспечивающих приемлемое качество работы при изменении статических характеристик воздействий в широком диапазоне, а также при нестабильности параметров объекта управления считаются наиболее перспективными [111]. Описанные тенденции развития методов теории робастного управления более подробно представлены в работах [103,104].

Понимание важности данного направления в теории автоматического управления пришло сравнительно поздно, в 90-е годы, хотя задачи создания систем управления, свойства которых не изменялись бы при небольших отклонениях их параметров от расчетных, возникали в начале развития теории автоматического управления. Уже тогда в инженерной практике для преодоления проблемы «априорной неопределенности» использовались отдельные элементы синтеза робастных систем [112-114]. Однако это были чисто эвристические методы, не претендующие на теоретическую строгость и справедливые для определенного числа случаев. Сейчас синтез робастных систем приобретает черты строгого метода решения корректно поставленной математической задачи, где четко описаны исходные данные, сформулирован критерий и ограничен класс систем, в котором отыскивается результат [115].

Принципиальная идея по синтезу робастного управления состоит в том, чтобы единственным регулятором обеспечить устойчивость замкнутой системы для любого объекта, принадлежащего множеству «возмущенных» объектов; определяемых классом неопределенности. Робастный подход позволяет обеспечить приемлемое, в смысле некоторого критерия, качество замкнутой системы даже при наличии структурной неопределенности модели объекта, действии внешних возмущений и существенной нестационарности параметров объекта [116-119].

Начало проблеме робастного управления для модели, заданной в условиях неопределенности положили работы J.C.Doyle, G.Stein [120,121]. Фундаментальным исследованием по теории робастности является монография «Essentials of Robust Control» Zhou K., Doyle J.C. основанная на работах большого количества ученых объединяющих труды нескольких крупных научных учреждений [122].

В Казахстане исследованиями робастной устойчивости в системах управления занимаются в Казахском национальном исследовательском техническом университете. Основные результаты представлены в работах

Бейсенби М.А., Сулейменова Б.А., Ширяевой О.И. и др. Серьезные результаты в решении задач робастного синтеза представлены российскими учеными института проблем управления (Цыпкин Я.З., Поляк Б.Т., Щербаков П.С. и др.). Решению проблем управления в условиях неопределенности посвящены работы ученых Санкт-Петербургского Национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (Бобцов А.А., Никифоров В.О., Пыркин А.А., Слита О.В., Ушаков А.В.), Астраханского государственного технического университета (Цыкунов А.М., Фуртат И.Б.). Среди зарубежных можно отметить публикации принадлежащих ученым K.Glover, B.R.Barmish, J. Ackermann, V. Blondel, J. Kogan, R. Tempo, D.D. Siljak.

Предлагаемые учеными решения для проектирования робастных систем управления представлены такими основными направлениями - применение регуляторов, которые обеспечивают требуемый запас устойчивости системы [123-125], использование различных алгоритмов систем слежения [126-128]. Одним из наиболее эффективных способов решения проблем управления неопределенными объектами является компенсация возникающих неопределенностей, которые чаще всего связывают с действием возмущений [129]. Для выбора метода построения системы управления выделяют внутренние и внешние возмущения. К внутренним возмущениям относят параметрическую и структурную неопределенности системы. Дополнительно на объект управления при его функционировании действуют внешние возмущения, которые могут повлиять на качество работы всей системы или привести к выходу ее из рабочего режима. Необходимость учета влияния внешних неучтенных факторов, действующих на систему, привела к постановке и решению задач синтеза систем управления нечувствительных (робастных) к действию внешних возмущений. Данной теме посвящено большое количество исследований, в которых предлагаются различные методы решения задачи компенсации и алгоритмы адаптации систем [124,126-128, 130-132].

Интерес к данной проблеме вызван тем, что большинство объектов управления функционируют в условиях воздействия внешних возмущений, которые не учитываются при построении систем управления по ряду причин (технологические особенности, невозможность измерения воздействий, отсутствием измерительных устройств в системе и т.д.). Кроме того, параметры самого объекта управления могут изменяться во времени, что приводит к необходимости изменения параметров управляющего устройства с целью сохранения качественных показателей системы, которые естественно в этом случае изменяются.

Для ряда реальных систем не получено инженерных решений, позволяющих измерять переменные состояния объектов управления, поэтому необходимо также отметить развитие методов адаптивного и робастного управления по выходу [133, 134]. Управление по выходу позволяет уменьшить затраты на проектирование и разработку различных датчиков, которые увеличивают размерность математической модели системы и вносят дополнительные погрешности, связанные с ошибками измерений.

За последние годы теоретические разработки были успешно применены во многих инженерных областях, таких как гражданское и машиностроение, в том числе автомобильной и аэрокосмической отраслях. В области электротехники были успешно решены различные проблемы неопределенности систем и представлены в публикациях. Реализация таких систем основана на проектировании электронной схемы, которая позволяет сохранять работоспособность всей системы управления при наличии неопределенностей при ее описании.

Появляются публикации посвященные использованию робастного управления для светодиодных осветительных систем. В работе [135] предлагается использовать методы робастного управления для регулирования цвета и стабилизации силы тока трехцветного светодиода для подсветки жидкокристаллического дисплея. При этом контролировался важный для работы всех светодиодов фактор как температура. В статье показана зависимость изменения температуры после включения светодиода и систем регулирования. Видно, что через 4000 сек. температура становится постоянной на уровне $46,5^{\circ}\text{C}$. При этом изменение температуры произошло от $45,5^{\circ}\text{C}$, что по-видимому, являлось температурой внешней среды в которой находилась светодиодная установка. Исследования, проведенные в данной статье, согласуются с полученными результатами по температурным зависимостям в диссертации.

В статье [136] показано, что теорию робастности можно использовать при компенсации возмущений полученных от внешних источников, а именно от лампы накаливания, которая дает возмущения по температуре и не спрогнозированные изменения освещенности, вентилятор, который с течением времени меняет температуру, что приводит к неопределённостям по температуре. В данной работе сделаны попытки компенсации вышеперечисленные возмущения используя робастный подход. В целом мы видим, что теория робастности, описанная в статье, находит практическое применение. Однако все изменения и неопределённости могут быть спрогнозированы и скомпенсированы путем установки нужных входных значений без теории робастности. Прибор, который представлен в этой статье, является учебным и используется для применения теории робастности.

Для увеличения срока службы авиационных средств отображения информации, которые используют трехцветные светодиоды в работе [137] предложена модель системы автоматического управления тепловыми режимами средств индикации. Авторами вводится контур для компенсации воздействия внешних температурных факторов (от -40°C до $+70^{\circ}\text{C}$). Модель разработана при помощи пакета MathLab в среде Simulink. Значения датчика температуры панели используются для управления нагревателем, работающим в релейном режиме. Приведенные теоретические и экспериментальные переходные температурные процессы показывают адекватность разработанной модели. Однако разница пороговых температурных значений отрабатывающих системой составила 15°C и температурный режим установился в рабочем

состоянии через 10 мин. Для применения такой модели управления в системах освещения с мощными белыми светодиодами, такие параметры не приемлемы.

Как видно, на сегодняшний день представлены исследования по применению методов робастного управления только для индикаторных светодиодных приборов. Результаты, которых не могут обеспечить требуемого качества светотехнических параметров мощных светодиодов и надежность всей системы освещения. В проведенных исследованиях данной диссертации не разрабатывается робастная система управления, а используются только элементы, заключающиеся в организации двухконтурного управления светодиодной системой освещения, компенсирующей неопределенности температуры и тока в светодиоде.

1.4 Выводы по разделу, постановка задачи

Проведенный анализ современного состояния функционирования и развития светодиодных осветительных приборов и автоматизированных систем освещения выявил ряд направлений исследований, которые позволяют повысить энергоэффективность и надежность светодиодного освещения. На основе вышеперечисленных фактов были сформулированы цель и задачи диссертационного исследования. В целом литературный обзор показал, что необходимо проводить исследования по вопросу тепловых режимов мощных белых светодиодов, а также по организации системы управления работой светодиодным освещением с элементами робастности.

Особенно важным является изучение реальных осветительных систем, используемых в рабочих помещениях в офисах и промышленных предприятиях. Это позволит значительно снизить энергозатраты и создать промышленные образцы светодиодных систем с эффективностью выше существующих.

Для обеспечения решения поставленных проблем выявленных при анализе литературных источников можно сделать следующие выводы, которые необходимо решить при проведении научных исследований диссертации.

1) Оптимизация может осуществляться по температурным режимам, освещенности, токовым режимам работы светодиода, а также по компенсации внешних неопределенностей и возмущений.

2) Для повышения энергоэффективности систем светодиодного освещения необходимо осуществлять оптимизацию работы, как отдельных элементов освещения, так и всей системы в целом, а также использовать алгоритмы управления позволяющие учитывать особенности светодиодного освещения.

3) Создание оптимальной системы автоматизированного управления светодиодным освещением с помощью компенсации неопределенностей используя элементы робастного управления.

Данные выводы согласуются с целью и задачами диссертационной работы.

2 ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В СВЕТОДИОДНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ

2.1 Разработка математической модели тепломассопереноса для типичных светодиодных конструкций

Традиционно расчет теплоотвода от светодиода осуществляется с использованием приближенных формул полученных и используемых для расчета радиаторов полупроводниковой элементной базы. Однако из-за введенных приближений в этих формулах не всегда расчеты отражают реальную картину распространения тепла в системе «основание светодиода – кристаллик – линза – окружающий воздух». В связи с этим предложена и численно посчитана задача тепломассопереноса в светодиоде с использованием уравнений Пуассона.

Рассматривается процесс теплопереноса в типичном светодиоде. Известно [138,139], что строение светодиода определяется мощностью излучения, зависящей от прямого тока. Световой поток, излучаемый светодиодом, напрямую зависит от прямого тока, протекающего через изделие. Чем больше ток, тем больше поток излучения светодиода. Это связано с тем, что с увеличением тока растет число электронов и дырок, поступающих в зону рекомбинации в единицу времени. Но ток нельзя увеличивать до больших значений. Из-за внутреннего сопротивления полупроводника и р-п перехода кристаллик перегревается и как следствие диод может выйти из строя. Кроме того, на температурный режим светодиода влияют внешние условия (температура, влажность и т.д.) функционирования полупроводникового элемента. Так, например, известны [140-142] достаточно существенные масштабы влияния температуры окружающей среды на электрические (прямое напряжение, потребляемая энергия), энергетические (осевая сила света, световой поток, оптическая мощность) и калориметрические (относительное спектральное распределение света, относительная спектральная световая эффективность и т.д.) характеристики работы светодиодов.

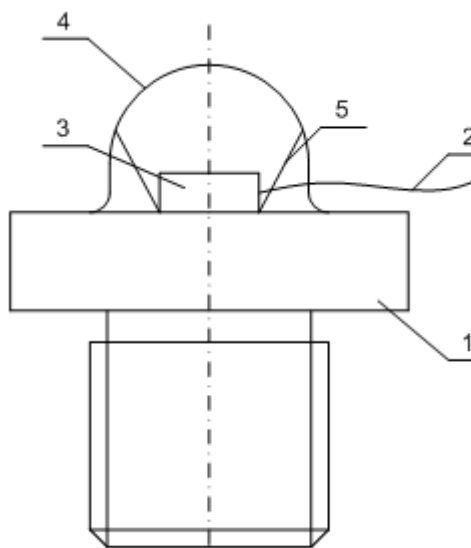
В результате выполнения численного анализа рассматриваемого процесса будут получены реальные тепловые процессы, проходящие при эксплуатации светодиода, создание рекомендаций по рациональному выбору материалов для изготовления комплектующих и уменьшению износа полупроводникового изделия вследствие изменения тепловых условий функционирования излучающего кристалла.

Рассматривается конструкция типового светодиода, схема которого представлена на рисунке 2.1.

При физической постановке задачи учитываются следующие процессы. При протекании тока через р-п переход в кристаллике происходит выделение энергии в форме излучения. Как следствие, кристаллик нагревается. За счет рефлектора излучение в основание не происходит и лучи отражаются. Таким образом, формируются потоки излучения от кристаллика, которые

фокусируются линзой. За счет теплопроводности и излучения основание и оптически прозрачный полимерный корпус (линза), заполненный компаундом, нагреваются.

С течением времени степень нагрева кристаллика, основания и фокусирующей линзы возрастает. Это в предельных случаях может приводить к плавлению кристаллика и последующему выходу из строя светодиода.



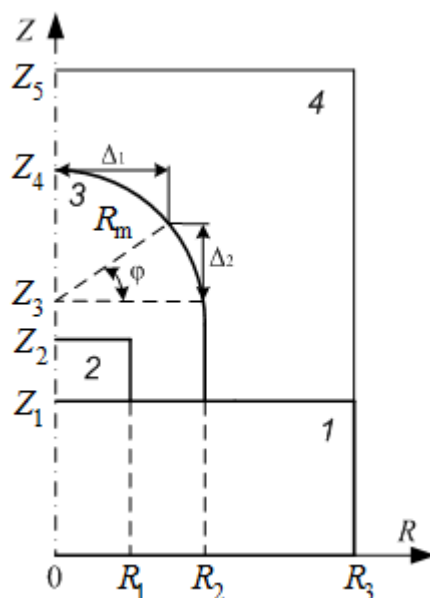
1 – основание – катод; 2 – проводник – анод; 3 – кристаллик; 4 – линза;
5 – рефлектор

Рисунок 2.1 – Устройство типового светодиода

Одной из задач теоретического исследования может быть установление предельных значений токов и времени функционирования светодиода без перегрева комплектующих элементов. Предварительный анализ показывает, что это возможно при численном решении задачи тепломассопереноса, так как натурный и лабораторный эксперименты требуют больших затрат времени и материальных ресурсов.

Рассматривается осесимметричная постановка (рисунок 2.2). Учитываются два механизма теплопереноса в светодиоде: излучение и теплопроводность. При этом не учитываются преломление, поглощение, рассеивание и фокусировка лучей линзой, а также зависимость теплофизических характеристик от температуры. Для области окружающего светодиод воздуха учитываются два механизма тепломассопереноса: конвекция и теплопроводность.

Предполагается, что пространство внутри линзы заполнено однородной средой – компаундом с постоянными теплофизическими характеристиками. Это допущение является типичным при моделировании процессов теплопереноса в оптических элементах и не накладывает существенных ограничений на общность постановки задачи.



1 – основание; 2 – кристаллик; 3 – компаунд в линзе; 4 – окружающий воздух

Рисунок 2.2 – Схема области решения задачи тепломассопереноса

Из рисунка 2.2 видно, что основную трудность при моделировании процессов тепломассопереноса представляет конфигурация светодиода. Реализация алгоритма численного решения предусматривает достаточно трудоемкое сопряжение сферической (полярной) и цилиндрической координатных сеток. К тому же, важную роль играет форма рефлектора, ширина «запрещенной» зоны кристаллика и ее изменение с ростом температуры. Следует подчеркнуть, что при моделировании рассматриваются наиболее типичные конфигурации фокусирующей линзы и рефлектора.

Система нестационарных дифференциальных уравнений, описывающих комплекс взаимосвязанных процессов тепломассопереноса, протекающих в системе «основание светодиода – кристаллик – линза – окружающий воздух», соответствующая сформулированной физической постановке задачи, имеет следующий вид.

Уравнение энергии для основания ($0 < R < R_3$, $0 < Z < Z_1$):

$$\rho_1 C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right). \quad (2.1)$$

Уравнение энергии для кристаллика ($0 < R < R_1$, $Z_1 < Z < Z_2$):

$$\rho_2 C_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right) + \frac{Q}{V_{cr} t}. \quad (2.2)$$

Уравнения энергии для компаунда линзы в цилиндрической части ($R_1 < R < R_2$, $Z_1 < Z < Z_2$; $0 < R < R_2$, $Z_2 < Z < Z_3$):

$$\rho_3 C_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right). \quad (2.3)$$

Уравнения энергии для компаунда линзы в сферической части ($0 < \varphi < \varphi_m$, $0 < R < R_m$):

$$\rho_3 C_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_3}{\partial \varphi^2} \right). \quad (2.4)$$

Уравнения энергии, движения и неразрывности для окружающего воздуха ($R_2 < R < R_3$, $Z_1 < Z < Z_3$; $\Delta_1 < R < R_3$, $Z_3 + \Delta_2 < Z < Z_4$; $0 < R < R_3$, $Z_4 < Z < Z_5$):

$$\rho_4 C_4 \left(\frac{\partial T_4}{\partial t} + u \frac{\partial T_4}{\partial r} + v \frac{\partial T_4}{\partial z} \right) = \lambda_4 \left(\frac{\partial^2 T_4}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_4}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial z^2} \right), \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{u}{r} = -\frac{1}{\rho_4} \frac{\partial P_4}{\partial r} + \nu_4 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{u}{r^2} \right), \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_4} \frac{\partial P_4}{\partial z} + \nu_4 \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \beta g (T_4 - T_0), \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial(ru)}{\partial r} + \frac{\partial(zv)}{\partial z} = 0. \quad (2.8)$$

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

r , z – координаты цилиндрической системы координат;

r , φ – координаты сферической системы координат;

R_m – радиус сферической части линзы ($R_m = R_2$);

φ_m – масштаб по сферической координате ($\varphi_m = \pi/2$);

t – время, с;

ρ – плотность, кг/м³;

P – давление, Н/м²;

ν – кинематическая вязкость, м²/с;

β – коэффициент термического расширения, К⁻¹;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

T – температура, К;

T_0 – начальная температура, К;

C – удельная теплоёмкость, Дж/(кгК);

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(мК);

V_{cr} – объем кристаллика, м³;

Q – количество тепла, выделяемое в кристаллике при протекании электрического тока, Дж.

По закону Джоуля-Ленца количество тепла, выделяемое в кристаллике при протекании электрического тока можно определить из следующего выражения [143]:

$$Q = I^2 R t, \quad (2.9)$$

где I – сила тока, А; R – электрическое сопротивление, Ом; t – время, с.

Поскольку целью является анализ теплового состояния сложной полупроводниковой системы – светодиода, то наиболее целесообразным представляется преобразование сформулированной системы дифференциальных уравнений (2.1) – (2.8) к виду, исключающему непосредственный поиск поля давления P .

Для этого вводится в рассмотрение функция тока ψ и вектор вихря скорости ω , которые задаются следующим образом [144, 145]:

$$u = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad v = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}, \quad \omega = \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{\partial u}{\partial z}. \quad (2.10)$$

После подстановки выражений для компонентов скорости u , v (2.10) в уравнение неразрывности (2.8) получаем уравнение Пуассона следующего вида:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = -r \omega. \quad (2.11)$$

Уравнение движения в переменных «функция тока – вектор вихря скорости» имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial r} + v \frac{\partial \omega}{\partial z} - u \frac{\omega}{r} = v \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right) + g \beta \frac{\partial T}{\partial r}. \quad (2.12)$$

Анализ приведенных нелинейных нестационарных уравнений (2.11), (2.12) показывает, что целесообразно применение безразмерной формы записи дифференциальных уравнений для уменьшения числа параметров, от которых зависит решение.

При переходе к безразмерным переменным в качестве масштабов расстояния, времени, скорости, температуры, функции тока и завихренности выбраны:

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{r}{z_m}, \quad Z = \frac{z}{z_m}; \\
 \tau &= \frac{t}{t_m}, \quad t_m = \frac{z_m}{V_m}, \quad V_m = \sqrt{g\beta\Delta T z_m}; \\
 U &= \frac{u}{V_m}, \quad V = \frac{v}{V_m}; \\
 \Theta &= \frac{T - T_0}{\Delta T}, \quad \Delta T = T_m - T_0; \\
 \Psi &= \frac{\psi}{\psi_m}, \quad \Omega = \frac{\omega}{\omega_m}, \quad \psi_m = V_m z_m^2, \quad \omega_m = \frac{V_m}{z_m};
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

где t_m – масштаб времени, с;

z_m – масштаб расстояния, м ($z_m = z_5$);

V_m – масштаб скорости, м/с;

T_m – масштаб температуры, К;

ψ_m – масштаб функции тока, м²/с;

ω_m – масштаб вектора вихря, с⁻¹;

τ – безразмерное время;

U, V – безразмерные составляющие скорости конвекции в проекции на оси цилиндрической системы координат r и z ;

Θ – безразмерная температура;

Ψ – безразмерный аналог функции тока;

Ω – безразмерный аналог вектора вихря.

Таким образом, процессы тепломассопереноса в системе «основание светодиода – кристаллик – линза – окружающий воздух» в безразмерных переменных описывает следующая система уравнений.

Для основания ($0 < Z < Z_1, 0 < R < R_3$) уравнение энергии:

$$\frac{1}{Fo_1} \frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_1}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial Z^2}. \tag{2.14}$$

Для кристаллика ($Z_1 < Z < Z_2, 0 < R < R_1$) уравнение энергии:

$$\frac{1}{Fo_2} \frac{\partial \Theta_2}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_2}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial Z^2} + \frac{Qr_m}{V_{cr} \Delta T \lambda_2 t}. \tag{2.15}$$

Для наполнителя (компаунда) в цилиндрической части линзы при $Z_1 < Z < Z_2$, $R_1 < R < R_2$; $Z_2 < Z < Z_3$, $0 < R < R_2$ уравнение энергии:

$$\frac{1}{Fo_3} \frac{\partial \Theta_3}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_3}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_3}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_3}{\partial Z^2}. \quad (2.16)$$

Для наполнителя (компаунда) в сферической части линзы при $0 < R < R_m$, $0 < \varphi < \varphi_m$ уравнение энергии:

$$\frac{1}{Fo_3} \frac{\partial \Theta_3}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_3}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_3}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \Theta_3}{\partial \varphi^2}. \quad (2.17)$$

Для воздуха вне линзы при $Z_1 < Z < Z_3$, $R_2 < R < R_3$; $Z_3 < Z < Z_4$, $R_2 - \Delta_1 < R < R_3$; $Z_4 < Z < Z_5$, $0 < R < R_3$:

уравнение Пуассона

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial R^2} - \frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2} = -R\Omega; \quad (2.18)$$

уравнение завихренности

$$\frac{1}{Sh} \frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Omega}{\partial R} + V \frac{\partial \Omega}{\partial Z} - U \frac{\Omega}{R} = \sqrt{\frac{Pr_4}{Ra_4}} \left[\frac{\partial^2 \Omega}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Omega}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Z^2} - \frac{\Omega}{R^2} \right] + \frac{\partial \Theta_4}{\partial R}; \quad (2.19)$$

уравнение энергии

$$\frac{1}{Sh} \frac{\partial \Theta_4}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Theta_4}{\partial R} + V \frac{\partial \Theta_4}{\partial Z} = \frac{1}{\sqrt{Ra_4 Pr_4}} \left[\frac{\partial^2 \Theta_4}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_4}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_4}{\partial Z^2} \right]. \quad (2.20)$$

Здесь Fo , Sh , Pr , Ra – безразмерные комплексы (число Фурье $Fo = \frac{\lambda t_m}{\rho C z_m^2}$, число

Струхаля $Sh = \frac{V_m t_m}{z_m}$, число Прандтля $Pr = \frac{\nu C \rho}{\lambda}$, число Рэлея $Ra = \frac{\beta g \Delta T z_m^3 C \rho}{\lambda \nu}$).

Следует отметить, что численное решение задачи в представленной системе (рисунок 2.2) подразумевает сопряжение цилиндрической и сферической (полярной) координатных сеток с использованием следующих комплексов:

$$\Delta_1 = R_m \cos(\varphi), \Delta_2 = R_m \sin(\varphi).$$

Начальные условия ($\tau=0$):

$$\begin{aligned}
&0 \leq R \leq R_3, 0 \leq Z < Z_1: \Theta_1 = \Theta_0; \\
&0 \leq R \leq R_1, Z_1 \leq Z \leq Z_2: \Theta_2 = \Theta_0; \\
&Z_1 < Z < Z_2, R_1 < R < R_2; Z_2 < Z < Z_3, 0 < R < R_2; 0 < R < R_2, 0 < \varphi < \varphi_m: \Theta_3 = \Theta_0; \\
&Z_1 < Z < Z_3, R_2 < R < R_3; Z_3 < Z < Z_4, R_2 - \Delta_1 < R < R_3; Z_4 < Z < Z_5, 0 < R < R_3: \Theta_4 = \Theta_0, \Omega = 0, \Psi = 0.
\end{aligned}$$

Граничные условия ($0 < \tau < \tau_m$):

$$\begin{aligned}
&R=0, 0 \leq Z < Z_1: \frac{\partial \Theta_1}{\partial R} = 0; \\
&R=0, Z_1 \leq Z \leq Z_2: \frac{\partial \Theta_2}{\partial R} = 0; \\
&R=0, Z_2 < Z < Z_3: \frac{\partial \Theta_3}{\partial R} = 0; \\
&R=0, Z_3 < Z < Z_4, \varphi = \varphi_m: \frac{\partial \Theta_3}{\partial \varphi} = 0; \\
&R=0, Z_4 < Z < Z_5: \frac{\partial \Theta_4}{\partial R} = 0, \frac{\partial \Psi}{\partial R} = 0, \frac{\partial \Omega}{\partial R} = 0; \\
&R=R_1, Z_1 < Z < Z_2: \lambda_3 \frac{\partial \Theta_3}{\partial R} + Q_r \frac{Z_m}{\Delta T} = \lambda_2 \frac{\partial \Theta_2}{\partial R}, \frac{\partial \Psi}{\partial R} = 0, \Psi = 0; \\
&R=R_2, Z_1 < Z < Z_3: \frac{\partial \Theta_3}{\partial R} = \frac{\lambda_4}{\lambda_3} \frac{\partial \Theta_4}{\partial R}, \frac{\partial \Psi}{\partial R} = 0, \Psi = 0; \\
&R=R_3, 0 < Z < Z_1: \frac{\partial \Theta_1}{\partial R} = 0; \\
&R=R_3, Z_1 < Z < Z_5: \frac{\partial \Theta_4}{\partial R} = 0, \frac{\partial \Psi}{\partial R} = 0, \Psi = 0; \\
&R=R_m, 0 < \varphi < \varphi_m: \frac{\partial \Theta_3}{\partial R} = \frac{\lambda_4}{\lambda_3} \frac{\partial \Theta_4}{\partial R}, \frac{\partial \Psi}{\partial R} = 0, \Psi = 0; \\
&Z=0, 0 < R < R_3: \frac{\partial \Theta_1}{\partial Z} = 0; \\
&Z=Z_1, 0 \leq R \leq R_1: \frac{\partial \Theta_2}{\partial Z} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{\partial \Theta_1}{\partial Z}; \\
&Z=Z_1, R_1 < R < R_2: \frac{\partial \Theta_3}{\partial Z} = \frac{\lambda_1}{\lambda_3} \frac{\partial \Theta_1}{\partial Z}, \frac{\partial \Psi}{\partial Z} = 0, \Psi = 0; \\
&Z=Z_1, R_2 < R < R_3: \frac{\partial \Theta_4}{\partial Z} = \frac{\lambda_1}{\lambda_4} \frac{\partial \Theta_1}{\partial Z}, \frac{\partial \Psi}{\partial Z} = 0, \Psi = 0; \\
&Z=Z_2, 0 < R < R_1: \frac{\partial \Theta_3}{\partial Z} = \frac{\lambda_2}{\lambda_3} \frac{\partial \Theta_2}{\partial Z}, \frac{\partial \Psi}{\partial Z} = 0, \Psi = 0;
\end{aligned}$$

$$Z=Z_5, 0<R<R_3: \frac{\partial \Theta_4}{\partial Z}=0, \frac{\partial \Psi}{\partial Z}=0, \Psi=0.$$

Здесь Q_r – тепло, отводимое от кристаллика за счет лучистого теплообмена ($Q_r = \sigma \varepsilon T_2^4$); σ – постоянная Стефана-Больцмана ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴)); ε – степень черноты; T_2 – температура кристаллика, К.

2.2 Численное решение нестационарных дифференциальных уравнений тепломассопереноса

1) Решение уравнения энергии для основания. Уравнение энергии для основания в безразмерных переменных имеет вид:

$$\frac{1}{Fo_1} \frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_1}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial Z^2}. \quad (2.21)$$

При использовании локально-одномерного метода и аппроксимации Самарского [146, с.34] выполняется переход к разностной форме дифференциального уравнения (2.21):

$$\frac{1}{Fo_1} \frac{\Theta_{1i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Theta_{1i,j}^n}{\tau} = \frac{\Theta_{1i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2\Theta_{1i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \Theta_{1i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{h_r^2} + \frac{1}{R} \frac{\Theta_{1i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Theta_{1i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2h_r}, \quad (2.22)$$

$$\frac{1}{Fo_1} \frac{\Theta_{1i,j}^{n+1} - \Theta_{1i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\tau} = \frac{\Theta_{1i,j+1}^{n+1} - 2\Theta_{1i,j}^{n+1} + \Theta_{1i,j-1}^{n+1}}{h_z^2}. \quad (2.23)$$

Разностные уравнения (2.22), (2.23) сводятся к трехдиагональному виду и решаются методом прогонки [143, с.42]:

$$A_i \Theta_{1i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - B_i \Theta_{1i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_i \Theta_{1i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} = F_i, \quad (2.24)$$

$$A_j \Theta_{1i,j+1}^{n+1} - B_j \Theta_{1i,j}^{n+1} + C_j \Theta_{1i,j-1}^{n+1} = F_j, \quad (2.25)$$

где

$$A_i = \frac{1}{h_r^2} + \frac{1}{2Rh_r}, \quad (2.26)$$

$$B_i = \frac{2}{h_r^2} + \frac{1}{Fo_1 \tau}, \quad (2.27)$$

$$C_i = \frac{1}{h_r^2} - \frac{1}{2Rh_r}, \quad (2.28)$$

$$F_i = -\frac{\Theta_{1i,j}^n}{Fo_1 \tau}; \quad (2.29)$$

$$A_j = \frac{1}{h_z^2}, \quad (2.30)$$

$$B_j = \frac{2}{h_z^2} + \frac{1}{Fo_1 \tau}, \quad (2.31)$$

$$C_j = \frac{1}{h_z^2}, \quad (2.32)$$

$$F_j = -\frac{\Theta_{1i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{Fo_1 \tau}. \quad (2.33)$$

На первом полушаге по времени из граничных условий на левой границе области решения уравнения энергии для основания вычисляются прогоночные коэффициенты α_0 и β_0 . Далее прямой прогонкой определяются коэффициенты α_i и β_i в каждом узле сетки. После нахождения значений температуры на правой границе области решения уравнения энергии для основания из соответствующего граничного условия выполняется обратная прогонка, в ходе которой определяются значения температуры в каждом узле сетки. Таким образом, решается система уравнений (2.24), (2.26) – (2.29). На втором полушаге по времени аналогично решается система уравнений (2.25), (2.30) – (2.33).

2) Решение уравнения энергии для кристаллика. Уравнение энергии для кристаллика в безразмерных переменных имеет вид:

$$\frac{1}{Fo_2} \frac{\partial \Theta_2}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_2}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial Z^2} + \frac{Qr_m}{V_{cr} \Delta T \lambda_2 t}. \quad (2.34)$$

При использовании локально-одномерного метода и аппроксимации Самарского [146 с.34] выполняется переход к разностной форме дифференциального уравнения (2.34):

$$\begin{aligned} \frac{1}{\text{Fo}_2} \frac{\Theta_{2i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Theta_{2i,j}^n}{\tau} = \frac{\Theta_{2i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2\Theta_{2i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \Theta_{2i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{h_r^2} + \frac{1}{R} \frac{\Theta_{2i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Theta_{2i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2h_r} + \\ + \frac{Qr_m}{V_{cr}\Delta T\lambda_2 t}, \end{aligned} \quad (2.35)$$

$$\frac{1}{\text{Fo}_2} \frac{\Theta_{2i,j}^{n+1} - \Theta_{2i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\tau} = \frac{\Theta_{2i,j+1}^{n+1} - 2\Theta_{2i,j}^{n+1} + \Theta_{2i,j-1}^{n+1}}{h_z^2} + \frac{Qr_m}{V_{cr}\Delta T\lambda_2 t}. \quad (2.36)$$

Разностные уравнения (2.35), (2.36) сводятся к трехдиагональному виду и решаются методом прогонки [146, с.42]:

$$A_i \Theta_{2i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - B_i \Theta_{2i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_i \Theta_{2i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} = F_i, \quad (2.37)$$

$$A_j \Theta_{2i,j+1}^{n+1} - B_j \Theta_{2i,j}^{n+1} + C_j \Theta_{2i,j-1}^{n+1} = F_j, \quad (2.38)$$

где

$$A_i = \frac{1}{h_r^2} + \frac{1}{2Rh_r}, \quad (2.39)$$

$$B_i = \frac{2}{h_r^2} + \frac{1}{\text{Fo}_2 \tau}, \quad (2.40)$$

$$C_i = \frac{1}{h_r^2} - \frac{1}{2Rh_r}, \quad (2.41)$$

$$F_i = -\frac{\Theta_{2i,j}^n}{\text{Fo}_2 \tau} - \frac{Qr_m}{V_{cr}\Delta T\lambda_2 t}; \quad (2.42)$$

$$A_j = \frac{1}{h_z^2}, \quad (2.43)$$

$$B_j = \frac{2}{h_z^2} + \frac{1}{Fo_2 \tau}, \quad (2.44)$$

$$C_j = \frac{1}{h_z^2}, \quad (2.45)$$

$$F_j = -\frac{\Theta_{2i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{Fo_2 \tau} - \frac{Qr_m}{V_{cr} \Delta T \lambda_2 t}. \quad (2.46)$$

На первом полушаге по времени из граничных условий на левой границе области решения уравнения энергии для кристаллика вычисляются прогоночные коэффициенты α_0 и β_0 . Далее прямой прогонкой определяются коэффициенты α_i и β_i в каждом узле сетки. После нахождения значений температуры на правой границе области решения уравнения энергии для кристаллика из соответствующего граничного условия выполняется обратная прогонка, в ходе которой определяются значения температуры в каждом узле сетки. Таким образом, решается система уравнений (2.37), (2.39) – (2.42). На втором полушаге по времени аналогично решается система уравнений (2.38), (2.43) – (2.46).

3) Решение уравнений энергии для наполнителя линзы. Уравнение энергии для наполнителя в цилиндрической части линзы в безразмерных переменных имеет вид:

$$\frac{1}{Fo_3} \frac{\partial \Theta_3}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_3}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_3}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_3}{\partial Z^2}. \quad (2.47)$$

При использовании локально-одномерного метода и аппроксимации Самарского [146, с.34] выполняется переход к разностной форме дифференциального уравнения (2.47):

$$\frac{1}{Fo_3} \frac{\Theta_{3i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Theta_{3i,j}^n}{\tau} = \frac{\Theta_{3i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2\Theta_{3i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \Theta_{3i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{h_r^2} + \frac{1}{R} \frac{\Theta_{3i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Theta_{3i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2h_r}, \quad (2.48)$$

$$\frac{1}{Fo_3} \frac{\Theta_{3i,j}^{n+1} - \Theta_{3i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\tau} = \frac{\Theta_{3i,j+1}^{n+1} - 2\Theta_{3i,j}^{n+1} + \Theta_{3i,j-1}^{n+1}}{h_z^2}. \quad (2.49)$$

Разностные уравнения (2.48), (2.49) сводятся к трехдиагональному виду и решаются методом прогонки [146, с.42]:

$$A_i \Theta_{3i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - B_i \Theta_{3i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_i \Theta_{3i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} = F_i, \quad (2.50)$$

$$A_j \Theta_{3i,j+1}^{n+1} - B_j \Theta_{3i,j}^{n+1} + C_j \Theta_{3i,j-1}^{n+1} = F_j, \quad (2.51)$$

где

$$A_i = \frac{1}{h_r^2} + \frac{1}{2Rh_r}, \quad (2.52)$$

$$B_i = \frac{2}{h_r^2} + \frac{1}{Fo_3 \tau}, \quad (2.53)$$

$$C_i = \frac{1}{h_r^2} - \frac{1}{2Rh_r}, \quad (2.54)$$

$$F_i = -\frac{\Theta_{3i,j}^n}{Fo_3 \tau}; \quad (2.55)$$

$$A_j = \frac{1}{h_z^2}, \quad (2.56)$$

$$B_j = \frac{2}{h_z^2} + \frac{1}{Fo_3 \tau}, \quad (2.57)$$

$$C_j = \frac{1}{h_z^2}, \quad (2.58)$$

$$F_j = -\frac{\Theta_{3i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{Fo_3 \tau}. \quad (2.59)$$

На первом полушаге по времени из граничных условий на левой границе области решения уравнения энергии для наполнителя линзы вычисляются прогоночные коэффициенты α_0 и β_0 . Далее прямой прогонкой определяются коэффициенты α_i и β_i в каждом узде сетки. После нахождения значений температуры на правой границе области решения уравнения энергии для наполнителя линзы из соответствующего граничного условия выполняется

обратная прогонка, в ходе которой определяются значения температуры в каждом узле сетки. Таким образом, решается система уравнений (2.50), (2.52) – (2.55). На втором полушаге по времени аналогично решается система уравнений (2.51), (2.56) – (2.59).

Уравнение энергии для наполнителя в сферической части линзы в безразмерных переменных имеет вид:

$$\frac{1}{Fo_3} \frac{\partial \Theta_3}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_3}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_3}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \Theta_3}{\partial \varphi^2}. \quad (2.60)$$

При использовании локально-одномерного метода и аппроксимации Самарского [146, с.34] выполняется переход к разностной форме дифференциального уравнения (2.60):

$$\frac{1}{Fo_3} \frac{\Theta_{3i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Theta_{3i,j}^n}{\tau} = \frac{\Theta_{3i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2\Theta_{3i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \Theta_{3i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{h_r^2} + \frac{1}{R} \frac{\Theta_{3i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Theta_{3i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2h_r}, \quad (2.61)$$

$$\frac{1}{Fo_3} \frac{\Theta_{3i,j}^{n+1} - \Theta_{3i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\tau} = \frac{1}{R^2} \frac{\Theta_{3i,j+1}^{n+1} - 2\Theta_{3i,j}^{n+1} + \Theta_{3i,j-1}^{n+1}}{h_\varphi^2}. \quad (2.62)$$

Разностные уравнения (2.61), (2.62) сводятся к трехдиагональному виду и решаются методом прогонки [146, с.42]:

$$A_i \Theta_{3i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - B_i \Theta_{3i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_i \Theta_{3i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} = F_i, \quad (2.63)$$

$$A_j \Theta_{3i,j+1}^{n+1} - B_j \Theta_{3i,j}^{n+1} + C_j \Theta_{3i,j-1}^{n+1} = F_j, \quad (2.64)$$

где

$$A_i = \frac{1}{h_r^2} + \frac{1}{2Rh_r}, \quad (2.65)$$

$$B_i = \frac{2}{h_r^2} + \frac{1}{Fo_3 \tau}, \quad (2.66)$$

$$C_i = \frac{1}{h_r^2} - \frac{1}{2Rh_r}, \quad (2.67)$$

$$F_i = -\frac{\Theta_{3i,j}^n}{Fo_3\tau}; \quad (2.68)$$

$$A_j = \frac{1}{R^2 h_\varphi^2}, \quad (2.69)$$

$$B_j = \frac{2}{R^2 h_\varphi^2} + \frac{1}{Fo_3\tau}, \quad (2.70)$$

$$C_j = \frac{1}{R^2 h_\varphi^2}, \quad (2.71)$$

$$F_j = -\frac{\Theta_{3i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{Fo_3\tau}. \quad (2.72)$$

На первом полушаге по времени из граничных условий на левой границе области решения уравнения энергии для наполнителя линзы вычисляются прогоночные коэффициенты α_0 и β_0 . Далее прямой прогонкой определяются коэффициенты α_i и β_i в каждом узле сетки. После нахождения значений температуры на правой границе области решения уравнения энергии для наполнителя линзы из соответствующего граничного условия выполняется обратная прогонка, в ходе которой определяются значения температуры в каждом узле сетки. Таким образом, решается система уравнений (2.63), (2.65) – (2.68). На втором полушаге по времени аналогично решается система уравнений (2.64), (2.69) – (2.72).

4) Решение уравнения Пуассона для окружающего воздуха. Уравнение Пуассона в безразмерных переменных имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial R^2} - \frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2} = -R\Omega. \quad (2.73)$$

Для решения данного уравнения используется получивший широкое распространение неявный метод переменных направлений [146, с.356]. Для этого стационарное уравнение (2.73) приводится к нестационарному виду:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial R^2} - \frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2} + R\Omega. \quad (2.74)$$

При использовании аппроксимации Самарского [146, с.34] выполняется переход от дифференциального (2.74) к разностным уравнениям:

$$\frac{\Psi_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} - \Psi_{i,j}^k}{\tau/2} = \frac{\Psi_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} - 2\Psi_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} + \Psi_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}}}{h_r^2} - \frac{1}{R} \frac{\Psi_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} - \Psi_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}}}{2h_r} + \frac{\Psi_{i,j+1}^k - 2\Psi_{i,j}^k + \Psi_{i,j-1}^k}{h_z^2} + R\Omega_{i,j}, \quad (2.75)$$

$$\frac{\Psi_{i,j}^{k+1} - \Psi_{i,j}^{k+\frac{1}{2}}}{\tau/2} = \frac{\Psi_{i,j+1}^{k+1} - 2\Psi_{i,j}^{k+1} + \Psi_{i,j-1}^{k+1}}{h_z^2} + \frac{\Psi_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} - 2\Psi_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} + \Psi_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}}}{h_r^2} - \frac{1}{R} \frac{\Psi_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} - \Psi_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}}}{2h_r} + R\Omega_{i,j}. \quad (2.76)$$

Разностные уравнения (2.75), (2.76) сводятся к трёхдиагональному виду и решаются методом прогонки [146, с.42]:

$$A_i \Psi_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} - B_i \Psi_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} + C_i \Psi_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}} = F_i, \quad (2.77)$$

$$A_j \Psi_{i,j+1}^{k+1} - B_j \Psi_{i,j}^{k+1} + C_j \Psi_{i,j-1}^{k+1} = F_j, \quad (2.78)$$

где

$$A_i = \frac{1}{h_r^2} - \frac{1}{2h_r R}, \quad (2.79)$$

$$B_i = \frac{2}{h_r^2} + \frac{2}{\tau}, \quad (2.80)$$

$$C_i = \frac{1}{h_r^2} + \frac{1}{2h_r R}, \quad (2.81)$$

$$F_i = -\frac{\Psi_{i,j}^k}{\tau/2} - \frac{\Psi_{i,j+1}^k - 2\Psi_{i,j}^k + \Psi_{i,j-1}^k}{h_z^2} - R\Omega_{i,j}; \quad (2.82)$$

$$A_j = \frac{1}{h_z^2}, \quad (2.83)$$

$$B_j = \frac{2}{h_z^2} + \frac{2}{\tau}, \quad (2.84)$$

$$C_j = \frac{1}{h_z^2}, \quad (2.85)$$

$$F_j = -\frac{\Psi_{i,j}^{k+\frac{1}{2}}}{\tau/2} - \frac{\Psi_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} - 2\Psi_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} + \Psi_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}}}{h_r^2} + \frac{1}{R} \frac{\Psi_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} - \Psi_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}}}{2h_r} - R\Omega_{i,j}. \quad (2.86)$$

На первом полушаге по времени из граничных условий на левой границе области решения уравнения Пуассона для функции тока вычисляются прогоночные коэффициенты α_0 и β_0 . Далее прямой прогонкой определяются коэффициенты α_i и β_i в каждом узле сетки. После нахождения значений функции тока на правой границе области решения уравнения Пуассона из соответствующего граничного условия выполняется обратная прогонка, в ходе которой определяются значения функции тока в каждом узле сетки. Таким образом, решается система уравнений (2.77), (2.79) – (2.82). На втором полушаге по времени аналогично решается система уравнений (2.78), (2.83) – (2.86).

5) Решение уравнения завихренности для окружающего воздуха. Уравнение для вектора вихря скорости в безразмерных переменных имеет вид:

$$\frac{1}{Sh} \frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Omega}{\partial R} + V \frac{\partial \Omega}{\partial Z} - U \frac{\Omega}{R} = \sqrt{\frac{Pr_4}{Ra_4}} \left(\frac{\partial^2 \Omega}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Omega}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Z^2} - \frac{\Omega}{R^2} \right) + \frac{\partial \Theta_4}{\partial R}. \quad (2.87)$$

При использовании локально-одномерного метода и аппроксимации Самарского [146, с.34] выполняется переход к разностной форме дифференциального уравнения (2.87):

$$\begin{aligned} & \frac{1}{Sh} \frac{\Omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Omega_{i,j}^n}{\tau} + U_{i,j}^n \frac{\Omega_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Omega_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2h_r} - |U_{i,j}^n| \frac{\Omega_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2\Omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \Omega_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2h_r} - U_{i,j}^n \frac{\Omega_{i,j}^n}{R} = \\ & = \sqrt{\frac{Pr_4}{Ra_4}} \left[\left(1 + |U_{i,j}^n| \frac{h_r \sqrt{\frac{Ra_4}{Pr_4}}}{2} \right)^{-1} \frac{\Omega_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2\Omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \Omega_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{h_r^2} + \frac{1}{R} \frac{\Omega_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Omega_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2h_r} \right] + \\ & + \frac{\Theta_{4i+1,j}^n - \Theta_{4i-1,j}^n}{2h_r}, \end{aligned} \quad (2.88)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{\text{Sh}} \frac{\Omega_{i,j}^{n+1} - \Omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\tau} + V_{i,j}^n \frac{\Omega_{i,j+1}^{n+1} - \Omega_{i,j-1}^{n+1}}{2h_z} - |V_{i,j}^n| \frac{\Omega_{i,j+1}^{n+1} - 2\Omega_{i,j}^{n+1} + \Omega_{i,j-1}^{n+1}}{2h_z} = \\
& = \sqrt{\frac{\text{Pr}_4}{\text{Ra}_4}} \left[\left(1 + |V_{i,j}^n| \frac{h_z \sqrt{\frac{\text{Ra}_4}{\text{Pr}_4}}}{2} \right)^{-1} \times \frac{\Omega_{i,j+1}^{n+1} - 2\Omega_{i,j}^{n+1} + \Omega_{i,j-1}^{n+1}}{h_z^2} + \frac{\Theta_{4i,j+1}^n - \Theta_{4i,j-1}^n}{2h_z} \right]. \quad (2.89)
\end{aligned}$$

В приведенных схемах используются аппроксимации конвективных членов, осредненные относительно $V_{i,j}^n$, $|V_{i,j}^n|$ и $U_{i,j}^n$, $|U_{i,j}^n|$ для того, чтобы схема не зависела от знака скорости. При этом применяется аппроксимация одномерных операторов центральными разностями.

Разностные уравнения (2.88), (2.89) сводятся к трехдиагональному виду и решаются методом прогонки [146, с.42]:

$$A_i \Omega_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - B_i \Omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_i \Omega_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} = F_i, \quad (2.90)$$

$$A_j \Omega_{i,j+1}^{n+1} - B_j \Omega_{i,j}^{n+1} + C_j \Omega_{i,j-1}^{n+1} = F_j, \quad (2.91)$$

где

$$A_i = \sqrt{\frac{\text{Pr}_4}{\text{Ra}_4}} \left[\left(1 + |U_{i,j}^n| \frac{h_r \sqrt{\frac{\text{Ra}_4}{\text{Pr}_4}}}{2} \right)^{-1} \frac{1}{h_r^2} + \frac{1}{2h_r R} - \frac{U_{i,j}^n}{2h_r} + \frac{|U_{i,j}^n|}{2h_r} \right], \quad (2.92)$$

$$B_i = \frac{2}{h_r^2} \sqrt{\frac{\text{Pr}_4}{\text{Ra}_4}} \left(1 + |U_{i,j}^n| \frac{h_r \sqrt{\frac{\text{Ra}_4}{\text{Pr}_4}}}{2} \right)^{-1} + \frac{|U_{i,j}^n|}{h_r} + \frac{1}{\text{Sh} \tau}, \quad (2.93)$$

$$C_i = \sqrt{\frac{\text{Pr}_4}{\text{Ra}_4}} \left[\left(1 + |U_{i,j}^n| \frac{h_r \sqrt{\frac{\text{Ra}_4}{\text{Pr}_4}}}{2} \right)^{-1} \frac{1}{h_r^2} - \frac{1}{2h_r R} \right] + \frac{U_{i,j}^n}{2h_r} + \frac{|U_{i,j}^n|}{2h_r}, \quad (2.94)$$

$$F_i = -\frac{\Omega_{i,j}^n}{\tau} + U_{i,j}^n \frac{\Omega_{i,j}^n}{R} - \frac{\Theta_{4i+1,j}^n - \Theta_{4i-1,j}^n}{2h_r}; \quad (2.95)$$

$$A_j = \frac{1}{h_z^2} \sqrt{\frac{\text{Pr}_4}{\text{Ra}_4}} \left(1 + |V_{i,j}^n| \frac{h_z \sqrt{\frac{\text{Ra}_4}{\text{Pr}_4}}}{2} \right)^{-1} - \frac{V_{i,j}^n}{2h_z} + \frac{|V_{i,j}^n|}{2h_z}, \quad (2.96)$$

$$B_j = \frac{2}{h_z^2} \sqrt{\frac{\text{Pr}_4}{\text{Ra}_4}} \left(1 + |V_{i,j}^n| \frac{h_z \sqrt{\frac{\text{Ra}_4}{\text{Pr}_4}}}{2} \right)^{-1} + \frac{|V_{i,j}^n|}{h_z} + \frac{1}{\text{Sh} \tau} \quad (2.97)$$

$$C_j = \frac{1}{h_z^2} \sqrt{\frac{\text{Pr}_4}{\text{Ra}_4}} \left(1 + |V_{i,j}^n| \frac{h_z \sqrt{\frac{\text{Ra}_4}{\text{Pr}_4}}}{2} \right)^{-1} + \frac{V_{i,j}^n}{2h_z} + \frac{|V_{i,j}^n|}{2h_z}, \quad (2.98)$$

$$F_j = -\frac{\Omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\tau} - \frac{\Theta_{4i,j+1}^n - \Theta_{4i,j-1}^n}{2h_z}. \quad (2.99)$$

На первом полушаге по времени из граничных условий на левой границе области решения уравнения для вектора вихря скорости вычисляются прогоночные коэффициенты α_0 и β_0 . Далее прямой проголкой определяются коэффициенты α_i и β_i в каждом узле сетки. После нахождения значений вектора вихря скорости на правой границе области решения уравнения для вектора вихря скорости из соответствующего граничного условия выполняется обратная прогонка, в ходе которой определяются значения вектора вихря скорости в каждом узле сетки. Таким образом, решается система уравнений (2.90), (2.92) – (2.95). На втором полушаге по времени аналогично решается система уравнений (2.91), (2.96) – (2.99).

6) Решение уравнения энергии для окружающего воздуха. Уравнение энергии для воздуха в цилиндрической части линзы в безразмерных переменных имеет вид:

$$\frac{1}{Sh} \frac{\partial \Theta_4}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Theta_4}{\partial R} + V \frac{\partial \Theta_4}{\partial Z} = \frac{1}{\sqrt{Ra_4 Pr_4}} \left(\frac{\partial^2 \Theta_4}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_4}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_4}{\partial Z^2} \right). \quad (2.100)$$

При использовании локально-одномерного метода и аппроксимации Самарского [146, с.34] выполняется переход к разностной форме дифференциального уравнения (2.100):

$$\begin{aligned} \frac{1}{Sh} \frac{\Theta_{4i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Theta_{4i,j}^n}{\tau} + U_{i,j}^n \frac{\Theta_{4i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Theta_{4i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2h_r} - |U_{i,j}^n| \frac{\Theta_{4i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2\Theta_{4i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \Theta_{4i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2h_r} = \\ = \frac{1}{\sqrt{Ra_4 Pr_4}} \left[\left(1 + |U_{i,j}^n| \frac{\sqrt{Ra_4 Pr_4} h_r}{2} \right)^{-1} \frac{\Theta_{4i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2\Theta_{4i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \Theta_{4i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{h_r^2} + \right. \\ \left. + \frac{1}{R} \frac{\Theta_{4i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Theta_{4i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2h_r} \right]. \end{aligned} \quad (2.101)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{Sh} \frac{\Theta_{4i,j}^{n+1} - \Theta_{4i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\tau} + V_{i,j}^n \frac{\Theta_{4i,j+1}^{n+1} - \Theta_{4i,j-1}^{n+1}}{2h_z} - |V_{i,j}^n| \frac{\Theta_{4i,j+1}^{n+1} - 2\Theta_{4i,j}^{n+1} + \Theta_{4i,j-1}^{n+1}}{2h_z} = \\ = \frac{1}{\sqrt{Ra_4 Pr_4}} \left[\left(1 + |V_{i,j}^n| \frac{\sqrt{Ra_4 Pr_4} h_z}{2} \right)^{-1} \frac{\Theta_{4i,j+1}^{n+1} - 2\Theta_{4i,j}^{n+1} + \Theta_{4i,j-1}^{n+1}}{h_z^2} \right]. \end{aligned} \quad (2.102)$$

В приведенных схемах используются аппроксимации конвективных членов, осредненные относительно $V_{i,j}^n$, $|V_{i,j}^n|$ и $U_{i,j}^n$, $|U_{i,j}^n|$ для того, чтобы схема не зависела от знака скорости. При этом применяется аппроксимация одномерных операторов центральными разностями.

Разностные уравнения (2.101), (2.102) сводятся к трехдиагональному виду и решаются методом прогонки [146, с.42]:

$$A_i \Theta_{4i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - B_i \Theta_{4i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_i \Theta_{4i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} = F_i, \quad (2.103)$$

$$A_j \Theta_{4i,j+1}^{n+1} - B_j \Theta_{4i,j}^{n+1} + C_j \Theta_{4i,j-1}^{n+1} = F_j, \quad (2.104)$$

где

$$A_i = \frac{1}{\sqrt{\text{Ra}_4 \text{Pr}_4}} \left[\left(1 + |U_{i,j}^n| \frac{\sqrt{\text{Ra}_4 \text{Pr}_4} h_r}{2} \right)^{-1} \frac{1}{h_r^2} + \frac{1}{2R h_r} \right] - \frac{U_{i,j}^n}{2h_r} + \frac{|U_{i,j}^n|}{2h_r}, \quad (2.105)$$

$$B_i = \frac{2}{\sqrt{\text{Ra}_4 \text{Pr}_4} h_r^2} \left(1 + |U_{i,j}^n| \frac{\sqrt{\text{Ra}_4 \text{Pr}_4} h_r}{2} \right)^{-1} + \frac{|U_{i,j}^n|}{h_r} + \frac{1}{\text{Sh} \tau}, \quad (2.106)$$

$$C_i = \frac{1}{\sqrt{\text{Ra}_4 \text{Pr}_4}} \left[\left(1 + |U_{i,j}^n| \frac{\sqrt{\text{Ra}_4 \text{Pr}_4} h_r}{2} \right)^{-1} \frac{1}{h_r^2} - \frac{1}{2R h_r} \right] + \frac{U_{i,j}^n}{2h_r} + \frac{|U_{i,j}^n|}{2h_r}, \quad (2.107)$$

$$F_i = -\frac{\Theta_{4i,j}^n}{\text{Sh} \tau}; \quad (2.108)$$

$$A_j = \frac{1}{\sqrt{\text{Ra}_4 \text{Pr}_4} h_z^2} \left(1 + |V_{i,j}^n| \frac{\sqrt{\text{Ra}_4 \text{Pr}_4} h_z}{2} \right)^{-1} - \frac{V_{i,j}^n}{2h_z} + \frac{|V_{i,j}^n|}{2h_z}, \quad (2.109)$$

$$B_j = \frac{2}{\sqrt{\text{Ra}_4 \text{Pr}_4} h_z^2} \left(1 + |V_{i,j}^n| \frac{\sqrt{\text{Ra}_4 \text{Pr}_4} h_z}{2} \right)^{-1} + \frac{|V_{i,j}^n|}{h_z} + \frac{1}{\text{Sh} \tau}, \quad (2.110)$$

$$C_j = \frac{1}{\sqrt{\text{Ra}_4 \text{Pr}_4} h_z^2} \left(1 + |V_{i,j}^n| \frac{\sqrt{\text{Ra}_4 \text{Pr}_4} h_z}{2} \right)^{-1} + \frac{V_{i,j}^n}{2h_z} + \frac{|V_{i,j}^n|}{2h_z}, \quad (2.111)$$

$$F_j = -\frac{\Theta_{4i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\text{Sh} \tau}. \quad (2.112)$$

На первом полушаге по времени из граничных условий на левой границе области решения уравнения энергии вычисляются прогоночные коэффициенты α_0 и β_0 . Далее прямой прогонкой определяются коэффициенты α_i и β_i в каждом узле сетки. После нахождения значений температуры на правой границе области решения уравнения энергии из соответствующего граничного условия

выполняется обратная прогонка, в ходе которой определяются значения температуры в каждом узле сетки. Таким образом, решается система уравнений (2.103), (2.105) – (2.108). На втором полушаге по времени аналогично решается система уравнений (2.104), (2.109) – (2.112).

2.3 Алгоритм численного моделирования

1. На первом шаге по времени строится итерационный цикл для определения температурного поля в рассматриваемой системе (рисунок 2.2). В качестве начального приближения задается значение сеточной функции на предшествующем временном слое. Итерационный цикл заканчивается при условии:

$$\max |\Theta^{(s)} - \Theta^{(s-1)}| \leq \delta, \quad (2.113)$$

где δ – заданное малое число, s – номер итерации.

Если в результате итерационного цикла требуемая точность вычислений не достигается, то полученное приближение $\Theta^{(s)}$ задается в качестве начального в систему разностных аналогов уравнений энергии и теплопроводности для определения очередного приближения $\Theta^{(s+1)}$. При достижении заданной точности вычислений выполняется переход к следующему временному слою.

Для достижения сходимости итерационного цикла в условиях высоких скоростей теплопереноса традиционная схема итерационного алгоритма дополняется процедурой «усреднения итераций». Вводится итерационный коэффициент последовательного усреднения γ . В этом случае, значение искомой функции $\Theta_*^{(s+1)}$, вводимое на каждой итерации в качестве последнего приближения в соответствующие разностные операторы, отличается от фактически вычисленного на последней итерации значения $\Theta^{(s+1)}$ и вычисляется для каждого узла итерационной сетки по следующей формуле:

$$\Theta_*^{(s+1)} = \Theta^{(s)} + \gamma (\Theta^{(s+1)} - \Theta^{(s)}), \quad 0 < \gamma < 1. \quad (2.114)$$

Введение такой процедуры приводит к существенному снижению скорости сходимости итераций в процессе решения задачи, но обеспечивает сходимость.

В выполняемых расчетах точность вычислений температуры принимается равной 0,5 K ввиду минимально возможной в такой постановке температуры $\Theta=0,3$. На каждом шаге итерации, пока не выполняется условие вида (2.113), решение проводится по методикам, изложенным в п.2.3 (1 -3, 6).

2. При известных значениях температуры в каждом узле пространственной сетки вычисляется значение функции тока Ψ согласно методике, изложенной в п. 2.3 (4).

3. По найденным значениям функции тока Ψ и температуры в каждом узле сетки итерационным путем определяются значения вектора вихря скорости Ω .

На каждом шаге итерации, пока не выполняется условие вида (2.114) для вектора вихря скорости, решение уравнения для вектора вихря скорости проводится по методике, изложенной в п. 2.3 (5).

4. По значениям вектора вихря скорости Ω и функции тока Ψ вычисляются компоненты скорости конвекции воздушных потоков U и V по выражениям (2.10).

5. Для контроля точности проводимых вычислений в каждом узле сетки выполняется оценка достоверности полученных результатов по результатам анализа консервативности разностной схемы.

6. Затем проверяются условия окончания вычислений по превышению температуры кристаллика предельных значений (температур плавления компаунда, кристаллика, основания). В случае невыполнения условий окончания вычислений выполняется переход на следующий временной слой и определяются поля температуры, функции тока, вектора вихря скорости, проверяется достоверность полученных результатов и условий окончания вычислений по пунктам данного алгоритма.

В случае выполнения условий окончания вычислений определяется время прохождения исследуемого процесса, предельные токовые нагрузки, критические внешние условия и температурные режимы работы светодиода.

Вычисления по вышеприведенному алгоритму проводились с использованием программы MathCAD-10.

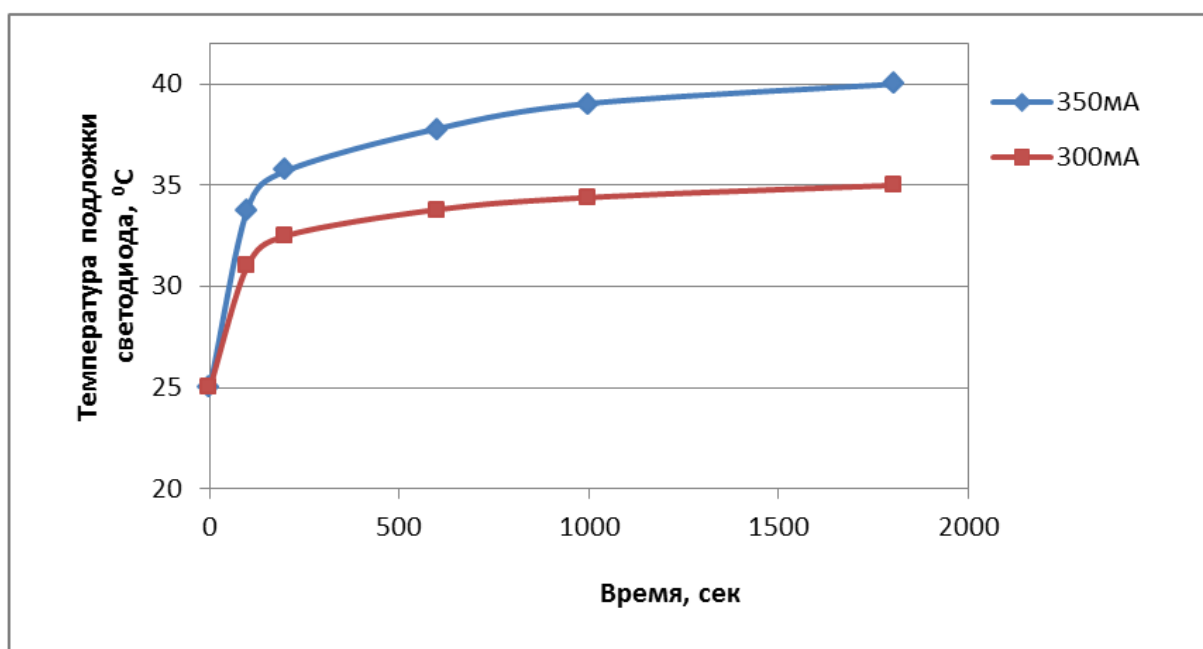


Рисунок 2.3 – Расчетные температурные зависимости мощного светодиода Nichia NCSL219B

Расчетные данные показаны на рисунке 2.3. При численном решении были получены значения температуры подложки светодиода для двух значений тока 300мА и 350мА в интервалах времени: 100с, 200с, 600с, 1000с, 1800с.

Температура окружающего воздуха принималась 25°C . Все расчеты были проведены для светодиода фирмы Nichia NCSL219B [147]. При задании граничных условий площадь радиатора задавалась 4500 мм^2 .

В главе 4 диссертации приведены экспериментальные данные температурных изменений во времени, которые хорошо согласуются с результатами полученными теоретически.

Проведенные расчеты достаточно неплохо согласуются с расчетами, приведенными в работе [148], где исследования проводились со светодиодами фирмы Cree с использованием метода тепловых сопротивлений. Для светодиодных систем освещения мощностью 1-5 Вт (для которых решалось уравнение Пуассона) можно использовать данный метод.

2.4 Выводы по разделу

В результате выполненных теоретических исследований сформулирована математическая модель, выбраны методы и разработан алгоритм численного моделирования, позволяющие рассчитать тепловые режимы эксплуатации светодиодов, создать рекомендации по рациональному выбору материалов для изготовления комплектующих и уменьшению износа полупроводниковых изделий.

На базе предложенного математического аппарата возможно проведение вариативных исследований для анализа масштабов влияния внешних и внутренних факторов на электрические, энергетические и калориметрические характеристики работы светодиодов.

Получена адекватная модель для всех тепловых процессов в светодиоде, функционирующем в реальных условиях.

Изложенный подход к теоретическому расчету тепломассопереноса показывает, что тепловые процессы можно рассчитывать с использованием метода тепловых сопротивлений.

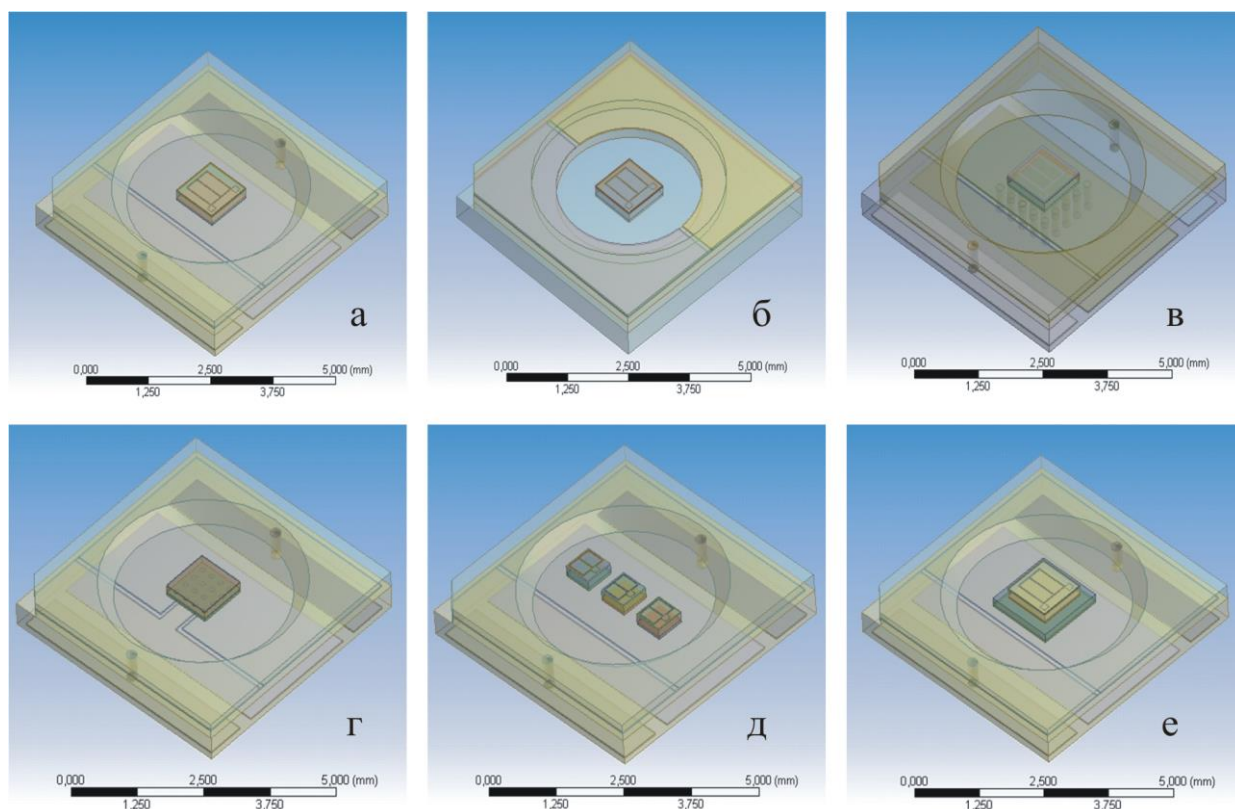
Полученные температурные зависимости подложки белого мощного светодиода фирмы Nichia от времени согласуются как с зарубежными источниками, проведенными со светодиодами фирмы Cree, так и с экспериментальными результатами.

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕТОДИОДНОЙ СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ С ЦЕЛЮ ПОЛУЧЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

3.1 Компьютерное моделирование конструктивных параметров светодиодной матрицы с целью повышения теплоотдачи

Основным элементов полупроводникового осветительного прибора является светодиод. На сегодняшний день конфигурации конструктивных исполнений светодиодов большой мощности достаточно разнообразны. Производители совершенствуют технологии изготовления светоизлучающих кристаллов, конструкции и материалы теплоотводящих оснований для достижения максимальной световой эффективности и снижения теплового сопротивления.

В ходе исследования и обзора научных статей, публикаций и технической документации ведущих мировых производителей светодиодной продукции выявлены основные направления в развитие светодиодов высокой мощности, а также решения связанные с проблемой отвода тепла от кристалла светодиодов повышенной мощности.



а – стандартная конструкция светодиода; б – сплошная металлическая подложка; в – «металлизированные столбики» в подложке; г – кристалл «flip-chip» на металлизированной керамической подложке; д – три кристалла с такой же общей суммарной мощностью и объемом; е – кристалл с установкой на дополнительную подложку

Рисунок 3.1– Трехмерные модели корпусов поверхностного монтажа

Для сравнительного анализа эффективности конструктивных и технологических особенностей мощных светодиодов лидирующих мировых производителей было проведено моделирование с использованием программного продукта «ANSYS 14.5». В системе трехмерного проектирования «Autodesk Inventor Professional 2013» были спроектированы стандартные модели корпусов поверхностного монтажа типоразмера 5×5мм, в каждом из которых применен один из способов улучшения отвода тепла.

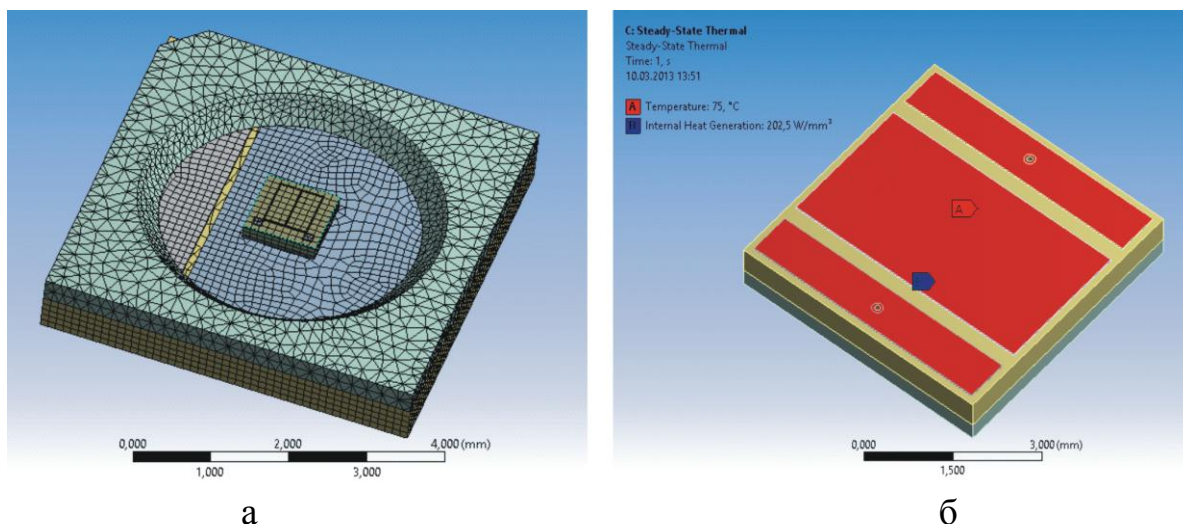
Спроектированы следующие светодиодные матрицы: стандартной конструкции, со сплошной металлической подложкой, с «металлизированными столбиками» в подложке, исполнение кристаллов по технологии «flip-chip» на металлизированной керамической подложке; с тремя кристаллами общей суммарной мощностью и объемом равным предыдущим матрицам; матрица с дополнительной подложкой (рисунок 3.1).

Материалы элементов светодиодов, используемые при моделировании, и их теплопроводность представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Материалы элементов светодиода

Элемент	Материал	Теплопроводность, Вт/(м·К)
Кристалл	Au	318
	AuSn	220
	n - слой	140
	p- слой	140
	Si	150
Клей для монтажа кристалла	диэлектрический	7
	электропроводный	15
Подложка под кристалл	Si	150
	SiC	360
Подложка	керамика алюмооксидная (Al ₂ O ₃)	24
	керамикаалюмонитридная (AlN)	180
	медь (Cu)	401
	CVD - алмаз	1800
	металлизированные «столбики»	300
Металлизация	паста на основе серебра	300

Анализ производится по методу конечных объемов. Для точности моделирования, выбран самый мелкий шаг сетки дискретизации. Каждый элемент конструкции делится на 392 части (рисунок 3.2а). В качестве температуры окружающей среды, была принята верхняя граница гражданского диапазона температур +75°С и приложена к нижней части основания светодиода (рисунок 3.2б).



а – сетка дискретизации; б – область температуры окружающей среды
Рисунок 3.2 – Граничные условия

Расчеты проводились в стационарном режиме.

В среднем КПД исследуемых светодиодов не превышает 30%, поэтому в моделировании приняли, что 70% мощности светодиода преобразуется в тепло.

В качестве тепловых источников использовались объемы, встроенные в кристаллы светодиодов, имитирующие р-п переход. Каждому элементу задается коэффициент теплового излучения, который равен отношению мощности теплового излучения к объему излучающего элемента (рисунок 3.3).

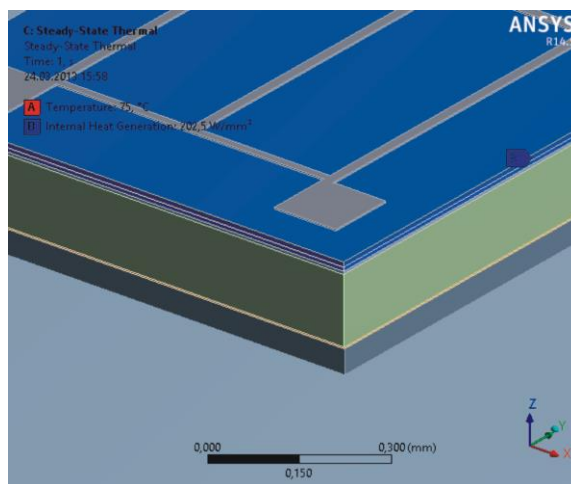


Рисунок 3.3 – Модель кристалла

Не смотря на трудоемкость такого моделирования, его результаты можно будет использовать в дальнейшем для тепловых расчетов любых светотехнических систем, в которых используется аналогичная технология монтажа светодиодов, материалы и геометрия радиатора.

В результате моделирования получены значения тепловых сопротивлений подложек корпусов светодиодных матриц с применением различных материалов и технологий (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Тепловое сопротивление подложек

Материал подложки	Тепловое сопротивление, %	Снижение теплового сопротивления, %
Керамика алюмооксидная	100	-
Керамика алумонитридная	59	41
Металлическая подложка (Cu)	36	54
CVD - алмаз	16	74
Металлизированные столбики (Ag)	56	44

Для сравнения за основу (эталонную модель) была принята спроектированная стандартная конструкция светодиодной матрицы с подложкой из алюмооксидной керамики. По сравнению с алюмооксидной, алумонитридная керамика обладает значительно более высокой теплопроводностью, но является более дорогой.

На сегодняшний день становится все более распространенным применение сплошного металлического основания, металлы обладают очень высокими показателями теплопроводности. Тем не менее, основная сложность данной технологии заключается в способе крепления кристалла к подложке. Стоит отметить, что температурные коэффициенты металлов зачастую сильно отличаются от материалов, используемых в кристалле. Поэтому приходится использовать толстые слои специального клеящего материала, которые должны компенсировать разность температурных коэффициентов расширения. В то же время, не стоит забывать, клеящий материал должен быть диэлектрическим, чтобы исключить возможность контакта кристалла с подложкой. Все это отрицательно сказывается на показателе теплопроводности клея. Диэлектрический клей минимум в два раза ниже по теплопроводности, чем токопроводящий. Не смотря на все это, данный метод достаточно эффективен и прост.

Использование «металлизированных столбиков» является очень эффективным при использовании подложек из полимерных материалов, а так же на печатных платах. Данные материалы позволяют, по сравнению с керамикой, обеспечить высокую плотность отверстий и существенно не ограничены по диаметру. Этот метод позволяет значительно повысить теплопроводность всей подложки в целом. Очень эффективной альтернативой этого метода является использование большого металлизированного отверстия под кристаллом, сравнимого с его площадью. Данный конструктивный вариант формирует сплошной металлический теплоотвод под кристаллом и по эффективности приближается к варианту со сплошной металлической подложкой, но технологическая реализация требует очень тонкой настройки и узкого технологического окна процесса его изготовления.

Подложки на основе CVD-алмаза уже применяют в некоторых устройствах большой мощности и не только как в качестве теплоотвода, но и совместно, как и полупроводниковый материал. Многие исследователи называют данный

материал как «идеальной диэлектрической подложкой». На сегодняшний день его теплопроводность превышает 2300 Вт/(м·К). Существует ряд технологий выращивания CVD-алмаза и с каждым годом они совершенствуются. Тем не менее, для его массового внедрения в электронику еще предстоит решить ряд технологических трудностей, но уже сейчас, специалисты прогнозируют данному материалу большое будущее и одно из первых его применений будет направленно на создание мощных светодиодных устройств.

Сравнительный анализ полученных в результате моделирования тепловых сопротивлений мощных светодиодов различных конструкций и технологий исполнения представлен в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Тепловое сопротивление кристаллов и подложек

Конструкция кристаллов	Тепловое сопротивление, %	Снижение теплового сопротивления, %
Стандартная	100	-
Flip-Chip	73	27
Тонкий	80	20
Три кристалла	63	37
Подложка Si	67	33
Подложка SiC	62	38

В качестве стандартного кристалла, здесь подразумевается планарный кристалл, высотой около 170 мкм (рисунок 3.1а). Данные кристаллы наиболее распространенные и сравнительно дешевые.

Компания Philips первая стала применять технологию исполнения кристалла методом «flip-chip»(перевернутый кристалл). Она позволяет повысить световой поток и в тоже время, очень значительно, понизить тепловое сопротивление за счет более низкого расположения полупроводниковых слоев от теплоотвода.

Не менее эффективно использование тонких кристаллов. Компания Cree обладает очень высокими технологическими достижениями в производстве кристаллов и уже в промышленных масштабах производит кристаллы высотой менее 100 мкм. Использование высокотеплопроводных материалов, а в частности карбида кремния, позволяет дополнительно понизить тепловое сопротивление конструкции.

Компания Sharp разрабатывает многокристальные структуры и основана на производстве светодиодных матриц высокой мощности. Применение нескольких кристаллов меньшего объема вместо одного мощного, позволяет выиграть не только в световом потоке, мощности, но и в тепловом сопротивлении. С увеличением количества кристаллов тепловой поток наиболее эффективно и равномерно распределяется на всей площади подложки, что позволяет значительно снизить тепловое сопротивление. Но стоит отметить, что этот метод требует увеличения площади подложки.

В результате можно выделить следующие наиболее перспективные и эффективные направления:

- производство многокристалльных структур;
- использование в конструкциях цельные металлические подложки;
- применение «металлизированных столбиков».

Проведенные исследования моделей светодиодных матриц позволили спроектировать собственную модель светодиодной матрицы с учетом оптимизации ее температурных режимов. Алгоритм расчета и результаты моделирования представлены в работе [149].

Были получены следующие параметры светодиодной матрицы повышенной мощности:

- мощность: 75Вт;
- световой поток: 7000 лм;
- тепловое сопротивление $0,7^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$;
- габаритные размеры: длина – 25мм, ширина 20 мм, высота 4 мм.

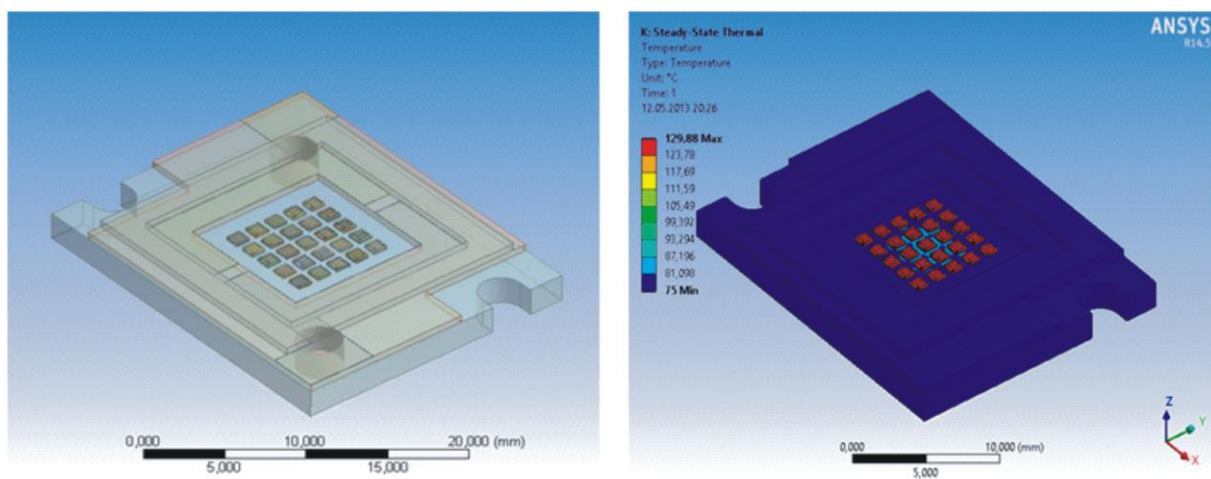


Рисунок 3.5 – Модель светодиодной матрицы на сплошной медной подложке

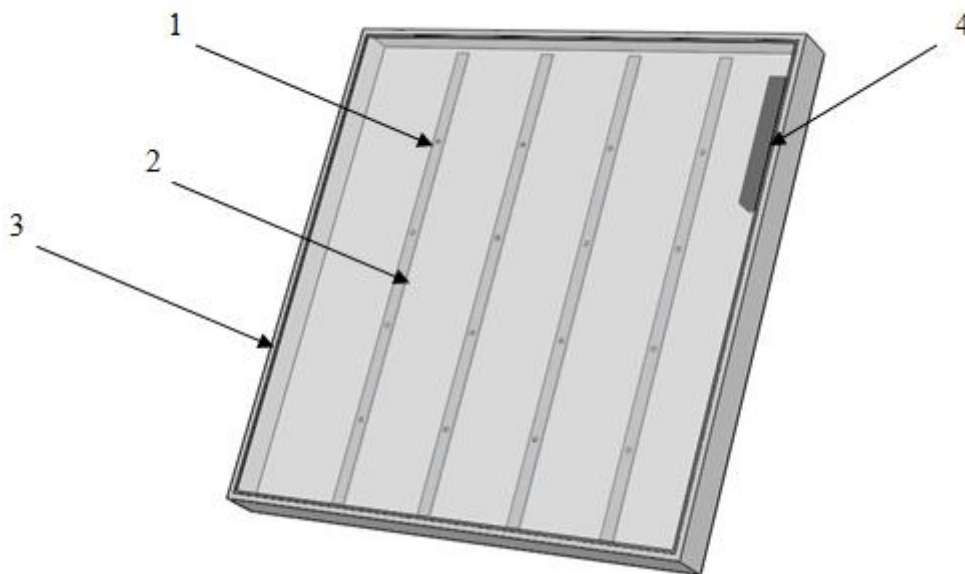
Матрица располагается на цельной металлической подложке, обладает простой прямоугольной формой с возможностью крепления на болтах (рисунок 3.5). Имеется два полимерных диэлектрических слоя, на первом из которых закреплены металлические контакты с выходами по краям. Верхний слой является «граничной рамкой» для заливки эпоксидной смолы.

3.2 Разработка новой конструкции светодиодного осветительного прибора

Организация эффективного теплоотвода является основной проблемой при проектировании мощного светодиодного светильника. При разработке такого типа осветительного прибора необходимо минимизировать плотность распределения тепла от массива светодиодов, а также тепловое сопротивление между корпусом радиатора и теплоотводящим основанием светодиода. Очень

важно, чтобы расчеты при проектировании светотехнического устройства обеспечивали надлежащий уровень охлаждения мощного светодиода. Отвод тепла достигается путем выбора оптимальных конструктивных решений осветительного прибора.

На рисунке 3.6 представлена наиболее распространенная конструкция теплообменника для внутреннего освещения помещения. Конструкция представляет собой корпус светильника типа «Armstrong» стандартных пропорций.



1 - светодиод, 2 –печатная плата, 3 –корпус (радиатор), 4 – источник питания

Рисунок 3.6 – Конструкция светильника типа «Armstrong»

Для расчета температурных полей спроектированной компьютерной модели было использовано CAD система Solid Works Flow Simulation, которая позволяет рассчитывать тепломассообмен конструкции [150]. Результатами расчетов являются: распределение температуры в любом сечении конструкции и среды, скорости и формы потоков среды (воздуха), коэффициент теплопередачи от любой поверхности конструкции в среду. Возможности Flow Simulation позволяют за некоторое количество итераций оптимизировать тепловую конструкцию осветительного прибора. Изменяя форму поверхностей, зазоры и толщины можно добиться компромиссного решения между массо-габаритными требованиями и тепловыми, при этом, не забывая о реальности конструкции.

На этапе проектирования светодиодных осветительных приборов и расчёта теплового режима их работы необходимо определять внешние условия эксплуатации. С целью обозначения теплового режима задаются основные параметры. Для расчетов были выбраны следующие данные:

- среда - воздух при давлении 101,3 кПа,
- температура окружающей среды 25°C;

- материал конструкции - алюминий (200 Вт/м*К);
- плафон - поликарбонат (1,3 Вт/м*К),
- вес рассчитанной конструкции не более 3 кг.

Использовались светодиоды фирм Nichia и LG с основными светотехническими характеристиками, представленными в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Характеристики светодиодов

Характеристика	NVSL219B	NCSL219B	LG 3030N
Мощность светодиода, Вт	2,16	1,05	0,609
Сила тока, мА	700	350	100
Световой поток, лм	278	147	78
Световая отдача, лм/Вт	128	140	128
Размеры, мм	3.5x3.5x2.0	6.5x5.0x1.35	3.0x3.0x2.0

1 расчет. Для первого расчета использовались светодиоды Nichia NVSL219B. На рисунке 3.7 показано температурное поле модели светодиодного светильника работающего при токе $I=0,7\text{A}$. Максимальная температура на корпусе светодиодных матриц составила $35,2^{\circ}\text{C}$.

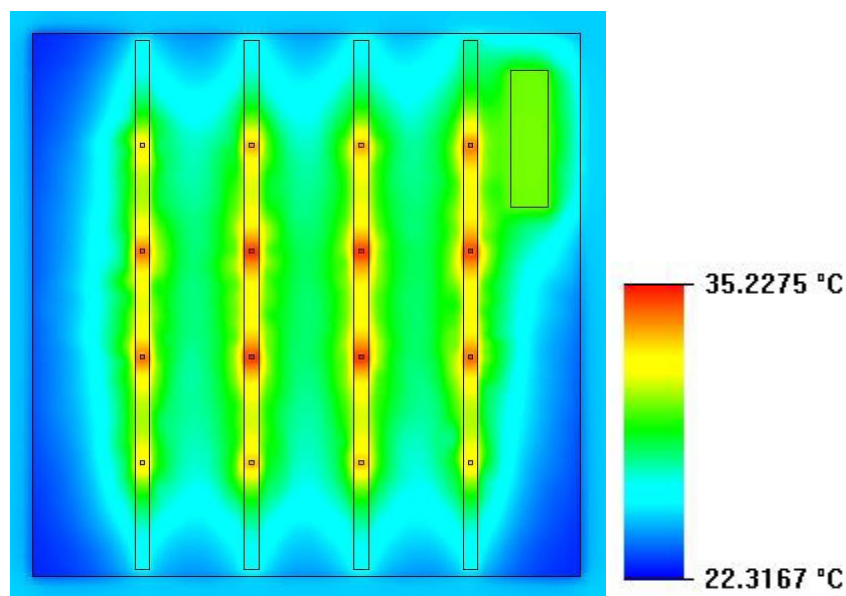


Рисунок 3.7 – Температурное поле светильника со светодиодами Nichia NVSL219B

2 расчет. Во втором случае использовались светодиоды Nichia NCSL219B. На рисунке 3.8 показано температурное поле модели светодиодного светильника работающего при токе $I=0,35\text{A}$. Максимальная температура на корпусе светодиодных матриц составила $32,6^{\circ}\text{C}$.

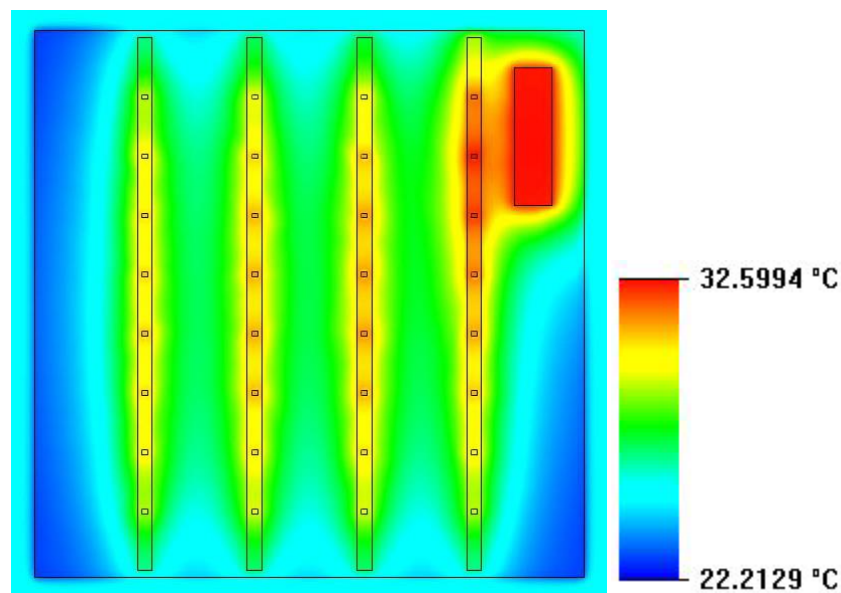


Рисунок 3.8 – Температурное поле светильника со светодиодами Nichia NCSL219B

3 расчет. В данном расчете использовались светодиоды LG 3030N работающие на малом токе. На рисунке 3.9 показано распределение температурного поля модели светодиодного светильника работающего при токе $I=0,1\text{A}$. Максимальная температура на корпусе светодиодных матриц составила 38°C .

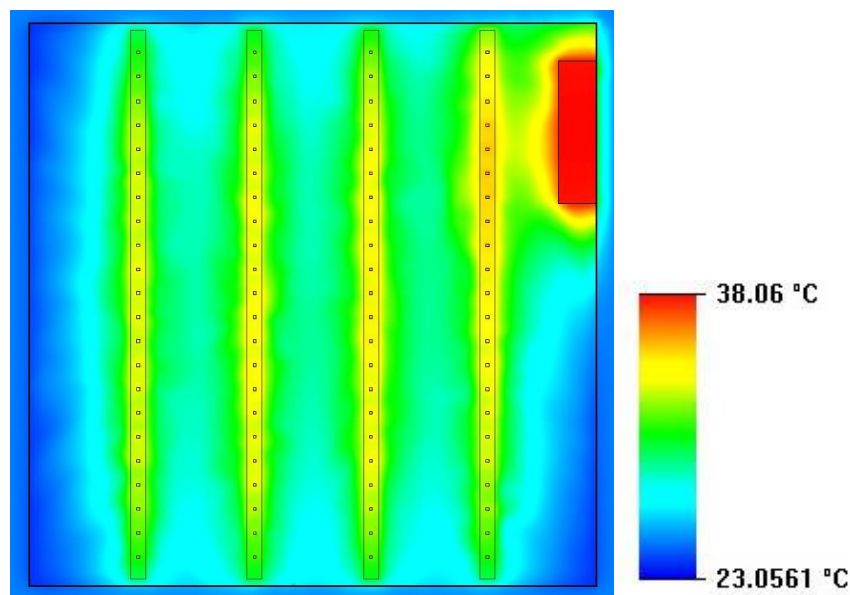


Рисунок 3.9 – Температурное поле светильника со светодиодами LG 3030N

Результаты проведенного моделирования при проектировании светильника для внутреннего освещения наглядно демонстрируют различия от выбора определенного типа светодиодов, режимов их работы, а также конструктивных решений осветительного прибора (таблица 3.5).

Таблица 3.5 – Характеристики осветительных приборов

Характеристика осветительного прибора	1 расчет	2 расчет	3 расчет
Светодиоды	NVSL219B	NCSL219B	LG 3030N
Мощность светильника, Вт	34	32	52
Световой поток светодиодов, Лм	4448	4704	6864
Кол-во светодиодов, шт.	16	32	88
Стоимость светодиодов, тенге	4119	6540	3240

На основании проведенных исследований нами сделаны и опубликованы [55] следующие выводы:

- светодиодные светильники, изготовленные с использованием светодиодов малой мощности ($<1\text{Вт}$) и работающие на малом токе ($0,1\text{А}$) выгодны с точки зрения стоимости. Однако для достижения требуемой световой отдачи светильника необходимо увеличение количества светодиодов и соответственно увеличивается потребляемая мощность осветительного устройства. Температура на корпусе с светильника выше на 5°C (расчет 3) чем в других вариантах;

- из светодиодных светильников, изготовленных с использованием светодиодов повышенной мощности ($>1\text{Вт}$) второй вариант предпочтителен по световой отдаче и температурному распределению на корпусе светильника, однако он уступает по стоимости. Первый вариант со светодиодами 2Вт демонстрирует необходимость дополнительной системы охлаждения;

- проведенные расчеты тепловых полей корпуса светильника делают предпочтительным расположение драйвера не внутри светильника, а снаружи. Расположение драйвера внутри создает дополнительные оптические потери и создает неравномерную яркость на рассеивателе. При расположении снаружи способствует лучшему охлаждению источника питания, а значит более эффективной и надежной работе светильника.

Для подтверждения проведенных модельных расчетов было проведено натурное экспериментальное рассмотрение тепловых потоков, в системе «светодиоды - корпус светильника - окружающая среда». Для этого был изготовлен макет светильника с оптимальными техническими характеристиками на основании проведенного исследования соответствующее модели осветительного прибора из второго расчета (светодиоды Nichia NCSL219B с потребляемой мощностью 32Вт при токе $I=0,35\text{А}$).

На рисунке 3.10 приведена фотография изготовленного светодиодного светильника.



Рисунок 3.10 – Фотография макета светильника

Максимальная температура светильника была измерена термопарой и составила 33°C (32,6°C полученная при моделировании). На основании этого можно сделать вывод, что разработанная модель светильника является достаточно достоверной, что позволяет считать результаты компьютерного моделирования верными.

3.3 Обеспечение равномерности освещения рабочих помещений методом статистического моделирования конструктивных решений

Основное требование, предъявляемое к системе освещения, это обеспечить нормируемый уровень освещенности во всех точках рабочей поверхности. Немаловажным является соблюдение санитарных требований (спектральный состав света, частота мерцания, равномерность освещения) и энергоэффективность системы. Комплекс этих требований решается при проектировании и монтаже осветительных приборов за счет выбора определенного типа светильников и оптимального их размещения.

Решение задачи выбора осветительных приборов и оптимизация их размещения для равномерного освещения помещения при выполнении требуемого уровня освещенности рабочей поверхности конкретного помещения были доложены на международной конференции [151] и опубликованы в научном журнале [152].

При проектировании светодиодной системы освещения необходимо учитывать особенности технических характеристик светотехнических изделий. Проводились исследования освещения офисного помещения с использованием светодиодных светильников (СДС) и люминесцентных ламп (ЛЛ) различной мощности от российских производителей. Основные расчеты выполнялись в программах DIALux и STATISTICA, моделирование распределения освещенности осуществлялось в программе MATLAB.

Возможности программы DIALux позволяют проводить светотехнические расчеты методом коэффициента использования светового потока и точечным методом; определить оптимальное расположение светильников, оцениваемое по стандартному коэффициенту равномерности распределения освещенности с соблюдением ограничения в виде минимальной нормативной освещенности. Нахождение оптимального расположения осуществляется поисковым безградиентным методом решения оптимизационных задач – методом сканирования области изменения независимых переменных с ограничениями в виде неравенств. Метод сканирования заключается в последовательном просмотре значений целевой функции (в данном случае - значение коэффициента равномерности распределения освещенности) в ряде точек, принадлежащих области изменения независимых переменных (значения освещенности в контрольных точках) и нахождении среди них точек с минимальным значением целевой функции [153].

Идентификация закона распределения освещенности от осветительных приборов проводится с помощью пакета программ STATISTICA. Строится гистограмма интервального распределения освещенности для всего помещения и проводится проверка в пакете Industrial Statistics, подпрограмме Process analysis [154]. С помощью пакета программ STATISTICA определяются основные статистические характеристики.

В диссертационном исследовании рассматривается офисное помещение длиной 9 м, шириной 4 м и высотой 2,8 м. Значения освещенности определены на рабочей плоскости - 0,8 м от уровня пола. Нормативная освещенность помещения принимается 300лк, что соответствует Б1 разряду зрительной работы с характеристикой зрительной работы высокой точности [155].

Исследования проводились для пяти вариантов освещения офисного помещения. Необходимо отметить, что в первых четырех вариантах рассмотрены попарно варианты освещения с помощью СДС и ЛЛ с одинаковым значением светового потока для каждой сравниваемой пары. Это делается для проведения корректного сравнительного анализа количественных и качественных показателей системы освещения. В пятом варианте рассмотрено освещение помещения с не стандартным расположением комбинации СДС.

1 расчет. В первом варианте освещения выбран СДС PLANT 02-25-3000-31 (120), производства ООО «АтомСвет», г.Москва [152]. Основные технические характеристики и диаграмма светового распределения приведены в приложении Г.

На первом этапе расчета определяется необходимое число светильников. В результате расчета в программе DIALux получено, что при выбранном СДС со световым потоком 3120лм, оптимальное расположение светильников (позиции 1-6) имеет следующий вид (рисунок 3.11).

Коэффициент равномерности распределения освещенности на рабочей плоскости равен 0,519, что удовлетворяет минимальному пороговому значению 0,300 [156].

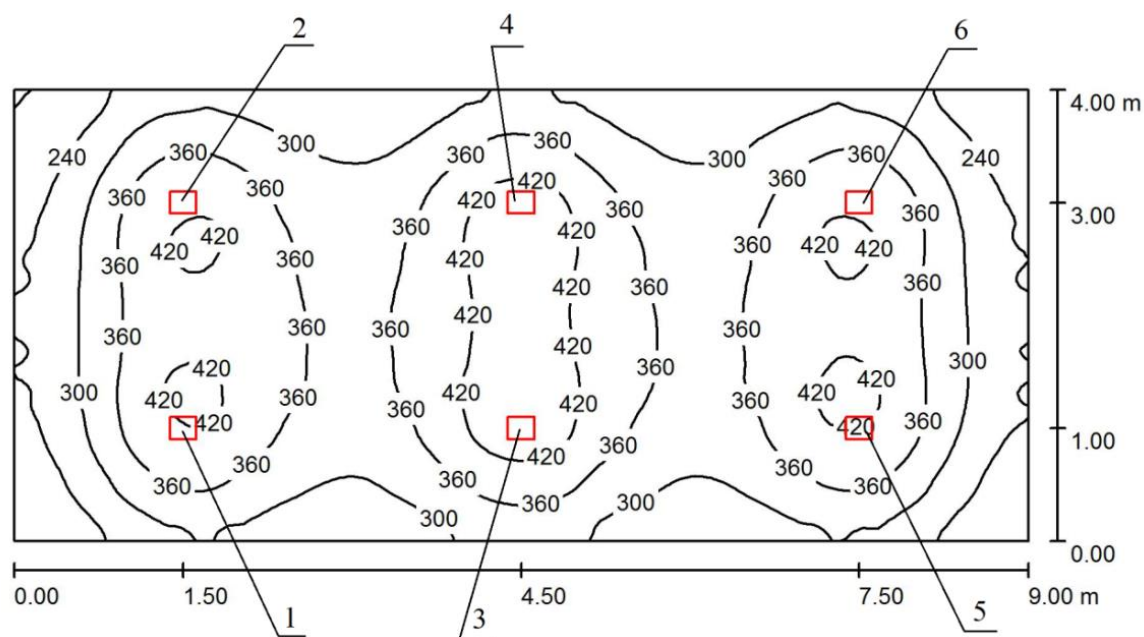


Рисунок 3.11 – Оптимальное расположение светодиодных светильников PLANT 02-25-3000-31 (120)

Составляется карта освещенности помещения по контрольным точкам. Карта освещенности помещения дает возможность визуализации распределения освещения на рабочей плоскости в помещении, которая позволяет показать характер картины освещенности. По карте освещенности в программе MATLAB построена 3D-модель распределения освещенности в пространстве помещения на рабочей плоскости (рисунок 3.12).

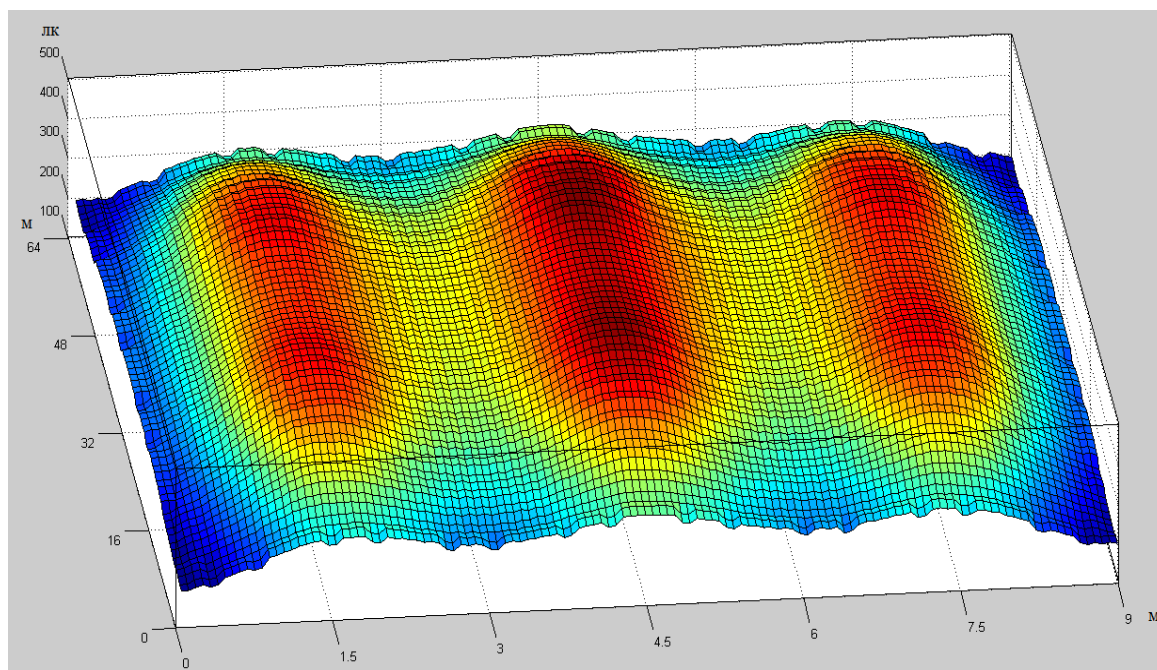


Рисунок 3.12 – 3D-модель распределения освещенности в пространстве помещения на уровне рабочей плоскости

Получена волнообразная картина освещения в помещении. В данном случае основное центральное поле помещения достаточно освещено, однако, с наличием участков повышенной освещенности. По краям имеются «темные» пятна. Общая картина освещения допустима, но не совсем благоприятна для условий комфортной работы.

Вторым этапом является идентификация закона распределения освещенности от выбранных светильников. Знание закона распределения предоставляет возможность показать характер распределения освещенности в пространстве помещения. Также в ходе проведения статистического анализа появляется возможность определить среднее квадратическое отклонение, которую можно использовать в качестве показателя равномерности освещения на рабочей плоскости, т.е. как качественную характеристику освещения. Необходимость использования данного показателя обусловлена тем, что общепринятый коэффициент равномерности распределения освещенности (определяемый как отношение минимального значения освещенности к среднему) является менее информативным, т.е. по его значению можно судить только о том, насколько будет «пиковая» картина освещения. Так в случае неравномерной диаграммы распределения света светильника возникают такие ситуации, когда при довольно равномерном освещении помещения появляются некоторые провалы, и в этом случае значение коэффициента равномерности распределения освещенности не будет отражать правдивой картины освещения. В данных случаях наиболее приемлемо использовать среднее квадратическое отклонение, как показатель равномерности, так как оно позволяет показать разброс значений освещенности относительно средней величины, что в большей степени позволяет судить о равномерности полученного освещения.

Таким образом, после идентификации закона распределения и проведения статистического анализа данных будет известна математическая модель распределения освещенности, выраженная через функцию плотности закона распределения; появится возможность оптимизировать размещение светильников согласно такому критерию оптимальности, как среднее квадратическое отклонение с соблюдением такого ограничения, как минимальное нормативное значение освещенности; будет получена качественная оценка освещения. Перечисленные возможности с использованием автоматизированных систем управления позволят обеспечить энергоэффективное освещение с требуемым качеством освещения.

Закон Вейбулла является одним из наиболее применяемых на практике законов распределения. Функция плотности распределения закона Вейбулла имеет следующий вид [157]:

$$f(S, \alpha, \beta, \gamma) = \frac{\beta}{\alpha} (S - \gamma)^{\beta-1} e^{-\frac{(S-\gamma)^\beta}{\alpha}}, S \geq \gamma, \quad (3.1)$$

где α – параметр масштаба; β – параметр формы; γ – параметр положения (сдвига).

Преимущество закона Вейбулла состоит в том, что он в отличие от нормального закона имеет аналитическую форму интегрального закона распределения, которая представлена следующей формулой [158]:

$$F(S) = 1 - e^{-\frac{(S-\gamma)^\beta}{\alpha}} \quad (3.2)$$

По значениям карты освещенности составляется выборка освещенности и строится гистограмма интервального распределения освещенности для всего помещения с помощью пакета программы STATISTICA. Проверка на соответствие распределения освещенности распределению Вейбулла осуществляется по критерию соответствия аналитической кривой идеальной кривой Вейбулла. В результате было получено, что распределение освещенности является распределением Вейбулла на 99,88 %. На рисунке 3.12 представлена функция плотности распределения с определенными параметрами формы, масштаба и положения. Функция плотности распределения освещенности в рассматриваемом помещении с выбранными светильниками согласно формуле (3.1) имеет следующий вид $f(S; 319,66; 5,66; 45,22) = 0,018(S - 45,22)^{4,66} \cdot e^{-\frac{(S-45,22)^{5,66}}{319,66}}$, что является математической моделью распределения освещенности на рабочей плоскости для данного конкретного случая.

С помощью пакета программы STATISTICA определяются основные статистические характеристики. Среднеквадратическое отклонение в данном расчете равно 61,39.

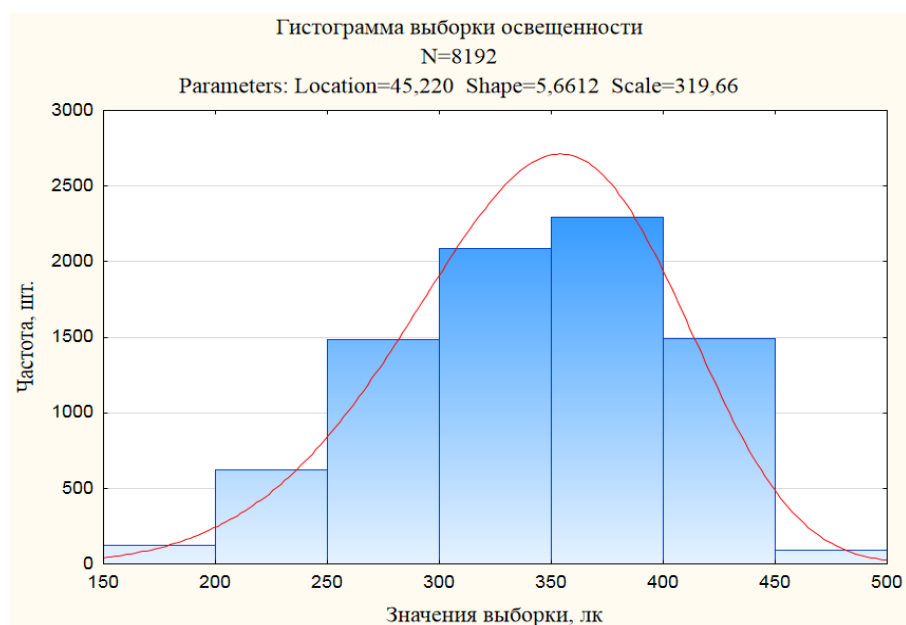


Рисунок 3.13 – Гистограмма и функция плотности распределения освещенности от светодиодных светильников PLANT 02-25-3000-31 (120)

Для всех последующих вариантов применялся описанный алгоритм

расчета.

2 расчет. В качестве второго варианта рассмотрен пример освещения помещения с помощью люминесцентных светильников DIAL 23 TCW 596S-158 I-D2 NB с ртутными газоразрядными лампами низкого давления, производства ЗАО «Компания Технолог», г.Москва [159]. Основные технические характеристики светильника и диаграмма светового распределения приведены в приложении Г.

Данный светильник был выбран с таким же световым потоком, как и у СДС из первого расчета для корректного сравнения получаемой картины освещения в помещении от СДС и ЛЛ, а также для дальнейшего анализа качества освещения и экономического анализа эффективности использования определенного типа светильника.

Оптимальное расположение светильников (позиции 1-6) при выбранном типе ЛЛ со световым потоком равным 3174 лм имеет вид, показанный на рисунке 3.14.

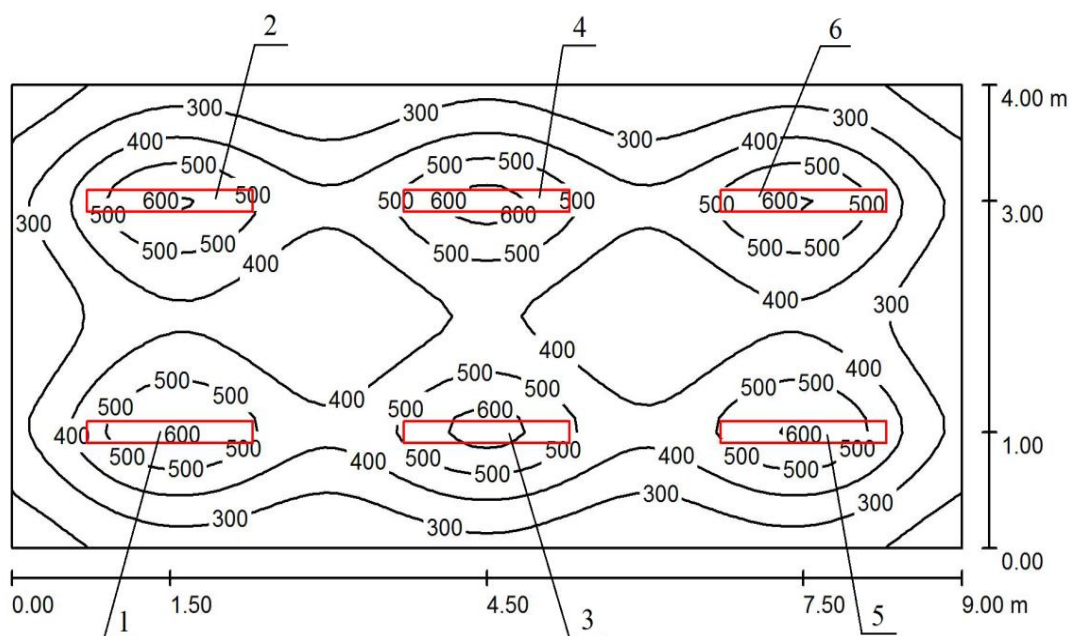


Рисунок 3.14 – Оптимальное расположение люминесцентных ламп DIAL 23 TCW 596S-158 I-D2 NB

Координаты расположения светильников в первом и втором вариантах одинаковы, это объясняется практически одинаковым значением светового потока у обеих моделей светильников, а также схожей диаграммой КСС.

Модель распределения освещенности в пространстве помещения на рабочей плоскости (рисунок 3.15) показывает, что при выбранных ЛЛ наблюдается пиковая картина освещенности, которая характеризуется наличием участков повышенной освещенности под осветительными приборами и темных пятен в остальных местах.

В результате расчетов получено, что распределение освещенности

является распределением Вейбулла на 92,35 %.

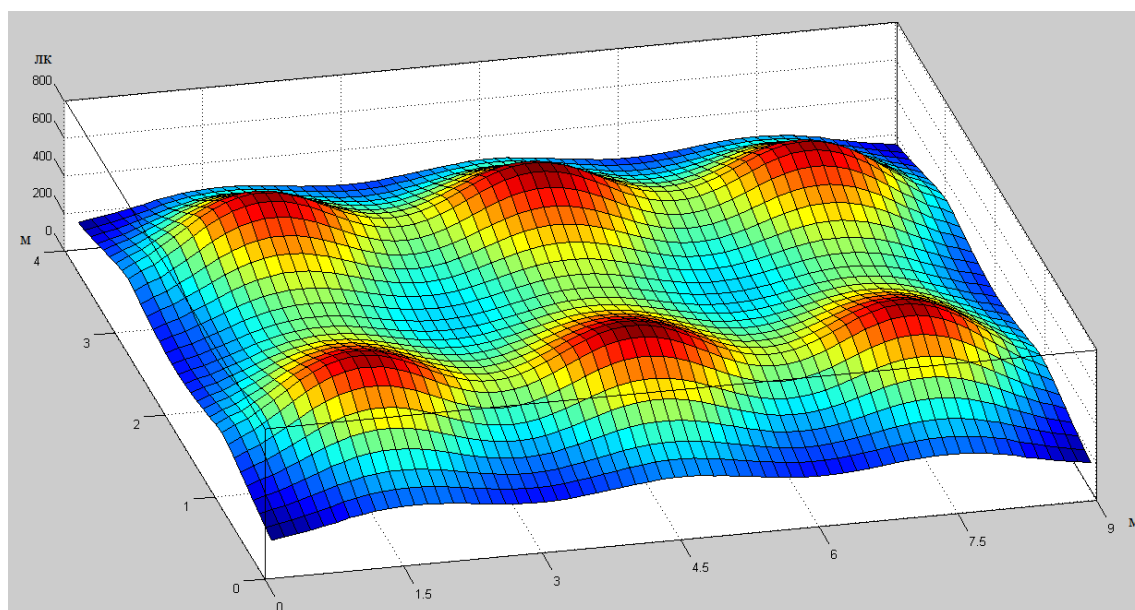


Рисунок 3.15 – 3D-модель распределения освещенности в пространстве помещения на уровне рабочей плоскости

На рисунке 3.16 представлена гистограмма распределения освещенности. Функция плотности распределения освещенности в рассматриваемом помещении с выбранными ЛЛ имеет вид $f(S; 292,69; 2,61; 126,84) = 0,009(S - 126,84)^{1,61} \cdot e^{-\frac{(S-126,84)^{2,61}}{292,69}}$. Среднеквадратическое отклонение равняется 107,72.

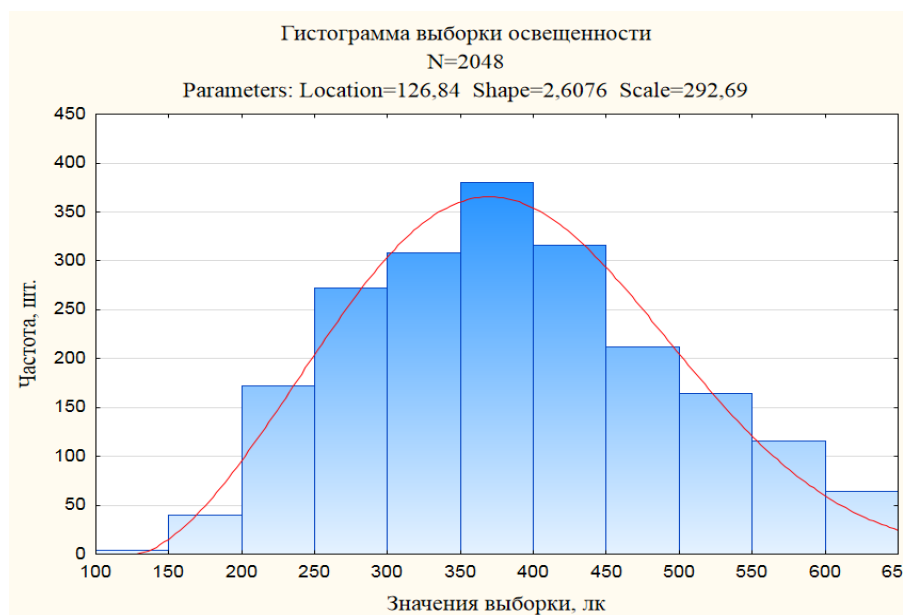


Рисунок 3.16 – Гистограмма и функция плотности распределения освещенности от люминесцентных ламп DIAL 23 TCW 596S-158 I-D2 NB
Сравнительный анализ полученных данных показывает, что при

освещении помещения СДС средний уровень освещенности на рабочей плоскости меньше чем при освещении ЛЛ, однако при этом показатель равномерности освещения $E_{\min}/E_{\text{ср}}$ больше в первом случае, что показывает наличие более равномерной картины в первом варианте освещения. Также минимальное и максимальное значение освещенности в случае с ЛЛ имеют меньшее и большее значение соответственно, т.е. наблюдается картина освещенности с большими перепадами. В первом варианте со СДС разброс значений освещенности относительно средней величины меньше, чем во втором варианте расчета с ЛЛ, что показывает о более равномерной картине освещения помещения. Все это показывает, что при освещении СДС из первого варианта наблюдается более равномерная со сглаженными пиками картина освещения.

3 расчет. В данном варианте освещения используется СДС с меньшим по сравнению с предыдущими вариантами значением светового потока. В качестве такого светильника подобран PLANT 02-16-2400-26 (120) производства ООО «АтомСвет», г.Москва [156]. Основные технические характеристики и диаграмма светового распределения осветительного прибора приведены в приложении Г.

Произведен расчет требуемого количества светильников и поиск оптимального расположения. В результате получено, что при выбранном СДС со световым потоком равным 2390лм, оптимальное расположение светильников (позиции 1-8) имеет вид, показанный на рисунке 3.17.

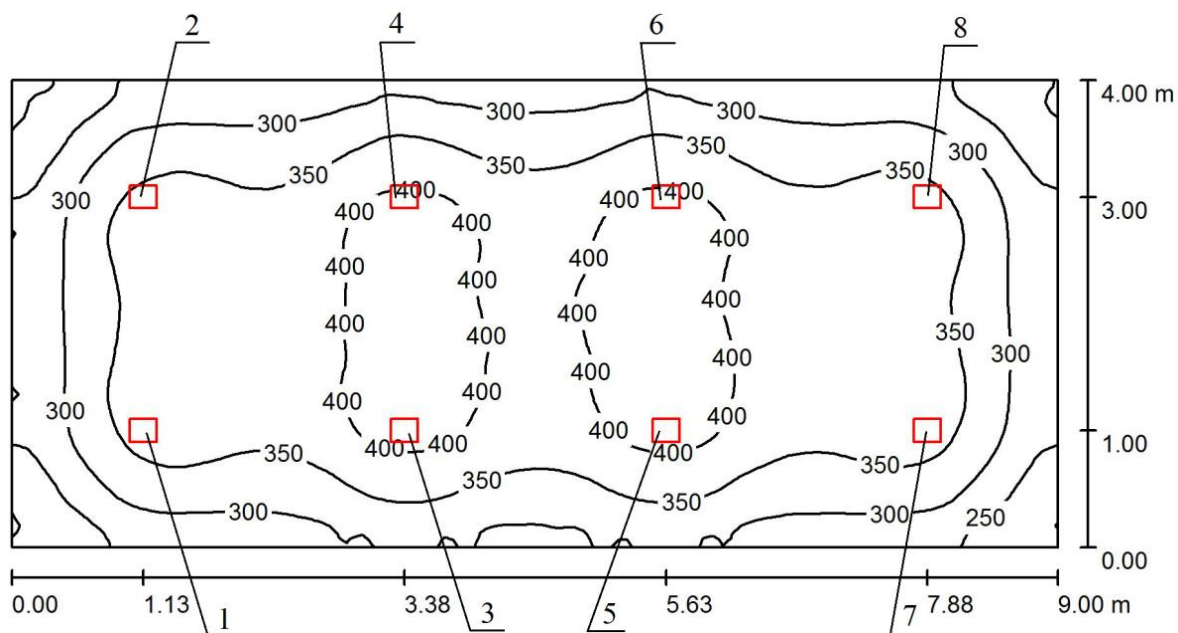


Рисунок 3.17 – Оптимальное расположение светодиодных светильников PLANT 02-16-2400-26 (120)

В результате расчетов получены значения освещенности на различных поверхностях.

По значениям карты освещенности построена модель распределения

освещенности в пространстве помещения на рабочей плоскости (рисунок 3.18).

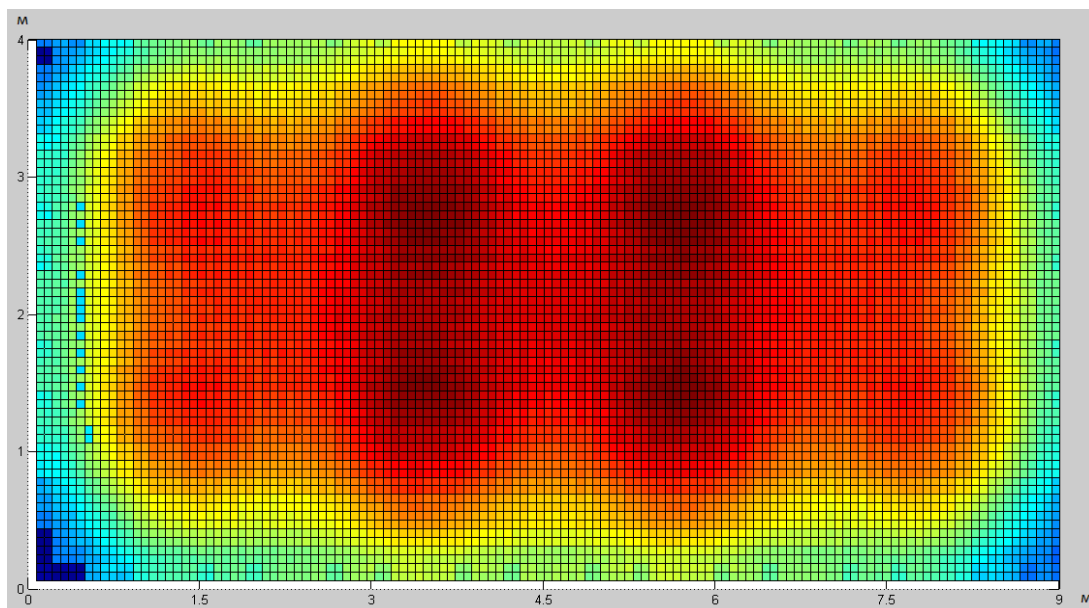


Рисунок 3.18 – Распределение освещенности в пространстве помещения на уровне рабочей плоскости – вид сверху

Распределение освещенности является распределением Вейбулла на 94,26%. На рисунке 3.19 показана гистограмма распределения освещенности. Функция плотности распределения освещенности имеет вид $f(S; 245,87; 5,18; 120,80) = 0,02(S - 120,80)^{4,18} \cdot e^{-\frac{(S-120,80)^{5,18}}{245,87}}$. Среднеквадратическое отклонение равняется 53,59.

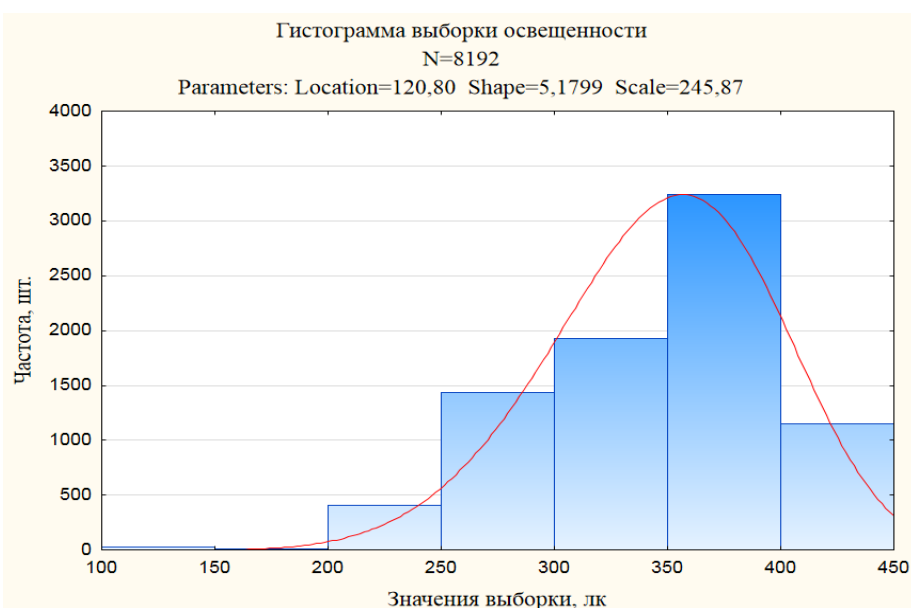


Рисунок 3.19 – Гистограмма и функция плотности распределения освещенности от светодиодных ламп PLANT 02-16-2400-26 (120)

В данном варианте освещения СДС получается самая равномерная картина

освещенности из трех рассмотренных вариантов. Данный вывод сделан на основании сравнения минимального и максимального значений освещенности, а также коэффициента равномерности освещения $E_{\min}/E_{\text{ср}}$. Построенная модель распределения освещенности (рисунок 3.18) подтверждает сделанный вывод о наиболее равномерной картине освещения. В данном варианте освещения наблюдается наиболее сглаженная картина освещенности.

4 расчет. В качестве четвертого варианта рассмотрен пример освещения помещения с помощью люминесцентных светильников DIAL 3 BS-158C 900-Leuchte с линейными люминесцентными лампами типа T26, производства ООО «Халлалайтинг», г.Москва [160]. Основные технические характеристики и диаграмма светового распределения осветительного прибора приведены в приложении Г. Данный светильник был выбран с таким же световым потоком, как и у СДС из предыдущего варианта рассмотрения освещения офиса.

Произведен расчет количества светильников и оптимальное их расположение позиции 1-9 (рисунок 3.20).

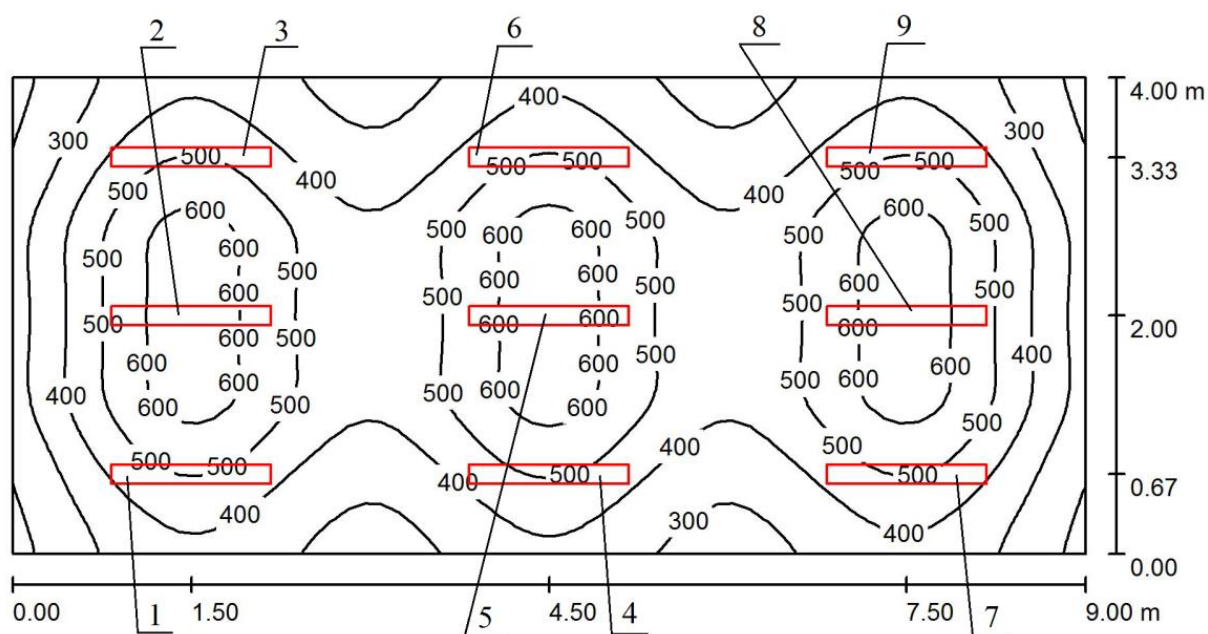


Рисунок 3.20 – Оптимальное расположение люминесцентных ламп DIAL 3 BS-158C 900-Leuchte

Сравнивая с предыдущим вариантом можно увидеть, что, несмотря на одинаковое значение светового потока, координаты расположения светильников различны. Это объясняется различием в количестве светильников и в диаграммах светового распределения светильников.

По значениям карты освещенности построена модель распределения освещенности на рабочей плоскости (рисунок 3.21). При данном варианте картина получается со значительными пиками и провалами, что является нежелательным для обеспечения комфортных условий труда.

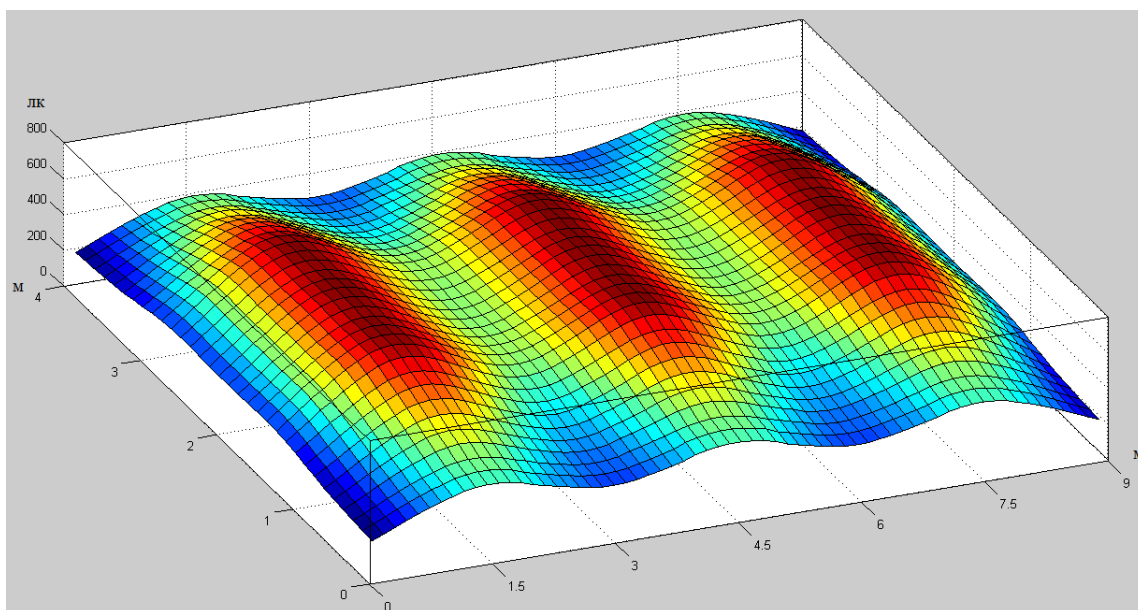


Рисунок 3.21 – 3D-модель распределения освещенности в пространстве помещения на уровне рабочей плоскости

Распределение освещенности является распределением Вейбулла на 92,39%. На рисунке 3.22 представлена гистограмма распределения освещенности. Функция плотности распределения освещенности имеет следующий вид $f(S; 357,72; 3,13; 124,48) = 0,009(S - 124,48)^{2,13} \cdot e^{-\frac{(S-124,48)^{3,13}}{124,48}}$. Среднеквадратическое отклонение в данном случае равняется 113,50, что является наибольшим значением из рассмотренных четырех вариантов.

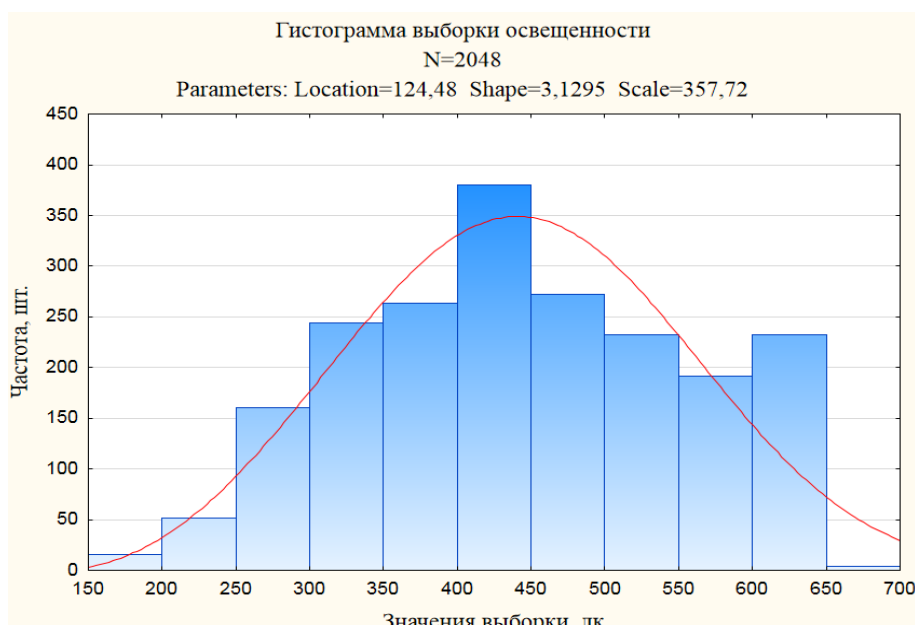


Рисунок 3.22 – Гистограмма и функция плотности распределения освещенности от люминесцентных ламп DIAL 3 BS-158C 900-Leuchte

5 расчет. Все рассмотренные варианты были со стандартным симметричным расположением светильников. Смоделируем освещенность при несимметричном расположении осветительных приборов. Так как программа DIALux автоматически не позволяет несимметрично размещать светильники различной мощности, все требуемые расчеты проводились путем комбинации ручных расчетов и методом компьютерного моделирования.

Предлагается разместить 9 СДС различной мощности следующим образом: четыре (позиции 1, 2, 8 и 9) по углам помещения, один (позиция 5) в центре помещения и четыре светильника (позиции 3, 4, 6 и 7) по два с каждой стороны относительно центрального светильника.

Опираясь на предыдущие расчеты, для обеспечения необходимого нормируемого значения освещения подобраны следующие осветительные приборы:

4шт. - СДС PLANT 02-25-3000-31 (120) со световым потоком 3120 лм (позиции 1, 2, 8 и 9);

1шт. - СДС PLANT 02-16-2400-26 (120) со световым потоком 2390 лм (позиция 5);

4шт. СДС PLANT 02-16-2000-22 (120) со световым потоком 1980 лм (позиция 3, 4, 6 и 7).

Для данного варианта определены координаты расположения светильников (рисунок 3.23). Расположение светильников не случайное, так как светильники 1, 2, 8 и 9 обладают наибольшим световым потоком и, соответственно, наибольшей мощностью из используемых в данном варианте, они используются в качестве основных осветительных устройств. СДС 3, 4, 6 и 7 обладают наименьшим световым потоком и используются для освещения неохваченных «темных» участков помещения. Значение светового потока оставшегося 5 светильника является средним между значениями других светильников и является центральным осветительным устройством.

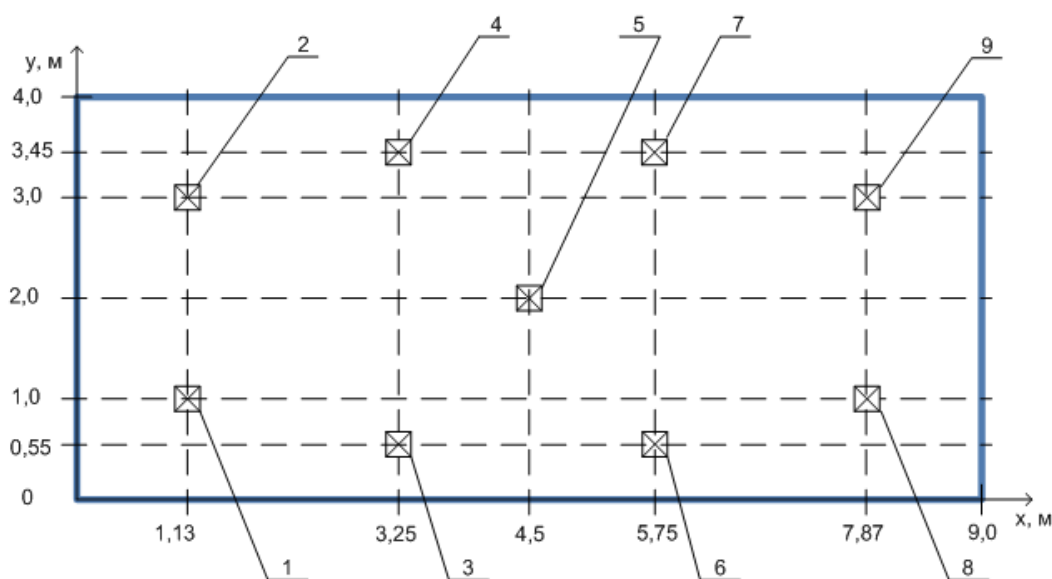


Рисунок 3.23 – Вариант размещения светодиодных ламп различной мощности

После определения расположения светильников, проводятся расчеты значений уровня освещенности в контрольных точках с учетом влияния соседних осветительных приборов точечным методом. По определенным значениям уровня освещенности в контрольных точках была составлена карта освещенности помещения на уровне рабочей плоскости и построена модель распределения освещенности на рабочей плоскости (рисунок 3.24).

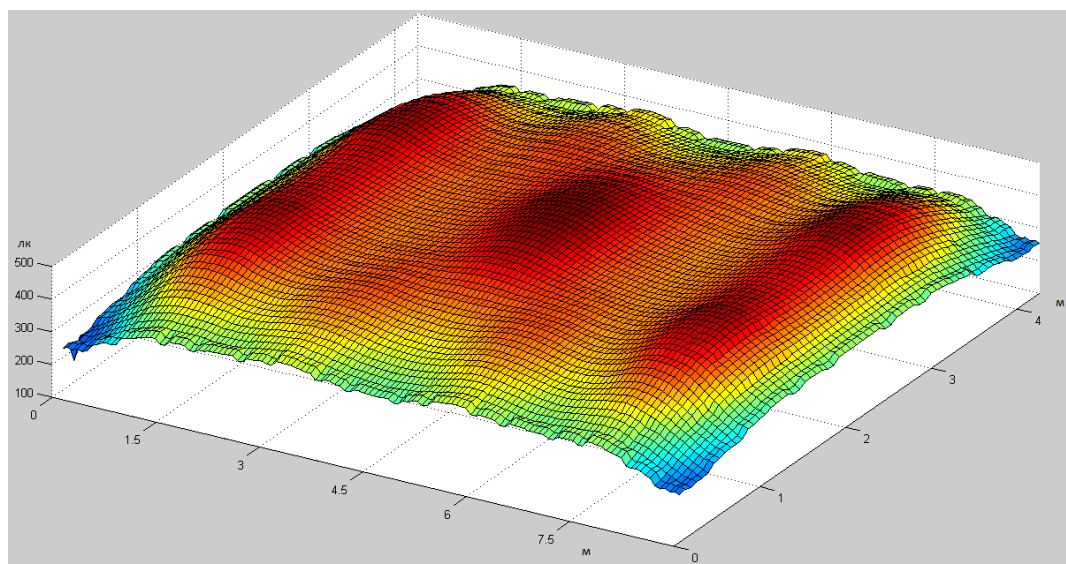


Рисунок 3.24 – 3D-модель распределения освещенности на рабочей плоскости

При данном варианте освещения практически отсутствуют «темные» пятна. Из рисунка видно, что колебания интенсивности света на рабочей поверхности не превышает 10%, что позволяет сказать о наиболее равномерном освещении рассматриваемых вариантах.

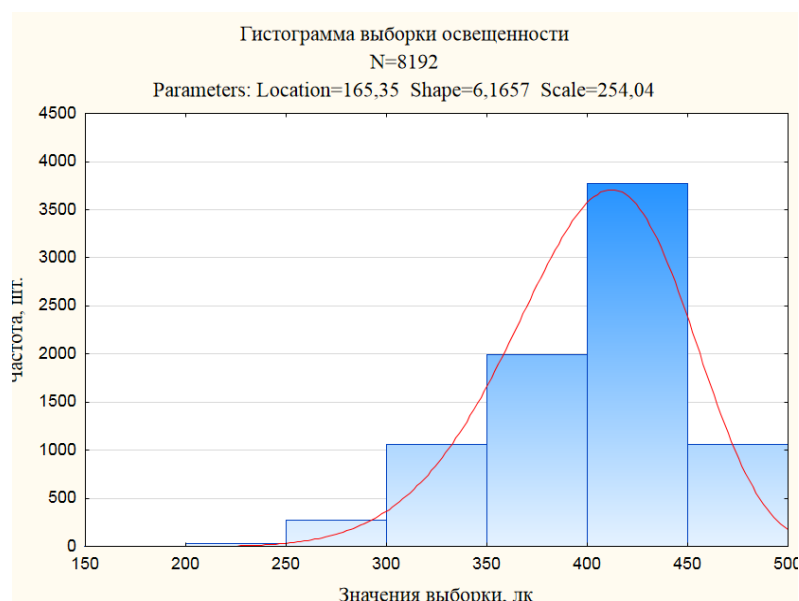


Рисунок 3.25 – Гистограмма и функция плотности распределения освещенности
Распределение освещенности является распределением Вейбулла на

99,31%. Функция плотности распределения освещенности имеет вид $f(S; 254,04; 6,17; 165,35) = 0,024(S - 165,35)^{5,17} \cdot e^{-\frac{(S-165,35)^{6,17}}{254,04}}$ (рисунок 3.25). Среднеквадратическое отклонение в данном случае равняется 47,23.

Сравнительный анализ рассчитанных количественных и качественных показателей освещенности, создаваемой осветительными установками с различными источниками света, приведен в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Сравнительный анализ параметров вариантов освещения

Характеристики светильника	СДС		ЛЛ		СДС
	1 вариант	3 вариант	2 вариант	4 вариант	5 вариант
Наименование	PLANT 02-25-3000-31 (120)	PLANT 02-16-2400-26 (120)	DIAL 23 TCW 596S-158 I-D2 NB	DIAL 3 BS-158C900 -Leuchte	
Количество, шт.	6	8	6	9	9
Световой поток светильника, лм	3120	2390	3174	2400	
Общий световой поток, лм	18720	19120	19044	21600	18830
Потребляемая мощность светильника, Вт	31	26	65	58	
Общая мощность, Вт	186	208	390	522	238
Коэффициент равномерности распределения освещенности	0,519	0,563	0,378	0,400	0,45
Среднеквадратическое отклонение	61,39	53,59	107,72	113,50	47,23

Опираясь на проведенные исследования можно сделать следующие выводы.

– согласно коэффициенту равномерности распределения освещенности, а также среднеквадратическому отклонению, показывающему разброс значений относительно средней величины, наиболее равномерная картина освещенности со стандартным симметричным расположением светильников была достигнута в третьем варианте со СДС;

– согласно коэффициенту равномерности распределения освещенности наименее равномерная картина освещенности наблюдается во втором варианте освещения с ЛЛ, а согласно среднеквадратическому отклонению - в четвертом варианте с ЛЛ. Расчеты показали, что не всегда увеличение количества светильников приводит к более равномерной картине освещения, так в четвертом варианте было использовано наибольшее количество светильников, однако была получена наихудшая картина освещения;

– точки зрения энергопотребления наименьшая общая потребляемая мощность светильников равная 186 Вт со световым потоком 18720 лм была получена при первом варианте освещения с СДС, следующим является третий вариант освещения с общей мощностью светильников 208 Вт и световым потоком 19120 лм с СДС;

– вариант с несимметричным расположением светильников показывает самое равномерное освещение.

Для сравнения полученных показателей экономического (общая потребляемая мощность) и качественного (среднеквадратическое отклонение) аспектов освещения пяти вариантов моделирования приводится диаграмма (рисунок 3.26).

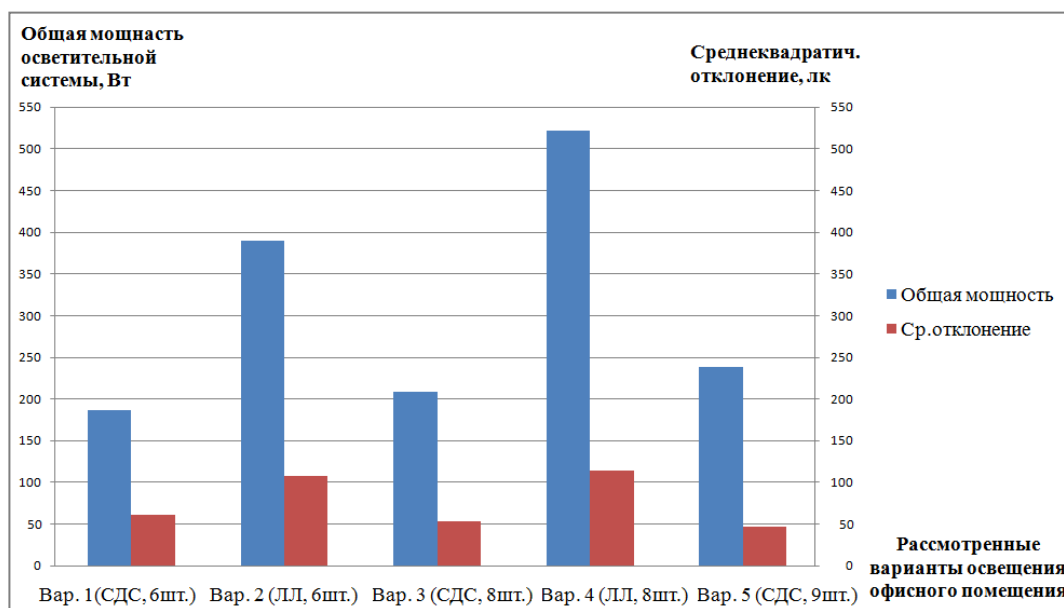


Рисунок 3.26 – Сравнительная диаграмма показателей освещения

С точки зрения соотношения потребляемой мощности и равномерности картины освещенности предпочтительным является 3 вариант. Однако в тех случаях, когда на первый план выдвигается качество освещения, наилучшим является вариант с нестандартным размещением светильников. Также очевидно, что люминесцентные светильники значительно проигрывают светодиодным приборам, как по потребляемой мощности, так и по равномерности картины освещенности.

Для экспериментального исследования оптимального размещения светодиодных светильников нами был разработан макет офисного помещения. Выбран первый вариант освещения. Поскольку для освещения было использовано шесть СДС с общей потребляемой мощностью осветительной системы 186Вт (таблица 3.6), то для освещения модели использованы шесть светодиодов мощностью 0,1Вт с общей потребляемой мощностью 0,6Вт. Соответственно рассчитаны значения метрических параметров модели и координаты расположения светодиодов в модели помещения (рисунок 3.27).

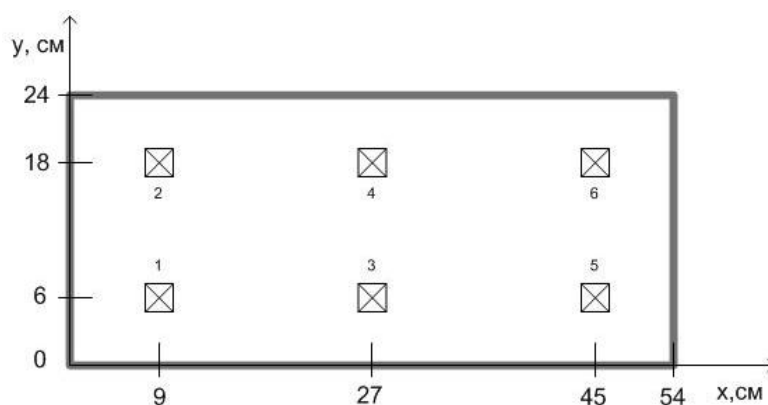


Рисунок 3.27 – Расположения светодиодов в пространстве модели помещения

Для проведения эксперимента разработана установка, состоящая из компонентов: модель офиса, плата Arduino UNO с микроконтроллером ATmega328, web-камера и персональный компьютер (рисунок 3.28). Плата Arduino UNO с микроконтроллером ATmega328 управляет уровнем напряжения светодиодов и необходима для выставления требуемой мощности и для обеспечения стабилизированного питания светодиодов [161]. Уровень напряжения светодиодов выставляется программно. Web-камера фиксирует картину освещения и передает изображение в персональный компьютер для дальнейшей обработки. Экспериментальная модель системы освещения помещения представлена на рисунке 3.29.

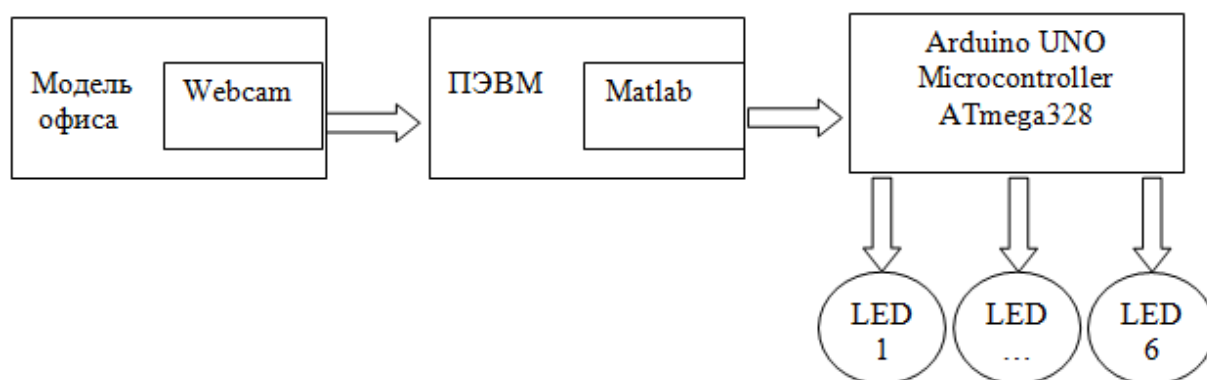


Рисунок 3.28 – Схема проведения эксперимента

При проведении эксперимента на модели с помощью web-камеры получено изображение освещения в RGB -цветовой модели. Данное изображение подлежит обработки для определения значений освещенности в контрольных точках. RGB модель – аддитивная цветовая модель, описывающая способ синтеза цвета для цветовоспроизведения. Изображение в данной цветовой модели представлено в виде трёх каналов: R, G, B, что является значением цвета в диапазоне [0; 1]. Каждая из координат представляется в виде одного октета, значения которого обозначаются целыми числами, где 0 соответствует минимальному значению интенсивности, а 255 – максимальному [162, 163].



Рисунок 3.29 – Внешний вид экспериментальной модели

Так как RGB цветовая модель непосредственно не дает информацию об освещенности в той или иной точки рабочей поверхности модели помещения, то необходимо перейти к другой более подходящей цветовой модели. Таковой является HLS цветовая модель. HLS (от англ. Hue, Saturation, Lightness) – цветовая модель, в которой в качестве цветовых координат выступают: тон (H), изменяющейся в пределах $[0; 360]$; насыщенность (S), изменяющаяся в пределах $[0; 1]$; светлота (L), изменяющаяся в пределах $[0; 255]$. Интересующей характеристикой для исследования в цветовой модели HLS является слой L – светлота, который показывает значение освещенности в единицах от 0 до 255 [164, 165].

Переход из RGB модели в HLS модель осуществляется с помощью специального алгоритма, который представлен формулой (3.3) [166, 167]:

$$L = \frac{1}{2} (\max + \min), \quad (3.3)$$

где $\max$ – максимум из трех значений (R, G, B);

$\min$ – минимум из трех значений (R, G, B).

После того, как известен алгоритм перевода изображения из одной цветовой модели в другую, можно перейти непосредственно к обработке изображения. Обработка снимка в данном исследовании осуществляется в программе Adobe Photoshop, а именно снимаются значения R, G, B в контрольных точках. Далее полученные значения каналов вбиваются в подготовленную таблицу MsExcel, в которой заложен алгоритм преобразования значений R, G, B в слой L. Также в MsExcel производится перевод освещенности из интервала $[0; 255]$ к относительным единицам. Данный перевод основан на следующем: так как известно, что R, G, B могут принимать максимальное значение равное 255, что соответствует 1, то все полученные значения освещенности необходимо разделить на 255.

Следующим шагом является переход от относительных единиц к абсолютным значениям освещенности. Известно, что 1 – это максимально возможное значение освещенности. Максимально возможное значение освещенности может быть определено по показаниям люксметра, замеренным в точке, находящейся под одним из светодиодов. В проведенном эксперименте при общей мощности светодиодов равной 0,6Вт максимальное значение освещенности, замеренное люксметром, равняется 33лк, что соответствует 560лк в масштабах реального офиса.

Завершающим этапом эксперимента является составление карты освещенности, состоящей из найденных абсолютных значений освещенности в контрольных точках. Для корректного сравнения значений освещенности реального помещения, рассчитанных в первом варианте освещения, и полученных данных в ходе эксперимента, значения освещенности модели офиса переведены в масштаб офисного помещения. По карте освещенности построена 3D-модель распределения освещенности в пространстве модели офиса на рабочей плоскости (рисунок 3.30).

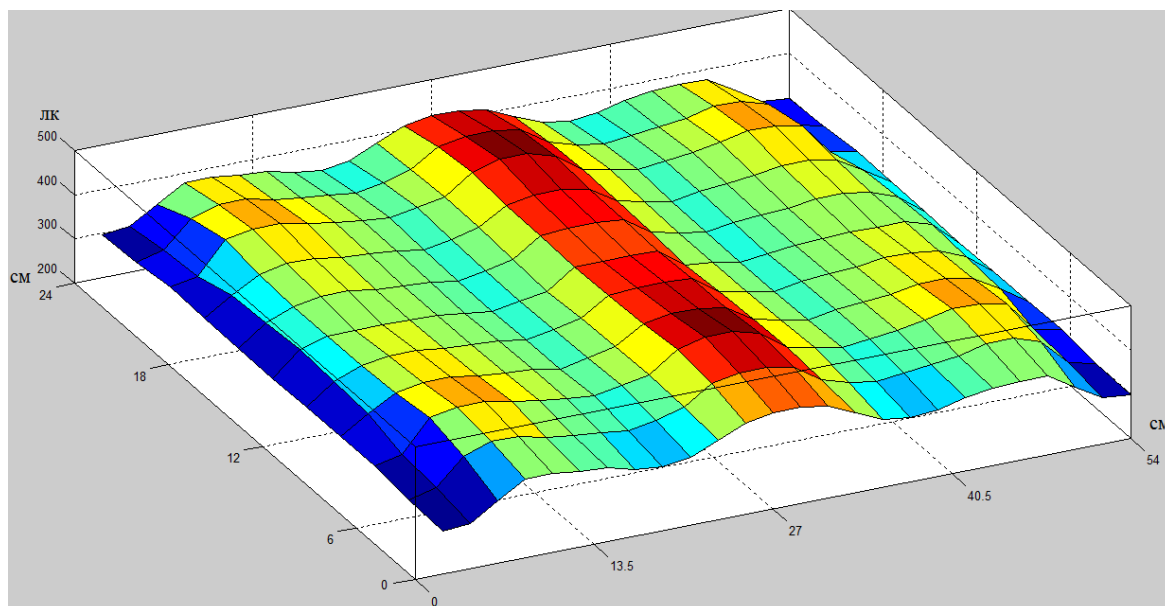


Рисунок 3.30 – 3D-модель распределения освещенности в пространстве модели на уровне рабочей плоскости

Характер освещения, полученного в экспериментальных условиях, не отличается от характера смоделированного освещения в первом варианте.

В результате проверки получено, что распределение освещенности является распределением Вейбулла на 92,64 %. Функция плотности распределения освещенности в рассматриваемой модели при данных условиях согласно формуле (3.2) имеет вид $f(S; 159,78; 4,88; 231,09) = 0,031(S - 231,09)^{3,88} \cdot e^{-\frac{(S-231,09)^{4,88}}{159,78}}$ (рисунок 3.31). Определяются основные статистические характеристики: среднеквадратическое отклонение – 54,46 и коэффициент равномерности распределения освещенности 0,59

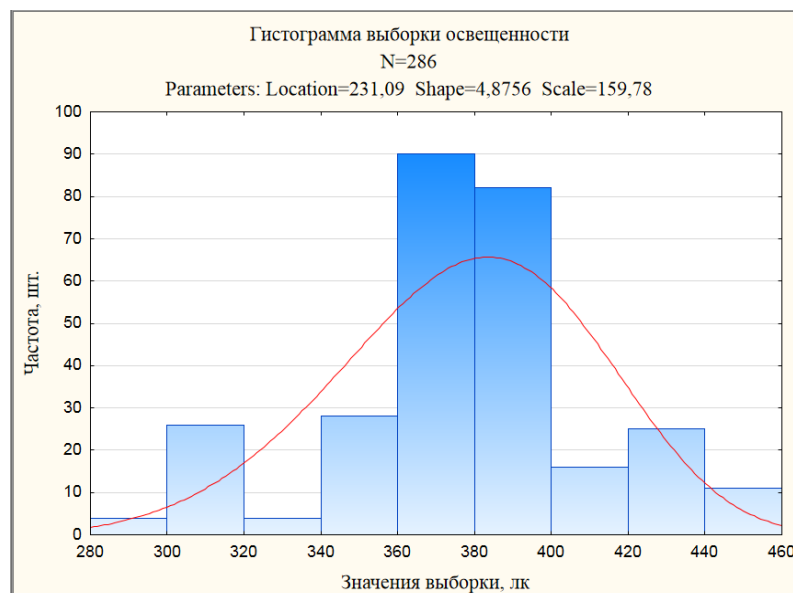


Рисунок 3.31 – Гистограмма и функция плотности распределения освещенности

Таким образом, в результате проведенных модельных теоретических и экспериментальных исследованиях были получены достоверные, имеющих хорошее согласие между моделированием и экспериментом результаты по оптимальному размещению светодиодных светильников в офисном помещении. Это позволяет использовать данную методику расчета оптимального размещения светодиодных светильников для помещений различной конфигурации. Предложенное моделирование на реальном макете позволит оперативно осуществлять расчеты по геометрическому положению элементов освещения.

3.4 Выводы по разделу

В разделе проведено моделирование конструкции светодиодной матрицы, позволяющей осуществлять оптимизацию температурных режимов и использовать такие конструкции в системах освещения повышенной надежности и долговечности.

Используя предложенную методику расчета тепломассопереноса в системе «основание светодиода – кристаллик – линза – окружающий воздух» можно создавать конструкции новых светильников, которые по анализу распределения температурных полей обеспечат долговременную работу осветительных приборов в соответствии с заявленным временем работы порядка 50 тыс. часов.

Кроме этого, по данному разделу можно сделать следующие выводы:

- была разработана модель офисного помещения и проведен эксперимент на модели;
- полученные данные в ходе эксперимента показывают, что характер освещения модели, полученного в экспериментальных условиях, не сильно

отличается от характера смоделированного освещения офисного помещения;

- характер закона экспериментального распределения освещенности идентичен теоретическому и является распределением Вейбулла;
- все вышеперечисленное подтверждает корректность теоретических расчетов и показывает возможность замены экспериментов на модели или в реальных условиях на компьютерное моделирование;
- полученная возможность управления освещенностью позволяет разработать опытную экспериментальную установку для бестеневого освещения помещения.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ С ЭЛЕМЕНТАМИ РОБАСТНОСТИ

4.1 Разработка схемы регулирования системы светодиодного освещения

В [168,169] описаны различные типы неопределенностей, которые могут возникнуть в физических системах. К внутренним факторам относятся ошибки связанные с работой схемы, и изменения параметров компонентов схемы, ошибки конструирования, ошибки при прошивке схемы, увеличение внутреннего шума и т.д. Внешние факторы связаны с экологическими воздействиями и человеческими ошибками, связанными с неправильной эксплуатацией электронной системы, высокой температурой окружающей среды и воздействием различных радиоволн и других видов электромагнитных излучений. Общая схема электронной системы управления с неопределенностями связанными с внутренними и внешними факторами показана на рисунке 4.1.

Взаимодействие системы управления с неопределенностями изменения параметров осуществляется путем отслеживания ошибок работы системы и контроля корректной работы каждого элемента системы.



Рисунок 4.1 – Общее представление электронной системы управления с учетом внешних и внутренних неопределенностей

Систему, показанную на рисунке 4.1 можно представить общей схемой описания робастных систем управления (рисунок 4.2) [170], где P – номинальная система управления; C – синтезируемый регулятор; Δ – множество всех возможных неопределенностей в описании системы; w – вектор сигнала включающий шумы, помехи и опорные сигналы (внешний вход системы); z – представляет собой вектор сигнала включающий контролируемые сигналы и ошибки слежения (выход системы); u – управляющий сигнал, y – контрольный сигнал; сигналы η и v – вход и выход неопределенности соответственно.

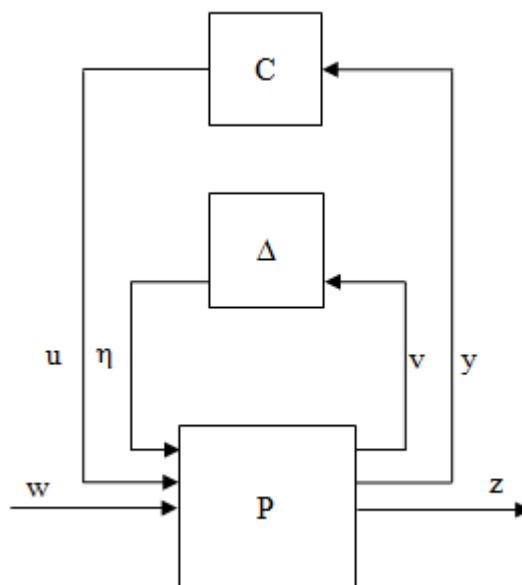


Рисунок 4.2 – Общая схема робастной системы управления

В работах [171,172] исследуется система робастного управления с использованием различных архитектур построения схем управления. Рассмотрим систему с параллельной архитектурой робастного управления.

На рисунке 4.3 представлена схема системы с робастным управлением на основе параллельной архитектуры контроля и регулирования. Входной сигнал системы $w(t)$ включает опорный сигнал и все суммарные сигналы шумов и помех системы в целом. Выходной сигнал $z(t)$ включает контролируемый сигнал и сигнал ошибки слежения. Для неопределенностей системы Δ_n предусмотрены контуры обработки и управления с входными сигналами $v_n(t)$ и выходными $\eta_n(t)$ сигналами управления. Такая система позволяет осуществлять робастное управление за счет компенсации неопределенностей и тем самым повышает стабильность работы системы в оптимальном режиме. Другими словами расширяет диапазон регулирования системы в целом. Данная схема имеет параллельную архитектуру и позволяет управлять компенсациями неопределённости независимо.

При реализации схем автоматизированного управления светодиодными приборами освещения имеются как внешние, так и внутренние возмущающие

факторы (неопределенности) влияющие на качество освещения и время работы осветительного прибора. Так колебания тока приводят к мерцаниям и деградации кристалла, связанные с токовой нестабильностью внутри кристалла [173]. Повышение температуры кристалла также приводит к потере оптической мощности светодиода и в конечном случае полной деградации [141]. Данные факторы не позволяют в реальных светодиодных системах освещения обеспечить задаваемые заводом изготовителем ресурсы в 50 тыс. часов непрерывной работы с сохранением первоначальных оптических характеристик.

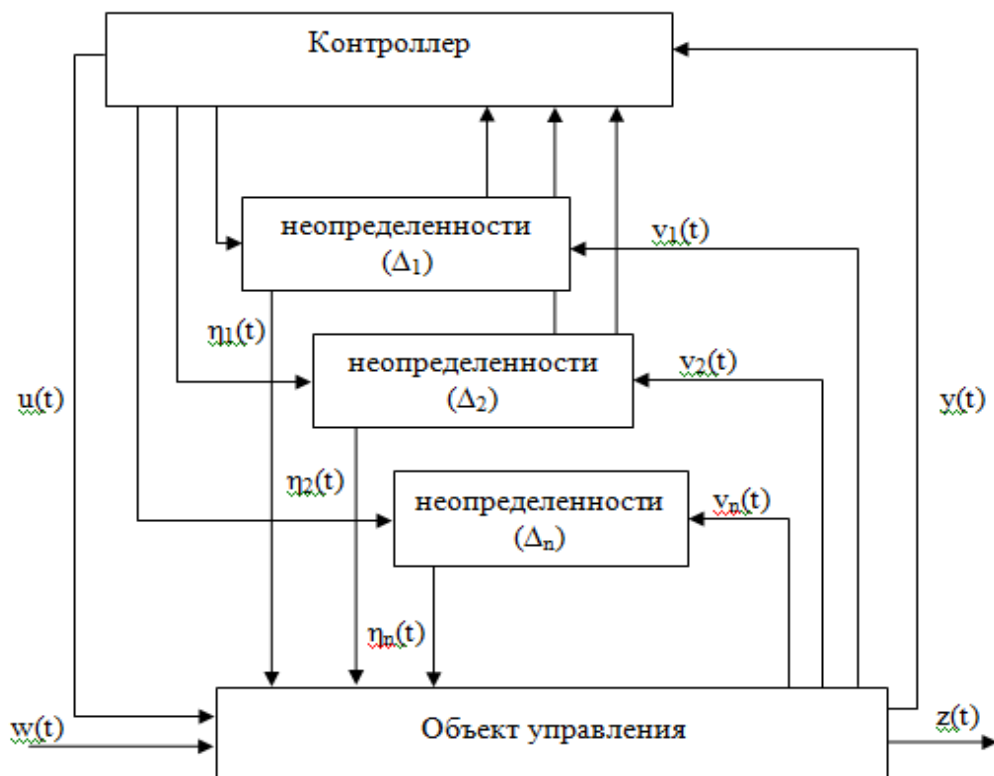
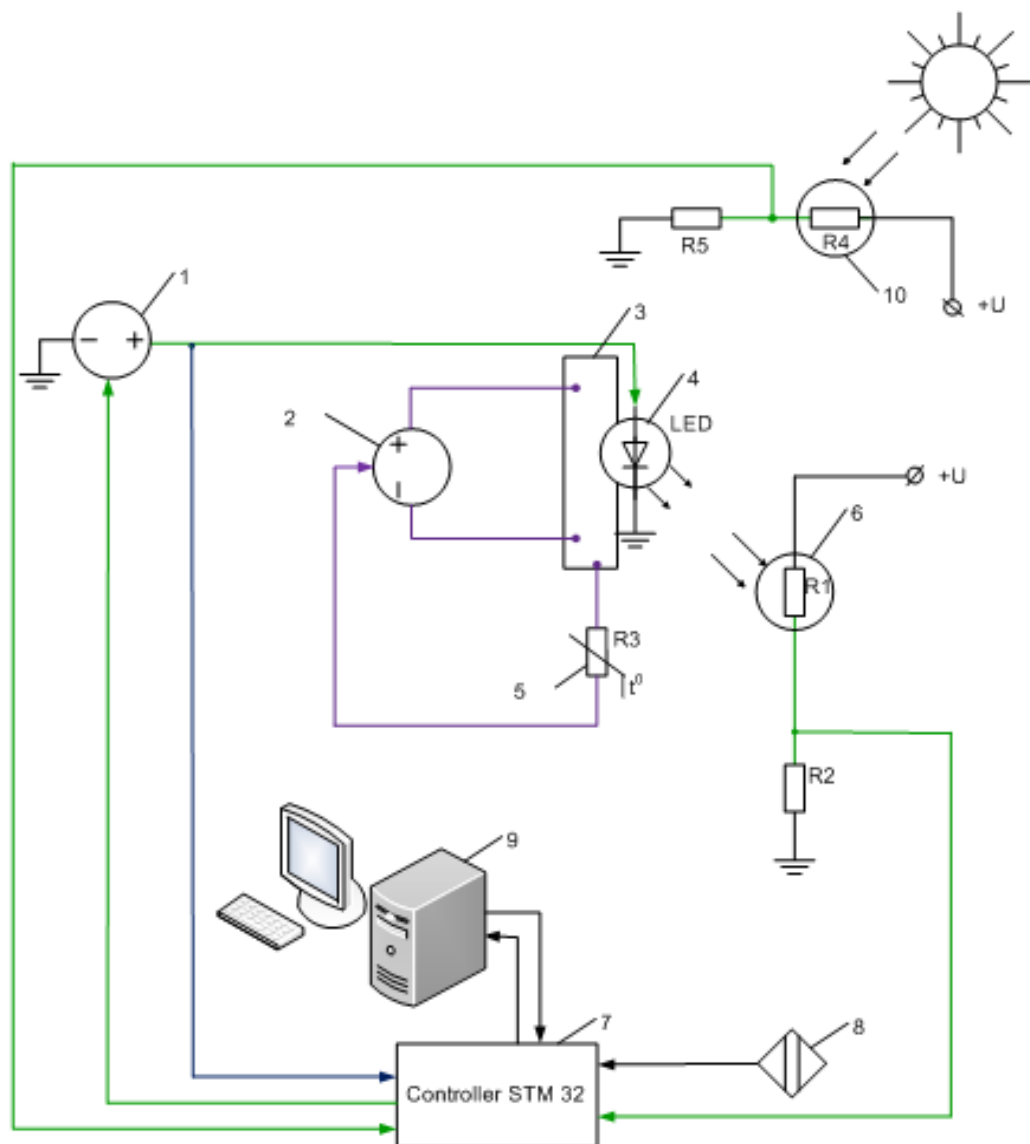


Рисунок 4.3 – Схема системы управления с параллельной архитектурой

В реальных условиях освещения помещения имеется дополнительная засветка, связанная с естественным светом. При этом данная засветка может меняться со временем в значительном диапазоне, а также иметь непрогнозируемые, быстропротекающие изменения освещенности. Учет внешнего естественного света позволяет повысить устойчивость автоматизированной системы и обеспечить требуемый уровень освещенности.

Для реализации системы автоматизации, учитывающей неопределенности, нами была разработана схема, представленная в работах [174,175] (рисунок 4.4). Данная схема за счет первого контура регулирования поддерживает требуемую температуру кристалла светодиода. Второй контур регулирования обеспечивает необходимую освещенность за счет изменения режимов работы драйвера.



1 – драйвер управления светодиодом; 2– источник питания управления температурой элемента Пельтье; 3 – элемент Пельтье; 4 – светодиод; 5 – терморезистор; 6, 10 – фоторезистор; 7 – микроконтроллер STM32; 8 – датчик движения; 9 – ПК с программой интеллектуального управления

Рисунок 4.4 – Схема управления светодиодной системой освещения

Рассмотрим работу данной схемы. Первый контур регулирования поддерживает требуемый температурный режим в диапазоне, обеспечивающим устойчивую работу светодиода 4, при котором в течении заявленного фирмой производителем времени работы светодиод не деградирует. Регулировка осуществляется автоматически, изменяя рабочее напряжение элемента Пельтье 3 с помощью разработанного источника питания 2. В качестве датчика температуры служит терморезистор 5.

Второй контур регулирования обеспечивает постоянный уровень освещенности за счет управления мощностью светодиода 4 с помощью ШИМ (широтно-импульсная модуляция) регулирования драйвера 1. Управляет работой драйвера микроконтроллер STM32. Контрольный сигнал для

управления поступает с фотосопротивления 6 на контроллер 7, выполняющий программу с необходимым сценарием работы светодиода. Контроль солнечного света осуществляется с помощью фотосопротивления 10 сигнал, с которого поступает на аналоговый вход микроконтроллера и позволяет поддерживать общую освещенность помещения постоянной за счет драйвера светодиода 1. Данный контур позволяет обеспечить компенсацию естественного света, а также учитывать комбинированное освещение рабочего помещения.

Возмущения, связанные с изменениями тока светодиода, контролируются с помощью аналогового входа контроллера и отображаются на экране монитора персонального компьютера. Сигнал компенсации неопределенности по току, получается путем инвертирования входного сигнала и добавляется к сигналу управления драйвера светодиода 1.

Для обеспечения работы осветительной системы только в присутствии людей используется датчик движения 8. Сигнал с датчика поступает на контроллер и обеспечивает включения или выключение системы в зависимости от присутствия людей. Для записи алгоритма интеллектуальной системы работы микроконтроллера используется персональный компьютер 9 с необходимым программным обеспечением.

Рассмотрим более детально схемы регулирования освещенности и температуры.

Схема регулирования температуры элемента Пельтье (рисунок 4.5). Схема работает следующим образом. Напряжение $+U_p$ подается на Элемент Пельтье и управляемый транзистор T_d , с помощью которого осуществляется регулировка тока протекающего через элемент Пельтье и тем самым осуществляется регулировка его температуры. Температура контролируется с помощью термосопротивления R_{NTC} . При изменении сопротивления в зависимости от температуры меняется напряжение между R_5 и R_{NTC} , которое поступает на аналоговый вход микроконтроллера $\mu C_{analoginput2}$.

В зависимости от программы управляющей микроконтроллером на аналоговом выходе микроконтроллера $\mu C_{analogout2}$ вырабатывается напряжение, которое должно соответствовать напряжению на эмиттерном сопротивлении R_1 с учетом падения напряжения на сопротивлении R_3 . Оба этих напряжения подаются на компаратор K_1 , где они сравниваются. В зависимости от разницы напряжений транзистор T_d меняет состояние от закрытого до открытого при этом регулирует ток между коллектором и эмиттером в зависимости от поступающего на базу напряжения от компаратора. Таким образом, данная схема позволяет управлять температурой элемента Пельтье (ТЕМ) по программе, вшитой в микроконтроллер. Дополнительные элементы R_2 , R_3 , R_4 , R_5 и U_r необходимы для получения заданного смещения на входе компаратора.

Аналогично работает схема управления световым потоком светодиода (рисунок 4.6). Единственно в схеме осуществлена замена элемента Пельтье на светодиод (LED), а термосопротивление на фотосопротивление (R_6).

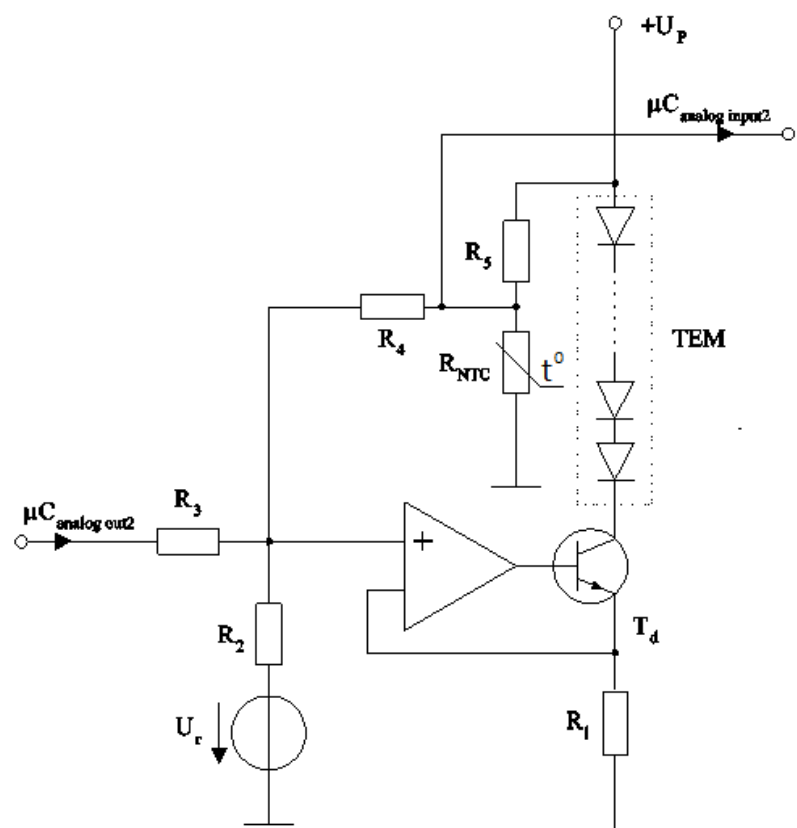


Рисунок 4.5 – Принципиальная схема регулирования температуры элемента Пельтье

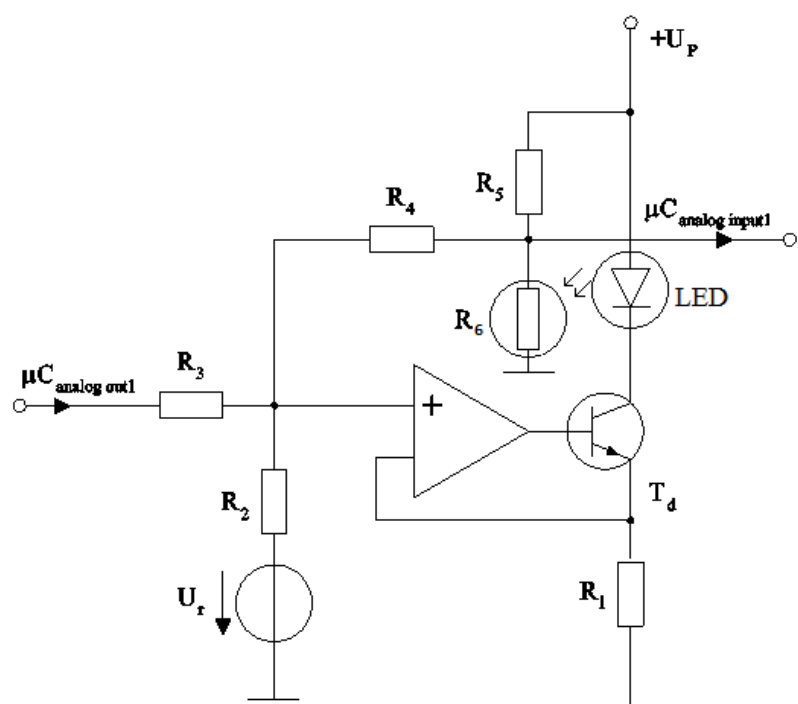


Рисунок 4.6 – Принципиальная схема регулирования светового потока светодиода

Вся система управляется микроконтроллером (рисунок 4.7), который задает необходимые параметры по температуре и освещенности. Обе схемы, показанные на рисунках 4.5 и 4.6, представляют собой независимые контуры регулирования разработанной светодиодной системы освещения. Однако при одновременной работе обоих контуров регулирования происходит следующий процесс: при установке заданной освещенности меняется температура светодиода и контур регулирования температуры обрабатывает данные изменения, т.е. компенсируются неопределенности по температуре и освещенности. Это позволяет сказать, что использование элементов робастного управления позволило создать более надежную систему светодиодного освещения.

Как видно из приведенного анализа результатов работы регулировки температуры и освещенности взаимосвязь между контурами регулирования существует и в реальных системах с несколькими контурами регулирования происходит корректировка регулятора на реальном объекте. На основании этого понятно, что теоретически рассчитать ПИД-регулятор для всей системы представляется невозможным. Поэтому в нашем случае, как будет сказано ниже, коэффициенты регулятора были подобраны эмпирически.

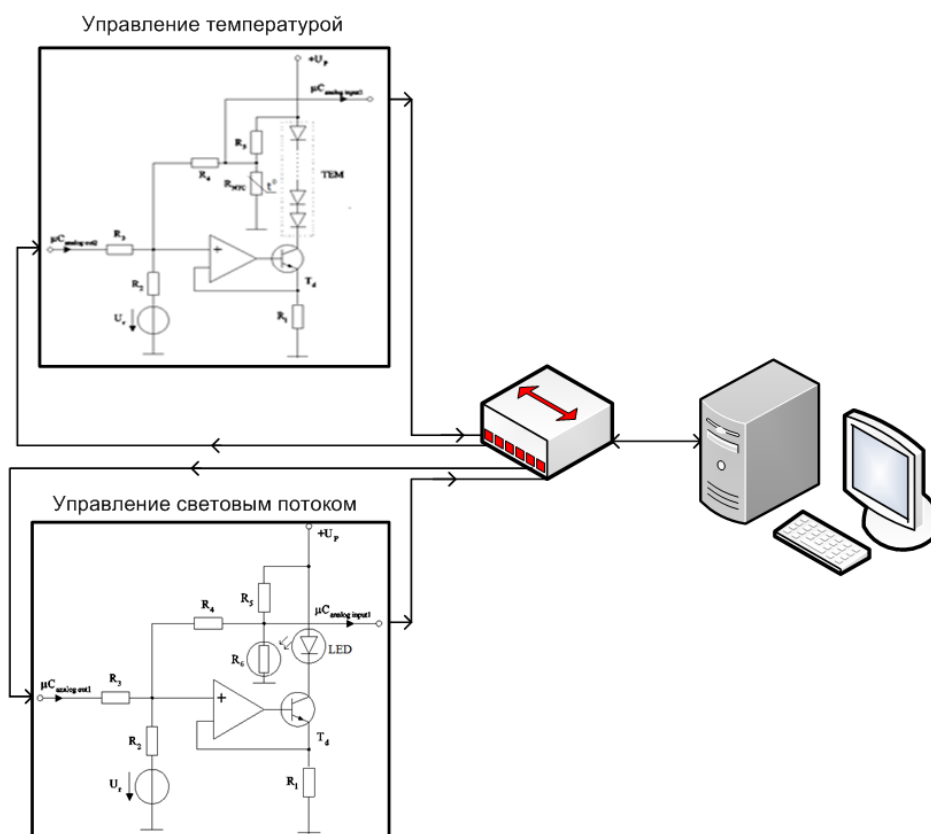


Рисунок 4.7 – Двухконтурное управление системой светодиодного освещения

Для представления модели всей системы в целом изложенной выше с учетом робастности можно воспользоваться структурной схемой, показанной на рисунке 4.8.

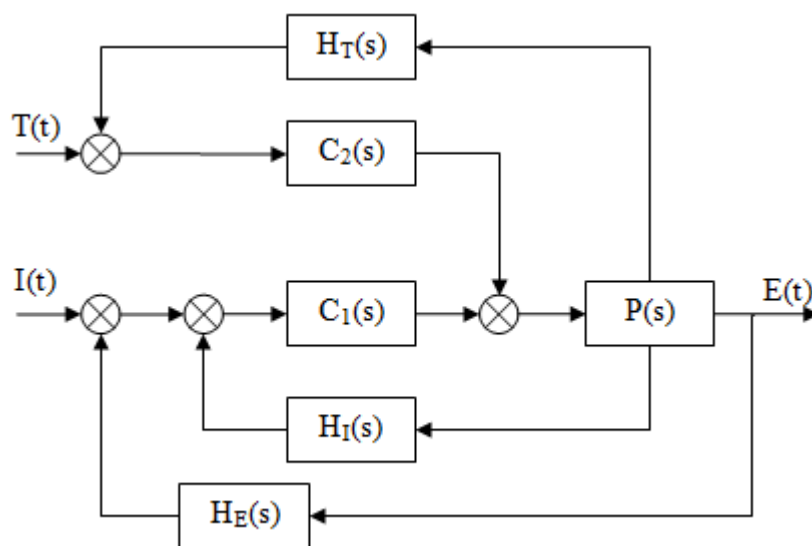


Рисунок 4.8 – Структурная схема автоматизированной системы управления светодиодной системы освещения

На данной схеме представлено три контура регулирования обеспечивающих оптимальную работу мощного белого светодиода (объекта регулирования $P(s)$). На вход основного контура подается сигнал тока $I(t)$. Данный контур обеспечивает регулирование уровня освещенности за счет управления регулятором $C_1(s)$ (драйвера светодиода) средним током светодиода. Принципиальная схема регулирования освещенности показана на рисунке 4.6. Флуктуации тока, имеющиеся в данной системе, компенсируются с помощью регулятора $C_1(s)$. Датчик $H_E(s)$ находится внутри драйвера светодиода и работает в автономном режиме обеспечивая высокую стабильность по току. В результате работы данного контура поддерживается требуемый уровень освещенности $E(t)$.

На вход второго контура поступает текущая температура подложки светодиода $T(t)$. Возникающие в системе неустойчивости температуры контролируются датчиком температуры $H_T(s)$ и регулируются с помощью регулятора $C_2(s)$ основанного на использовании модуля Пельтье. Принципиальная схема регулировки температуры с использованием элемента Пельтье показана на рисунке 4.5.

Для обеспечения робастного управления, реализованного на принципах параллельной архитектуры (рисунок 4.3) рассматриваемую структурную схему можно преобразовать в систему управления с элементами робастности (рисунок 4.9). При этом изменения температуры, тока и освещенности можно представить в виде неопределенностей, т.е. не прогнозируемые изменения.

На приведенной блок схеме показана система с компенсациями неопределенностей $v_T(t)$, $v_I(t)$, $v_E(t)$, соответственно неопределенности температуры, тока и освещенности. При робастном управлении осуществляется компенсация неопределенностей независимо от основного контура регулирования управляемого регулятором $C_1(s)$.

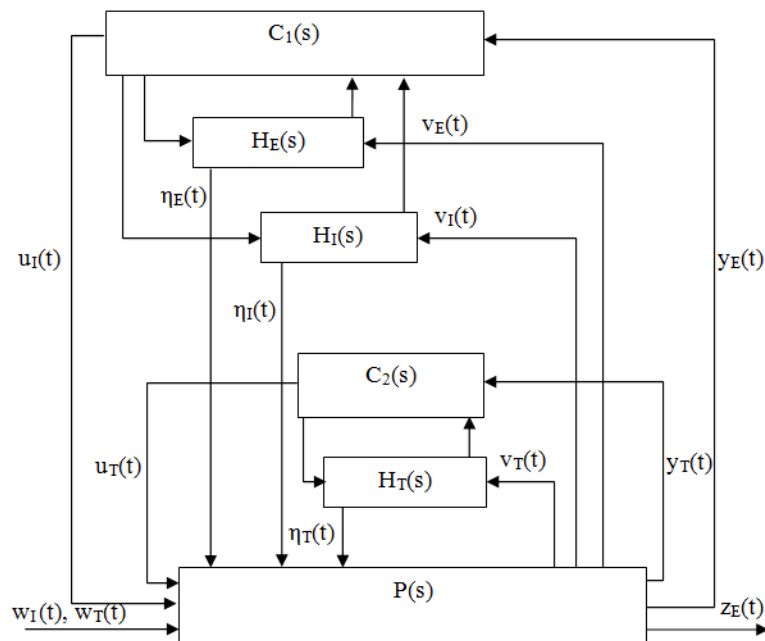


Рисунок 4.9 – Представление робастного управления системой освещения с использованием светодиодов

Выходные сигналы неопределенностей $\eta_I(t)$, $\eta_E(t)$, $\eta_T(t)$ необходимы для контроля компенсации. Информация о качестве компенсации получается путем сравнения входного сигнала $v_i(t)$ и выходного сигнала $\eta_i(t)$.

Компенсация неопределенности температуры, контролируемой датчиком $H_T(s)$, осуществляется за счет поддержки постоянной температуры кристалла светодиода с помощью регулятора $C_2(s)$.

Возмущения, связанные с током и освещенностью устраняются с помощью регулятора $C_1(s)$ где суммируются сигналы возмущений приходящих с датчиков $H_I(s)$ и $H_E(s)$.

Необходимо отметить, что элементы регулирования $C_1(s)$ и $C_2(s)$ обрабатываются одним контроллером. Это наглядно было показано на рисунке 4.7. Компенсация различных неопределенностей под управлением одного контроллера позволяет в реальном времени анализировать всей системы в целом на персональном компьютере. Благодаря этому система стабилизации управления светодиодным освещением становится более устойчивой. Это позволяет поддерживать рабочий режим кристалла светодиода и как следствие увеличить время работы, как светодиода, так и всей системы в целом.

4.2 Разработка экспериментальной установки светодиодного освещения.

Для исследования параметров светодиодов была создана экспериментальная установка. Основу экспериментальной установки составляет автоматизированная система управления светодиодным осветительным прибором с элементами робастности (рисунок 4.10).

Она состоит из двух блоков: световой модуль, представляет собой закрытый кожухом светодиод с датчиком освещенности (рисунок 4.10, позиция 1); блок управления, включающий контроллер и элементы питания для светодиода и пластины Пельтье (рисунок 4.10, позиция 2).

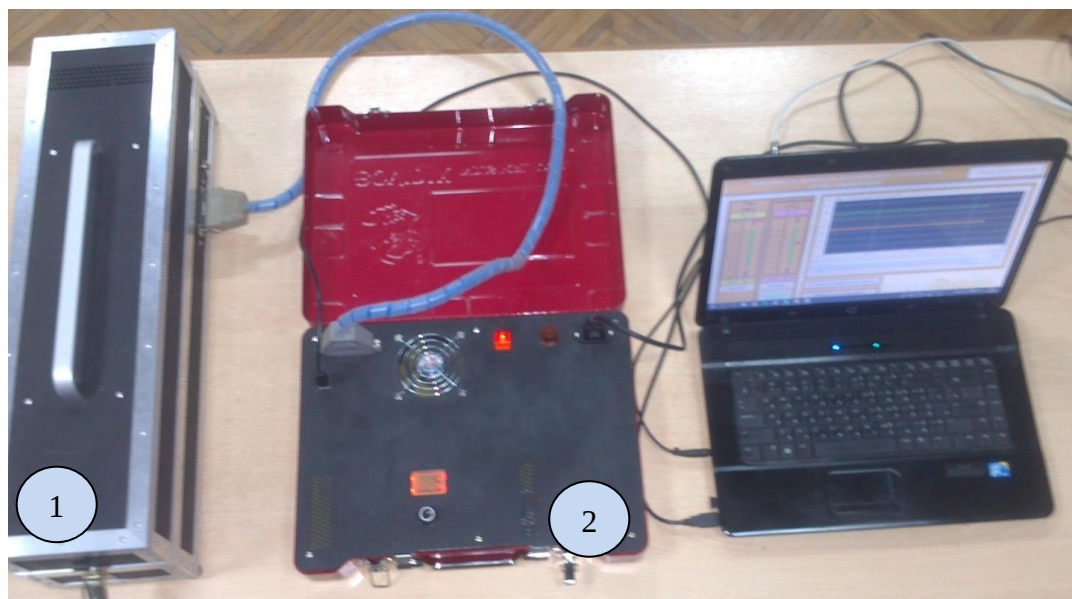
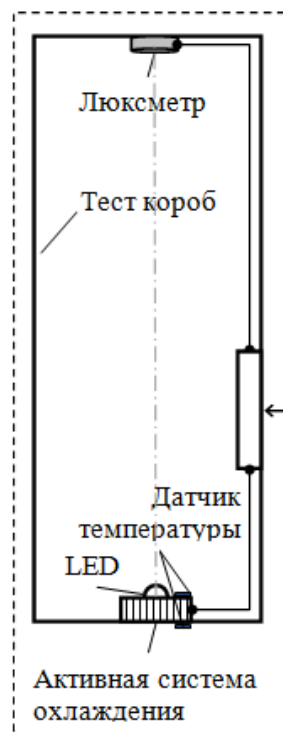


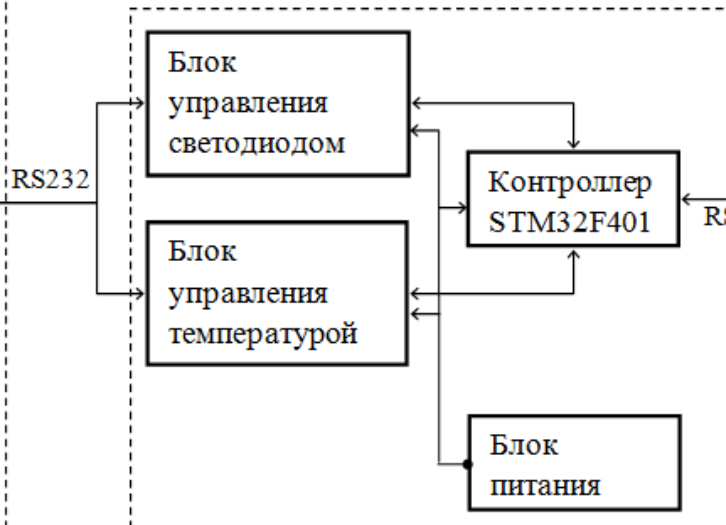
Рисунок 4.10 – Общий вид экспериментальной установки

Структурная схема экспериментального стенда приведена на рисунке 4.11.

Блок 1 – Световой модуль



Блок 2 – Блок управления



ПЭВМ с программным обеспечением



USB-порт

RS-485

RS232

Рисунок 4.11 – Структурная схема экспериментальной установки

Связь между блоками осуществляется при помощи шины RS232, а также у блока два имеется соединение с ПЭВМ через конвертор RS485 – USB. На управляющем компьютере установлена SCADA система TRACE MODE 6 и разработанное приложение для управления контроллером, получения от него данных и занесения их в архив, при помощи системы управления базами данных ACCESS.

Рассмотрим более подробно элементы, составляющие каждый из блоков, и функции элементов автоматизированной системы управления освещением рабочих помещений.

Световой модуль конструктивно состоит из светонепроницаемого корпуса, в котором установлены: исследуемый светодиод Nichia NCSL219B, система поддержки необходимой температуры кристалла светодиода, система контроля освещенности, источник дополнительного освещения (рисунок 4.12).

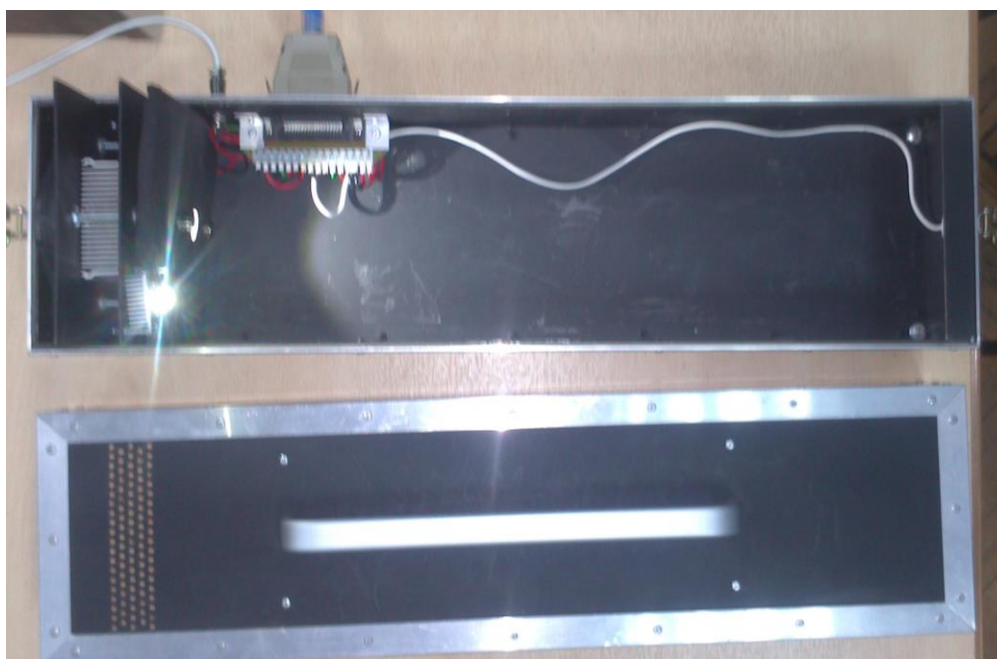
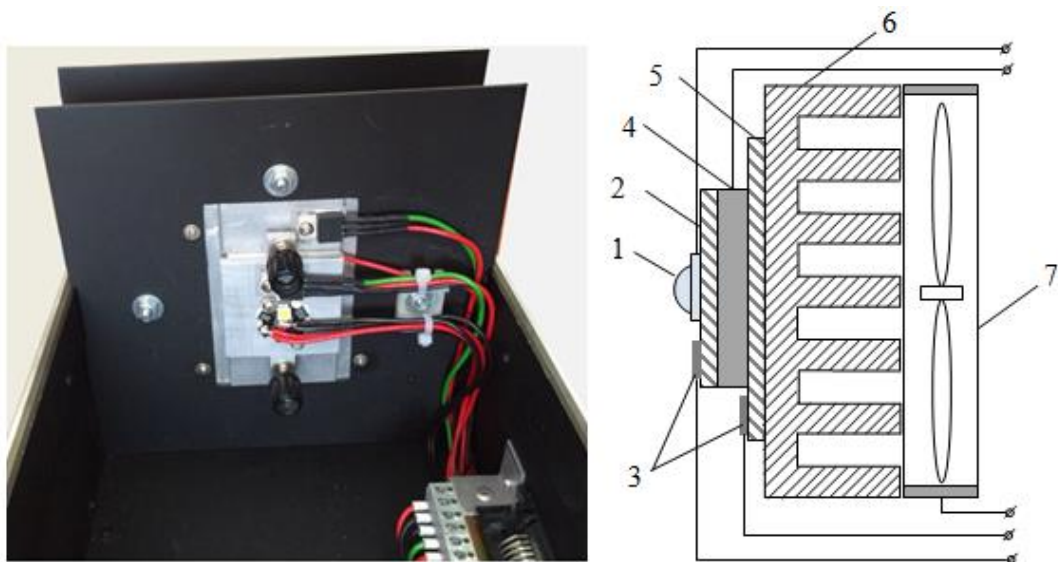


Рисунок 4.12 – Внешний вид светового модуля

Светодиод закреплен на алюминиевой пластине, вместе с датчиком температуры – для контроля температуры кристалла. Пластина, через кремнийорганическую теплопроводную пасту, при помощи пружинных зажимов, крепится к одной стороне элемента Пельтье. К другой стороне элемента, через кремнийорганическую теплопроводную пасту, крепится массивный радиатор с вентилятором для отведения или подведения тепла, в зависимости от функции нагрева или охлаждения соответственно. На радиаторе установлен датчик температуры – необходим для предотвращения перегрева элемента Пельтье. Данная конструкция показана на рисунке 4.13.

Напротив светодиода, на его оси, расположен датчик освещенности – калиброванный люксметр, который измеряет суммарную освещенность от искусственного (исследуемого) и естественного источника освещения.



1 – светодиод; 2, 5 – алюминиевая пластина; 3 – датчики температуры; 4 – пластина Пельтье; 6 – медный радиатор; 7 – вентилятор
Рисунок 4.13 – Конструкция поддержки температуры кристалла светодиода

Для моделирования естественного освещения используется дополнительный светодиод, установленный в коробе и управляемый от источника тока ИТ-300.

Все управляющие схемы находятся в блоке управления, выполненном в виде металлического кейса (рисунок 4.14). Пульт управления состоит из следующих узлов: микропроцессорный блок, блок питания, конвертор интерфейсов USB в RS-485, блок управления светодиодом, блок управления температурой.

Модуль контроллера функционально состоит из: основной платы, на 32-битном микропроцессоре ARM Cortex M4 STM32F401, к которой подключены блок управления светодиодом и блок управления нагревателем. Микропроцессорный блок осуществляет считывание и обработку нормализованных сигналов с датчиков, выдачу управляющих сигналов на остальные узлы, обмен информацией с АРМ оператора и выполнение команд оператора. Возможна работа системы, как под управлением компьютера, так и в автономном режиме. Для отображения информации о режимах работы в автономном режиме микропроцессорный блок имеет миниатюрный графический ЖК индикатор. Программное обеспечение микроконтроллера позволяет обращаться к нему через стандартный протокол MODBUS. Для управления температурой и током светодиода используется программные ПИД-регуляторы, для которых можно задать коэффициенты. Кроме того, регулирование тока светодиода можно осуществлять по двум параметрам – непосредственно ток светодиода или освещенность. При управлении освещенностью используется дополнительный программный ПИД-регулятор с жестко заданными настройками коэффициентов и который выдает задание для основного регулятора тока светодиода.



1 – блок контроллера; 2 – блок управления нагревателем; 3 – блок управления светодиодом

Рисунок 4.14 – Внешний вид платы контроллера с блоками управления светодиодом и элемента Пельтье

Блок управления светодиодом управляет током светодиода в зависимости от задания, контролирует температуру кристалла, измеряет освещенность и передает данные контроллеру основной платы. Блок управления светодиодом предназначен для стабилизации тока светодиода на основании управляющих сигналов от микропроцессорного блока. Кроме того, в данном блоке производится первичная обработка сигналов тока светодиода, падения напряжения на кристалле, светового потока и температуры светодиода.

Блок управления нагревателем управляет температурой кристалла светодиода при помощи элемента Пельтье, контролирует температуру радиатора и управляет вентилятором притока воздуха. Предназначен для питания элемента Пельтье, с помощью которого осуществляется поддержание заданной температуры светодиода. Регулирование производится изменением напряжения питания элемента Пельтье и сменой полярности питания для переключения режимов нагрев/охлаждение [176].

Блок управления нагревателем и блок управления светодиодом связан с основной платой. Основная плата контроллера получает данные от обоих блоков. На основе этих параметров управляет регуляторами тока и температуры светодиода, отправляет данные в SCADA систему через USB – для архивирования и дальнейшей обработки.

Блок питания предназначен для получения постоянного напряжения 12В при токе до 8А из сетевого переменного напряжения ~220В для питания всех узлов стенда.

Конвертор интерфейсов предназначен для подключения микропроцессорного блока со стандартным промышленным интерфейсом RS-485 к компьютеру через интерфейс USB.

4.3 Разработка программного обеспечения автоматизированной системы управления LED освещением

Для управления светодиодной системой освещения было разработано программное обеспечение. Программный комплекс разработан в SCADA системе Trace Mode 6.10.

Реализация связи с измерительным комплексом осуществляется с помощью протокола ModBus и режима передачи данных RTU (удаленное терминальное устройство). Данный протокол имеет высокую достоверность передачи данных, связанную с применением надежного метода контроля ошибок. Отсутствие необходимости в специальных интерфейсных контроллерах, простота программной реализации и принципов функционирования, высокая степень открытости протокола и совместимость с большим количеством оборудования повлияло на наш выбор [177].

Программный комплекс позволяет передавать/считывать заданные физические величины в контроллер устройства, осуществлять математические расчёты. В реальном времени интерфейс переключается в рабочий режим, на котором отображаются протекающие процессы.

После запуска приложения на дисплее появится рабочее окно программы (Рисунок 4.15). Данный экран является основной формой проекта, на который выведена следующая информация:

- принципиальная схема устройства (позиция 1);
- кнопки управления для перехода на экраны расчета соответствующих параметров: тока, мощности, освещенности и температуры (позиции 2 - 6);
- задаваемые коэффициенты ПИД-регулятора (позиция 7);
- считанные с устройства параметры: величины тока, температуры светодиода и элемента Пельтье, освещенность (позиция 8);
- опорное напряжение прибора (позиция 9);
- падение напряжения на светодиоде (позиция 10).

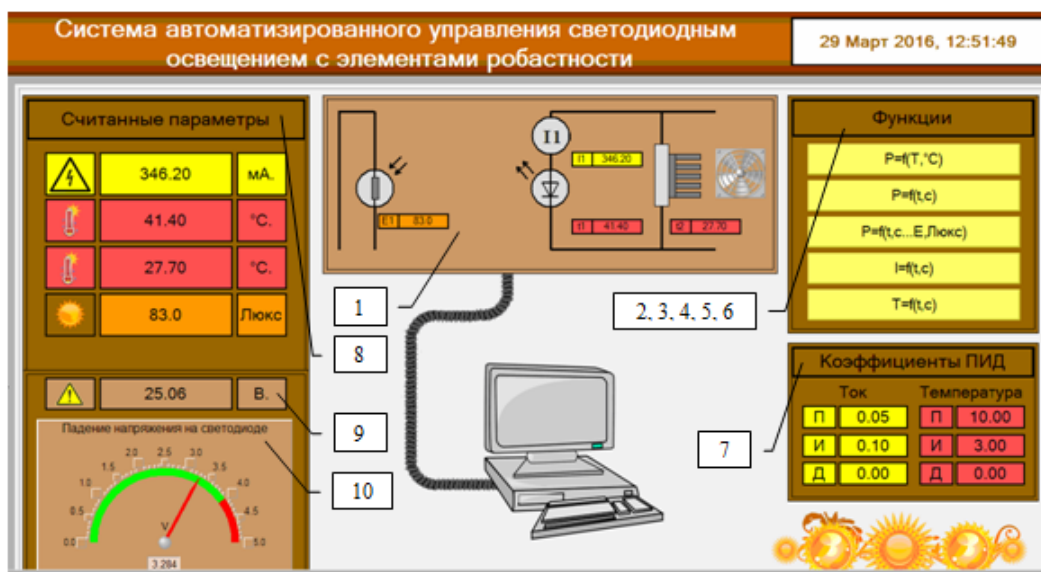


Рисунок 4.15 – Главное окно пользовательского приложения

Для установки рабочих параметров мощных белых светодиодов разработаны диалоговые окна, которые доступны через соответствующие функции: $P = f(T^0)$ – зависимость мощности потребляемой светодиодом от его температуры; $P = f(t)$ – функция мощности потребляемой светодиодом по времени; $P = f(E, t)$ – зависимость мощности потребляемой светодиодом от освещенности кристалла по времени; $I = f(t)$ – функция тока потребляемого светодиодом по времени; $T = f(t)$ – функция температуры светодиода по времени.

Через диалоговое окно «Зависимость мощности, потребляемой светодиодом, от его температуры» (рисунок 4.16) можно устанавливать параметры тока и температуры светодиода (позиция 3), а также включать/отключать активную систему охлаждения светодиода (позиция 5). Для передачи введенных параметров контроллеру необходимо нажать кнопку «Сохранить» (позиция 4).

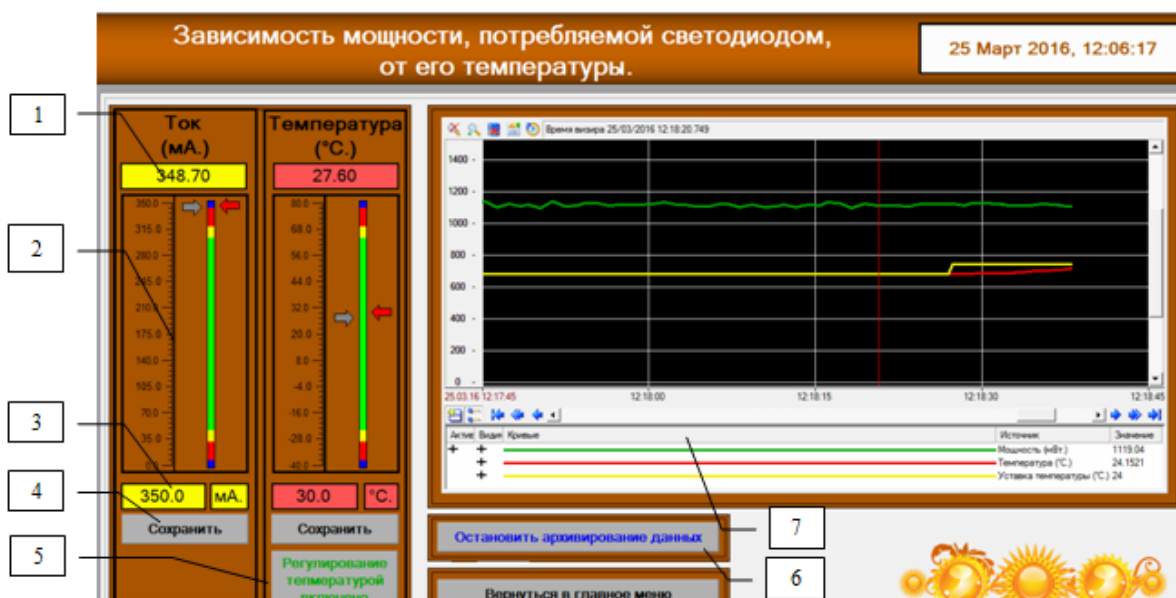


Рисунок 4.16 – Диалоговое окно «Зависимость мощности, потребляемой светодиодом от его температуры»

На экран вынесены считанные с приборов текущие значения тока и температуры светодиода (позиция 1), а также графическое отображение изменения показаний относительно заданного. Стрелка слева отмечает текущее значение на приборе, а справа установленное значение переданное контроллеру (позиция 2). Кнопка «Начать архивирование данных» (позиция 6) передает прибору команду о включении светодиода, и контроллер начинает выполнять регулирование тока светодиода согласно заданным значениям ПИД регулятора, при этом одновременно происходит чтение показаний с датчиков и архивирование считанных параметров в базу данных. В реальном времени интерфейс переключается в рабочий режим, на котором отображаются протекающие процессы. На данном интерфейсе видно поведение температуры

светодиода и мощности. Все полученные значения можно просмотреть в графическом виде на трендах (позиция 7).

Диалоговое окно «Зависимость мощности, потребляемой светодиодом от освещенности кристалла, создаваемой внешним источником света» (рисунок 4.17) включает функции регулировки и управления освещенностью и температурой светодиода. На данном интерфейсе видно поведение температуры, мощности и освещенности (мощность – линия 1, температура – линия 2, освещенность - линия 3).

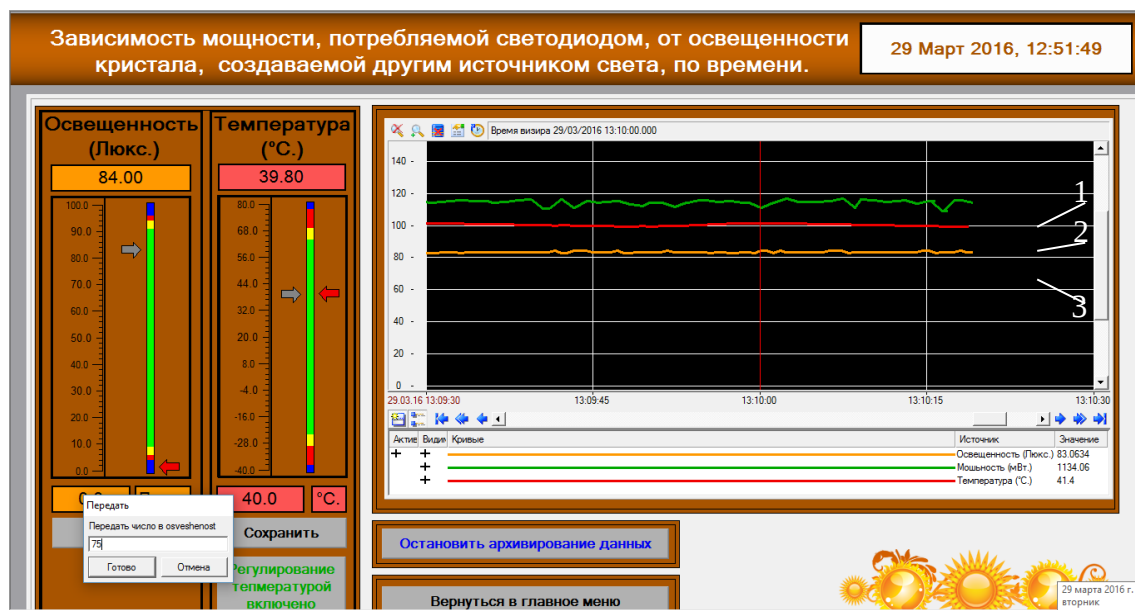


Рисунок 4.17 – Диалоговое окно «Зависимость мощности, потребляемой светодиодом от освещенности кристалла»

Диалоговые окна функции тока и мощности потребляемого светодиодом по времени, а также функции температуры светодиода могут быть использованы для регулировки соответствующих параметров, а также разработаны для изучения поведения каждого параметра в отдельности. Программное решение диалоговых окон для управления параметрами мощного белого светодиода выполнено в едином формате и имеет аналогичные функции.

При архивировании значений создается база данных текущих и установленных значений в формате таблиц MS ACCESS. Это позволяет оценить работу комплекса в целом и проследить изменения всех значений, для последующих расчетов и анализа.

Данный программно-аппаратный комплекс позволяет устанавливать и поддерживать оптимальные параметры мощных белых светодиодов. Разработанный модуль может быть использован в реальных осветительных системах внутреннего светодиодного освещения. Получено свидетельство о государственной регистрации прав на объект авторского права под названием «Система автоматизированного управления светодиодным освещением с элементами робастности (программа для ЭВМ)» [178]

4.4 Анализ экспериментальных данных

В результате исследования режимов работы светодиодов было показано [179,180], что при данной системе регулирования с компенсацией температурных и токовых неопределенностей (с использованием робастности) можно получить устойчивый режим работы (в широком диапазоне изменения параметров внешней среды) светодиода. Данный режим позволяет полностью устранить деградацию светодиодной матрицы, а также обеспечить наиболее высокие показатели освещенности.

На рисунке 4.18 мы видим поведение температуры светодиода при различных токах при температуре помещения 25°C . Показано три зависимости: нижняя кривая получена при токе 250мА, вторая при токе 300мА, третья при токе 350мА. Установлено, что с повышением тока увеличивается температура кристалла светодиода, которая со временем выходит в насыщение. Так в первом случае насыщение достигается при 30°C , во втором 31°C , и в третьем случае 32°C . Исследования позволяют изучать поведение температуры при более мощных токах, однако при увеличении тока более 350 мА со временем падает интенсивность излучения, а при токах 450мА и более диод деградирует. В реальных осветительных системах мы видим постепенную деградацию, так как диоды в осветительном приборе работают при оптимальном токе 350мА, а температура повышается за счет внешних условий и только в редких случаях за счет скачка напряжения в цепи питающей электронный прибор.

Поведение изменения температуры при различных токах показывает, что при стабилизации тока (как в нашем случае) мы не видим резких скачков температуры, прослеживается только белый шум, который присутствует во всех электронных устройствах.

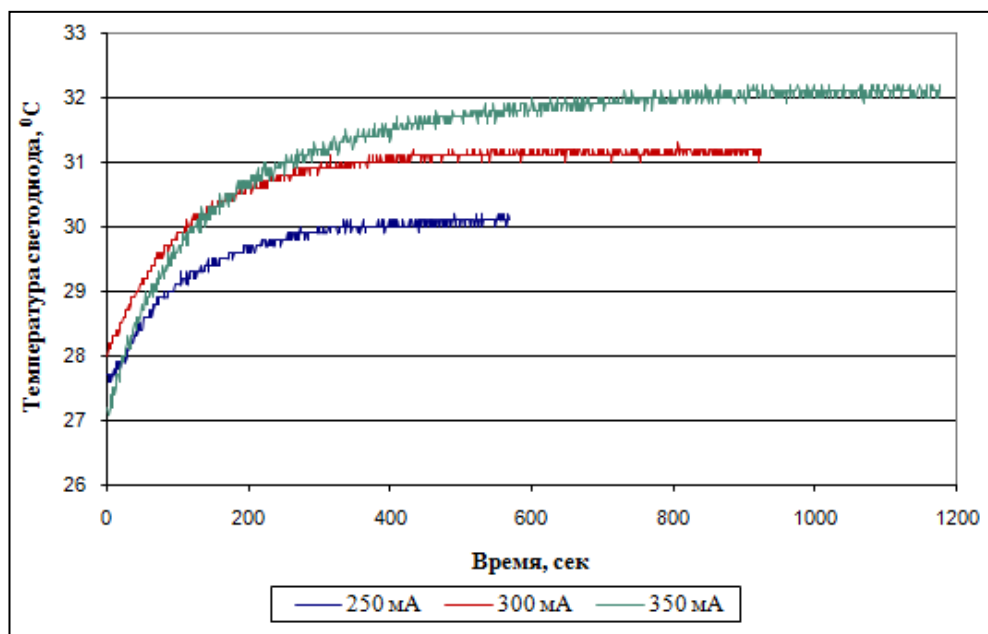


Рисунок 4.18 – Переходной процесс установки температуры светодиода при различных токах

При включенной стабилизации по освещённости, зависимость температуры имеет несколько изменённый вид. На рисунке 4.19 показан переходной процесс установки определенной температуры с помощью разработанной системы автоматизации, т.е. работа дополнительного контура регулирования, обеспечивающего робастность системы. Параметры сняты при протекающем токе через светодиод 350мА, температуре подложки светодиода 25⁰С и температуре окружающей среды 25⁰С.

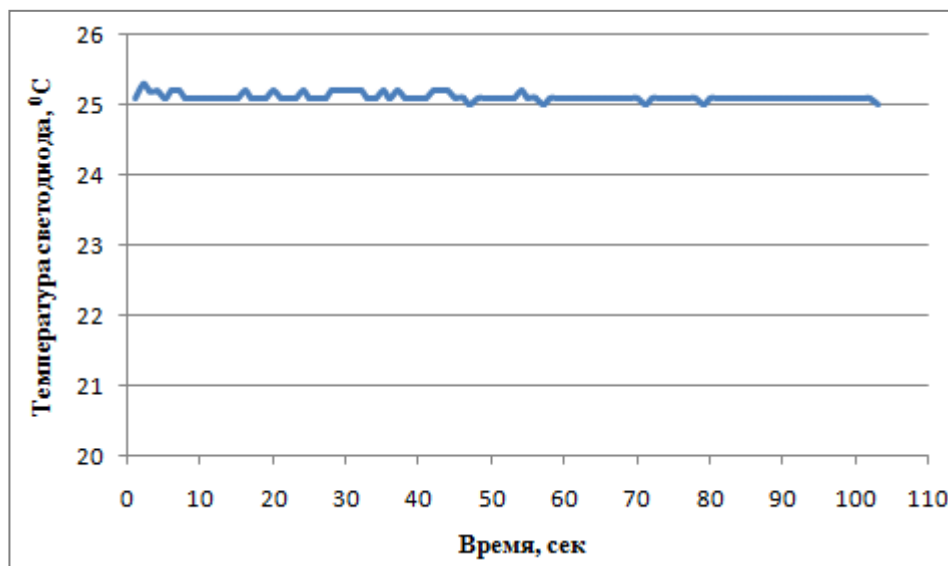


Рисунок 4.19 – Переходной процесс установки температуры с помощью разработанной системы регулирования

Разница между полученными графиками заключается в происходящих процессах светодиода. С одной стороны диод нагревается, и оптическая мощность меняется, а с другой стороны система управления температуры пытается отработать это изменения и т.д. Как видно из полученных экспериментальных зависимостей система работает в оптимальном режиме, т.к. изменения температуры изменяется на $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, что не сказывается на работе светодиода.

При стабилизации температуры (устранение неопределенности флуктуации температурных режимов) выходная мощность светодиодов имеет более стабильный характер. Мощность после насыщения (рисунки 4.20, 4.21) не имеет изменений во времени, как в большую, так и в меньшую сторону.

Несмотря на то, что существует основной контур регулирования мощности при значительном изменении температуры, которые происходят при естественных условиях эксплуатации осветительных приборов, диапазона регулирования не хватает для поддержки заданной мощности. Как сказано выше в нашем случае, используя робастный подход (поддерживая постоянную температуру кристалла светодиода), получаем стабилизированную мощность при длительной эксплуатации светодиода.

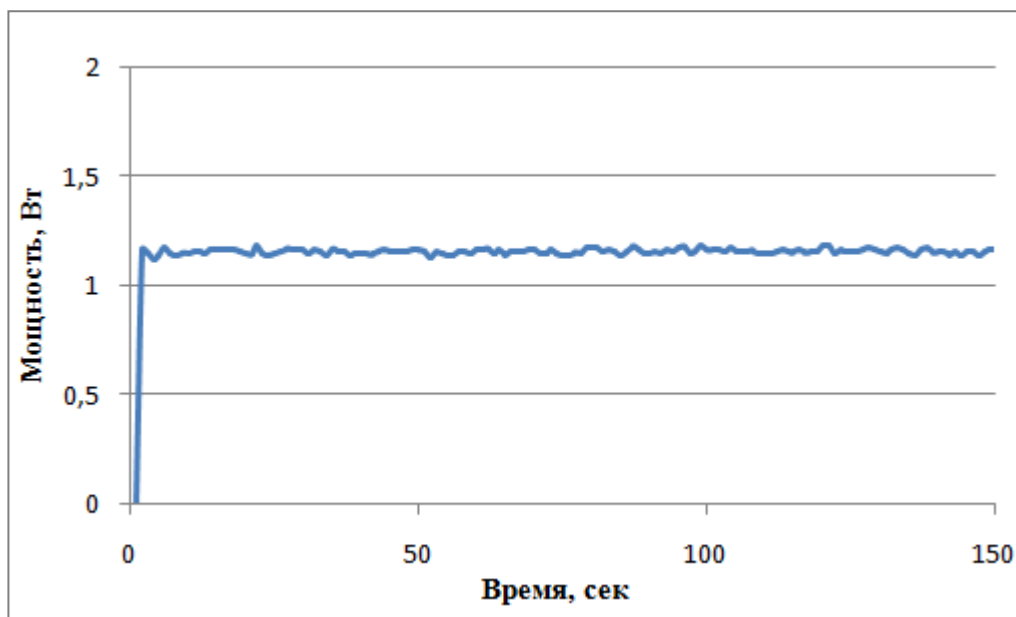


Рисунок 4.20 – Зависимость мощности светодиода от времени при стабилизированной температуре 26⁰С

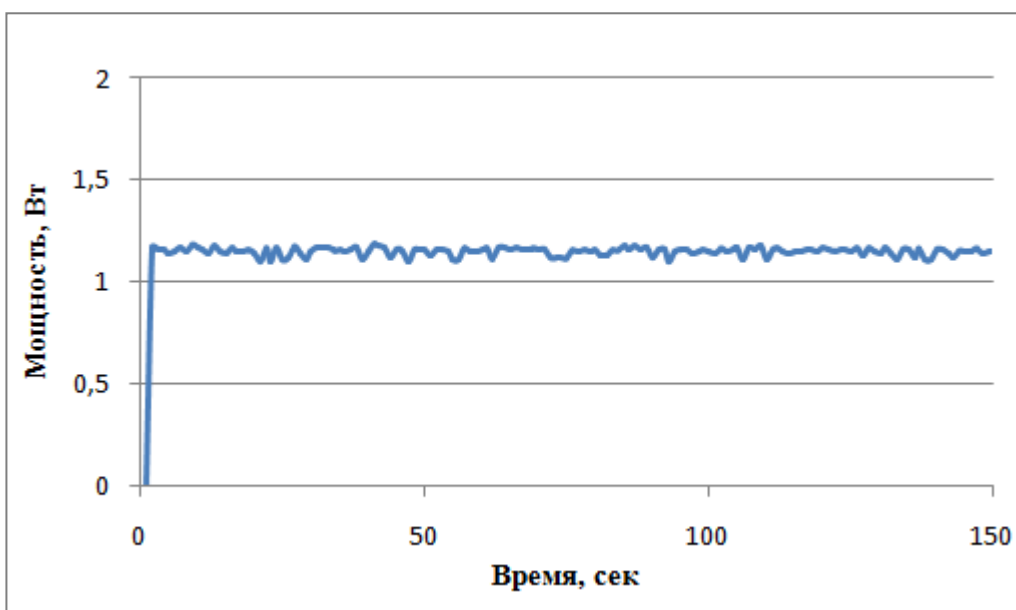


Рисунок 4.21 – Зависимость мощности светодиода от времени при стабилизированной температуре 40⁰С

Единственное изменение мощности связано с белым шумом на выходе стабилизированного источника питания. Эта зависимость мощности от времени показана на рисунке 4.22. Параметры сняты при $I = 350\text{mA}$, $T = 40^{\circ}\text{C}$.

Данный рисунок показывает стабильность работы с использованием робастных технологий и использованием двух контуров регулирования по сравнению с имеющимися светодиодными лампами, продающимися в промышленности, где за счёт увеличения температуры практически линейно меняется мощность, которая потом совсем деградирует.

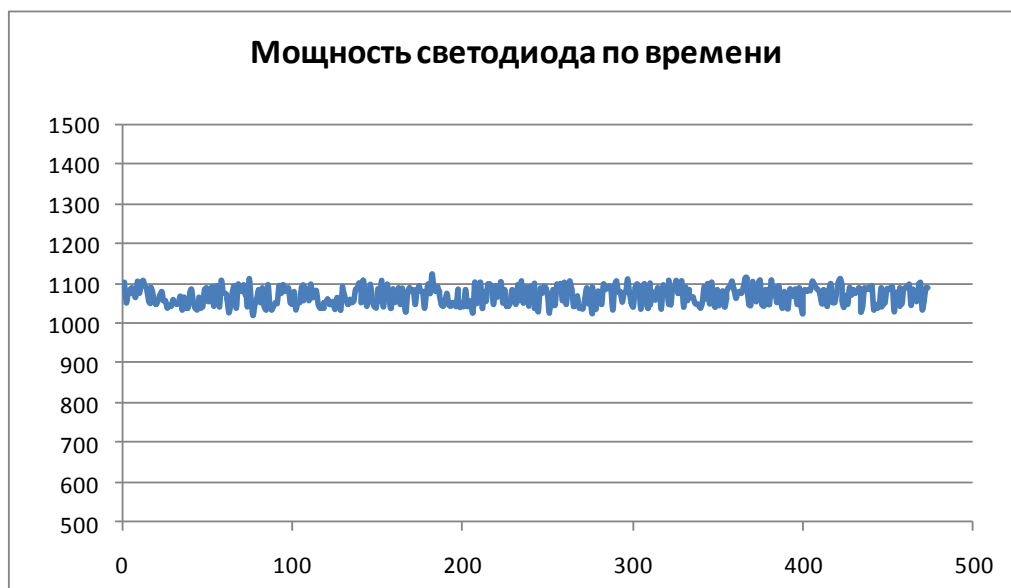


Рисунок 4.22 – Белый шум на выходе стабилизированного по току светодиода

Полученные оптические характеристики мощных белых светодиодов позволяют сделать вывод о возможности организации импульсных режимов работы светодиода. На рисунках 4.20 и 4.21 видно, что крутизна фронта очень высока и даст возможность перейти к режимам светодиодов с очень короткими импульсами. Аналогично как это сделано со мной в соавторстве со светодиодными лазерами для создания фемтосекундного стандарта частоты с внешним высокочастотным интерферометром опубликованного в статье и доложенного международной конференции [181, 182].

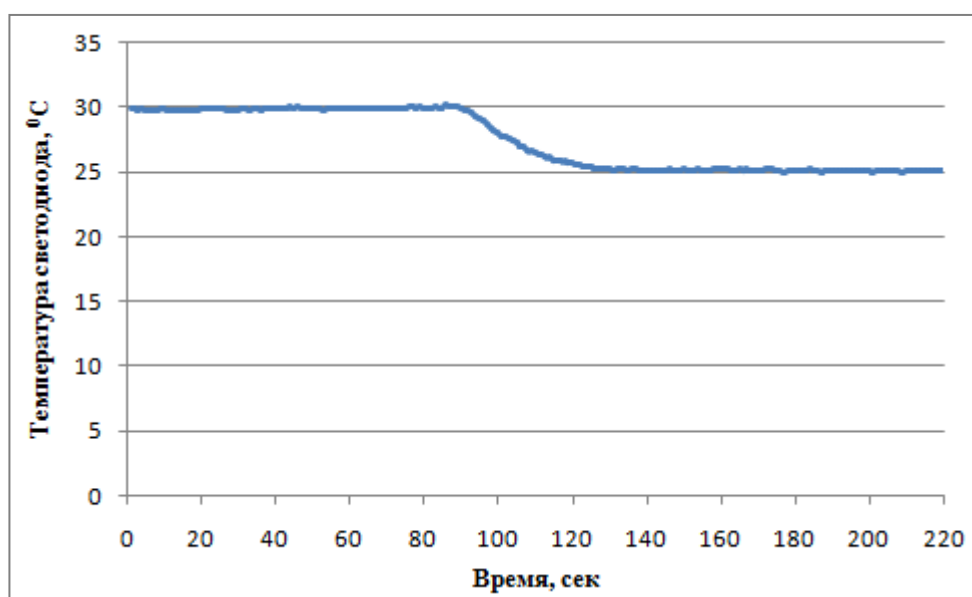


Рисунок 4.23 –Изменение температуры за счет автоматизированной системы управления

Рисунок 4.23 показывает гибкость управления светодиодным осветительным прибором. Управление светодиодом (температурой) во время его работы не мешает устойчивой работе осветительного прибора в целом.

Результаты эксперимента показали, что использование современных подходов при управлении сложными системами позволяют обеспечить устойчивость режимов работы системы характеристики. В данном случае, использование теории робастности и на основе этого создавая дополнительные контуры регулирования, были устранены факторы, отрицательно влияющие на работу системы. За счет этого система как видно из рисунков 4.19, 4.22 становится более стабильной и обеспечивает длительную устойчивую работу мощных светодиодов освещения.

На рисунке 4.24 показаны изменения освещенности светодиода от температуры подложки кристалла при различных значениях тока. Исследования проводились при температуре помещения 25°C . Видно, что траектория изменения зависимости хорошо согласуется с данными представленными на официальном сайте Nichia [147].

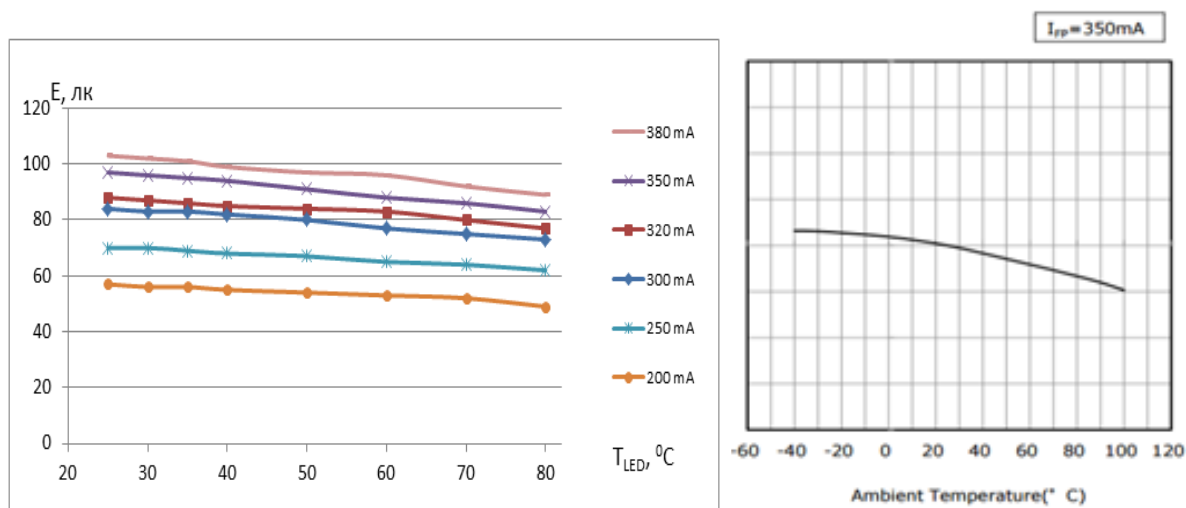


Рисунок 4.24 – Зависимость изменения освещенности от температуры при различных токах светодиода

Зависимость освещенности светодиода от протекающего тока при разных температурах основания светодиода показана на рисунке 4.25.

Следует отметить достаточно высокое приближение полученных значений параметров к заявленным фирмой производителем.

Использование предлагаемой методики в осветительных приборах высокой мощности позволит значительно увеличить продолжительность работы, а также избежать деградации кристаллов светодиодов. При этом использование осветительных приборов возможно как в офисных, производственных помещениях, так и в осветительных приборах наружного освещения.

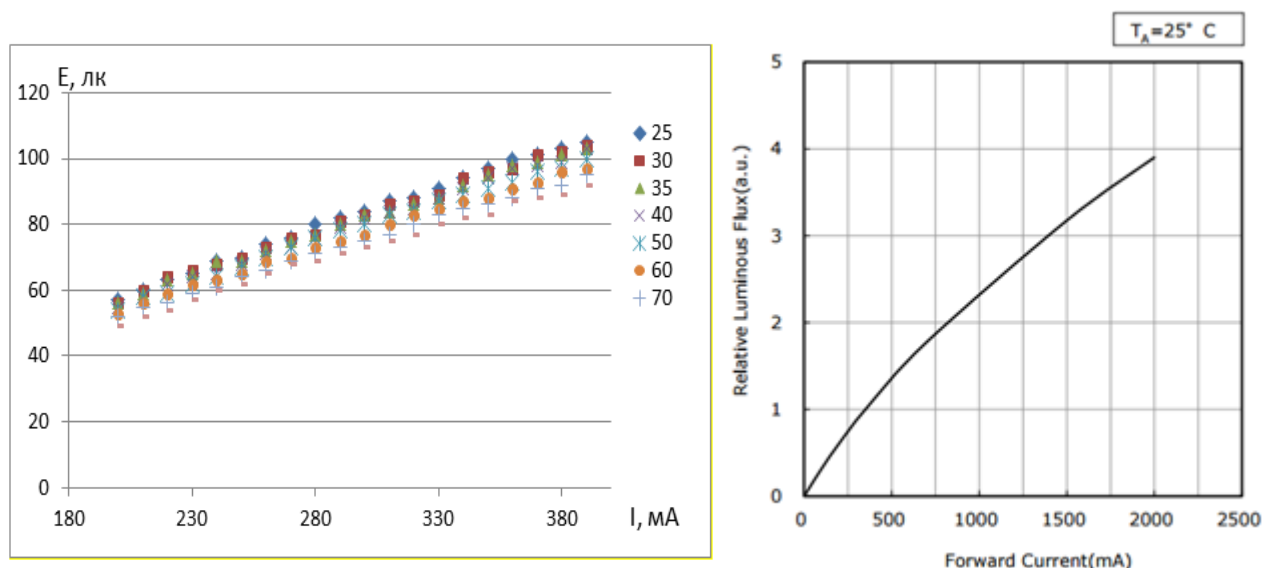


Рисунок 4.25– Зависимость освещенности светодиода от силы тока при различных температурах

Данная методика позволяет исключить как внешние, так и внутренние неопределенности, добавляя контуры управления в соответствии с робастным подходом. Дальнейшее развитие методики связано с исследованием робастной устойчивости и влиянием ее на регулирование освещенности в агрессивных условиях высоких температур и повышенной влажности.

4.5 Выводы по разделу

В данном разделе получены следующие результаты:

- разработана система управления светодиодным освещением с учетом компенсации неопределенностей с использованием теории робастности;
- разработана принципиальная схема системы регулирования, обеспечивающая устойчивую работу освещения при значительном изменении внешней температуры и с корректировкой влияния естественного или дополнительного освещения;
- создан экспериментальный стенд для исследования светотехнических характеристик белых мощных светодиодов;
- разработано программное обеспечение для управления системой контроля и регулирования параметров светодиодной системы освещения;
- получены экспериментальные результаты поведения системы освещения при стационарных внешних условиях и при быстром переключении режимов температуры и освещенности;
- даны рекомендации по оптимальным температурным и токовым режимам управления светодиодной системой освещения для внутренних помещений.

5 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1 Исследования системы освещения в эксплуатационных условиях

Для проведения анализа и оценки эффективности работы разработанной автоматизированной светодиодной системы освещения были проведены натурные эксперименты. Измерялась потребляемая мощность освещения рекреаций двух этажей учебного корпуса ВКГТУ им.Д.Серикбаева. На одном этаже использовались люминесцентные лампы дневного света, а на другом этаже светодиодные лампы новой конструкции, работающие в двух режимах: в обычном режиме без системы управления и с использованием разработанной системы автоматизированного управления.

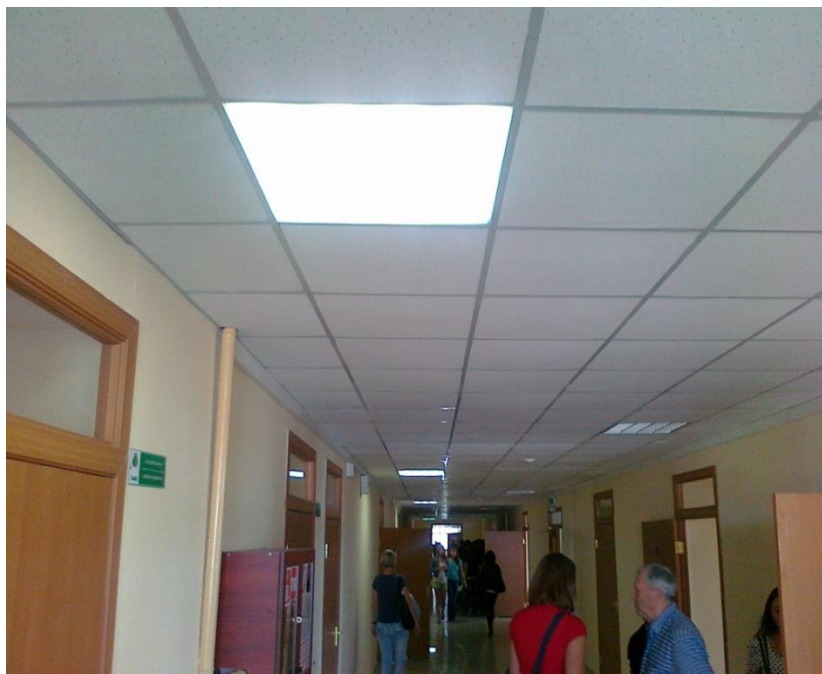


Рисунок 5.1 – Освещение LED светильниками коридора учебного корпуса

В качестве источника светодиодного излучения для прибора освещения выбран сверхяркий мощный светодиод японской корпорации Nichia NCSL219B с тепло-белой температурой излучения, мощностью 1Вт, световым потоком 126Лм, рабочим током 350 мА, углом направленности 120° [147].

Для обеспечения продолжительного срока службы, высокой надежности и стабильности характеристик светодиодных светильников важно поддерживать высокую стабильность тока. При этом возникает вопрос о выборе схемы источника питания (драйвера). Главная задача светодиодного драйвера – обеспечить на выходе постоянный стабильный ток, независимо от изменения питающего напряжения и количества светодиодов в цепочке.

За основу управляемого драйвера была взята микросхема HV9910 (фирма Microchip Technology Inc, США) – высокоэффективный недорогой ШИМ-стабилизатор тока светодиодов [183].

Микросхема HV9910 позволяет очень просто реализовать стабильный источник тока для питания светодиодов. Позволяет работать как в низковольтных приложениях, так и для освещения улиц и помещений от выпрямленного сетевого напряжения 220В.

В конструкции микросхемы заложены технологии, обеспечивающие прочную изоляцию полупроводниковых структур при входных напряжениях до 450В. Постоянство яркости цепочки светодиодов осуществляется за счёт стабилизации выходного тока, при этом значения этого тока легко программируются от нуля до максимума, как с помощью навесного резистора, так и с помощью внешних низкочастотных ШИМ импульсов в диапазоне до нескольких кГц. Выходная мощность нагрузки управляется внешним MOSFET транзистором на фиксированной частоте до 300 КГц. Диапазон рабочих температур от -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$.

При изучении режимов работы выявлено, что микросхема HV9910 позволяет варьировать количество подключаемых светодиодов без ухудшения качества стабильности по току. Использование HV9910 обеспечивает гибкость управления светодиодами и увеличивает срок их службы. Микросхемы, работая при более низких входных напряжениях, чем другие популярные изделия, позволяют повысить эффективность стабилизатора, повысить точность стабилизации, снизить габариты и общую стоимость конструкции.

Схема включения микросхемы HV9910 и внешний вид разработанной монтажной платы показаны на рисунке 5.2. Микросхема стабилизирует ток на светодиодах по пиковому значению. Значение тока снимается непосредственно с резистора датчика тока R_{CS} , ток поступает на компаратор (вывод микросхемы CS) и сравнивается с опорным сигналом 250мВ. Если напряжение на R_{CS} превышает 250мВ, происходит выключение ключа Q_1 .

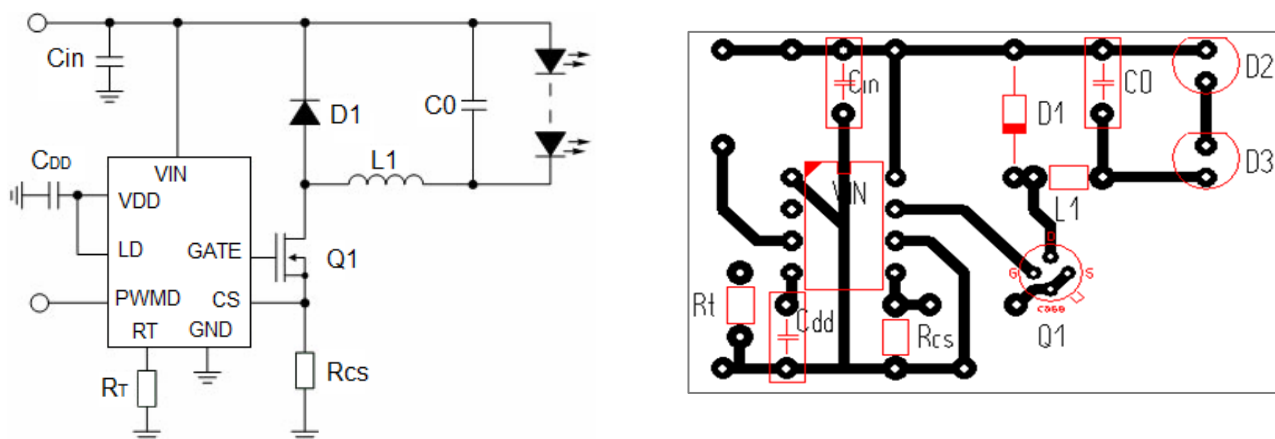


Рисунок 5.2 – Схема включения микросхемы HV9910 и внешний вид печатной платы

Управляемый драйвер на базе микросхемы HV9910 создавался в ВКГТУ им.Д.Серикбаевана производственной базе «Энергия» с применением имеющегося оборудования, станков и инструментов (рисунок 5.3).



Рисунок 5.3 – Производственная база «Энергия»

Монтаж радиодеталей осуществлялся в два этапа. На первом этапе производится пайка микросхемы SMD (англ. Surface mounted device) монтажом в паяльной печи с инфракрасным разогревом. Печь программируется на определенный температурно-временной график, который выдается фирмой-производителем радиодетали, и с помощью паяльной пасты специального химического состава радиодеталь закрепляется на свое посадочное место.

На втором этапе производится монтаж радиодеталей при помощи паяльной станции с регулируемой температурой нагрева жала паяльника (рисунок 5.4). После сборки электронного прибора производится настройка его параметров при помощи осциллографа. Основным параметром настройки является стабилизация тока в 350мА для стабильной и безаварийной работы сверхярких осветительных светодиодов. Далее собранный управляемый драйвер проходит стендовые испытания в течение 7 дней.

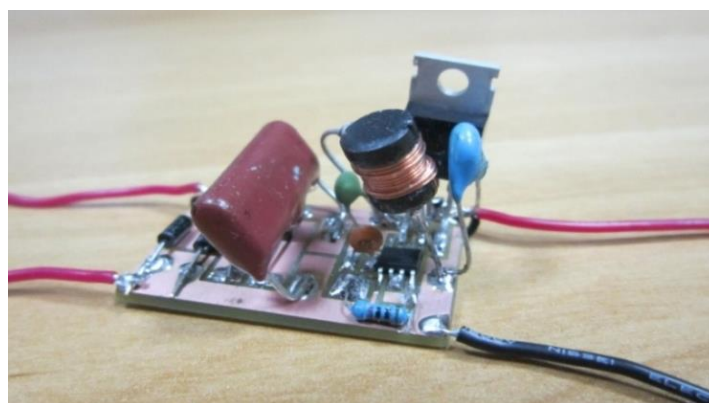


Рисунок 5.4 – Собранный печатная плата управляемого драйвера со снятым корпусом

Discovery заложен 32 МГц микроконтроллер STM32L152RBT6с 128 Kb Flash, 16 Kb RAM и 4 Kb EEPROM. Так же на плате имеется встроенный контроллер LCD 8x40 и LCD дисплей 24x8 в форм-факторе DIP28.

Данная плата имеет возможность измерения потребляемого тока. Наличие встроенного программатора–отладчика ST-LINK позволяет программировать другие микроконтроллеры STM32. Сигналы встроенного ST-LINK выведены на внешний разъем, что предусмотрено в дальнейшем использовать STM32L-Discovery в качестве программатора-отладчика для своих собственных разработок.



Рисунок 5.6 – Монтажная плата модуля согласования на базе микроконтроллера STM32L-Discovery

Осветительный прибор новой конструкции светодиодной лампы типа «Armstrong», используемый для освещения коридора, показан на рисунке 5.7. Светильник был сделан на основе стандартной конструкции с учетом теплотехнического расчета, приведенного в разделе 3, п.3.2.

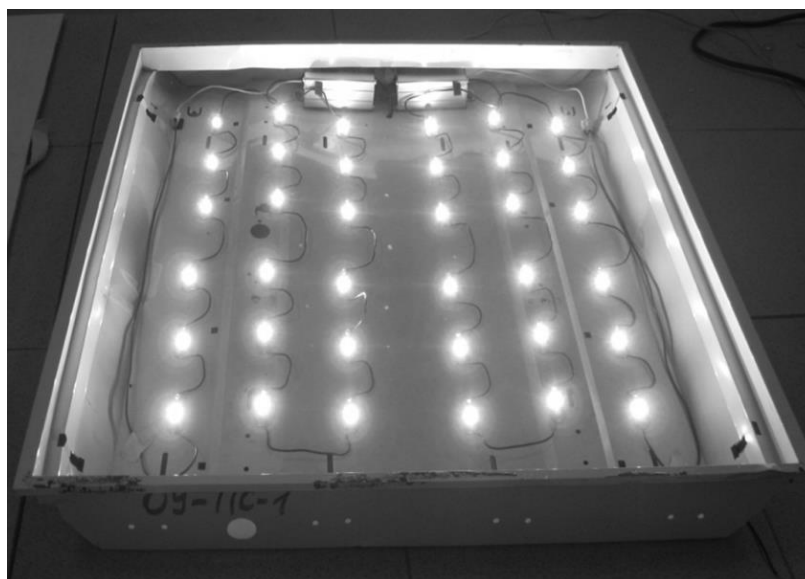


Рисунок 5.7 – Внешний вид разработанной конструкции светодиодной лампы типа «Armstrong»

Всего в светильнике 36 светодиодов, которые объединены в 4 сектора по 9 светодиодов. Каждый сектор закреплен на элементе Пельтье. Два сектора управляются отдельным драйвером (рисунок 5.2). Таким образом, система управления контролирует температуру четырех секторов и ток двух частей светодиодного светильника. Одна плата микроконтроллера обеспечивает управление всеми лампами рекреации этажа.

Схематично этаж с размещенными элементами освещения и автоматизированной системой управления показан на рисунке 5.8.

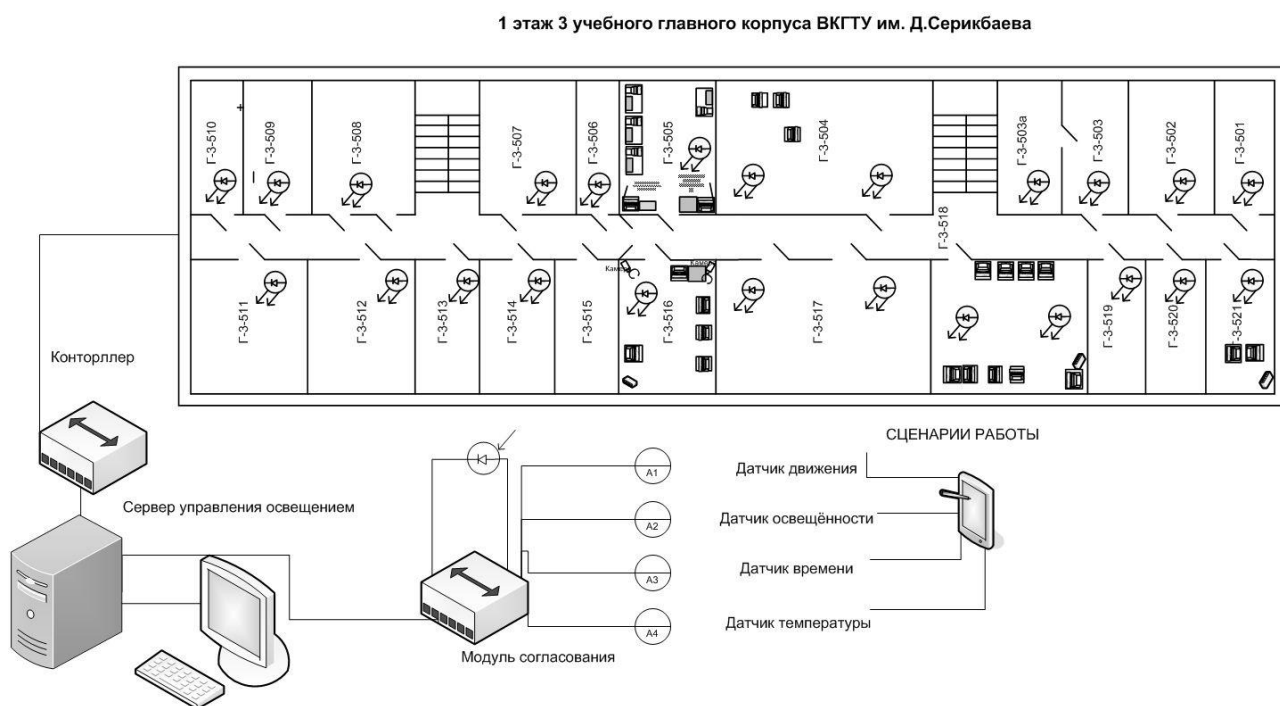


Рисунок 5.8 – Схема автоматизации и размещения светодиодных светильников

Дополнительно были установлены датчики движения и времени, которые совместно с датчиками освещенности и температуры, позволяли реализовать различные сценарии работы системы освещения всего этажа.

На втором этаже были установлены люминесцентные лампы с суммарной световой мощностью равной световой мощности светодиодных ламп первого этажа.

Для сравнительного анализа экономичности работы используемых технологий освещения для каждого сегмента были установлены электронные счётчики «Меркурий-230» [189], передающие данные на ПЭВМ. Схема подключения счетчиков к компьютеру показана на рисунке 5.9. Передача данных осуществляется по стандарту RS-485 с помощью преобразователя интерфейсов, который предназначен для преобразования интерфейса USB в CAN/RS-232/RS-485. После установки драйвера USB преобразователь интерфейсов определяется как виртуальный COM-порт.

Все интерфейсные выводы преобразователя имеют гальваническую развязку от интерфейса USB компьютера.

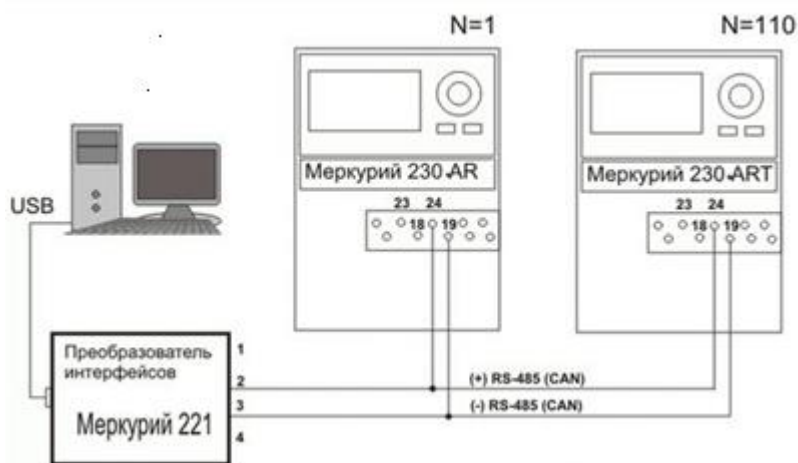


Рисунок 5.9 – Интерфейсные подключения для счётчиков «Меркурий 230-ART» с внутренним источником питания интерфейса

Для визуального наблюдения расхода электроэнергии был разработан интерфейс, демонстрирующий графики и гистограммы по энергоэффективности обоих этажей.



Рисунок 5.10 – Внешний вид подключения счетчиков с монитором

Информация, поступающая со счетчиков, передавалась на сервер и записывалась в базу данных. Это позволило провести изучение энергоэффективности автоматизированной светодиодной системы освещения.

5.2 Анализ полученных результатов, оценка эффективности работы управления системой светодиодного освещения

Разработанная прикладная программа позволяла получать информацию о расходе электроэнергии и эффективности работы систем освещения. Данные отображались на мониторе и записывались в базу данных (рисунок 5.11).

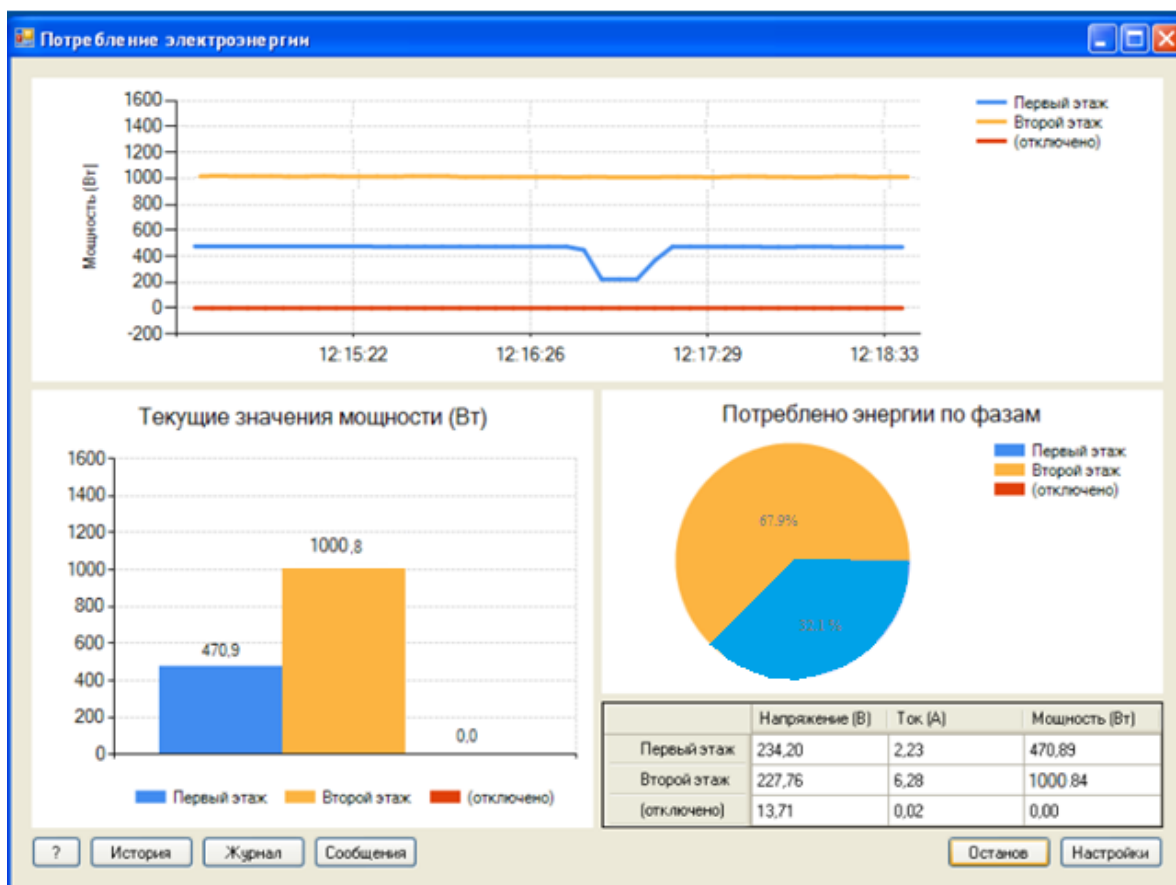


Рисунок 5.11 – Визуализация контроля расхода электроэнергии

Все рабочее поле интерфейса программы разделено на три части. Вверху отображается расход электроэнергии в реальном времени. По горизонтали откладывается текущее время (в данном случае 12 часов, 15 минут). Видно, что расход второго этажа имеет 1000 Вт, а расход первого этажа, где используется автоматизированная система светодиодным освещением, составляет 470Вт. На графике видно резкое уменьшение мощности. Это связано с демонстрацией работоспособности системы – было полностью кратковременно выключено освещение на первом этаже в районе 12 часов 17 минут.

В нижней части интерфейса показана гистограмма расхода электроэнергии. Данные гистограммы показывают точный расход электроэнергии первого и второго этажа, а также процентное содержание энергопотребление по этажам. Показанные значения на диаграмме являются средними за длительное время проведения натурных испытаний (в течении 5 месяцев).

В таблице 5.1 приведены основные технико-экономические показатели для различных видов ламп при использовании их в учебном корпусе ВКГТУ.

Таблица 5.1 – Техничко-экономические показатели для видов ламп

Показатели	Люминесцентная лампа дневного света	LED светильник	LED с датчиком присутствия
Потребляемая мощность, Вт	80	38	38
Стробоскопический эффект	есть	нет	нет
Срок службы светоизлучающего элемента, час.	12000	50000	50000
Наличие паров ртути	есть	нет	нет
Необходимость утилизации	да	нет	нет
Время работы лампы в день, час	5	5	1
Время работы лампы в год, час.	1440	1440	288
Количество ламп на этаже	12	12	12
Потребленная электроэнергия, кВт за год	1382, 4	656,64	131,33
Тариф за электроэнергию, тг/ кВт ч	12,963	12,963	12,963
Сумма к оплате за электроэнергию, тг за год	17920,05	8512,02	1702,43
Эксплуатационные расходы, тг за год	21504,06	10214,42	2042,916

Светодиодные светильники не требуют эксплуатационных расходов: их не нужно менять, утилизировать, закупать «расходники». Люминесцентные светильники требуют постоянного обслуживания, стоимость которого постоянно увеличивается примерно на 15% в год. Также люминесцентные лампы требуют утилизацию, что ещё увеличивает стоимость обслуживания на 5%.

Данные затрат на электроэнергию и общие затраты с учетом эксплуатационных расходов для одного светильника типа Армстронг в различных сегментах показаны соответственно на рисунках 5.12, 5.13.

На основании этих данных видна реальная экономия затрат на электроэнергию и экономия полных затрат на эксплуатацию использования светодиодных осветительных приборов.

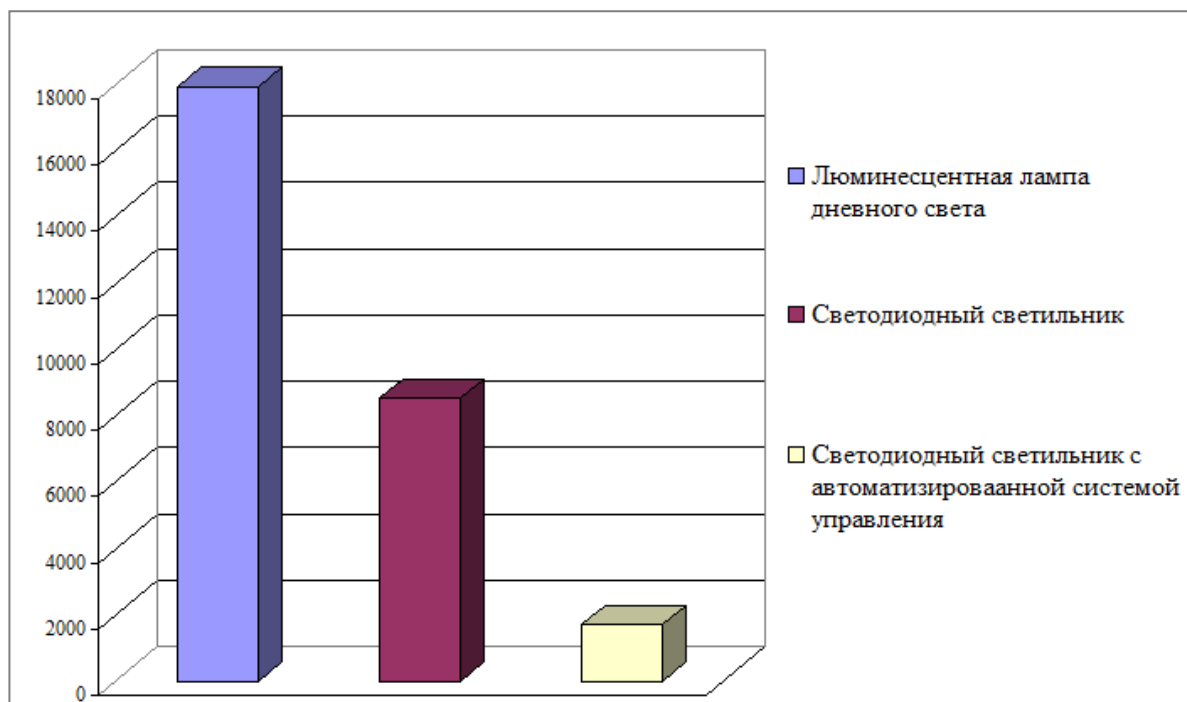


Рисунок 5.12 –Затраты на электроэнергию, тенге/год

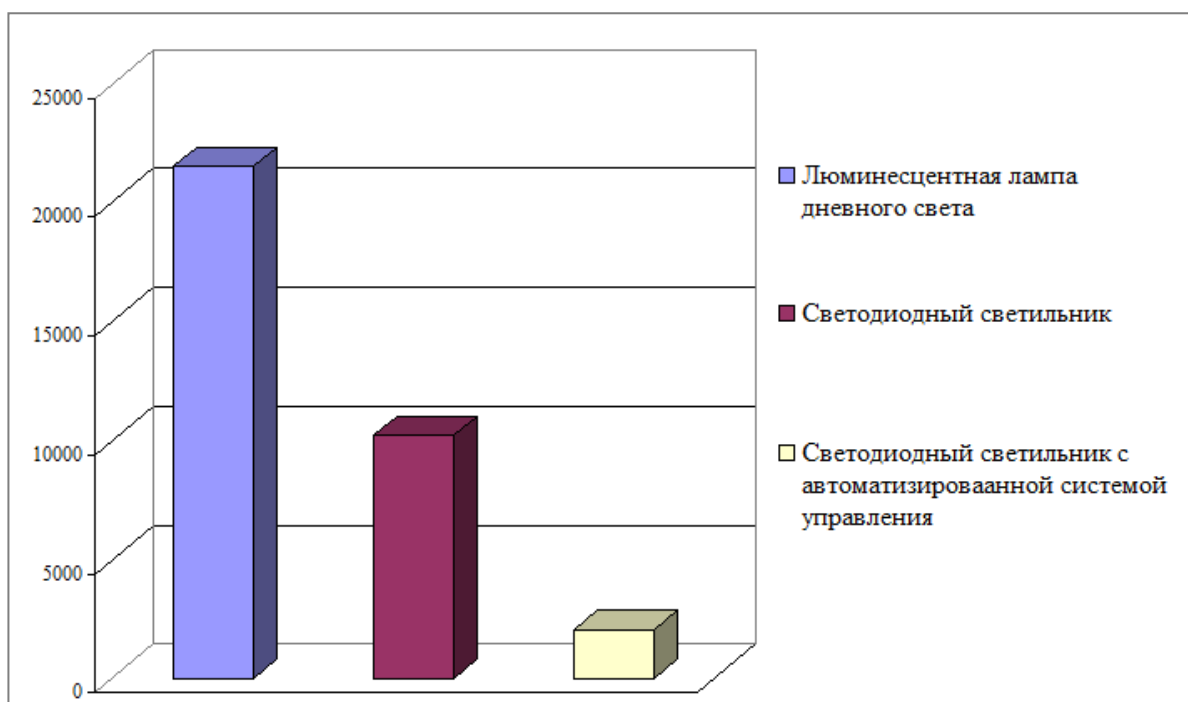


Рисунок 5.13– Общие затраты на эксплуатацию, тенге/год

В результате исследований были выделены и оптимизированы параметры светодиодной осветительной системы. Проведены натурные испытания с опытным образцом светодиодного светильника, выполненного в стандарте «Армстронг» в учебном корпусе ВКГУ им.Д.Серикбаева. Даны рекомендации по схемному решению источника питания и системе автоматизированного управления.

За время наблюдения за работой системой освещения и сравнения ее с имеющимися осветительными приборами, основанными на люминесцентных лампах были получены данные по экономии электроэнергии. Так в режиме работы светодиодной системы освещения с датчиком движения по сравнению с люминесцентными лампами экономия составляет: с датчиком движения 91%, без датчика движения 55%.

Натурные испытания показали стабильность работы разработанной системы, что позволило создать опытно-промышленный образец светодиодного осветительного прибора. Видно, что использование интеллектуальной системы освещения управления светодиодным освещением позволяет сэкономить электроэнергию практически в 10-12 раз по сравнению с имеющимся в настоящее время освещением на основе люминесцентных ламп. Также данные натурные измерения показали, что использованием светодиодов позволяет сэкономить электроэнергию в 2-3 раза даже без использования систем автоматизации.

5.3 Выводы по разделу

В данном разделе получены следующие результаты:

- разработано осветительное светодиодное устройство на базе «Армстронг» возможностью регулировки температуры и освещенности;
- разработаны принципиальные схемы драйвера светодиодов и системы управления температурой;
- реализована схема управления светодиодными светильниками для этажа учебного корпуса
- проведены натурные эксперименты по энергоэффективности созданной светодиодной системы освещения с управлением в реальном времени;
- разработаны аппаратные и программные средства для проведения сравнения светодиодного освещения и освещения с использованием люминесцентных ламп;
- проведен сравнительный анализ энергоэффективности различных систем освещения как с использованием автоматизированной системой управления, так и без нее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие основные результаты.

1. Проведен анализ современного состояния функционирования и развития светодиодной технологии освещения, в ходе которого установлено:

а) только совместное использование инновационных светодиодных светильников и автоматизированной системы управления в рамках интегрированной LED технологии освещения позволяет оптимизировать работу системы и получить максимальный экономический эффект, такой подход соответствует мировым тенденциям;

б) существующие осветительные светодиодные устройства нуждаются в совершенствовании и повышении эффективности за счет улучшения системы отвода тепла;

в) технология работы и система размещения светодиодных осветительных установок не учитывает их отличие от традиционных ламп и особенности работы, а учет этих (составляющих) факторов по сути меняет подход к использованию светодиодной технологии;

г) система управления освещением нуждается в коренном преобразовании путем полной автоматизации процесса, применения робастных систем, что позволяет оптимизировать и повысить эффективность работы и управления.

2. Впервые использован робастный подход в системе управления мощными светодиодами основанный на компенсации неопределенностей температуры мощных светодиодов белого света.

3. Проведены теоретические теплотехнические расчеты и моделирование тепломассопереноса в светодиодных осветительных конструкциях. Осуществлено численное решение уравнения Пуассона (теплопереноса) для системы «основание светодиода – кристаллик – линза – окружающий воздух».

4. Проведены исследования светотехнических характеристик мощных светодиодов при различных температурных режимах. Получены экспериментальные данные позволяющие создать оптимальную конструкцию светодиодной лампы типа «Armstrong» по критерию минимальной температуры рабочей поверхности лампы.

5. Создана экспериментальная установка, с помощью которой получены оптимальные режимы работы светодиодной осветительной системы для внутреннего освещения, подтвержденные теоретическими расчетами.

6. Разработан алгоритм и программа для исследования режимов работы светодиодной осветительной установки с контролем и управлением температуры.

7. Получены экспериментальные данные при проведении натурных экспериментов, подтверждающие энергоэффективность разработанной автоматизированной системы светодиодным освещением.

8. Проведен сравнительный анализ работы систем освещения на основе светодиодной технологии с реализацией новой автоматизированной системы и без нее, с люминесцентной системой освещения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Послание Президента Республики Казахстан Н.Назарбаева народу Казахстана «Социально-экономическая модернизация - главный вектор развития Казахстана» от 27 января 2012 г.
2. Назарбаев Н. Глобальная энергоэкологическая стратегия устойчивого развития в XXI веке. – М.: Экономика, 2011. – 194с.
3. Аналитический обзор ATF Bank Research. Энергетический рост Казахстана. 2011. – 21с.
4. Абдрахманов Е.А. Развитие энергосберегающей деятельности в Казахстане // Вестник Алматинского университета энергетики и связи. – 2013. – №3(22) – С. 16–25.
5. Давиденко Ю. Современные светодиоды // Компоненты и технологии. – 2004. – №5. – С.12-16; №6. – С. 38–43.
6. Миронов С. Интегральные драйверы для светодиодного освещения // Новости электроники. – 2010. – №10. – С. 3–12.
7. Лебедев В., Котов В., Цевелюк Е., Шестопалов С. LED-драйверы и системы управления светодиодным освещением // Полупроводниковая светотехника. – 2014. – №1. – С.48–51.
8. Махлин А. Особенности проектирования блока питания для светодиодных ламп//Полупроводниковая светотехника. – 2011. – №1. – С.30-33.
9. Отчет компании «LSRC» LED Luminaire Lifetime: Recommendations for Testing and Reporting [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://energy.gov/sites/prod/files/2015/01/f19/led_luminaire_lifetime_guide_sept2014.pdf.
10. Конопельченко А. Новые DC/DC-драйверы светодиодов от компании Peakelectronics // Современная светотехника. – 2011. – №2. – С. 34–37.
11. Соломатин М., Автушенко К. Решения компании International Rectifier для систем светодиодного освещения // Современная светотехника. – 2013. – №5. – С. 56–63.
12. РайтМ. Микросхемы драйверов светодиодов с различной функциональностью для полупроводниковых светотехнических изделий // Полупроводниковая светотехника. – 2014. – №6. – С. 6–10.
13. Камчатов А., Гальцов А. Источник постоянного тока LEDinGRAD// Современная светотехника. – 2014. – №3. – С.18–22.
14. Чистяков В. Антикризисное предложение: новые ИП для LED-светильников внутреннего освещения // Новости электроники + Светотехника. – 2015. – №1. – С.27-29.
15. Петропавловский Ю. Микросхемы драйверов светодиодов фирмы Rohm Semiconductor // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – №5. – С.42-49.
16. Каталог фирмы Rohm Semiconductor [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rohm.com/web/global/>.
17. Ромадина И. Новый линейный драйвер NSI50350 от ON Semiconductor для 1-Вт светодиодов // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – №6. – С. 27–30.

18. ON Semiconductor. Драйвера светодиодов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.onsemi.ru.com/PowerSolutions>.
19. Пазюк А. DC/DC и обвязка в мини-корпусе: модульные импульсные преобразователи Texas Instrument // Новости электроники. – 2016. – №5. – С.6–11.
20. Обзор продукции для светодиодного освещения фирмы Texas Instruments [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ti.com/llds/ti/power-management/led-driver-products.page>.
21. Пескин А. Интеллектуальные световые системы или мечты дизайнеров сбываются // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – №2. – С. 60–63.
22. Каталог продукции фирмы Makroblock [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mblock.com.tw/products.php>.
23. Каталог продукции фирмы ZETEX Semiconductors [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.diodes.com/zetex.html>.
24. Гайказьян Т. Драйверы для светодиодов на базе STMicroelectronics // Компоненты и технологии. – 2012. – №6. – С. 172–177.
25. Каталог LED-драйверов фирмы STMicroelectronics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.st.com/content/st_com/en/products/power-management/led-drivers.html.
26. Федоров А. Обзор источников питания MeanWell для светодиодного применения // Полупроводниковая светотехника. – 2012. – №5. – С.14–18.
27. Неяскин К. Светодиодные драйверы MeanWell серии ELG. Новые возможности управления освещением // Полупроводниковая светотехника. – 2016. – №1. – С. 15–21.
28. Охрименко В. Новые драйверы светодиодов и блоки питания компании MeanWell: HLG-320H-C, RPS-120 // Электронные компоненты и системы. – 2016. – №2. – С.23–26.
29. Звонарев Е. Линейные и импульсные: драйверы мощных светодиодов от Maxim // Новости электроники. – 2010. – №10. – С. 21–24.
30. Каталог LED-драйверов для светодиодов фирмы MaximIntegrated. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.maximintegrated.com/en/products/power/led-drivers.html>.
31. Обзор продукции источников питания фирмы Microchip Technology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.microchip.com/design-centers/analog/power-management/overview>.
32. Евстифеев А. Практический опыт применения микросхемы Supertex HV9910 // Компоненты и технологии. – 2009. – №12. – С. 78–80.
33. Медник А. Драйвер с широким входным диапазоном для промышленной автоматики на микросхеме от Supertex // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – №5. – С. 33–35.
34. Бакланов А.Е., Титов Д.Н., Григорьева С.В. Создание источника питания со стабилизацией тока (драйвера) для управления светодиодными элементами // Академическая наука – проблемы и достижения: мат. науч.-практ. конф. – North Charleston, USA, 2014. – Том 3. – С. 177–182.

35. Рязанов А., Кузубов С., Безрядин Н., Котов Г. Осветительный прибор на основе мощных светодиодов // Полупроводниковая светотехника. – 2012. – №5. – С.70-72.
36. Ноэль Л. Охлаждение и регулирование температурных режимов светодиодов // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – №3. – С.13–15.
37. Закс М. Теплоотводящие печатные платы для монтажа мощных светодиодов // Полупроводниковая светотехника. – 2012. – №1. – С. 2–5.
38. Гонин М. Спасительная прохлада, или теплоотвод для мощных светодиодных матриц // Новости электроники +Светотехника. – 2013. – №2. – С. 12-17.
39. Староверов К. Системы охлаждения для светодиодов // Новости электроники. – 2008. – №17. – С. 21-23.
40. Ежов В. Стандартизация и расчет тепловых характеристик мощных светодиодов // Светотехника и оптоэлектроника. – 2009. – №6. – С.42-48.
41. Поль А. Особенности расчета системы отвода тепла при использовании светодиодов в корпусах PLCC // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – №5. – С. 54-57.
42. Солдаткин В.С. Модернизация и исследование характеристик светодиода белого свечения для поверхностного монтажа: автореф. дис. на соиск. учен.степ. канд. тех. наук (05.11.07) / Солдаткин Василий Сергеевич; ТУСУР. – Томск, 2013. – 21с.
43. Akca H., Yasa Y., Ayaz R., Durusu A., Ajder A., Nakir I. and Tanrioven M. Thermal Management of Power LED System // 3rd International Conference on Renewable Energy Research and Applications Milwaukee, USA, 2014. –pp. 760-764.
44. Alexandersen J., Sigmund O., Aage N. Topology optimization of passive coolers for light-emitting diode lamps // 11th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, Sydney Australia, 2015. –pp. 16-23.
45. Van N. Thermal Management Practical Application for the High Power LED emitters [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.digikey.com/en/pdf/l/led-engin/thermal-management-practical-application>.
46. Романовский М.Н., Еханин С.Г. Методика расчета теплопереноса в светоизлучающих диодах на основе GaN // Доклады ТУСУРа. – 2011. – №2(24). – С.47-51.
47. Шибайкин С.Д., Мышонков А.Б. Моделирование тепловых процессов в светодиоде // Отраслевые аспекты технических наук. – 2012. – №8(20). – С. 29-35.
48. Мышонков А.Б. Исследование характеристик светодиодных источников света при питании импульсным током: автореф. дис. на соиск. учен.степ. канд. тех. наук (05.09.07) / Мышонков Александр Борисович; Мордовский государственный университет. – Саранск, 2012. – 22 с.
49. Пуговкин А.В., Степной В.С., Антонова А.Ю., Еремич М.А. Энергетические характеристики светодиодов и светодиодных ламп // Доклады ТУСУРа. – 2011. – №2(24). – С. 164-168.

50. Михалев А.А. Разработка системы освещения птицеводческих помещений на основе светодиодных светильников и резонансного источника питания: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. тех. наук (05.20.02) / Михалев Александр Александрович; Российский государственный аграрный заочный университет. – Москва, 2014. – 23 с.
51. Vigh V., Kalmar L., Regert T. Investigation on the thermal management of a high power LED module // Bulletin of the Transilvania University of Braşov Series I: Engineering Sciences. – 2013. – Vol. 6 (55) No. 1 – pp. 19-26.
52. Bor-Jang Tsai, Sheam-Chyun Lin and Wei-Kuo Han. Thermal analysis of a high power LED multi-chip package module // International Journal of Energy. – 2011. – Vol. 5. – pp. 79-87.
53. Rudenko O.M., Strizhak P.A. Mathematical simulation of heat transfer processes at the maximum possible electrical loads in typical light-emitting diodes // EPJ Web of Conferences, 2014 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dx.doi.org/10.1051/epjconf/20147601022>.
54. Григорьева С.В., Бакланов, А.Е., Темирбеков Н.М., Квасов А.И., Титов Д.Н. Совершенствование методики расчета теплопереноса в светодиоде и светотехническом устройстве // Вестник, Вычислительные технологии. – 2013. – Совместный выпуск. – Часть 3. – С.37-44.
55. Григорьева С.В., Бакланов А.Е., Яковлев А.Н. Математическое моделирование тепломассопереноса в системе теплоотвода для светодиода высокой мощности // Вестник Карагандинского университета. Серия Физика. – 2015. – №4(80). – С. 31-38.
56. Григорьева С.В., Короткова С.В. Создание модели, позволяющей производить расчет температурных режимов мощных светодиодов // Творчество молодых инновационному развитию Казахстана: мат. науч. конф. / ВКГТУ. – Усть-Каменогорск, 2014 г. – часть IV. – С.99-101.
57. Григорьева С.В., Бакланов А.Е., Яковлев А.Н. Численное решение задачи тепломассопереноса в системе: основание светодиода – кристалл – линза – окружающий воздух // Проблемы оптимизации сложных систем: сб. статей. – Кыргызская Республика, Булан-Соготту, 2014. – Часть 1. – С.102-108.
58. Каталог светодиодов компании Nichia [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nichia.co.jp/ru/product/led.html>.
59. Обзор светодиодной продукции компании Osram [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.osram-os.com/osram_os/ru/company.
60. Каталог светодиодной продукции фирмы Philips [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lighting.philips.ru>.
61. Каталог светодиодов фирмы Seoul Semiconductor [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.seoulsemicon.com/en/html/product>.
62. Каталог светодиодов фирмы Cree [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cree.com/LED-Chips-and-Materials>.

63. Каталог светодиодов фирмы Prolight Opto Technology Corporation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.prolightopto.com/eng/product.php>.
64. Каталог светодиодов фирмы Edison [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.edison-opto.com.tw/ru/product>.
65. Каталог светодиодов фирмы LedEngin [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ledengin.com/products>.
66. Вихарев Л. Кратко о методах и системах охлаждения // Силовая электроника. – 2005. – №4. – С. 54-59; 2006. – №1. – С. 62–67.
67. Колпаков А. Охлаждение силовых модулей: проблемы и решения // Силовая электроника. – 2012. – №3. – С.72–78.
68. Wang R., Li J. A Cooling System with a Fan for Thermal Management of High-Power LEDs // International Journal of Modern Physics. – 2010. – № 1. – pp. 196–199.
69. Luo X., Liu S. A Microjet Array Cooling System for Thermal Management of High-Brightness LEDs // IEEE Transactions on advanced packaging. – 2007. – vol. 30, no. 3. – pp. 475–484.
70. LuoX., Chen W., Sun R., Liu S. Experimental and Numerical Investigation of a Microjet-Based Cooling System for High Power LEDs // Heat Transfer Engineering. – 2008. – №29(9). – pp.774–781.
71. Liu S., Yang J., Gan Z., Luo X. Structural optimization of a microjet based cooling system for high power LEDs // International Journal of Thermal Sciences. – 2008. – №47. – pp. 1086–1095.
72. Sorensen H. Water cooling of high power light emitting diode // Proceedings of the 13th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm): Aalborg Universitet. – 2012. – pp. 968–974.
73. Wang J., Zhao X., Cai Y., Zhang Ch., Bao W. Experimental study on the thermal management of high-power LED headlight cooling device integrated with thermoelectric cooler package // Energy Conversion and Management. – 2015. – 101. – pp. 532–540.
74. Kaya M. Experimental study on active cooling systems used for thermal management of high-power multichip light-emitting diodes // Scientific World Journal. – 2014. –pp. 1–7.
75. LiJ.,MaB., WangR., HanL. Study on a cooling system based on thermoelectric cooler for thermal management of high-power LEDs // Microelectronics Reliability. – 2011. – Volume 51, Issue 12. – pp. 2210–2215.
76. Maaspuro M. Experimenting and Simulating Thermoelectric Cooling of an LED Module // International Association of Online Engineering in International Journal of Online Engineering. – 2015. – vol. 11. – pp. 47–54.
77. Шевырева А. Решение Sunon для охлаждения мощных светодиодов // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – №3. – С. 32–34.
78. Сергеев Н. Перспективные разработки ОАО «ПО «УОМЗ» в области световых приборов со светодиодами // Светотехника. – 2011. – №3. – С. 23–28.

79. Кисеев В., Черкашин В. Двухфазные теплопередающие системы для охлаждения светодиодных светильников // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – №3. – С. 27–31.
80. Смолянский В. Светильники с активным охлаждением в повестке дня. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.startbase.ru/knowledge/articles/479>.
81. Фейтл А. Технология сборки. Эффективный теплоотвод с помощью керамических подложек // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – №5. – С. 30–32.
82. Селезнев М. Легкость и компактность: новые матрицы CREE CXA2 (СХВ) на базе технологии SC5 // НЭ+Светотехника. – 2015. – №1. – С. 5–8.
83. Антипин С., Королев Г. Светодиодные матрицы против одиночных кристаллов // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – №5. – С. 54–52.
84. Международное энергетическое агентство. Тщетные усилия света: Стратегии энергоэффективного освещения, ОЭСР: МЭА, 2008. – 7с.
85. Provoost R., Goetzeler M. A global transition to efficient lighting // COP 16 United Nations Climate Change Conference Cancun Mexico, 2010. – С.84–85.
86. Старостин А., Сушков В., Микрюков А. Развитие полупроводниковой светотехники // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – №2. – С. 8–10.
87. Бабко А.Н., Инютин С.П. Энергетический и световой аудит в зданиях, сооружениях и уличном освещении: учебное пособие / Бабко А.Н., Инютин С.П.; – Астана: Издательство, 2014. – 174 с.
88. Модель взаимодействия субъектов ЖКХ // Пособие по организации управления и содержания многоквартирных жилых домов. – Астана, 2012.
89. Halonen L. Guidebook on Energy Efficient Electric Lighting for Buildings // Aalto University School of Science and Technology Lighting Unit, Finland. – 2010. – 345 p.
90. Kang H., Sung J., Park S., Kang H., Choi J., Kang T. Automatic Lighting Control System and Architecture Using Ambient Light Sensor // The Tenth International Conference on Systems. – Barcelona, 2015. – pp. 44–45.
91. Постановление Правительства Республики Казахстан от 29 августа 2013г. № 904 Об утверждении Программы «Энергосбережение – 2020».
92. Писарук Т.В. Системы автоматического управления освещением // Актуальные проблемы энергетики: мат. научной конф. / БНТУ. – Минск, 2014. – С. 135–138.
93. Garg V., Bansal N. Smart occupancy sensors to reduce energy consumption // Energy and Buildings. – 2000. – 32(1). – pp. 81–87.
94. Богданов А.А. Практика применения систем управления освещением светодиодами // Светотехника. – 2012. – №3. – С.20–28.
95. Тюкин С.В. Опыт разработки и применения систем управления освещением компании Zumtobel // Светотехника. – 2012. – №3. – С.42–44.
96. Калиниченко А.М. Системы управления освещением PHILIPS: от простого к сложному // Светотехника. – 2012. – №3. – С.28–30.

97. Гвоздев-Карелин С.В., Свиридов М.С. Системы и компоненты компании Osram для управления освещением и энергосбережения // Светотехника. – 2012. – №3. – С.30–34.
98. Вебер А. Системы управления внутренним и наружным освещением компании Vossloch-Schawbe // Светотехника. – 2012. – №3. – С.45-46.
99. Бабанова Ю.Б., Лунчев В.А. Потенциал энергосбережения при использовании системы управления внутренним освещением // Светотехника. – 2011. – №5. – С. 35-40.
100. Сайт компании АРГО. Локально-активная интеллектуальная диагностика состояния систем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://argoivanovo.ru/decision/index.php?IBL=29%27A=0&ID=3844>.
101. Пупков К.А. Методы классической и современной теории автоматического управления, 2000. – 748с.
102. Дорф Р. Современные системы управления. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832с.
103. Имангазиева А.В. Робастное управление с компенсацией возмущений : автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. тех. наук (05.13.01) / Имангазиева Алия Владимировна; Астраханский государственный технический университет. – Астрахань, 2009. – 17 с.
104. Терновая Г.Н. Робастное алгоритмическое обеспечение управляющих подсистем АСУ ТП с использованием наблюдателя : автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. тех. наук (05.13.06) / Терновая Галина Николаевна; Астраханский государственный техн. университет. – Астрахань, 2006. – 16 с.
105. Макаров И.М. Основы автоматизации управления производством. – М.: ВШ, 1983. – 504 с.
106. Фомин В.М., Фрадков А.Л., Якубович В.А. Адаптивное управление динамическими объектами – М.: Наука, 1980.
107. Фрадков А.Л. Адаптивное управление в сложных системах – М.: Наука, 1990.
108. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. – СПб.: Наука, 2000. – 550 с.
109. Никифоров В.О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений. – СПб.: наука, 2003. – 282с.
110. Györök Gy., Lakner J., and Makó M. Robust Electronic Application by PSoC // 10th IEEE Jubilee International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics-SAMI, 2012. – Slovakia, Herlany. – pp. 405-409.
111. Емельянов С.В., Коровин С.К. Новые типы обратной связи. Управление при неопределенности. – М.: Физматлит, Наука, 1997. – 352 с.
112. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах – М.: Наука, 1968.
113. Орурк И.А. Новые методы синтеза и некоторых нелинейных динамических систем. – М.: Наука, 1965. – 208 с.

114. Харитонов В.Л. Асимптотическая устойчивость семейства систем линейных дифференциальных уравнений // Дифференциальные уравнения. – 1978. – Т. 14. №11. – С. 2086-2088.
115. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление - М.:Наука, 2002.
116. Поляк Б.Г., Цыпкин Я.З. Робастная устойчивость линейных систем // Итоги науки и техники, серия Техническая кибернетика. ВИНТИ. М. – 1991. – С. 3–31.
117. Джури Е.Н. Робастность дискретных систем. Обзор // Автоматика и телемеханика. – 1990. – №5. – С. 12-21.
118. Цыкунов А.М. Робастное управление нестационарными объектами // Автоматика и телемеханика. – 1996. – №2. – С.117-125.
119. Никифоров В.О. Робастное управление линейным объектом по выходу // Автоматика и телемеханика. – 1998. – №9. – С.87-99.
120. Doyle J.C. Analysis of feedback systems with structured uncertainties // IEEE Proc. 1982. – Pt. D. V. 129. – pp. 242-250.
121. Doyle J.C, Stein G. Multivariable Feedback Design: Concepts for a Classical I Modern Synthesis II IEEE Trans. Auto. Control. 1981. Vol. AC-26. N1.
122. Zhou K., Doyle J.C. Essentials of Robust Control. – Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1998.
123. Честнов В.Н. Синтез робастных регуляторов многомерных систем при параметрической неопределенности на основе круговых частотных неравенств // Автоматика и телемеханика. – 1999. – №3. – С. 229-238.
124. Воронов К.В., Никифоров В.О. Динамический регулятор выходной переменной с компенсацией постоянных возмущений // Автоматика и телемеханика. – 2003. – №2. – С.11-21.
125. Atassi A.N., Khalil H.K. A separation principle for the stabilization of class of nonlinear systems // IEEE Trans. Automat. Control. – 1999. – Vol. 44, №9. – pp. 1672-1687.
126. Никифоров В.О. Наблюдатели внешних детерминированных возмущений // Автоматика и телемеханика. – 2004. – №10. – С. 13-24.; 2004. - №11. – С. 40-48.
127. Никифоров В.О. Нелинейная система управления с компенсацией внешних детерминированных возмущений // Изв.РАН. Теория и системы управления. – 1997. – №4. – С.69-73.
128. Цыкунов А.М. Алгоритмы робастного управления с компенсацией ограниченных возмущений // Автоматика и телемеханика. – 2007. – №7. – С.103-115.
129. Буков В.Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. - Калуга: Издательство научной литературы Н.Ф. Бочкаревой, 2006. – 720 с.
130. Воронов К.В., Королева О.И., Никифоров В.О. Робастное управление нелинейными объектами с функциональными неопределенностями // Автоматика и телемеханика. – 2001. – №2. – С. 112-121.

131. Крутова И.Н., Рутковский В.Ю. Робастность систем управления с нелинейной параметрической коррекцией к некоторым видам возмущений // Автоматика и телемеханика. – 1991. – №9. – С.145-159.
132. Цыкунов А.М. Алгоритмы робастного управления с компенсацией ограниченных возмущений // Автоматика и телемеханика. – 2007. – №7. – С. 103-115.
133. Бобцов А.А., Наговицина А.Г. Адаптивное управление по выходу линейными нестационарными объектами // Автоматика и телемеханика. – 2006. – №12. – С. 163–174.
134. Цыкунов А.М. Адаптивное и робастное управление динамическими объектами по выходу. – М.: Физматлит, 2009. – 268с.
135. Wang F., Tang C., Huang B. Multivariable Robust Control for a Red–Green–Blue LED Lighting System // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2010. – vol. 25, №2. – pp. 417-428.
136. Jakub O. Robust SISO control design for thermo-optical plant UDAQ28/LT // Elektrotechnika. – 2008. – pp. 1-8.
137. Жаринов И.О., Жаринов О.О. Модель системы автоматического управления тепловым режимом жидкокристаллической панели бортового средства индикации // Моделирование систем и процессов. – 2015. – №4. – С. 26-31.
138. Мосс Т., Баррел Г., Эллис Б. Полупроводниковая оптоэлектроника. – М.: Мир, 1976. – 214с.
139. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984. – 456с.
140. Давиденко Ю. Современные светодиоды // Компоненты и технологии. – 2004. – № 5. – С.12–16.
141. Никифоров С. Температура в жизни и работе светодиодов // Компоненты и технологии. – 2005. – № 9. – С.140– 146; 2006. – № 1. – С.42-47.
142. Закгейм А.Л. Светодиодные системы освещения: энергоэффективность, зрительное восприятие, безопасность для здоровья // Светотехника. – 2012. – №6. – С. 1-10.
143. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Электричество. – М.: Наука, 1977. – 704с.
144. Роуч П.Дж. Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир, 1980. – 618с.
145. Джалурия Й. Естественная конвекция: тепло– и массообмен. – М.: Мир, 1983. – 399с.
146. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1989. – 616с.
147. Nichia. LED NCSL219B. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nichia.co.jp/specification/products/led/NCSL219B-V1-E.pdf>.
148. Сайт компании «НЕОН-ЭК» – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.e-neon.ru/pages/id/66>
149. Григорьева С.В., Квасов А.И., Бакланов А.Е., Короткова С.В. Моделирование конструкции светодиодной матрицы с учётом оптимизации её температурных режимов // Автоматика. Информатика. – 2015. – №2(37). – С. 34–39.

150. Алямовский А.А. Инженерные расчеты в Solid Works Simulation. М.: ДМК Пресс, 2010. – 464с.
151. Григорьева С.В., Григорьев Е.А. Оптимизация размещения светодиодных осветительных приборов для организации равномерного освещения офисных помещений // Студент: наука, профессия, жизнь: мат. науч. конф./ ОГУСП. – Омск, 2015. – С.86-90.
152. Григорьева С.В., Бакланов А.Е., Квасов А.И. Моделирование и экспериментальное изучение размещения светодиодных осветителей офисных помещений // Вестник ВКГТУ. – 2015. – №3 (69). – С.114-121.
153. Руководство пользователя. DIALux основные положения. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.astz.ru/calc>.
154. Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов / В. Боровиков. – СПб.: Питер, 2003. – 688с.
155. СН РК 2.04-02-2011 Государственные нормативы в области архитектуры, градостроительства и строительства. Естественное и искусственное освещение. Издание официальное. Агентство Республики Казахстан по делам строительства и жилищно-коммунального хозяйства. – Астана: РГП «КазНИИССА», 2011. – 102с.
156. Паспорт: Светильники торговой марки «Атом Свет» серии Plant. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.atomsvet.ru/files/passports/Passport_03_07_2012\(1_module\).pdf](http://www.atomsvet.ru/files/passports/Passport_03_07_2012(1_module).pdf).
157. Моделирование процессов: учеб. пособие / В.К. Кулешов, В.А. Корнев, И.В. Дайчман, Е.В. Шильникова, Е.С. Учайкина, М.Н. Янушевская; Томский политехнический университет. – Томск, 2013. – 312с.
158. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов / В.Е. Гмурман. – 9-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2003. – 479с.
159. Светильники PHILIPS. Сайт ЗАО «Компания Технолог». – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zao-tehnolog.ru/page863432>.
160. Каталог: HALLA Lighting производство светотехники. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.halla.ru/images/Halla_Lighting_2015.pdf.
161. Thearticle: Arduino Uno. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>.
162. Levkowitz H., Herman G.T. GLHS: A Generalized Lightness, Hue and Saturation Color Model// CVGIP: Graphical Models and Image Processing. – 1993. – 55 (4). – pp. 271-285.
163. Maureen C. A Survey of Color for Computer Graphics// Course at SIGGRAPH. – 2001. – 55с.
164. Çelik T., Lilley C., David Baron L. CSS3 Color Module. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.w3.org/TR/2008/WD-css3-color-20080721/#hsl-color>.
165. Poynton C. Frequently Asked Questions About Color. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.poynton.com/ColorFAQ.html>.

166. Hanbury A., Serra J. A 3D-polar Coordinate Colour Representation Suitable for Image Analysis // Pattern Recognition and Image Processing Group Technical Report 77. – Vienna, Austria: Vienna University of Technology. – 2002.
167. Joblove G.H., Greenberg D. Color spaces for computer graphics// SIGGRAPH '78 Proceedings of the 5th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. – ACM New York, NY, USA, 1978. – pp.20–25.
168. Grigoryeva S., Baklanov A., Gyorok Gy, Titov D. The robust systems based on programmable analogous electronic circuits // Вестник КазНТУ. – 2015. – №5(111). – С. 294-301.
169. Gyorok Gy., Mako M., Lakner J. Combinatorics at electronic circuit realization in FPAA // Acta Polytechnica Hungarica, 2009. – №6(1). – pp. 151–160.
170. Zhou K., Ren Z. A new controller architecture for high performance robust, and fault-tolerant control // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2001. – vol. 46(10). – pp. 1613–1618.
171. Gyorok Gy. Embedded Hybrid Controller with Programmable Analog Circuit // IEEE 14th International Conference on Intelligent Engineering Systems. – 2010.– pp. 277-280.
172. Grigoryeva S., Baklanov A., Gyorok Gy. The FPAA Realization of Analog Robust Electronic Circuit // Проблемы оптимизации сложных систем: Труды XI Международной Азиатской школы-семинара. – Чолпон-Ата, Кыргызская Республика, 2015. – Ч.1.–С.217-223.
173. Маттео Менжини, Гауденцио Менжессо, Энрико Занони, Маттео Да Лаго, Никола Тривеллин. Разработка надежных светодиодных источников освещения // Полупроводниковая светотехника. – 2013. – №5. – С.61-64.
174. Григорьева С.В., Квасов А.И., Титов Д.Н. Двухконтурное регулирование параметрами системы светодиодного освещения // Автоматика. Информатика. – 2014. – №2(35). – С.23-28.
175. Grigoryeva S., Gyorok Gy. Search of optimal parameters for work of led lighting system // Зеленая экономика – будущее человечества: материалы Международной научно-практической конференция. – Усть-Каменогорск, Казахстан, 2014. – С.530-539.
176. Grigoryeva S., Baklanov A. and Titov D. The practical realization of robustness for LED lighting control systems// 11th International Forum on Strategic Technology. June 1-3, 2016, Novosibirsk, Russia, Part 2 – С.52-57.
177. Денисенко В. Протоколы и сети ModBus и ModBusTCP // Современные технологии автоматизации. – 2010. – №4. – С.90-94.
178. Григорьева С., Квасов А., Бакланов А., Анохин Е. Свидетельство о государственной регистрации прав на объект авторского права под названием «Система автоматизированного управления светодиодным освещением с элементами робастности (программа для ЭВМ)» №2336 от 9.11.2016г.
179. Григорьева С.В., Квасов А.И., Бакланов А.Е. Автоматизированная система управления светодиодным освещением с компенсацией возмущения на основе робастности // Вестник КазНТУ. – Алматы. 2016. – №3(115). – С.338–345.

180. Grigoryeva S., Baklanov A., Györök Gy. Control of LED Lighting Equipment with Robustness Elements // *Acta Polytechnica Hungarica*. – Budapest. 2016. – v.13, № 5. – pp.105–119.
181. Григорьева С.В., Дмитриев А.К., Головин Н.Н., Бакланов Е.В. Фемтосекундный стандарт частоты с внешним высокодобротным интерферометром // *Оптика и спектроскопия*. – 2016. – т.121, №6. – С. 159-162.
182. Grigoryeva S., Dmitriev A., Baklanov E., Golovin N. Stabilisation of a femtosecond frequency standard using a Michelson interferometer // *VIIth International Symposium and Young Scientists School «Modern problems of laser physics»*. – Novosibirsk, Russia. 2016. – p.138
183. Microchip Technology Inc. HV9910B Universal High-Brightness LED Driver. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20005344A.pdf>
184. Hebei I.T. (Shanghai) Co., Ltd. Thermoelectric Cooler. TEC1-12706 – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.hebeiltd.com.cn/peltier.datasheet/TEC1-12706.pdf>.
185. Grigoryeva S., Baklanov A., Györök Gy. Intelligent control of LED luminaries // *9th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas „New Faculty, New Ability!” AIS 2014*. – Hungary. 2014. – pp. 87-91.
186. Texas Instruments. LM723/LM723C Voltage Regulator - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ti.com>.
187. dr. Györök Gy. Számítógéppelvezés I. Budapest – 2013. – 254 с.
188. STMicroelectronics. STM32F4 Series microcontrollers. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.st.com>.
189. ООО «НПК «Инкотекс». – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.incotexcom.ru/m230ar.htm>.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акты внедрения



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Григорьевой С.В. «Оптимизация светодиодных систем освещения с элементами робастного управления»

Мы нижеподписавшиеся, директор ТОО «Айрон-Техник» Дмитриев Александр Сергеевич с одной стороны и докторант группы 13-DAY-3 специальности 6D070200 «Автоматизация и управление» ВКГТУ имени Д. Серикбаева Григорьева Светлана Владимировна с другой стороны, составили акт о том, что результаты диссертационной работы внедрены в разработке макета осветительного прибора при выполнении ТОО «Айрон-Техник» договора № 772 от 09.11.2015г.

Результаты внедрения показали, что полученные в диссертации оптимальные параметры работы автоматизированной светодиодной системы освещения являются достоверными и могут быть использованы при разработке промышленных светодиодных систем освещения.

Директор ТОО «Айрон-Техник»



А.С. Дмитриев

Докторант ВКГТУ им. Д. Серикбаева

С.В. Григорьева

**ТОО «Лаборатория альтернативной
энергетики»**

Исх. № 57-К от 16.05.16г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Григорьевой С.В. на тему
«Оптимизация светодиодных систем освещения с элементами робастного
управления» ТОО «Лаборатория альтернативной энергетики»

Настоящий акт составлен на основании проведенных натурных исследований автоматизированной светодиодной осветительной системы на базе ТОО «Лаборатория альтернативной энергетики». В результате полученных экспериментальных данных разработанная в диссертации автоматизированная светодиодная система освещения с элементами робастности внедрена в ТОО «Лаборатория альтернативной энергетики» для освещения служебных помещений.

Важным является использование в системе управления контура регулирования температуры, что позволило увеличить срок службы работы светодиодных светильников по сравнению с аналогичными световыми приборами и обеспечить срок службы, заявляемый производителями.

В результате долговременной работы внедренного опытного образца системы освещения была получена экономия энергии по сравнению с существующими системами на основе люминесцентных светильников на 55%, что согласуется с данными представленными в диссертации.

Генеральный директор



А. Панфилов А. Панфилов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Свидетельство о государственной регистрации прав на объект авторского права

Авторлық құқық объектісіне құқықтарды
мемлекеттік тіркеу туралы

ҚУӘЛІК

№ 2336 9 қараша 2016 ж.

Қазақстан Республикасы Әділет министрлігінде
авторлардың өтініші бойынша авторлары Светлана
Владимирова Григорьева, Александр Евгеньевич
Бакланов, Андрей Иванович Квасов, Евгений
Александрович Анохин болып табылатын авторлық
құқықпен қорғалатын объектіге айрықша мүлкілік
құқықтар «Система автоматизированного управления
светодиодным освещением с элементами
робастности» (ЭЕМ-ге арналған бағдарлама)
атауымен тіркелгені куәландырылады.

Авторлардың өтініші бойынша авторлық құқықпен
қорғалатын объектіге айрықша мүлкілік құқықтар және
2016 жылғы 1 маусымда жасалған объекті
С.В. Григорьевая, А.Е. Бакланов, А.И. Квасов,
Е.А. Анохинге тиесілі және авторлар жорарыда
көрсетілген объектіні жасаған кезде басқа адамдардың
зияткерлік меншік құқығы бұзылмағандығына кепілдік
береді.

Тізілімде 2016 жылғы 9 қарашада жасалған
№ 2336 жазба бар.

Министрдің орынбасары

ҚУӘЛІК

Э. Әзімова

СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации прав
на объект авторского права

№ 2336 9 ноября 2016 г.

Настоящим удостоверяется, что в Министерстве
Юстиции Республики Казахстан зарегистрированы
исключительные имущественные права на объект
авторского права под названием «Система
автоматизированного управления светодиодным
освещением с элементами робастности»
(программа для ЭВМ), авторами которого по
заявлению авторов являются Григорьева Светлана
Владимировна, Бакланов Александр Евгеньевич,
Квасов Андрей Иванович, Анохин Евгений
Александрович.

По заявлению авторов исключительные
имущественные права на объект авторского права,
созданный 1 июня 2016 года, принадлежат
Григорьевой С.В., Бакланову А.Е., Квасову А.И.,
Анохину Е.А. и авторы гарантируют, что при создании
вышеуказанного объекта не были нарушены права
интеллектуальной собственности других лиц.

Запись в реестре за № 2336 от 9 ноября
2016 года выдана.

Заместитель министра

СВИДЕТЕЛЬСТВО

Э. Азімова

ис. 006461

Отчет госбюджетной НИР МОН РК

РГП на ПХВ «ВОСТОЧНО-КАЗАХСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Д. СЕРИКБАЕВА» МОН РК

Ректор

УТВЕРЖДАЮ
Ректор ВКГТУ им. Д. Серикбаева
Ж.К. Шаймарданов
« » 2015г.

по теме:

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В СВЕТОДИОДНЫХ
УСТАНОВКАХ СОВМЕЩЁННОГО ОСВЕЩЕНИЯ С
АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ: АЛГОРИТМЫ,
ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ, ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ МАКЕТ НА
ЭКСПО 2017
(заключительный)


ПОДПИСЬ, дата

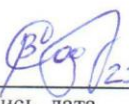
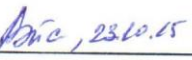
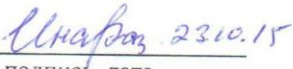
Д. ТИТОВ


ПОДПИСЬ, дата

А. Бакланов

Усть-Каменогорск 2015

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы к.ф.-м.н., зав.кафедрой	 _____ подпись, дата	А. Бакланов (разделы 3, 4, заключение)
Ведущий научный сотрудник д.т.н., профессор	 23.10.2015 _____ подпись, дата	А. Квасов (разделы 1, введение)
Старший научный сотрудник, директор департамента	 _____ подпись, дата	Д. Титов (раздел 2, 3,4)
Научный сотрудник, докторант группы 13- DAY-3	 23.10.15 _____ подпись, дата	С. Григорьева (раздел 1,2)
Техник, зав. лабораторией кафедрыПиАТП	 23.10.2015 _____ подпись, дата	Д. Васьков (раздел 3, 4)
Студент группы 12-АУ-1	 23.10.2015 _____ подпись, дата	Е. Григорьев (раздел 2, 4)
Студент группы 12-АУ-1	 23.10.15 _____ подпись, дата	А. Райс (раздел 3, 4)
Нормоконтролер	 23.10.15 _____ подпись, дата	И. Фызылова

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Технические параметры осветительных приборов

1 Светодиодный светильник PLANT 02-25-3000-31 (120)

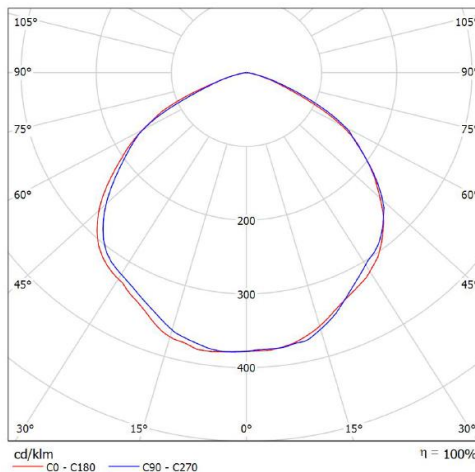


Рисунок Г.1 – Диаграмма светового распределения PLANT 02-25-3000-31 (120)

Таблица Г.1

Технические параметры PLANT 02-25-3000-31 (120)

Параметр	Значение
Питающее напряжение / частота, В/Гц	150-265 / 50
Потребляемая мощность, Вт	31
Световой поток светильника, лм	3120
Цветовая температура, К	5000
Индекс цветопередачи Ra	>80
Масса светильника, кг	2,2
Габаритные размеры светильника, мм	270 x 200 x 110
Ресурс светодиодов, ч	> 50 000
Рабочий диапазон температур, °С	от -60 до +60
Степень защиты	IP67
Тип КСС и угол оптики, °	Косинусная, 120

2 Люминесцентный светильник DIAL 23 TCW 596S-158 I-D2 NB

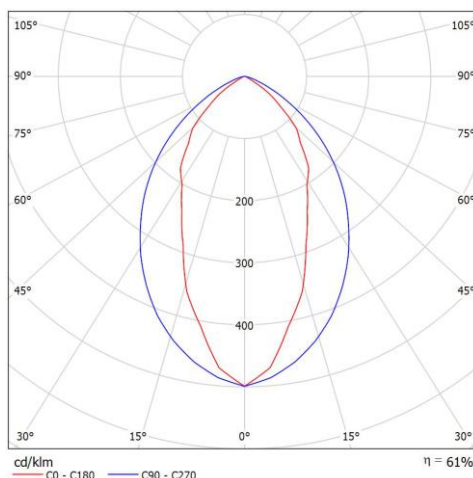


Рисунок Г.2 – Диаграмма светового распределения DIAL 23 TCW 596S-158 I-D2 NB

Таблица Г.2

Технические параметры DIAL 23 TCW 596S-158 I-D2 NB

Параметр	Значение
Питающее напряжение / частота, В/Гц	220-240 / 50-60
Потребляемая мощность, Вт	65
Световой поток светильника, лм	3174
Индекс цветопередачи Ra	85
Ресурс лампы, ч	20 000
Масса светильника, кг	6,1
Габаритные размеры светильника, мм	1570×188×152
Тип светового пучка	Узкий

3 Светодиодный светильник PLANT 02-16-2400-26 (120)

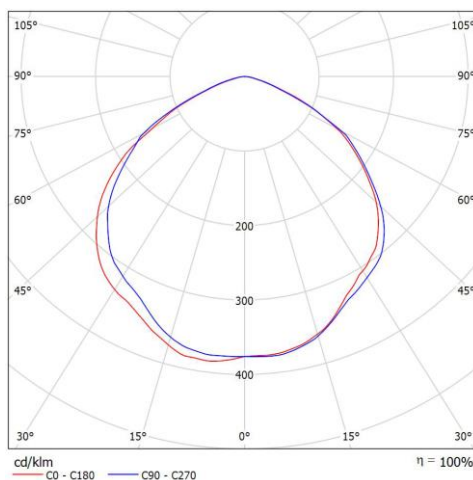


Рисунок Г.3 – Диаграмма светового распределения PLANT 02-16-2400-26 (120)

Таблица Г.3

Технические параметры PLANT 02-16-2400-26 (120)

Параметр	Значение
Питающее напряжение / частота, В/Гц	150-265 / 50
Потребляемая мощность, Вт	26
Световой поток светильника, лм	2400
Цветовая температура, К	5000
Индекс цветопередачи Ra	>80
Масса светильника, кг	2,2
Габаритные размеры светильника, мм	270 x 200 x 110
Ресурс светодиодов, ч	> 50 000
Рабочий диапазон температур, °С	от -60 до +60
Степень защиты	IP67
Тип КСС и угол оптики, °	Косинусная, 120

4 Люминесцентный светильник DIAL 3 BS-158C 900-Leuchte

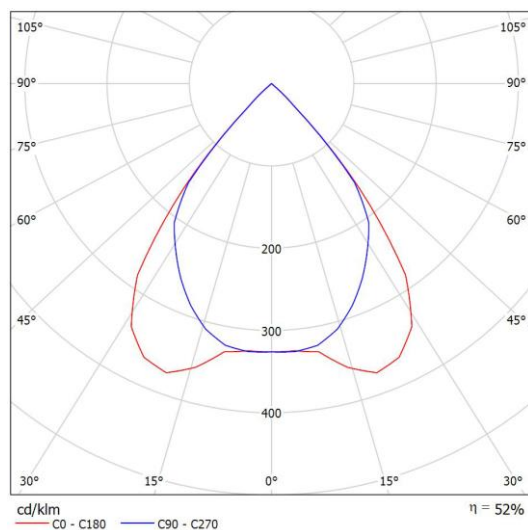


Рисунок Г.4 – Диаграмма светового распределения DIAL 3 BS-158C 900-Leuchte

Таблица Г.4

Технические параметры DIAL 3 BS-158C 900-Leuchte

Параметр	Значение
Питающее напряжение / частота, В/Гц	220 / 50
Потребляемая мощность, Вт	58
Световой поток светильника, лм	2400
Тип ПРА	ЭПРА/ЭмПРА
Цоколь	G13
Масса светильника, кг	5,1
Габаритные размеры светильника, мм	1960×127×65
Степень защиты, IP	20