ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КГТУ»)

На правах рукописи

Харитонов Максим Сергеевич

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ НА ОБЪЕКТАХ МОРСКОЙ ИНДУСТРИИ

Специальность 05.26.02
«Безопасность в чрезвычайных ситуациях (в морской индустрии)»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: заслуженный работник рыбного хозяйства Российской Федерации
доктор технических наук, профессор
Белей Валерий Феодосиевич

Калининград – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение …… 4

Глава 1 Анализ проблем электромагнитной совместимости систем освещения объектов морской индустрии …… 14

1.1 Анализ тенденций развития источников света …… 14

1.2 Источники света в системах освещения судов …… 18

1.3 Анализ аварийных ситуаций, обусловленных или сопряженных с нарушением нормальной работы электрооборудования морских судов….. 22

1.4 Анализ нормативных документов по электромагнитной совместимости систем освещения на основе светодиодных источников света ……..… 26

1.4.1 Анализ нормативных требований к показателям качества электроэнергии в системах электроснабжения объектов морской индустрии…… 26

1.4.2 Анализ нормативных требований к оптическому излучению и светобиологической безопасности светодиодных источников света на объектах морской индустрии …….. 31

1.5 Обзор и анализ исследований в области электромагнитной совместимости систем освещения на основе светодиодных источников света …….. 34

Цели и задачи исследования …… 49

Глава 2 Разработка методик исследования характеристик светотехнических изделий на основе светодиодов …… 50

2.1 Разработка экспериментальной установки и лабораторной методики исследований энергетических характеристик светодиодных источников света …… 50

2.2 Разработка инженерной методики исследования энергетических характеристик светодиодных источников света …… 64

Выводы по второй главе …… 66

Глава 3 Исследование энергетических характеристик светодиодных светотехнических изделий …… 67

3.1 Экспериментальные исследования энергетических характеристик светодиодных ламп …… 67

3.1.1 Результаты исследований светодиодной лампы Ikea 6,3 Вт …… 68

3.2 Анализ результатов исследований светодиодных ламп …… 71
3.3 Исследование энергетических характеристик светодиодных световых приборов …… 75
3.4 Расчет дозы фликера в системах освещения на основе светодиодных источников света …… 77
3.5 Исследование стробоскопического эффекта в системах освещения на основе светодиодных источников света…… 82
Выводы по третьей главе …… 84
Глава 4 Исследование электромагнитной совместимости светодиодных источников света в системах электроснабжения объектов морской индустрии …… 85
4.1 Анализ систем освещения ряда судов флота рыбной промышленности 85
4.2 Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости и качества электроэнергии в системе освещения судна типа БМРТ …… 90
4.3 Разработка и исследование на математической модели судовой электроэнергетической системы распространения высших гармоник тока …… 96
4.4 Экспериментальные исследования распространения токов высших гармоник в судовой электроэнергетической системе…… 105
4.5 Экспериментальные исследования гармоник тока и напряжения в системе электроснабжения объекта берегового базирования …… 107
4.6 Разработка устройства для обеспечения электромагнитной совместимости систем освещения на основе светодиодных источников света …… 109
Выводы по четвертой главе …… 115
Заключение …… 116
Список сокращений и условных обозначений…… 119
Список литературы …… 120
Приложение А Результаты экспериментальных исследований светодиодных ламп…… 128
Приложение Б Документы, подтверждающие внедрение (возможность применения) результатов диссертационного исследования …… 142

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Функционирование объектов морской индустрии обеспечивается совокупностью технических систем, в том числе систем освещения, от которых зависит безаварийность технологического процесса и безопасность в чрезвычайных ситуациях. Системы освещения объектов морской индустрии построены преимущественно на основе ламп накаливания и разрядных ламп. Однако в настоящее время осуществляется повсеместное внедрение надежных, экологичных и энергоэффективных светодиодных источников света, в том числе на объектах морской индустрии.

Системы освещения функционируют во взаимосвязи с электроэнергетическими и биологическими (персонал) системами объектов морской индустрии. При возникновении чрезвычайных ситуаций, обусловленных или сопряженных с нарушением нормальной работы электрооборудования, системы освещения объектов морской индустрии функционируют в особых условиях, характеризующихся снижением величины напряжения, кратковременными прерываниями напряжения с последующим самозапуском светильников, переключением на электроснабжение от резервных источников питания.

Светодиодные (СД) источники света, являясь нелинейной нагрузкой, оказывают воздействие на питающую электрическую сеть, ухудшая общую электромагнитную обстановку и снижая надежность работы систем в чрезвычайных ситуациях. В то же время СД источники света воспринимают электромагнитные помехи со стороны сети и способны через колебания светового потока (фликер) и пульсации освещенности воздействовать на организм человека, вызывая повышенную утомляемость и головные боли. Взаимосвязь данных факторов определяет уровень электромагнитной совместимости систем освещения – их способности при нормальной работе не оказывать недопустимых электромагнитных воздействий на питающую сеть и обеспечивать безопасное для человека оптическое излучение при наличии искажений питающего напряжения в электрической сети.

Недостаточная изученность вопросов электромагнитной совместимости СД источников света и отсутствие в действующих стандартах, правилах и санитарных нормах требований и методов контроля для СД световых приборов затрудняет обеспечение электромагнитной совместимости СД систем освещения как в нормальных условиях, так и в чрезвычайных ситуациях.

Таким образом, комплексные теоретические и экспериментальные исследования, направленные на обеспечение электромагнитной совместимости СД освещения в систе-

мах электроснабжения объектов морской индустрии и повышение устойчивости функционирования данных систем в условиях чрезвычайных ситуаций являются актуальной и важной задачей.

Степень проработанности темы. Значительная часть исследований в области СД светотехники связана с вопросами светобиологической безопасности, в то время как вопросы электромагнитной совместимости исследованы в недостаточной степени. Проблемы воздействия СД источников света на питающую сеть рассмотрены в работах ряда авторов: С. А. Янченко, Г.Я. Вагин, С.А. Цырук, Т. В. Анчарова, Д. Николаев, С. Миронов. Вопросы пульсаций светового потока СД источников света исследуются в работах Л.П. Варфоломеева, А. Архипова, А. Зорькина, С.А. Георгобиани, и др. Значимый вклад в адаптацию методики оценки дозы фликера при использовании СД источников света внесен коллективом авторов: К.Е. Лисицкий, А.В. Струмеляк. Вопросы эксплуатации СД систем освещения на судах исследуются в зарубежной литературе, главным образом, с позиций экономической эффективности, аспекты электромагнитной совместимости практически не рассматриваются.

Таким образом, существующее состояние исследований в области электромагнитной совместимости СД источников света и систем освещения на их основе характеризуется отсутствием системности и единой методологии исследований, что затрудняет сопоставление имеющихся результатов. Исследования по данному направлению применительно к системам освещения судов практически отсутствуют.

Целью диссертационной работы является проведение комплекса теоретических и экспериментальных исследований энергетических характеристик светодиодных источников света и особенностей их функционирования в составе систем освещения в обычных и чрезвычайных ситуациях для обеспечения электромагнитной совместимости светодиодного освещения в системах электроснабжения объектов морской индустрии.

Поставленная цель предусматривает решение следующих задач:

– разработка методик исследования энергетических характеристик СД источников света;

– экспериментальные исследования энергетических характеристик СД источников света при параметрах напряжения, характерных для нормальных и аварийных режимов;

– экспериментальные исследования показателей электромагнитной совместимости и качества электроэнергии в системах электроснабжения объектов морской индустрии в нормальных и аварийных режимах;

– разработка математической модели судовой электроэнергетической системы морского судна и исследование электромагнитной совместимости СД светотехнических изделий в системах освещения судов;

– разработка рекомендаций по обеспечению электромагнитной совместимости СД источников света в системах освещения объектов морской индустрии в нормальных условиях и при чрезвычайных ситуациях.

Научная новизна работы состоит в следующем:

– выявлены взаимосвязи между параметрами процессов на всех этапах преобразования энергии от электрической сети до излучаемого светового потока в СД источниках света;

– разработаны математические модели судовой электроэнергетической системы для исследования распространения высших гармонических (ВГ) составляющих тока, отличительной особенностью которых является использование метода контурных токов для расчета распространения гармоник тока кратных трем и метода узловых потенциалов для высших гармонических составляющих тока не кратных трем;

– обоснованы предложения по обеспечению электромагнитной совместимости светотехнических изделий на основе СД в системах освещения объектов морской индустрии в обычных условиях и при чрезвычайных ситуациях (Пат. РФ 158871, МПК H02J 3/01, опуб. 20.01.2016; бюл. № 2);

– предложена и обоснована методика расчета дозы фликера для практических целей на основе анализа амплитудно-временной характеристики освещенности, измеренной при помощи цифрового люксметра.

Методы исследований. При выполнении диссертационной работы для решения поставленных задач использовались методы экспериментального исследования, системного анализа и математического моделирования. При проведении исследований использовались программы MathCAD, Neplan, MS Excel.

Степень достоверности результатов проведенных исследований подтверждается достаточной и соответствующей инженерной точности сходимостью полученных аналитических результатов с фактическими данными экспериментальных исследований.

Теоретическая значимость работы

– разработаны математические модели судовой электроэнергетической системы для исследования распространения ВГ составляющих тока, эмиссируемых нелинейной осветительной нагрузкой;

– выявлены взаимосвязи между параметрами процессов на всех этапах преобразования энергии от электрической сети до излучаемого светового потока в СД источниках света.

Практическая значимость работы

– получены результаты экспериментальных исследований энергетических характеристик СД светотехнических изделий при параметрах напряжения, характерных для нормальных и аварийных режимов;

– разработано фильтрокомпенсирующее устройство для трехфазных систем электроснабжения с нелинейными нагрузками;

– впервые измерены и проанализированы значения токов включения СД источников света в электрической сети с позиций обеспечения функционирования систем рабочего и аварийного освещения при чрезвычайных ситуациях;

– выявлены особенности распространения ВГ составляющих тока, эмиссируемых СД источниками света в судовой электроэнергетической системе.

– установлено, что стробоскопический эффект в системах освещения, построенных на основе СД источников света может проявляться при наличии механизмов с частотой вращения 6000 об/мин и коэффициенте пульсаций освещенности более 10%.

Практическая значимость работы подтверждена актом внедрения и справкой о возможности внедрения результатов диссертационного исследования.

Основные положения, выносимые на защиту.

– методики экспериментальных исследований характеристик электромагнитной совместимости СД источников света, реализованные на основе комплекса приборов для измерения энергетических характеристик СД источников света на всех этапах преобразования энергии;

– результаты экспериментальных исследований энергетических характеристик СД источников света при параметрах напряжения, характерных для нормальных и аварийных режимов;

–методика расчета дозы фликера на основе анализа амплитудно-временной характеристики освещенности, измеренной при помощи цифрового люксметра;

– математические модели судовой электроэнергетической системы для ВГ составляющих тока.

Основное содержание работы

В первой главе выполнен обзор и анализ проблем электромагнитной совместимости систем освещения объектов морской индустрии. По результатам выполненного анализа сформулированы цель и задачи исследования.

Светодиодные источники света превосходят по эксплуатационным характеристикам лампы накаливания и разрядные лампы. Разрядные лампы, как правило, содержат пары ртути и поэтому представляют биологическую опасность, имеют низкий коэффициент мощности и являются источником высших гармонических составляющих тока. Анализ рынка светотехнической продукции показывает рост доли СД источников света при сокращении доли ламп накаливания.

Воздействие СД источников света на электрическую сеть, главным образом, зависит от конструкции встроенного блока питания (драйвера) и связано с потреблением реактивной мощности и эмиссией в сеть ВГ составляющих тока. Токи ВГ, распространяясь от СД источников света по электрической сети, создают электромагнитные поля с частотами от 50 Гц до 40 кГц и более, которые оказывают воздействие на организм человека.

Основные требования к электромагнитной совместимости систем освещения береговых объектов морской индустрии содержатся в ряде соответствующих ГОСТ, правилах по искусственному освещению и санитарных правилах и нормах; для морских судов – в Правилах Российского морского регистра судоходства и Нормах искусственного освещения на судах морского флота. Анализ исследований показал, что существующий подход к определению одного из важнейших показателей электромагнитной совместимости – дозы фликера – не может быть применен к СД источникам света.

Нормы искусственного освещения на судах морского флота устанавливают требования к минимальной освещенности только для люминесцентных ламп и ламп накаливания. Правилами Регистра установлены единые требования к освещенности для СД ламп и ламп накаливания. Однако СД источники света могут иметь значительный коэффициент пульсаций освещенности и быть причиной стробоскопического эффекта, повышая риск травматизма и возникновения чрезвычайных ситуаций. Таким образом, су-

ществующий комплекс нормативных документов по вопросам освещения морских судов не содержит однозначных требований для систем освещения на основе СД изделий.

Во второй главе представлена разработанная лабораторная методика исследования характеристик СД светотехнических изделий при параметрах напряжения, характерных для нормальных и аварийных режимов. Проведены исследования взаимосвязи энергетических характеристик и конструктивных особенностей СД лампы с характеристиками её светового потока, по результатам которого предложена упрощенная инженерная методика исследования.

Разработанная лабораторная методика основана на измерении амплитудно-временных зависимостей для энергии на входе драйвера (Uвх, Iвх), на выходе драйвера (Uвых, Iвых) и оптического излучения СД модуля (E). Измерения осуществляются при помощи анализатора качества электроэнергии Fluke-434, осциллографа, люксметра-пульсметра и мультиметров.

Для исследования процессов преобразования энергии в СД источнике света при помощи осциллографа были проведены измерения амплитудно-временных характеристик $u_{вх}(t)$, $i_{вх}(t)$, $u_{вых}(t)$, $i_{вых}(t)$ и E(t). Исследование распространения ВГ тока по элементам светодиодной лампы произведено методом гармонического анализа измеренных амплитудно-временных характеристик путем представления в виде тригонометрического ряда Фурье с использованием программного пакета Mathcad. Напряжение на выходе выпрямителя является пульсирующим, при этом преобладающей является гармоническая составляющая второго порядка.

В третьей главе рассмотрены результаты экспериментальных исследований энергетических характеристик СД источников света, предложена методика оценки дозы фликера по колебаниям освещенности.

Экспериментальные исследования проведены по разработанной инженерной методике для 20 образцов: восьми СД ламп и двенадцати СД световых приборов (светильников и прожекторов). Для СД ламп определены зависимости энергетических характеристик от величины напряжения в электрической сети и получены амплитудно-временные характеристики освещенности, которые были исследованы путем гармонического анализа методом разложения в ряд Фурье для определения частоты пульсаций освещенности (светового потока).

Проведенные исследования показали, что у всех рассмотренных образцов световой поток пульсирует с частотой 100 Гц, что обусловлено работой двухполупериодного выпрямителя в составе электрической схемы драйвера СД источника света. Помимо частоты пульсаций для всех образцов СД изделий измерен коэффициент пульсаций освещенности по ГОСТ Р 54945-2012. Выявлено, что большинство исследованных СД светильников и прожекторов имеют более низкий коэффициент пульсаций освещенности, чем исследованные СД лампы, у которых данный показатель значительно различается, что характерно как для изделий от различных производителей, так и для продукции одного производителя.

Анализ результатов исследований показывает, что стробоскопический эффект в системах освещения, построенных на основе СД источников света, может проявляться при наличии механизмов с частотой вращения 6000 об/мин и коэффициенте пульсаций освещенности более 10%. При этом возникновение стробоскопического эффекта более вероятно при освещении СД лампами, для которых характерен больший по величине коэффициент пульсаций освещенности.

На основе анализа результатов исследований выявлено, что существующие СД источники света могут быть разделены на изделия с регулируемым (зависящим от величины напряжения на вводе) и стабилизированным световым потоком. Изменение светового потока СД ламп со стабилизированным световым потоком при изменении величины питающего напряжения от 100 до 250 В составляет не более 10% от номинального значения, что позволяет обеспечить требования по освещенности при снижении величины напряжения в питающей сети в результате возникновения чрезвычайных ситуаций.

Проведённые на лабораторной установке исследования показали, что изменения светового потока СД источника света определяются характером изменения тока, протекающего через СД в соответствии с его вольт-амперной характеристикой. Поскольку доза фликера является количественной характеристикой воздействия светового потока на организм человека, то её величина может быть с инженерной точностью оценена на основе анализа амплитудно-временной характеристики освещенности по выражению для дозы колебаний освещенности.

Для оценки воздействия СД источников света на питающую сеть проведено измерение токов включения ламп и СД приборов при помощи анализатора Fluke-434. Выявлено, что для ряда СД световых приборов ток включения может достигать двенадцати-

кратного значения по отношению к номинальному. В системах аварийного освещения одновременное подключение световых приборов с большим током включения при высокой скорости его нарастания способно вызвать срабатывание защитных аппаратов, что может привести к неработоспособности системы аварийного освещения в условиях возможной чрезвычайной ситуации.

В четвертой главе приведены результаты исследований электромагнитной совместимости СД источников света в системах электроснабжения объектов морской индустрии. Выполнен анализ систем электроснабжения промысловых судов проектов «Атлантик-333», «В-673», «1288», «Атлантик-488». Проведено экспериментальное исследование качества электроэнергии в судовой электроэнергетической системе БМРТ «Алексей Аничкин». Анализ результатов исследований показывает, что в исследуемой судовой электроэнергетической системе в режиме стоянки с питанием от дизель-генератора показатели качества электроэнергии удовлетворяют требованиям правил классификации и постройки морских судов и ГОСТ 32144-2013. В ходе экспериментальных исследований выявлено, что в системах освещения судов преобладающей ВГ тока является составляющая пятого порядка.

Для анализа распространения ВГ тока в судовой сети БМРТ «Алексей Аничкин» разработаны две математические модели: на основе метода контурных токов для расчета распространения гармоник тока кратных трем и метода узловых потенциалов для ВГ составляющих тока не кратных трем. Модели разработаны для расчетного участка судовой электроэнергетической системы, соответствующего режиму работы во время проведения экспериментальных исследований.

Расчет методом контурных токов осуществляется в матричной форме для трехлинейной схемы замещения с учетом емкостной проводимости между линией и корпусом. Поскольку токи источников на стороне низкого напряжения совпадают по фазе, то токи ВГ третьего порядка в сети высокого напряжения за пределами обмоток трансформатора равны нулю. Следовательно, в судовой электроэнергетической системе при соединении трансформатора по схеме «треугольник-звезда» токи ВГ, кратных трем, эмиссируемые в осветительные сети симметричной нелинейной осветительной нагрузкой, не распространяются в силовую сеть напряжением 380 В.

Анализ распространения ВГ тока, не кратных трем, выполнен с использованием метода узловых потенциалов. Задача нахождения коэффициентов гармонических со-

ставляющих в узлах расчетной схемы решена методом матричных уравнений узловых потенциалов.

Произведена оценка возможности повышения надежности функционирования системы освещения судна в чрезвычайных ситуациях путем её оснащения СД источниками света в качестве перспективного варианта за счет прямой замены линейных люминесцентных ламп ЛБ-18 (потребляемая мощность 18 Вт, световой поток 850 лм) в существующих светильниках на СД линейные лампы СЛТ8 с потребляемой мощностью 8 Вт и световым потоком 750 лм. Как следует из результатов расчета, показатели несинусоидальности напряжения для большинства ВГ составляющих увеличились незначительно, что обусловлено: 1) уменьшением суммарной потребляемой СД светильниками мощности в сравнении с люминесцентными; 2) высоким сопротивлением судовой сети для протекания преобладающих у СД светильников токов третьей гармоники. Наибольшее увеличение несинусоидальности приходится на пятую и седьмую ВГ составляющие напряжения. В то же время замена существующих линейных люминесцентных ламп (светоотдача 47,2 лм/Вт) на СД аналоги со светоотдачей 93,8 лм/Вт обеспечивает уменьшение установленной мощности осветительных приборов судна на 55%. Это существенно повышает устойчивость функционирования судовых систем освещения, в том числе, освещения безопасности, при чрезвычайных ситуациях, сопровождающихся ограничениями электроснабжения.

Исследования на математических моделях подтверждены результатами экспериментальных исследований распространения ВГ тока на лабораторной установке, моделирующей судовую электроэнергетическую систему с нелинейной осветительной нагрузкой. Выявлено, что ВГ тока третьего порядка выпадает из гармонического состава токов СД источников света; токи ВГ не кратных трем, эмиссируемые нелинейной нагрузкой, распространяются по судовой электроэнергетической системе через трансформаторы со схемой соединения «треугольник-звезда» без нулевого провода.

Особенности функционирования систем освещения на основе СД источников света на объектах берегового базирования выявлены путем экспериментального исследования уровней и распространения ВГ тока и напряжения на промышленном объекте, система освещения которого построена преимущественно на основе СД светильников. Исследование проведено при помощи прибора Fluke-434 в точке присоединения кабельной линии системы освещения к шинам центрального распределительного пункта для режима

электроснабжения объекта от единой энергосистемы и от аварийного дизель-генератора (резервного источника в условиях чрезвычайных ситуаций).

Анализ осциллограмм токов в фазных и нулевом проводниках показывает, что по нулевому проводнику в системе освещения протекает преимущественно ток с частотой 150 Гц, что соответствует ВГ тока третьего порядка, обусловленной функционированием СД светильников. При этом величина тока в нулевом проводнике составляет от 75 до 98 % значения тока фазного проводника.

Таким образом, величина ВГ тока, эмиссируемых СД источниками света в питающую сеть, в частности, величина ВГ третьего порядка, должны учитываться при построении систем освещения в целях недопущения перегрузки нулевых проводников, а так же при проектировании системы аварийного электроснабжения и выборе резервных источников энергии. С учетом результатов проведенных исследований функционирования СД светильников в трехфазных системах электроснабжения с нулевым проводником разработано фильтрокомпенсирующее устройство для компенсации тока третьей гармоники и повышения качества электроэнергии в нормальных условиях и при чрезвычайных ситуациях (Пат. РФ 158871, МПК H02J 3/01, опуб. 20.01.2016; бюл. № 2).

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на восьми международных научных конференциях и форумах, в том числе: на III и IV международных научных конференциях «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии» г. Калининград, 2015, 2016 г.; на международной научной конференции «Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании», г. Москва, 2015 г.; на международном симпозиуме по противодействию бедствиям «Symposium on disaster resilience and built environment education», г. Хаддерсфилд, Англия, 2015г.; на IV Международной научно-практической конференции «Экономика, оценка и управление недвижимостью и природными ресурсами», г. Вильнюс, Литва, 2014 г.; на XXII международном технологическом конгрессе «Новые технологии газовой, нефтяной промышленности, энергетики и связи», г. Калининград, 2015 г.; на X и XII международных научных конференциях «Инновации в науке, образовании и бизнесе 2014», г. Калининград, 2012, 2014г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано восемнадцать печатных работ, четыре из которых в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК Минобранауки РФ, и получен один патент на полезную модель.

1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ИНДУСТРИИ

1.1 Анализ тенденций развития источников света

В настоящее время в мире на нужды освещения расходуется около 19% всей производимой электроэнергии [1]. В системах освещения используются: лампы накаливания (ЛН): традиционные и галогеновые; газоразрядные лампы низкого давления – люминесцентные лампы (ЛЛ): линейные и компактные; газоразрядные лампы высокого давления (ГРЛВД): ртутные, натриевые и другие; светодиодные (СД) лампы и светильники, а также изделия на основе органических светодиодов. Перечисленные источники света были разработаны, внедрены в производство и получили массовое распространение в различные периоды времени, однако продолжают совершенствоваться и по сей день (рисунок 1.1) [2].

Основным оценочным критерием энергоэффективности источника света является светоотдача η (1.1). Следует отметить, что светоотдача может определяться как для самого источника света, так и для изделия на его основе с учетом потерь во встроенных пускорегулирующих аппаратах и драйверах.

$$\eta = {}^{\Phi_v}/_{P}\,, \tag{1.1}$$

где Φ_v – световой поток, излучаемый источником света;

P – потребляемая мощность.

Для источников света значение также имеют влияние на живые организмы и питающую сеть (уровень электромагнитной совместимости), срок службы, вопросы экологичности и утилизации. Характеристики коммерчески доступных светотехнических изделий различного типа представлены в таблице 1.1 [3].

Как следует из таблицы, используемые в настоящее время типы ламп значительно различаются по показателям энергоэффективности. Первые образцы ЛН появились в середине XIX в., а к началу XX в. была представлена ЛН с вольфрамовой нитью накала и с заполнением колбы инертным газом. К настоящему времени ЛН являются устаревшими и энергонеэффективными. Модернизация изделия с наполнением колбы лампы парами галогенов позволила незначительно увеличить удельную светоотдачу и срок службы.

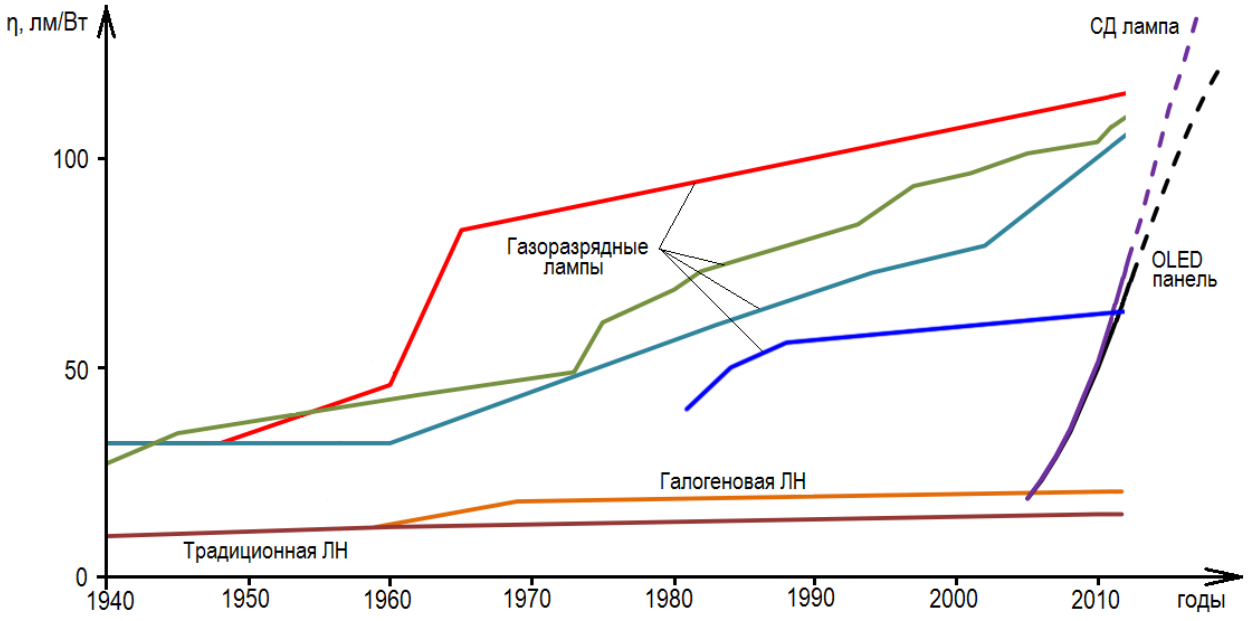


Рисунок 1.1 – Развитие технологий источников света и совершенствование их световой отдачи η [2]

Талица 1.1 – Характеристики различных типов ламп

Источник света	Тип лампы	Достигнутая светоотдача, лм/Вт	Цветовая температура, К	Срок службы, тыс. ч.	Наличие вредных веществ
Нить накаливания	Накаливания с инертным газом	15	2700	1	нет
	Накаливания галогеновая	20	2700-2800	до 10	
Электриче-ский разряд в газе	Линейная ЛЛ	108	2700-6500	25	ртутные разрядные лампы содержат до 10 мг ртути (ядовитое вещество 1ого класса опасности)
	Компактная ЛЛ	70	2700-6500	12	
	ГРЛВД малой мощности	104	3000	15	
	ГРЛВД большой мощно-сти	115	3100	15	
Светодиод	СД лампа	102 (205) [1]	2700-6000	до 100	нет

[1] Указана достигнутая светоотдача серийных изделий на основе СД с учетом эффективности драйвера и оптической системы (102 лм/Вт) и собственная светоотдача (205 лм/Вт) отдельного светодиода (передовые разработки)

Максимальная светоотдача формируемого вольфрамовой нитью накаливания излучения достигается при температуре его плавления и составляет 53,5 лм/Вт [4], что является теоретическим пределом для данного типа ламп.

Основной альтернативой для прямой замены ЛН до настоящего времени являлись компактные люминесцентные лампы, которые были представлены на массовый рынок в 1980х годах. Ввиду сравнительно большей удельной светоотдачи данные лампы принято считать энергосберегающими. Однако, несмотря на повышенную эффективность, уровень внедрения данных ламп в мире не превышает 20 % [5]. Причиной тому является ряд недостатков: экологическая опасность данных ламп (таблица 1.1), сравнительно высокая цена, отличный от естественного линейчатый спектр излучения, постепенный износ люминофора. Кроме того, ЛН и компактные ЛЛ на практике достигли своего предела светоотдачи. Так, по прогнозам специалистов потенциал роста их светоотдачи до 2030г. оценивается в 5 % [6].

Газоразрядные лампы высокого давления большой мощности являются энергоэффективным светотехническим решением (таблица 1.1), но применяются в основном на промышленных объектах и для уличного освещения.

В ряде государств, включая РФ и страны Евросоюза [7,8], на законодательном уровне реализуется политика постепенного сокращения доли ЛН в системах освещения в рамках программ в области повышения энергетической эффективности, либо уже произведен полный отказ от их использования [9,10]. В то же время в рамках Минаматской конвенции о ртути [11] и различных национальных программ по соображениям экологии и безопасности биосферы происходит постепенный отказ от большинства типов ртутьсодержащих газоразрядных ламп.

В то же время с учетом недостатков технологий ЛН и компактных ЛЛ перспективным является интенсивно развивающееся производство СД ламп. В основе данных ламп лежат светодиоды – надежные в эксплуатации источники света с высокой светоотдачей (таблица 1.1). Недостатком изделий на основе СД на данный момент является их высокая стоимость, что обусловлено особенностями конструкции (рисунок 1.2). Для продолжительной работы СД модулю необходим отвод тепла, что обеспечивается за счет установки радиаторов. Поскольку работа СД осуществляется на постоянном токе, то в состав СД лампы входит полупроводниковый преобразователь (драйвер), преобразующий электрическую энергию с переменного тока в постоянный. В итоге СД лампа является

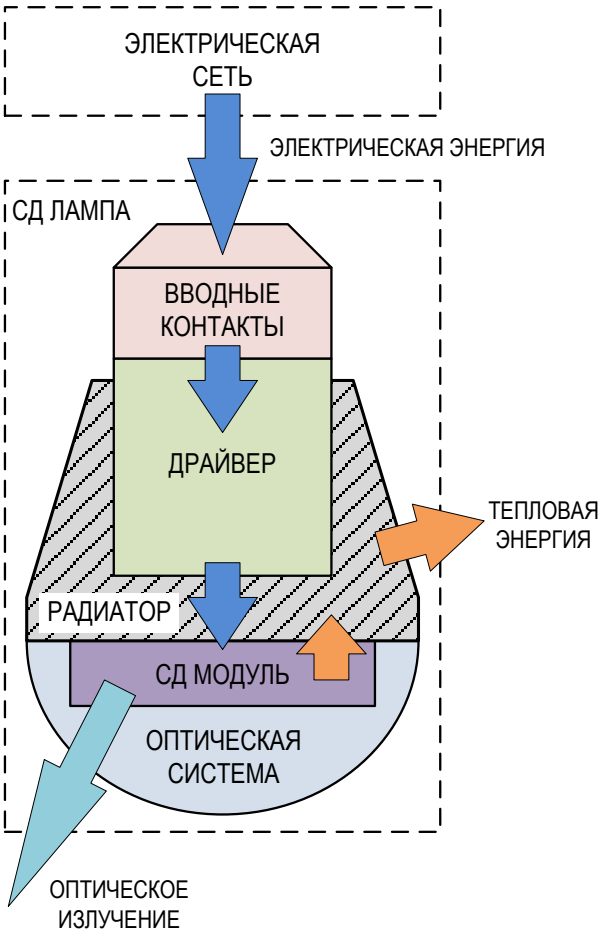


Рисунок 1.2 – Структурная схема светотехнических изделий на основе светодиодов

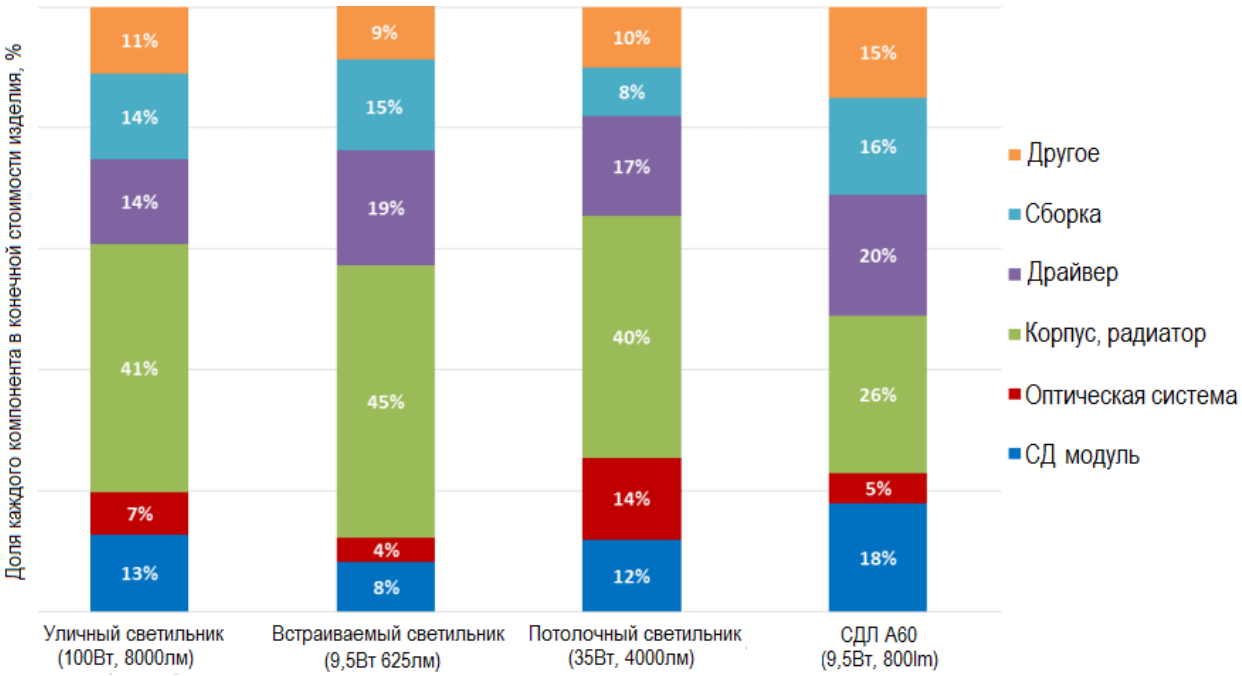


Рисунок 1.3 – Структура затрат на производство различных типов светотехнических изделий на основе светодиодов [12]

нелинейным элементом для электрической сети. Таким образом, стоимость изделия формируется из стоимости отдельных компонентов и затрат на сборку (рисунок 1.3) [12]. При этом стоимость отдельных составляющих и конечного изделия зависит от его технических характеристик.

Несмотря на сравнительно высокую стоимость СД ламп, анализ рынка светотехнической продукции (рисунок 1.4) [13] показывает тенденцию к реструктуризации и дает прогноз роста доли светодиодных ламп на фоне сокращения доли ЛН.

Кроме того, прогноз специалистов [14] указывает на ожидаемое снижение стоимости светодиодных ламп в ближайшей перспективе. На рисунке 1.5 представлена динамика изменения цен на современную светотехническую продукцию: СД лампы и компактные ЛЛ. К 2020 году прогнозируется снижение стоимости СД ламп для массового рынка до уровня компактных ЛЛ.

1.2 Источники света в системах освещения судов

Системы освещения судов являются составной частью комплекса по обеспечению безаварийного технологического процесса, а так же безопасности в чрезвычайных ситуациях, что обуславливает повышенные требования к надежности их функционирования.

Особенности судовой системы освещения можно рассмотреть на примере промыслового судна проекта «Атлантик-488» (рисунок 1.6, а), схема судовой электроэнергетической системы (ЭЭС) которого приведена на рисунке 1.6, б. Как следует из рисунка, судовая ЭЭС имеет два уровня напряжений с трансформаторной развязкой. Таким образом, системы освещения электрически отделены от мощных искажающих нагрузок на напряжении 380 В. В то же время некоторые искажающие нагрузки присутствуют и в сетях 220 В. В связи с этим возникают вопросы, связанные с обеспечением электромагнитной совместимости систем освещения и судовой ЭСС.

Требования к системам освещения судов и источникам света приводятся в нормативных документах Российского морского регистра судоходства: Правила классификации и постройки морских судов (КПМС) [15], Правила классификационных освидетельствований судов в эксплуатации; санитарных нормах и правилах для морских судов [16,17], в том числе, судов промыслового флота [18,19].

В настоящее время системы освещения отечественных судов реализованы преимущественно с использованием светотехнических изделий на основе ЛЛ и ЛН. Однако на рынке уже представлены и внедряются в системы освещения судовые светильники

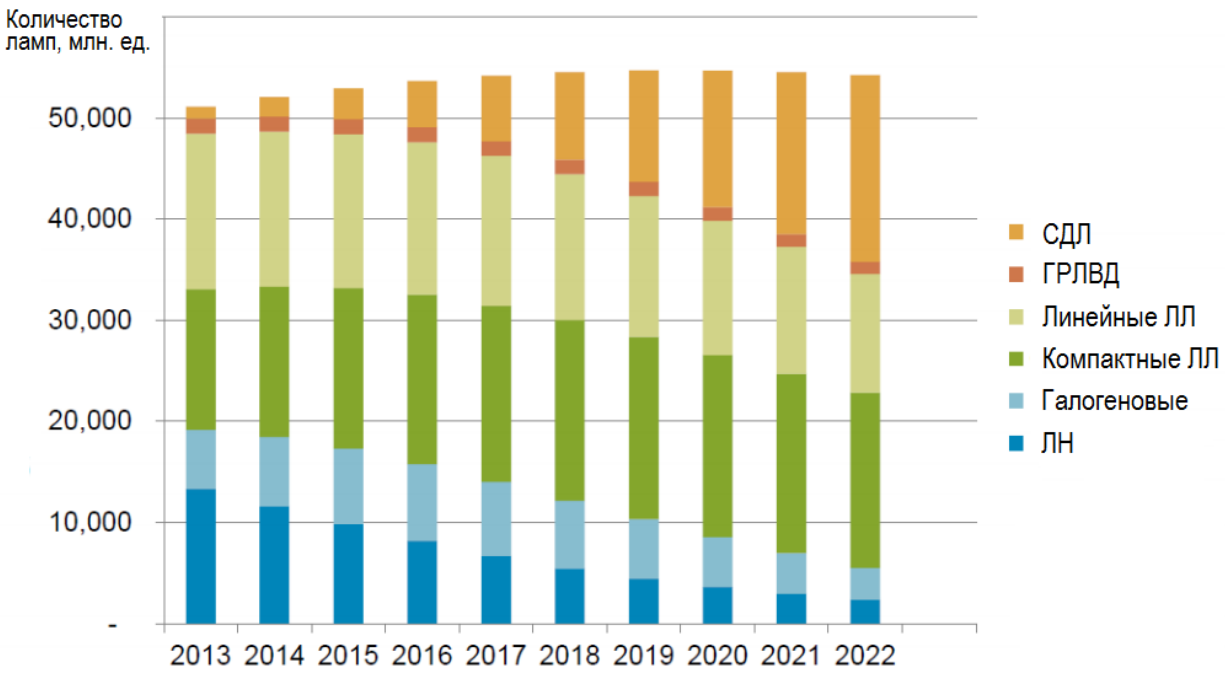


Рисунок 1.4 – Тенденции и перспективы изменения структуры совокупности установленных светотехнических устройств (в мире, по годам) [13]

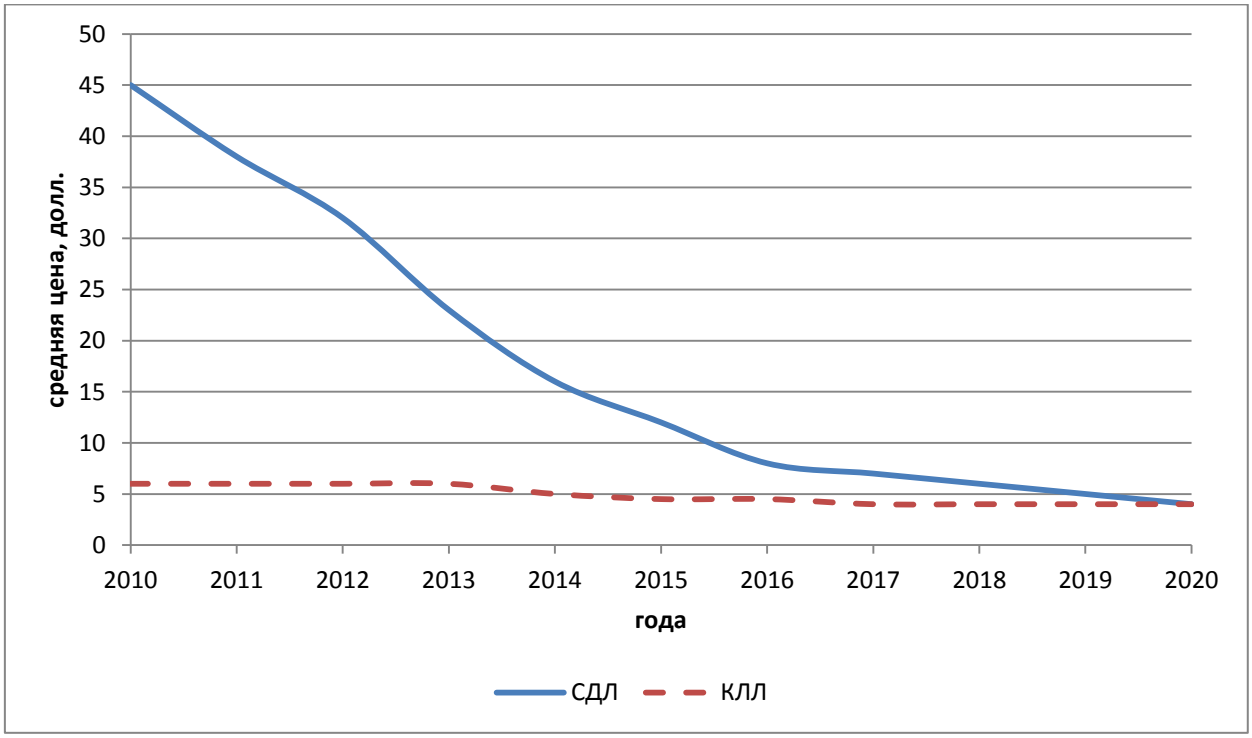
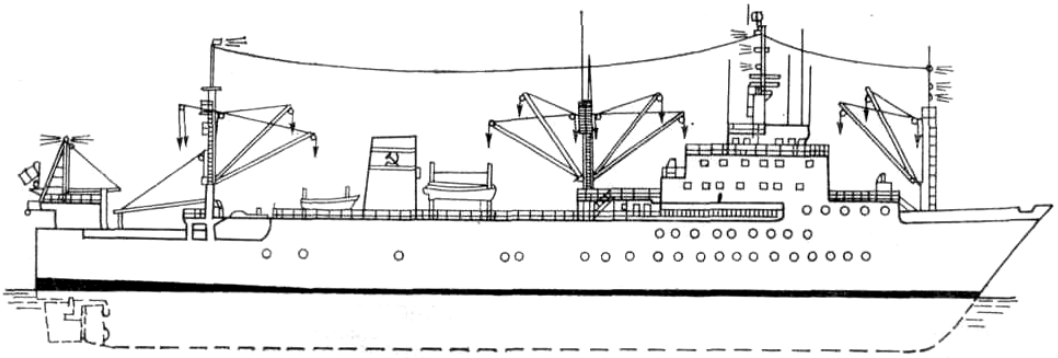
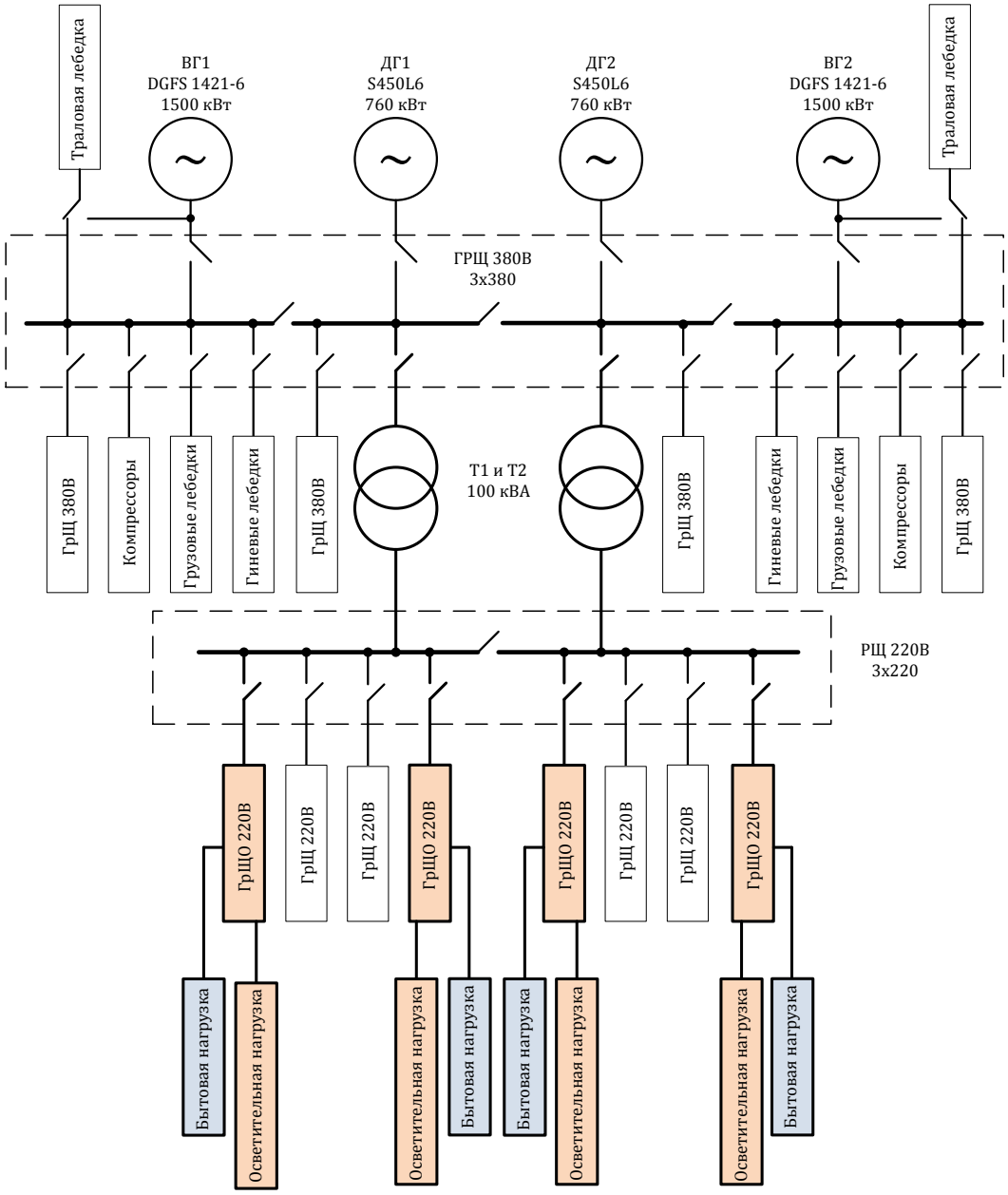


Рисунок 1.5 – Динамика и прогноз средней стоимости СДЛ и КЛЛ [14]

а)



б)



ВГ – валогенератор; ДГ – дизель-генератор; Т – трансформатор;
ГРЩ – главный распределительный щит; РЩ – распределительный щит;
ГрЩ – групповой щит; ГрЩО – групповой щит системы освещения

Рисунок 1.6 – Общий вид (а) и схема системы освещения в составе судовой ЭЭС (б) промыслового судна проекта «Атлантик-488»

различного назначения и исполнений на основе СД. Применение СД освещения на судах допускается Правилами КПМС (часть XI): в таблице 6.7.1 (таблица 1.2), содержащей требования к освещенности отдельных помещений и пространств нормы приводятся как для ЛН, так и для ЛЛ и СД ламп. Следует отметить, что информация о СД лампах была внесена в Правила сравнительно недавно, что явилось следствием успешного опыта внедрения светильников на основе СД на судах под влиянием общемировых тенденций.

Таблица 1.2 – Требования к освещенности помещений морских судов

№ п/п	Помещения и поверхности	Освещенность, лк			
		ЛЛ		ЛН и СДЛ	
		общая+ местная	общая	общая + местная	общая
1	Пост радиосвязи:				
	на установленном уровне над палубой	-	-	-	100
	рабочие столы поста радиосвязи	-	-	200	-
2	Навигационная рубка:				
	на установленном уровне над палубой	-	100	-	50
	навигационные столы	150	-	150	-
3	Рулевая рубка на установленном уровне над палубой	-	75	-	50
4	Машинные помещения, помещения распределительных щитов, маневренных и контрольных постов и пультов, помещения автоматизированных устройств, гирокомпасов:				
	на установленном уровне над настилом	-	75	-	75
	поверхности распределительных устройств и пультов управления	200	100	150	75
	места управления главными механизмами	150	100	150	75
	проходы между котлами, механизмами, трапы, площадки	-	75	-	30
	фронт котлов	100	75	75	75

В зависимости от назначения и расположения к судовым светильникам могут предъявляться особые требования по надежности: брызго- и влагозащищенность; взрывобезопасность; устойчивость к вибрациям и ударам. Надежность функционирования рабочего и аварийного освещения определяется взаимосвязью характеристик светотехнических изделий и качества электрической энергии в судовой электроэнергетической системе: допустимыми отклонениями и колебаниями напряжения, что определяет, в том числе, постоянство светового потока.

1.3 Анализ аварийных ситуаций, обусловленных или сопряженных с нарушением нормальной работы электрооборудования морских судов

По данным РМРС на данный момент класс Регистра имеют более 5,5 тыс. судов. Из них 37% судов - суда для генерального груза, 19% - балкеры, 14% - танкеры, 11% - рыболовные суда. При этом флот под надзором Регистра характеризуется высоким средним возрастом и малым средним тоннажем судов [20]. Динамика изменения среднего возраста судов представлена на рисунке 1.7. Увеличение среднего возраста судов сопряжено с износом основных систем, обеспечивающих безопасное функционирование судна в нормальных и чрезвычайных ситуациях.

Анализ исследований в области аварийности морских судов [20-22] показывает, что в большинстве случаев аварии обусловлены комбинацией отказов оборудования и других случайных событий (различные внешние воздействия и человеческий фактор: случайные ошибки персонала и нарушение правил эксплуатации), возникающих на различных стадиях развития аварии. К внешним воздействиям в данном случае можно отнести сложную навигационную и ледовую обстановку, погодные условия и т.д. Следует отметить, что в ряде случаев вовремя предпринятые действия персонала могут предотвратить возникновение серьезных аварий в случае отказа технической системы [20].

На рисунке 1.8 приведены данные о распределении аварий на судах по видам оборудования. Из данных рисунка следует, что отказы электрооборудования являются одной из наименее вероятных причин крупных аварий на судах. В то же время с увеличением возраста судов возрастает степень износа электрооборудования и снижается надежность функционирования судовой ЭЭС. Данную тенденцию можно рассмотреть на примере промысловых судов, эксплуатируемых сверх нормативного срока. Оборудование на устаревших судах имеет низкие показатели надежности, что оказывает влияние на безопасность мореплавания и эффективность промысловой работы. Несмотря на периодические обновления и капитальные ремонты, средний срок службы электрооборудования, установленного на данных рыбопромысловых судах, достаточно велик [23].

На рисунке 1.9 приведены результаты анализа среднего срока службы электрооборудования промысловых судов. Более 85 % всего электрооборудования эксплуатируется более 15 лет. При этом экономическая целесообразность и практическая реальность не способствуют замене устаревшего оборудования в ближайшие годы.

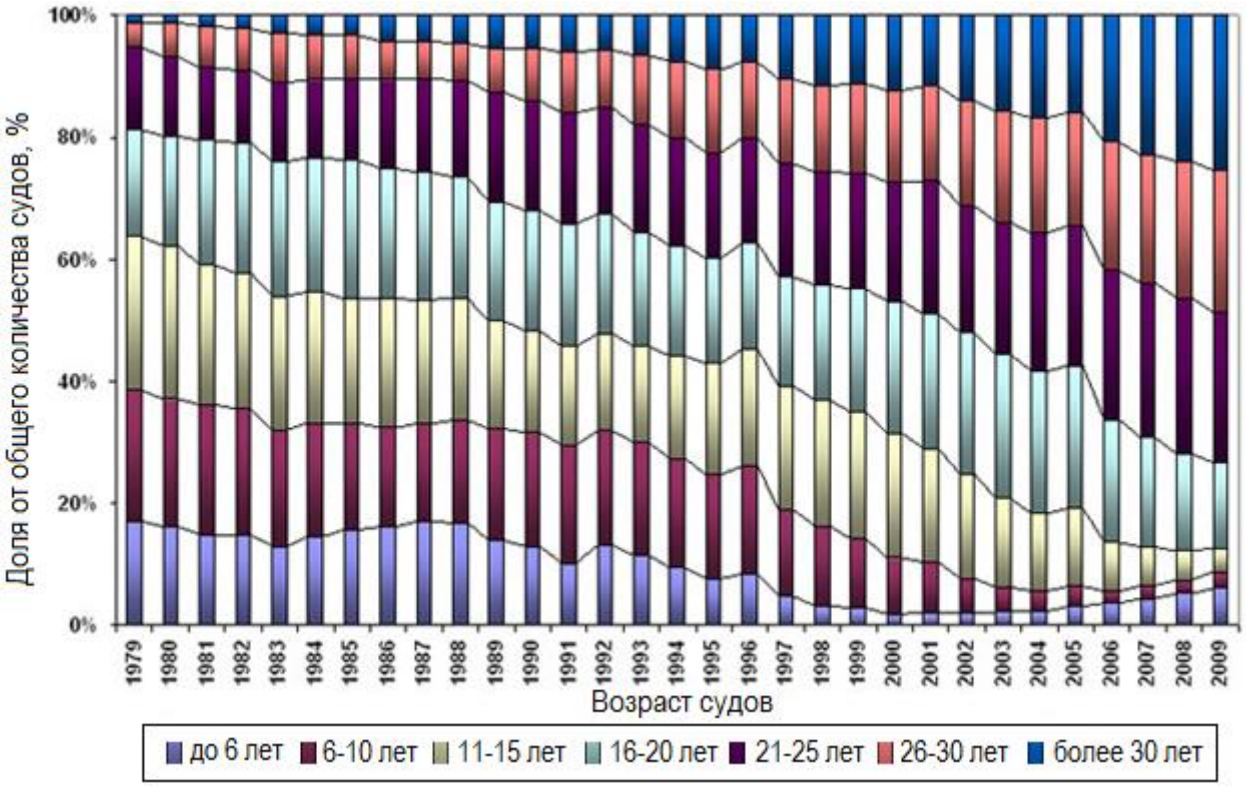


Рисунок 1.7 – Изменение возраста судов с классом Регистра по годам

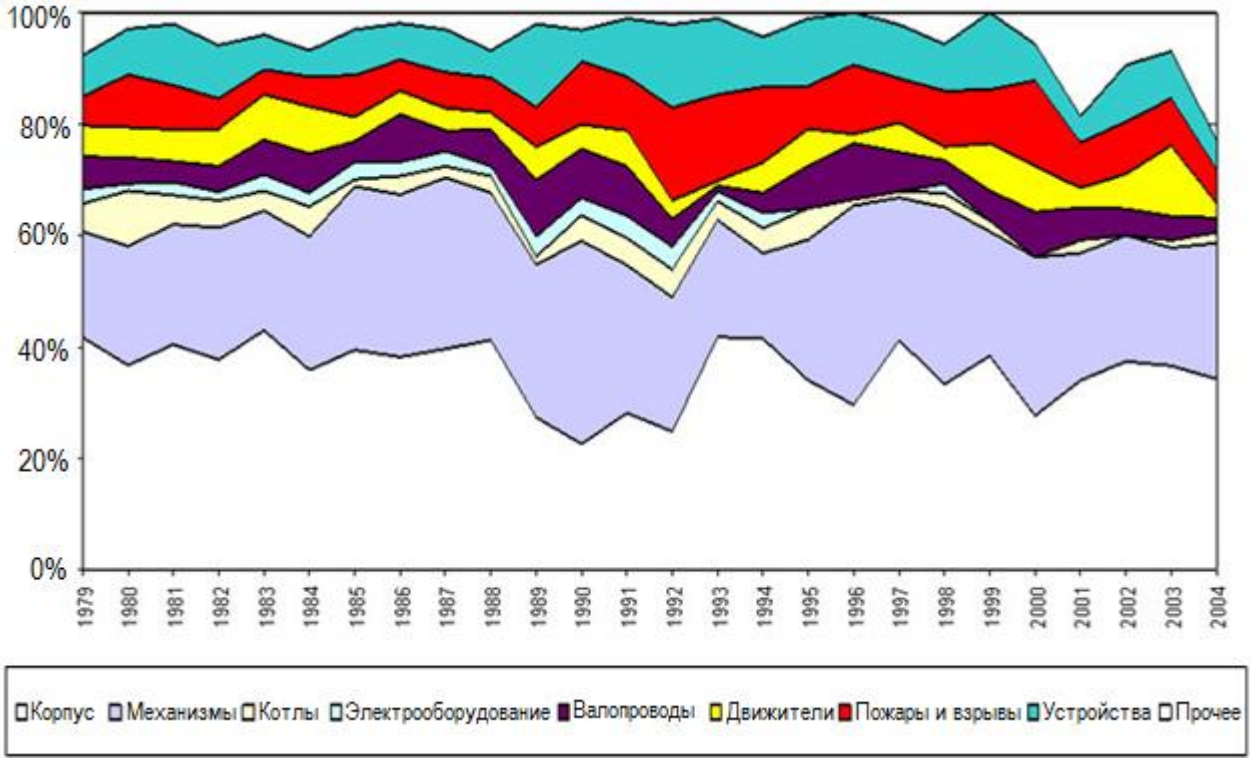


Рисунок 1.8 – Распределение аварий на судах по видам оборудования в процентах от общего числа аварий

Рисунок 1.9 – Средний службы электрооборудования на промысловых судах

В ГОСТ 27.002-89 [24], ГОСТ 15467-79 [25] даны определения дефектов, повреждений, отказов, их качественные и количественные характеристики с точки зрения параметров надежности. С этой точки зрения, наиболее опасными для эксплуатации являются дефекты, относящиеся к критическим (аварийным), влияющим не только на технологический процесс, но и на живучесть морских судов. На рисунке 1.10 представлены результаты оценки вероятности возникновения аварийных дефектов на судах [23].

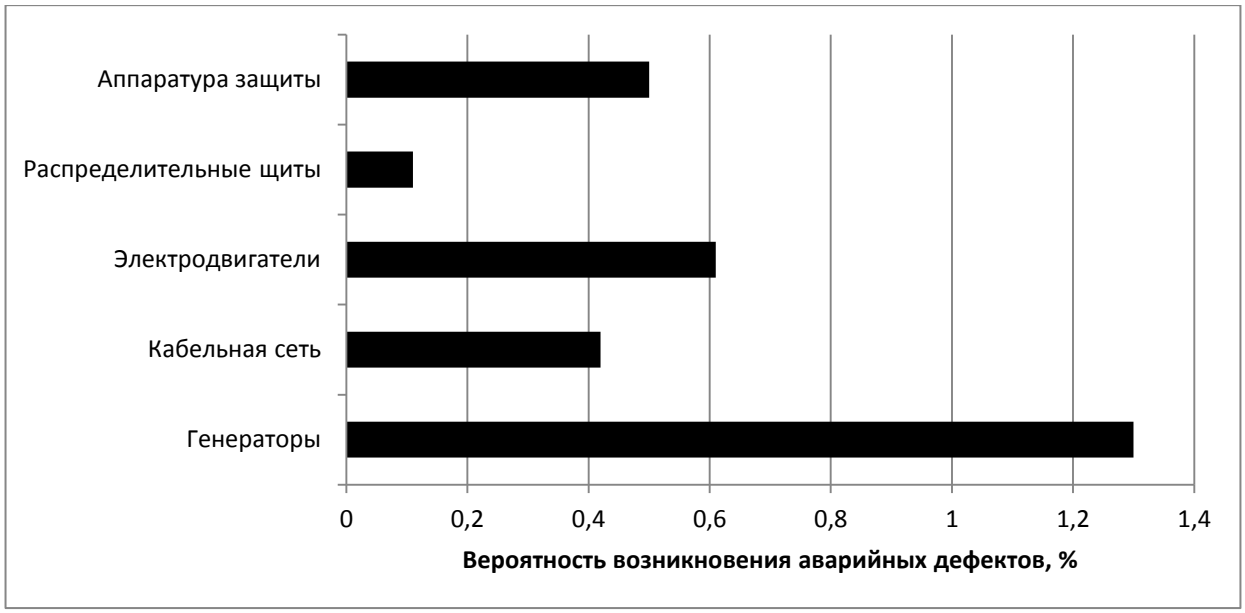


Рисунок 1.10 – Вероятность возникновения аварийных дефектов на судах

Анализ данных рисунка 1.10 показывает, что аварийные дефекты вероятнее всего возникают на генераторах и кабельной сети, что сопряжено с увеличением пожароопасности судов, нарушением технологического цикла, нарушением нормальной работы систем освещения, снижением безопасности мореплавания.

Таким образом, анализ существующих исследований в области аварийности морских судов показывает, что отказы элементов судовых электроэнергетических систем являются одной из наименее распространенных причин аварий на судах. В то же время аварии и чрезвычайные ситуации, обусловленные иными причинами, могут приводить к нарушению нормальной работы судовых ЭЭС в целом и систем освещения в частности.

К опасным воздействиям, возникающим при различных чрезвычайных ситуациях, с точки зрения систем освещения следует отнести: повреждения световых приборов при прямом механическом контакте, под действием ударной волны или вибраций; кратковременные прерывания напряжения с последующим самозапуском световых приборов; снижение величины напряжения; переключение на электроснабжение от резервных источников питания. СД лампы и световые приборы характеризуются высокой механической прочностью в сравнении с ЛН и ЛЛ, поскольку по принципу действия не требуют удержания газов в герметичной стеклянной ёмкости. В то же время, несмотря на сравнительно высокий КПД, СД источники света (ИС) чувствительны к превышениям температуры и требуют эффективного отвода тепла [26].

При функционировании СД систем освещения на объектах морской индустрии в обычных и чрезвычайных ситуациях должны обеспечиваться уровни освещенности в соответствии с действующими нормами. В связи с этим, с учетом многообразия характеристик СД ИС, с точки зрения обеспечения надежного функционирования систем освещения актуальной является задача исследования энергетических характеристик СД ИС при пониженном напряжении в электрической сети, характерном для ряда чрезвычайных ситуаций. Ввиду отсутствия информации о величине токов включения в технической документации СД ИС для оценки функционирования систем освещения в условиях кратковременных прерываний напряжения и переключения на аварийные источники питания необходимо проведение экспериментальных исследований величины токов включения СД ламп и световых приборов.

1.4 Анализ нормативных документов по электромагнитной совместимости систем освещения на основе светодиодных источников света

СД лампы и светильники при эксплуатации в составе систем освещения, как нелинейные элементы, вносят электромагнитные искажения в питающую электрическую сеть. В свою очередь функционирование СД ламп и светильников зависит от качества электроэнергии (КЭ) в электрической сети. Данные процессы обуславливают проблему электромагнитной совместимости (ЭМС) СД ИС и электрической сети. В то же время сами СД ИС создают оптическое излучение, которое зависит от их характеристик и КЭ в электрической сети. В связи с этим в работах некоторых исследователей рассматривается понятие биоэлектромагнитной совместимости – совместимости электроэнергетики с биосферой [27].

Далее будут рассмотрены нормативные документы, регламентирующие показатели электромагнитной совместимости, качества электроэнергии и светобиологической безопасности.

1.4.1 Анализ нормативных требований к показателям качества электроэнергии в системах электроснабжения объектов морской индустрии

Развитие российской нормативной базы в области КЭ для систем электроснабжения общего назначения началось с введения ГОСТ 13109-67 [28] в 1967 г. Стандарт имел две последующих редакции: 1987 и 1997 г. Интенсивные изменения нормативной базы приходятся на период после 2000 года, что отражает возросшую необходимость в обновлении и гармонизации стандартов в связи с внедрением высокотехнологичного электрооборудования и преобразовательной техники. В 2004 году была принята Директива Европарламента 2004/108/ЕС [29], касающаяся сближения законодательств государств-членов относительно электромагнитной совместимости, предполагающая, что изготовитель оборудования, предназначенного для подсоединения к сети, должен предусмотреть такую его конструкцию, чтобы избежать недопустимого сбоя функций в стандартных условиях эксплуатации. Положения директивы были учтены при разработке общеевропейского стандарта в области КЭ EN 50160:2010 [30].

Анализ нормативной базы в области КЭ показывает, что в настоящее время в РФ основополагающую роль имеет ГОСТ 32144-2013 [31] – межгосударственный стандарт ЕвроАзЭС, принятый для замены ГОСТ 13109-97 [32]. Новый ГОСТ был разработан в рамках Программы национальной стандартизации на основе адаптации европейского EN 50160 [33]. Сравнительный анализ основных показателей КЭ европейского и российских стандартов и Правил КПМС приведен в таблице 1.3.

С точки зрения обеспечения КЭ в системах освещения на основе СД ИС определяющее значение имеют следующие показатели КЭ: медленные изменения напряжения, колебания напряжения (фликер), несинусоидальность напряжения и тока.

Медленные изменения напряжения. Как правило, имеют продолжительность более 1 минуты и регламентируются величиной отрицательного $\delta U_{(-)}$ и положительного $\delta U_{(+)}$ отклонения напряжения от номинального значения (1.2, 1.3).

$$\delta U_{(-)} = [(U_0 - U_{(-)}) / U0] \bullet 100\% \quad (1.2)$$

$$\delta U_{(+)} = [(U_{(+)} - U_0) / U0] \bullet 100\% \quad (1.3)$$

где $U_{(-)}$, $U_{(+)}$ – значения напряжения электропитания, меньшие U_0 и большие U_0 соответственно; U_0 – напряжение, равное стандартному номинальному напряжени U_{nom}

Несинусоидальность напряжения. Регламентируется двумя показателями:

- значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 40-го порядка $K_{U(n)}$ в процентах напряжения основной гармонической составляющей U_1 в точке передачи электрической энергии (1.4) (таблица 1.4);

- значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U, % в точке передачи электрической энергии (1.5).

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{(1)}} \cdot 100\% \quad (1.4)$$

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{15}(U^2{}_{(n)})}}{U_{(1)}} \cdot 100\% \quad (1.5)$$

где $U_{(n)}$– значение амплитуды n-ой гармоники напряжения; $U_{(1)}$– значение амплитуды 1-ой гармоники напряжения

Несинусоидальность тока (показатели определяются аналогично (1.4, 1.5)). В то же время для ограничения влияния СД ИС на питающую сеть ГОСТ 30804.3.2-2013 устанавливает нормы эмиссии высших гармоник (ВГ) тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А. Стандарт относит все виды ламп, включая СД лампы, к световому оборудованию, что соответствует классу С применяемой в стандарте

Талица 1.3 – Сравнительный анализ требований к ПКЭ отечественных и зарубежного стандартов

Показатель	ГОСТ 13109-67	Правила КПМС РМРС	ГОСТ 32144-2013	EN 50160:2010
Отклонение частоты	Нормально допустимое ± 0,1 Гц Предельно допустимое ± 0,2 Гц Размах изменений не более 0,2 Гц	Длительное: ± 5 % Кратковременное: ± 10 % (5 с) Согласно п. 2.1.3 «Допускаемые отклонения параметров питания»	В синхронных системах: ± 0,2 Гц (95 % времени недели) ± 0,4 Гц (100 % времени недели) В изолированных системах: ± 1 Гц (95 % времени недели) ± 5 Гц (100 % времени недели)	В синхронных системах: ± 1 % (99,5 % времени года) + 4/- 6 % (100 % времени) В изолированных системах: ± 2 % (99,5 % времени недели) ± 15 % (100 % времени)
Положительное и отрицательное отклонение напряжения	На зажимах приборов освещения от -2,5 до +5% На зажимах эл. двигателей от -5 до +10% На зажимах остальных приемников ± 5%	Длительное: +6 / -10 % Кратковременное: ±20 % (1,5 с) Согласно п. 2.1.3 «Допускаемые отклонения параметров питания»	Положительное не более 10 % Отрицательное не более 10 %	В синхронных системах: ±10 % В изолированных системах: +10/-15 %
Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения	не более 5 %	не более 10 % Согласно п. 2.2.1.3	не более 8 % (Uном = 0,38 кВ) не более 5 % (Uном = 6-25 кВ) не более 4 % (Uном = 35 кВ)	не более 8 % (Uном = 0,38-35 кВ)
Коэффициент несимметрии	не более 2 %	Требования отсутствуют	по обратной и нулевой последовательности не более 2 % (95 % времени недели) не более 4 % (100 % времени недели)	по обратной последовательности не более 2 % от составляющей прямой последовательности
Колебания напряжения	Доза колебаний напряжения Лампы накаливания 0,018-0,034 % Люминесцентные лампы 0,079 %	Требования отсутствуют	Доза фликера кратковременная (Pst) не более 1,38 длительная (Plt) не более 1	Доза фликера длительная (Plt) не более 1 (95 % времени)

Таблица 1.4 – Допустимые значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения в различных стандартах

	Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$, % для гармоник						
Порядок гармоники	3	5	7	9	11	13	15
Правила КПМС	10	10	10	10	10	10	10
ГОСТ 32144-2013	5,0	6,0	5,0	1,5	3,5	3,0	0,3
EN 50160:2010	5,0	6,0	5,0	1,5	3,5	3,0	0,5

Таблица 1.5 – Нормы эмиссии высших гармоник тока

Стандарт	Порядок гармонической составляющей тока						
	3	5	7	9	11	13	15
Световые приборы с потребляемой активной мощностью менее 25 Вт							
	Допустимая эмиссия высших гармоник тока, мА/Вт						
ГОСТ 30804.3.2-2013	3,4	1,9	1,0	0,5	0,35	0,296	0,257
Световые приборы с потребляемой активной мощностью более 25 Вт							
	Коэффициенты гармонических составляющих тока, %						
ГОСТ 30804.3.2-2013	-	10	7	5	3	3	3

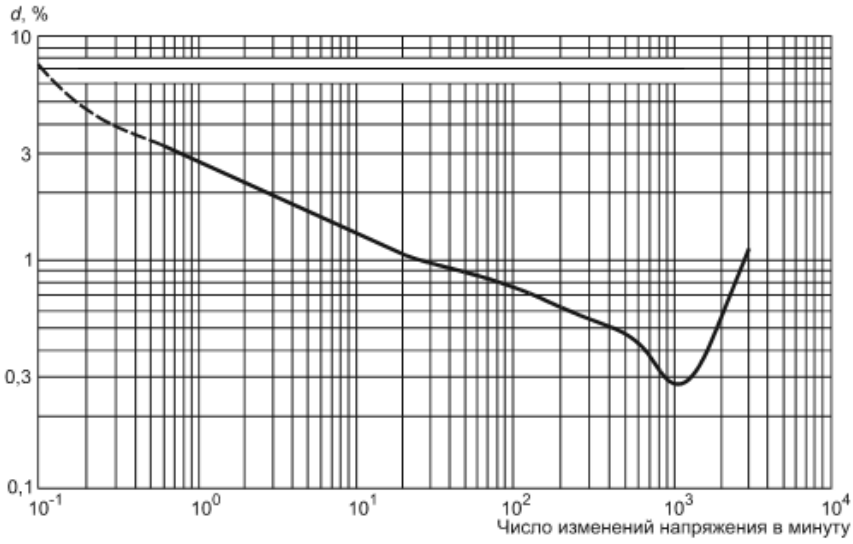


Рисунок 1.11 – Кривая для дозы фликера P_{st} = 1 при изменениях напряжения, имеющих форму меандра

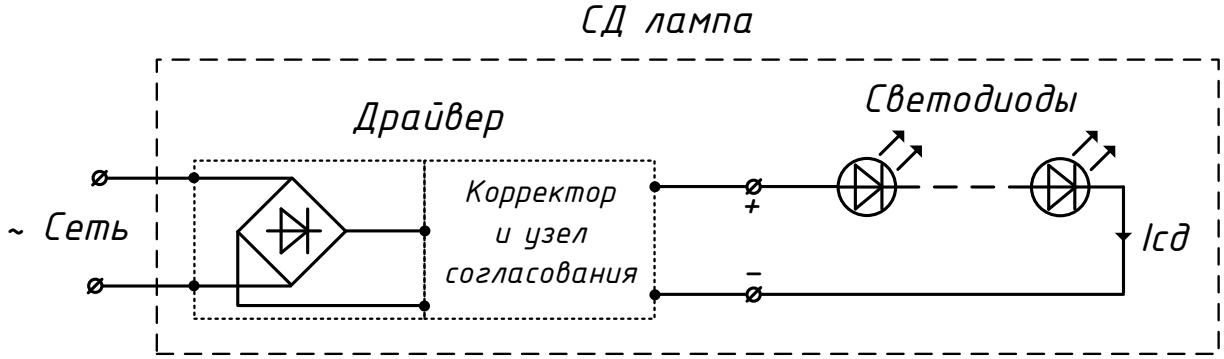


Рисунок 1.12 – Обобщенная структурная схема светодиодной лампы

классификации. Для СД ИС с мощностью более 25 Вт установлены требования к коэффициентам гармонических составляющих тока (таблица 1.5). Для изделий мощностью до 25 Вт установлен ряд требований, в том числе по величине значений гармонических составляющих тока на 1 Вт мощности, которые не должны превышать установленных норм гармонических составляющих тока (таблица 1.5) или - значение гармонической составляющей тока третьего порядка, выраженное в процентах от составляющей тока на основной частоте, не должно превышать 86%, соответствующее значение гармонической составляющей пятого порядка не должно превышать 61%. Кроме того, форма кривой потребляемого тока должна быть такой, чтобы ток достигал 5% пикового значения прежде фазового угла, равного 60°, достигал пикового значения прежде фазового угла 65° и не падал ниже 5% прежде фазового угла 90.

Колебания напряжения. Колебания напряжения в электрической сети, в том числе одиночные быстрые изменения напряжения, обусловливают возникновение фликера – явления субъективного восприятия колебаний светового потока источника света. Фликер является характеристикой электромагнитной совместимости СД ИС, их влияния на организм человека. Пульсации светового потока приводят к утомлению, снижению производительности труда и отражаются на здоровье человека. Установлено, что наиболее раздражающее действие фликера на организм человека проявляется при частоте колебаний 8,8 Гц, соответствующей собственной частоте колебаний клеток головного мозга [34].

В ГОСТ 13109-87 [35] использовалось понятие дозы колебаний напряжения (ψ) (1.6) – интегральной характеристики колебаний напряжения, вызывающих у человека накапливающееся за установленный период времени раздражение миганиями света.

$$\psi = \frac{1}{\theta} \cdot \int_{t-\theta}^{t} dt \int_{0}^{25} g_f^2 \cdot S(f,t) \cdot df \ , \qquad (1.6)$$

где g_f – коэффициент приведения действительных размахов изменения напряжения к эквивалентным; θ – интервал времени усреднения, равный 10 мин; S(f,t) – частотный спектр процесса изменения напряжения в момент времени t.

На данный момент показателями КЭ, относящимися к колебаниям напряжения, являются кратковременная доза фликера Pst (1.7), измеренная в интервале времени 10 мин, и длительная доза фликера Plt , измеренная в интервале времени 2 часа, в точке передачи электрической энергии.

$$P_{st} = \sqrt[3,2]{[\sum(2,3 \cdot (F \cdot d_{max})^{3,2}]/T_p} \quad (1.7)$$

где F – коэффициент приведения, определяемый в зависимости от вида кривой изменения напряжения; d_{max} – максимальное относительное изменение напряжения в процентах от номинального значения; T_p – период наблюдения.

Несмотря на высокий уровень энерговооруженности судов и большое количество искажающих нагрузок, Правилами КПМС требования к характеристикам напряжения, аналогичным дозе фликера, не предусмотрены.

Анализ стандартов показывает, что фликер определяется с использованием передаточной функции, связывающей колебания напряжения с колебаниями светового потока. Кратковременная доза фликера P_{st} оценивается косвенным путем по амплитуде колебаний напряжения d и частоте их повторения $f_{кн}$. Взаимосвязь параметров для предельно допустимого значения дозы фликера P_{st}=1 может быть представлена графически (рисунок 1.11).

Оценка колебаний светового потока фликерметром производится посредством моделирования реакции цепи «лампа-глаз-мозг» на основе измерения величины напряжения в электрической сети. В соответствии с ГОСТ Р 51317.4.15-2012 в приборе используется модель газонаполненной электрической лампы с биспиральной нитью накаливания ($P_{ном}$ = 60 Вт, $U_{ном}$ = 230 В). При этом СД лампы и ЛН различаются в конструкции и принципе действия (рисунок 1.12).

Зависимость колебаний светового потока СД ламп от колебаний напряжения в сети отличается от зависимости для ЛН. В связи с этим требования к фликерметру, установленные ГОСТ, не обеспечивают возможность объективной оценки дозы фликера в системах освещения на основе СД ламп [36].

1.4.2 Анализ нормативных требований к оптическому излучению и светобиологической безопасности светодиодных источников света на объектах морской индустрии

Совокупность требований к оптическому излучению ИС можно условно разделить на две категории: требования к светобиологической безопасности и к характеристикам и величине освещенности.

Вопросы светобиологической безопасности регламентируются ГОСТ Р МЭК 62471-2013 «Лампы и ламповые системы. Светобиологическая безопасность». Данный стандарт [37] содержит руководство по оценке светобиологической безопасности ламп и ламповых систем, включая светильники, и устанавливает пределы облучения, общепринятую методику измерений и схему классификации для оценки и контроля светобиологической опасности от всех электрических некогерентных широкополосных источников оптического излучения, включая СД.

В рамках данного направления рассматривается воздействие различных видов излучений (ультрафиолетового, инфракрасного, теплового, облучения опасным синим светом) на органы зрения и кожный покров человека. Указанные явления связаны в большей степени со светотехническими характеристиками источников света и не являются предметом настоящего исследования.

Требования к освещенности являются санитарными требованиями и непосредственно связаны с биологической совместимостью источников света и их влиянием на человека. При этом нормативными характеристиками являются: минимальная величина освещенности на рабочей поверхности и максимально допустимое значение коэффициента пульсаций освещенности, включая возможность возникновения стробоскопического эффекта.

Коэффициент пульсаций освещенности $К_П$ (формула 1.8) является характеристикой постоянства светового потока источника света в соответствии с ГОСТ Р 54945-2012 [38]. Данный показатель позволяет оценить относительную глубину колебаний освещенности в результате изменения во времени светового потока источников света при питании их переменным током.

$$K_{\text{П}} = \frac{E_{\text{макс}} - E_{\text{мин}}}{2\,E_{\text{ср}}} \cdot 100\% \quad , \tag{1.8}$$

где $E_{макс}$ и $E_{мин}$ – соответственно максимальное и минимальное значение освещенности за период её колебания; $E_{ср}$ – среднее значение освещенности за период колебаний T, соответствующий изменению освещенности от минимального до максимального значения (рисунок 1.13).

Однако расчёт пульсаций по формуле (1.8) допустим только для светового потока, колебания которого близки к гармоническим - при прямом подключении источника света к сети переменного тока или при использовании электромагнитного пускорегулирующего аппарата [38].

При использовании электронных пускорегулирующих аппаратов, электронных драйверов и регуляторов мощности (диммеров) для расчета коэффициента пульсации следует применять формулу (1.9).

$$K_{\text{П}} = \frac{E_{\text{макс}} - E_{\text{мин}}}{2\frac{1}{T}\int_0^1 E(t)dt} \tag{1.9}$$

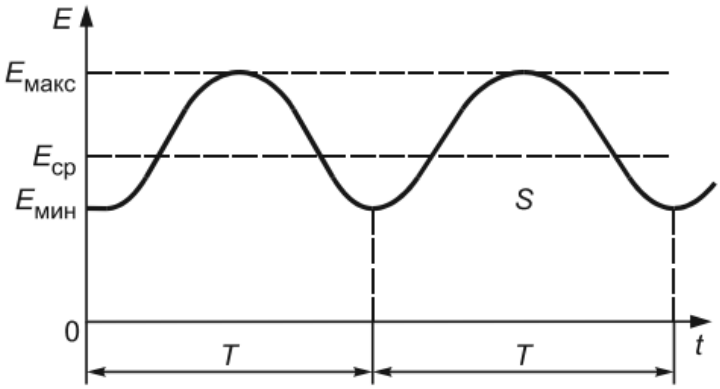


Рисунок 1.13 – Анализ колебаний освещенности при определении коэффициента пульсаций согласно ГОСТ Р 54945-2012

Для определения значения коэффициента пульсаций в отличие от косвенного метода определения величины дозы фликера используется метод непосредственного измерения величины освещенности, что обеспечивает достоверность измерений вне зависимости от типа источника света.

Немаловажным аспектом непостоянства светового потока являются пульсации с высокой частотой. Данные пульсации трудноразличимы для человеческого глаза, однако обуславливают проявление стробоскопического эффекта (визуальной иллюзии неподвижности вращающихся механизмов). Пункт 6.1.4 Правил устанавливает, что в помещениях и местах, которые освещаются ЛЛ и в которых находятся видимые вращающиеся части механизмов, должны быть приняты меры для устранения стробоскопического эффекта. Данный аспект затрудняет применение ЛЛ в ряде помещений судна. В то же время ряд источников показывает наличие данного эффекта и у СД ИС [39], что обуславливает необходимость проведения дополнительных исследований ламп с точки зрения пульсаций светового потока.

Нормативные значения освещенности и коэффициента пульсаций на объектах морской индустрии приводятся в различных документах. Нормы устанавливаются для отдельных типов объектов, помещений и рабочих мест в зависимости от функционального назначения и разряда зрительных работ. На основе анализа стандартов для береговых

объектов и официальных документов [40] о состоянии нормативной базы в области гигиены и эпидемиологии на транспорте составлен обобщенный перечень основных стандартов (таблица 1.6), устанавливающих требования к характеристикам и уровням освещенности на объектах морской индустрии. В таблице, в том числе, для каждого документа приведены наименьшие из допустимых значений $К_П$.

Следует отметить, что в Нормах искусственного освещения на судах морского флота [17] требования к минимальной освещенности приводятся для двух типов источников света: ЛЛ и ЛН, аналогично ранней версии таблицы 6.7.1 правил КПМС (до внесения изменений в Правила). В то же время в документе имеется примечание: «во всем неоговоренном настоящими нормами устройство искусственного освещения должно удовлетворять требованиям Правил по электрооборудованию морских судов морского Регистра судоходства» [16].

Таким образом, существующий комплекс нормативных документов по вопросам освещения морских судов не содержит однозначных требований для систем освещения на основе СД ИС. Предположение об идентичности требований к освещенности для ЛН и СД ИС необходимо обосновать с учетом различий в конструкции и принципе действия данных источников света (раздел 1.3).

1.5 Обзор и анализ исследований в области электромагнитной совместимости систем освещения на основе светодиодных источников света

С учетом выявленных особенностей использования светотехнических изделий на основе СД в системах освещения объектов морской индустрии и результатов анализа нормативной базы выполнен обзор и анализ исследований различных авторов в области электромагнитной совместимости СД ИС.

В настоящее время СД источники света в первую очередь позиционируются как энергоэффективные изделия для замены ЛН и ЛЛ. Однако ряд исследований указывает на расхождение показателей реальной и заявленной в паспортных данных энергоэффективности данных изделий. Так в работе [41] отмечается, что в ряде случаев из-за неточности описания или недобросовестности производителя заявленная светоотдача СД источников света не соответствует действительности. В качестве примера рассматривается случай, когда в паспортных данных СД светильника указывается собственная светоот-

Таблица 1.6 – Основные стандарты, нормирующие показателей освещенности

Наименование стандарта	Область применения	Наименьшее из допустимых значений $К_П$, %
СП 52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение»	Распространяется на проектирование освещения помещений вновь строящихся и реконструируемых зданий и сооружений различного назначения, мест производства работ вне зданий, площадок промышленных и сельскохозяйственных предприятий, железнодорожных путей площадок предприятий, наружного освещения городов, поселков и сельских населенных пунктов, автотранспортных тоннелей, а также на контроль за их состоянием. Не распространяется на проектирование освещения морских и речных портов.	10
СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий»	Санитарные правила распространяются на проектируемые, реконструируемые и существующие жилые и общественные здания	10
СП 2.2.2.1327-03 «Гигиенические требования к организации технологических процессов, производственному оборудованию и рабочему инструменту»	Требования санитарных правил являются обязательными при проектировании, внедрении в производство и осуществлении технологических процессов и эксплуатации производственного оборудования во всех отраслях промышленности (кроме горнорудной и угольной), транспорта, строительства и сельского хозяйства	5 При организации работ с использованием электронно-вычислительных машин
ПОТ Р 0-152-31.82.03-96 Правила охраны труда в морских портах (приложение 4 «нормы искусственного освещения морских портов»)	Распространяются на погрузочно-разгрузочные работы, вспомогательные работы и перевозку людей по акватории и территории портов судами портового флота и автотранспортом	-
Нормы искусственного освещения на судах морского флота № 2506-81	Используются при проектировании и эксплуатации искусственного освещения помещений и палуб вновь строящихся и реконструируемых судов, а также при реконструкции осветительных установок морских судов	10
Дополнение к «Нормам искусственного освещения на судах морского флота» № 2506-81 для морских судов флота рыбной промышленности	Распространяются на строящиеся и реконструируемые морские суда флота рыбной промышленности	20

дача СД модуля. По причине потерь в различных элементах светильника реальная светоотдача оказывается ниже. Аналитические данные исследования сведены в таблицу 1.7.

Таблица 1.7 – Причины потерь светового потока в СД светильнике

Причина снижения светового потока	Величина потерь, %
Потери в защитном стекле светильника (поликарбонат или полиметилметакрилат)	10-15
Отклонение величины светового потока СД от номинальной (при температуре 25°С) в условиях иного температурного режима	10-12
Потери в зависимости от типа кривой силы света светильника	9-12
Снижение светового потока из-за несоответствия параметров выходного напряжения драйвера номинальным значением для СД модуля	10

Кроме того в исследовании указаны проблемы несовершенства конструкции изделий на основе СД – отсутствие системы терморегулирования, что в ряде случаев приводит к выходу из строя или постепенному снижению энергоэффективности изделия. Также отмечено наличие погрешности измерений величины светового потока в лабораторных условиях, которая по данным исследования составляет 5-7%, что также затрудняет определение реальной светоотдачи изделий.

К недостаткам исследования можно отнести отсутствие экспериментальной проверки указанных значений падения светового потока на примере конкретных светотехнических изделий на основе СД.

На несоответствие паспортных данных реальным характеристикам СД изделий указывают и другие исследования. Так в работе [42] с учетом материалов [43] приводятся результаты исследований ряда СД ламп, показавшие несоответствие коэффициента мощности паспортным данным, недопустимые уровни несинусоидальности потребляемого тока, а так же снижение светового потока более чем на 10 % после 2000 ч. работы у 33% исследованных изделий. Отдельно отмечено, что некоторые производители для своих изделий на основе СД указывают срок службы 100 тыс. ч, при этом согласно паспортным данным для самих СД он не превышает 50 тыс. ч. На основе проведенного исследования с учетом существующего опыта внедрения в работе сделан вывод, что «капитальные затраты на внедрение светильников с СД в общее внутреннее и функциональное наружное освещение при сегодняшнем состоянии техники принципиально неокупаемы» [42, с. 23].

К недостаткам исследования следует отнести отсутствие характерных примеров СД ИС, для которых установлено несоответствие реальных характеристик паспортным данным, и оценки степени несоответствия.

В исследовании [44] рассматривается реактивная мощность, потребляемая СД лампами, и предлагается метод по её компенсации. Вопрос рассмотрен на примере исследования одного образца СД лампы. При этом отмечено, что несинусоидальность потребляемого лампой тока обусловлена СД, соединёнными между собой встречно-параллельно. Данный процесс анализируется при помощи графического метода на основе ВАХ СД (рисунок 1.14) При этом не рассматривается работа драйвера, присутствующего в большинстве СД ламп. По результатам экспериментального исследования СД лампы сделан вывод, что потребляемая реактивная мощность характеризуется двумя показателями: коэффициентом мощности cosφ и коэффициентом искажения формы тока ν. В результате сформировано требование к величине коэффициента мощности $К_М$ (1.10).

$$K_M = cos\varphi \cdot \nu \approx 1 \qquad (1.10)$$

В работе подробно рассмотрены вопросы проектирования компенсирующего устройства для СД ламп по критерию (1.10). Приводятся результаты применения данного устройства на примере нелинейной и активно-индуктивной нагрузке (рисунок 1.15). К недостаткам можно отнести построение теории на основе анализа одного образца СД лампы, отсутствие обзора уже реализованных в СД лампах систем коррекции коэффициента мощности (ККМ).

Затронутые в работах [43, 44] проблемы несинусоидальности потребляемого тока более подробно рассматриваются в ряде исследований [45-52]. Среди неблагоприятных последствий эмиссии ВГ тока в питающую сеть со стороны СД ИС в работе [45] рассматривается случай нарушения нормального функционирования помехонеустойчивого устройства (телевизора), подключенного к электрической сети, связанной с системами освещения, в которых была произведена замена ламп накаливания на СД лампы. По данным работы проблема была обусловлена несоответствием драйверов СД ИС требованиям к допустимым уровням создаваемых электромагнитных помех.

В исследовании [46] оценивается влияние ВГ тока и напряжения бытовых электроприемников, в том числе СД ламп, на питающую сеть. В работе изложена методика экспериментального исследования нелинейных нагрузок (рисунок 1.16) на примере импульсного источника питания персонального компьютера (ИИП ПК).

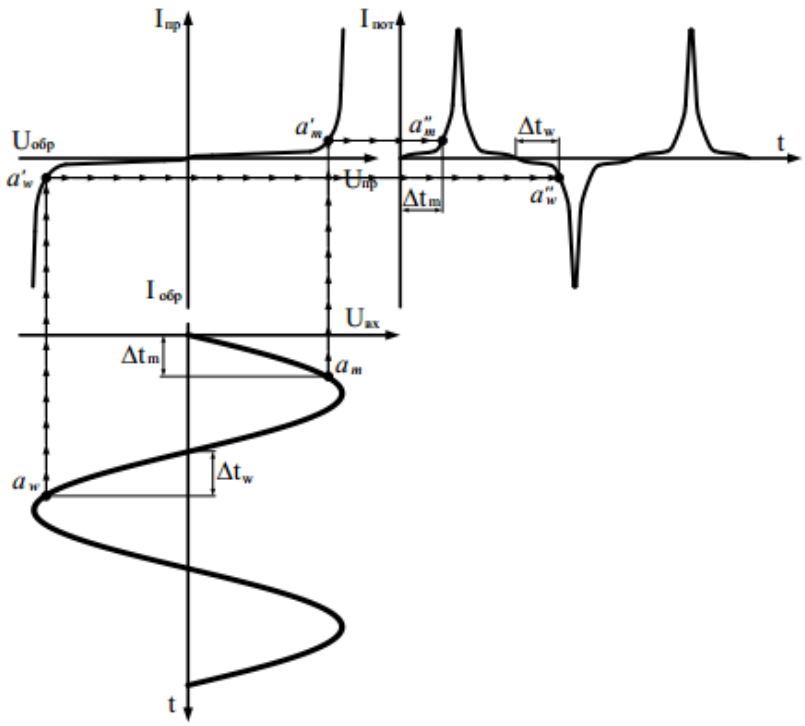


Рисунок 1.14 – Графический метод построения потребляемого тока СД лампы

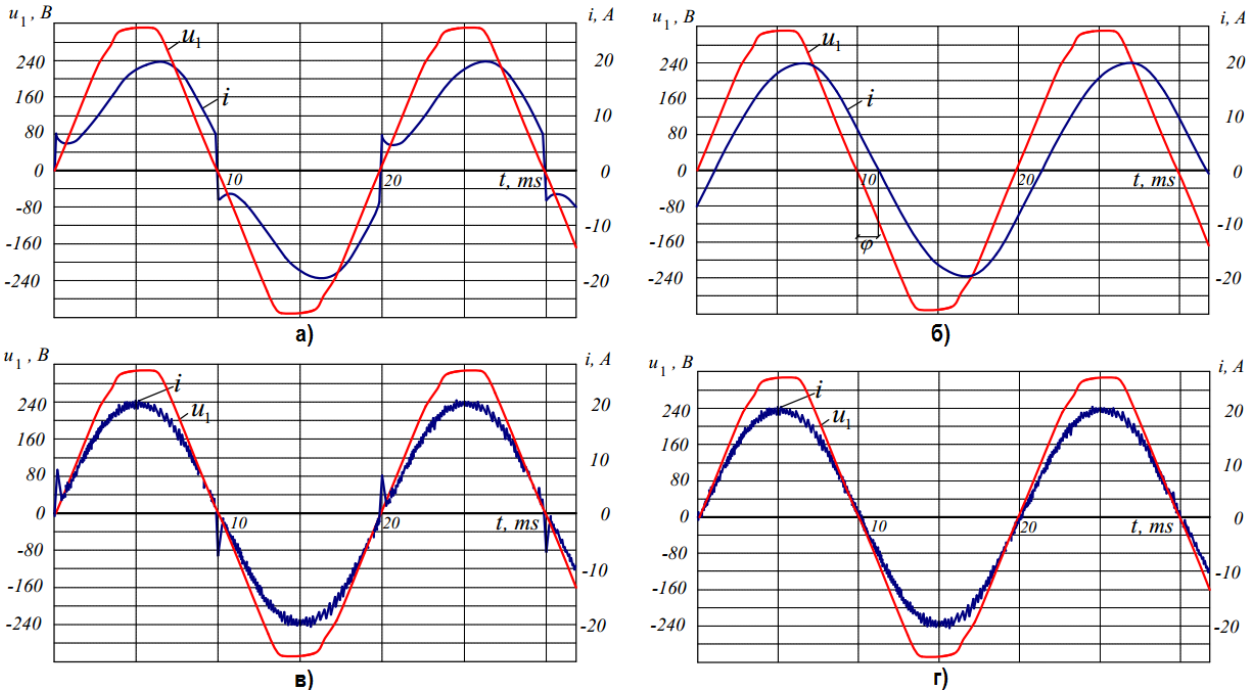


Рисунок 1.15 – Результаты экспериментальных исследований компенсатора: диаграммы сетевого напряжения и потребляемого тока для неуправляемого выпрямителя:
а – при отключенном компенсаторе; в – при включении компенсатора;
для цепи активно-индуктивной нагрузки:
б – при отключенном компенсаторе; г – при включении компенсатора

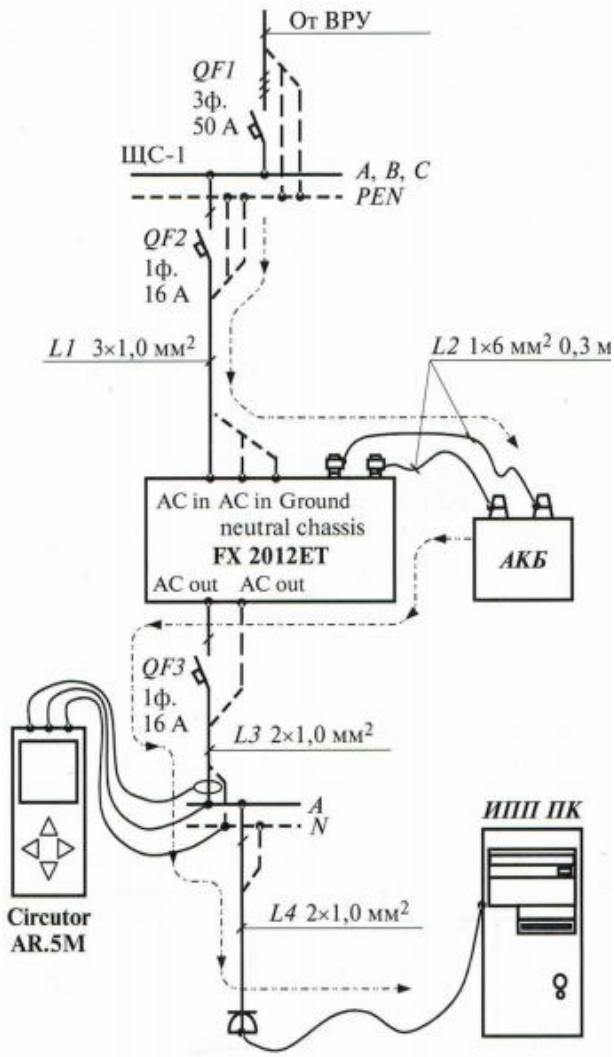


Рисунок 1.16 – Экспериментальная установка для исследования нелинейных нагрузок

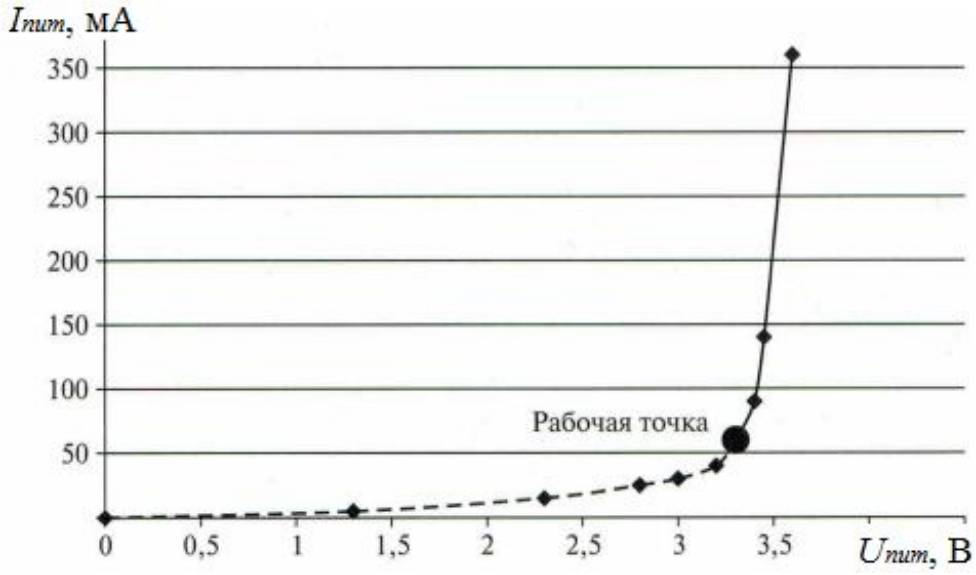


Рисунок 1.17 – Вольт-амперная характеристика светодиодного источника света

Экспериментальная установка состоит из инвертора (FX 2012ET, 2кВт), который используется в качестве источника синусоидального напряжения, аккумуляторной батареи и анализатора спектра (Circuitor AR.5M) для определения значений ВГ. Отличительной особенностью методики является применение инвертора в качестве источника питания с минимальными показателями несинусоидальности напряжения, что позволяет оценить воздействие нелинейной нагрузки на несинусоидальность напряжения в питающей сети. Однако в рассматриваемом примере при работе инвертора на резистивную нагрузку величина K_U составляет 1,8%, что сопоставимо с питанием от узла электрической сети с достаточной мощностью.

По результатам анализа нелинейных нагрузок сделан вывод о снижении суммарного коэффициента несинусоидальности тока за счет наличия эффекта частичной компенсации ВГ тока в случае подключения совокупности нелинейных электроприемников. В то же время при этом происходит рост амплитуды ВГ тока, что приводит к увеличению несинусоидальности напряжения.

С точки зрения вопросов, связанных непосредственно с СД ИС в работе приводится вольт-амперная харатеристика светодиодного источника света (рисунок 1.17) и предлагается структурная схема драйвера СД лампы (рисунок 1.18). Однако при этом не пояснено: насколько распространенной является указанная схема драйвера.

В заключении авторами сделан вывод о недостаточном объёме исследований в области функционирования СД ИС в составе электротехнических систем, отсутствии полной информации о воздействия СД ИС на питающую сеть. Результатов экспериментального исследования СД ИС в работе не приводится.

В работе [47] приведены результаты экспериментальных исследований ВГ тока, генерируемых энергосберегающими источниками света, в том числе СД ИС. Исследований проведены с использованием анализатора КЭ Fluke 434 по методике, изложенной в ГОСТ Р 54350-2015 [53]. В работе исследовано 15 источников света, среди них пять СД ламп (таблица 1.8).

На основании проведенных исследований сделан вывод о необходимости применения в конструкции СД лампы ККМ для ограничения несинусоидальности потребляемого СД лампой тока. На основе сопоставление значений ВГ тока, потребляемого энергосберегающими лампами, сделано заключение о допустимых уровнях эмиссии ВГ у большинства исследуемых ламп, за исключением недорогих образцов.

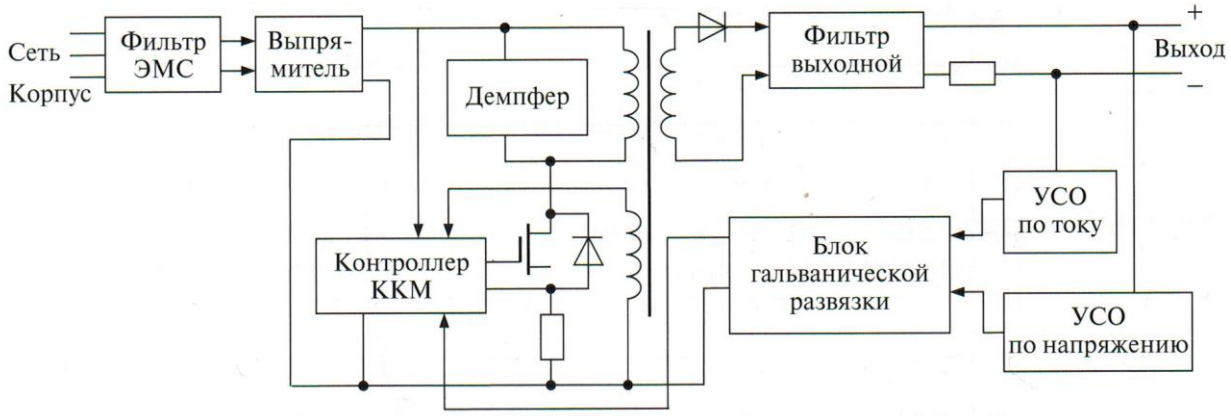


Рисунок 1.18 – Структурная схема драйвера СДЛ

Таблица 1.8 – Результаты исследований энергосберегающих ламп

Источник света	Произво-дитель	P, Вт	Значения $K_{I(n)}$ для нечетных гармоник						
			3	5	7	9	11	13	15
КЛЛ Spiral-conom	Китай	20	84,9	65,0	48,3	41,1	36,3	28,6	21,0
КЛЛ Navigator	Китай	20	80,0	55,2	46,1	43,8	35,7	27,1	21,0
КЛЛ Chamelion	Китай	30	48,0	35,1	27,9	25,9	22,2	16,9	14,0
СДЛ Classic Led	Германия	9	40,4	19,9	28,5	32,1	27,1	17,1	18,2
СДЛ Led Bulb	Германия	10	50,2	28,4	25,3	40,1	34,8	22,7	17,0
СДЛ Philips	Нидерланды	9,5	50,1	35,0	28,2	23,3	15,3	9,8	8,0
СДЛ Navigator	Китай	10	87,5	69,5	55,2	45,9	41,5	36,7	29,6
СДЛ Navigator	Китай	5	86,4	71,7	63,9	52,7	46,8	41,8	35,9
ЛЛ Т8 2х36 ЭмПРА	Россия	72	27,5	13,1	2,9	5,0	7,7	2,4	6,6
ЛЛ Т8 2х36 ЭПРА	Россия	72	12,9	7,2	2,2	3,2	1,7	0,7	1,2
ЛЛ Т8 4х18 ЭмПРА	Россия	72	15,0	10,0	8,2	17,4	5,2	3,4	10,0
ЛЛ Т8 4х54 ЭПРА	Россия	216	6,0	1,4	1,5	4,4	1,6	0,8	0,9
СД светильник S02/120	Россия	120	4,1	2,8	1,1	2,8	0,6	0,2	0,7
ДНаТ с ЭПРА и ККМ	Россия	120	5,5	4,8	3,4	4,5	1,3	0,6	0,6
МГЛ 70Вт + СДЛ 30Вт	Россия	120	6,1	2,3	1,7	2,2	1,3	1,1	0,8

а)

б)

Рисунок 1.19 – Осциллограммы параметров на входе преобразователя с пассивной схемой ККМ (а) и двухкаскадного преобразователя с активной схемой ККМ (б)

К недостаткам работы можно отнести:

1. Отсутствует информация о схеме экспериментальной установки, характеристиках источника напряжения, не указано значение суммарного коэффициента гармонических составляющих тока;
2. Не приводятся осциллограммы потребляемого тока, что не позволяет выявить характерные особенности функционирования для ламп с ККМ;
3. Наименования исследованных СД ламп приведены приблизительно, без указания модели, что затрудняет сопоставление с другими образцами;
4. Исследованы только одиночные СД лампы, не рассмотрены групповые соединения, что не позволяет оценить наличие эффекта накопления.

В работе [48] дан анализ конструкций драйверов СД ИС и характеристик потребляемого тока. Представленные на рынке драйверы разделены на 5 групп в зависимости от схемотехнических реализаций и наличия корректора коэффициента мощности: преобразователь без ККМ; преобразователь с пассивной схемой ККМ; однокаскадный преобразователь с активной схемой ККМ; однокаскадный преобразователь с активной схемой ККМ + каскад сглаживания пульсаций; двухкаскадный преобразователь с активной схемой ККМ. Для указанных групп приведены характерные осциллограммы параметров на входе и выходе драйвера (рисунок 1.19).

В работе дан анализ характеристик коммерчески доступных модульных драйверов для СД ИС (таблица 1.9) с позиции величины потребляемого тока, реактивной мощности) и пульсаций выходного тока ($K_{ПП}$).

Однако в работе не приводятся значения коэффициентов гармонических составляющих тока для исследуемых ламп. Исследуются только модульные преобразователи, не укомплектованные СД, что не дает возможности оценить особенности функционирования СД ламп. Также не приводится оценки воздействия группы из различных драйверов на питающую сеть.

Исследования взаимосвязи параметров КЭ и характеристик светового излучения источников света рассмотрены в ряде работ [54-63], среди которых присутствуют исследования, связанные с оценкой дозы фликера [54-57] и коэффициента пульсаций освещенности [58, 59] в системах освещения на основе СД ИС.

В ряде работ [54-57] показано, что изложенный в нормативных документах подход к определению дозы фликера, разработанный для безынерционных ЛН, где колебания

Таблица 1.9 – Характеристики модульных драйверов для светодиодов

Производитель	Наименование	Мощность, Вт	Ток, мА	Кп, %	КМ, λ
EagleRise	ELP030CxxxxLS*	30	350, 500…1400 (с шагом 100 мА)	10…25	>0,95
	ELP040CxxxxLS*	40			
	ELP050CxxxxLS*	50			
	ELP060CxxxxLS*	60			
Mea Mean Well	PLD-40/60	40/60	350, 700, 1050, 1400, 1750, 2100, 2400	~20	>0,95
	PCD-40/60	40/60			
	PLM-25	25	350, 500, 700, 1400		
	HLP-40H	40	750, 840, 960, 1100, 1300, 1700, 2000	<1	>0,95
	HLP-60H	60	1150, 1300, 1450, 1700, 2000, 2500		
Aproc	LST ИПС30-350T	30	350	<1	>0,95
	LST ИПС40-700T (TP[400-700])	40	700 (400…700)		
	LST ИПС50-350T (TP[240-360])	50	350 (240…360)		
	LST ИПС60-350T	60	350		
	LST ИПС60-700 TP[400-700]	60	400…700		

Рисунок 1.20 – Функциональная схема аппаратно-программного комплекса для определения передаточных функций искусственных источников света

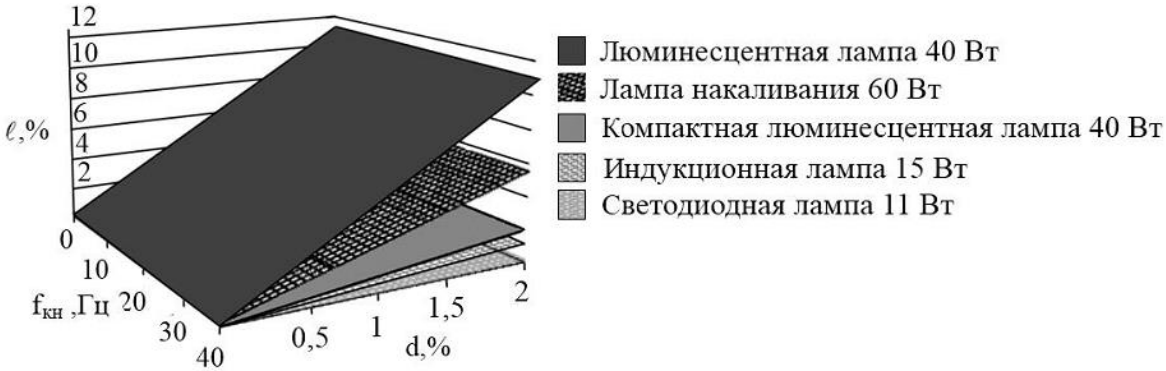


Рисунок 1.21 – Взаимосвязь амплитуды колебаний светового потока лампы и колебаний подведенного к ней напряжения

светового потока лампы повторяют форму колебаний подведенного напряжения, не может быть применен в отношении СД ИС, что обусловлено особенностями фликерметра [34] и было изложено ранее (раздел 1.4.1). В качестве решения проблемы авторами работ предложен метод оценки погрешности нормативных способов измерения фликера при использовании СД ИС и других типов ламп. Метод [55] подразумевает применение специализированного аппаратно-программного комплекса (АПК) (рисунок 1.20) для экспериментального определения передаточных функций (взаимосвязи колебаний напряжения и светового потока) искусственных источников света [56] при оценке дозы фликера (заявка на патент: 2011149905/28).

Принцип работы комплекса заключается в подаче на лампу напряжения с предварительно заложенными искажениями (частотой и амплитудой колебаний) от лабораторного источника питания. При этом с помощью фотоприемника измеряется изменение светового потока лампы. Управление источником питания и сбор информации с фотоприемника осуществляется при помощи персонального компьютера. Обработка полученных данных позволяет определить передаточную функцию исследуемой лампы. Авторами проведены исследования и определены взаимосвязи амплитуды колебаний светового потока (l, %) с колебаниями напряжения (рисунок 1.21) для ряда источников света, включая СД лампу [57]. Как следует из рисунка 1.21, в сравнении с другими источниками света исследованная СД лампа характеризуется наименьшим изменением светового потока.

По результатам экспериментальных исследований авторами произведено сравнение методов измерения дозы фликера на предмет наличия методологической погрешности. Результаты приведены в таблице 1.10, где $P_{st}^{эл}$ – кратковременная доза фликера, измеренная по предложенной методике; P_{st} - кратковременная доза фликера, измеренная по стандартной методике.

Таблица 1.10 – Результаты расчета погрешности измерений P_{st}

Тип источника света	Кратковременная доза фликера	
	P_{st}	$P_{st}^{эл}$
Лампа накаливания 60 Вт	1	1
Люминесцентная лампа 40 Вт		1,9806
Компактная люминесцентная лампа 40 Вт		0,3641
Индукционная лампа 15 Вт		0,2046
Светодиодная лампа 11 Вт		0,0289

Данные таблицы 10 соответствуют колебаниям напряжения с частотой fкн = 8,8 Гц и амплитудой колебаний напряжения d = 0,196%, соответствующим значению P_{st} = 1 для ламп накаливания мощностью 60 Вт (по стандартной методике).

К недостаткам работы можно отнести:

1. Сложная конфигурация АПК, затрудняющая реализацию метода на практике;
2. Отсутствие паспортных данных и характеристик исследованной СД лампы;
3. Недостаточное количество исследованных ламп;
4. Исследование выявило существенные недостатки в подходе к определению величины дозы фликера, изложенному в действующих государственных стандартах, однако не предложены пути решения данной проблемы.

В работе [58] приводятся результаты исследования влияния отклонений напряжения на основные качественные характеристики различных типов газоразрядных ламп и СДЛ и рекомендации по допустимым отклонениям напряжения. Данные получены в ходе экспериментальных исследований. В работе приведен перечень лабораторного оборудования, в том числе анализатор КЭ Fluke-434 с токовыми клещами Fluke-345 и люксметр-пульсметр Аргус-07. Исследование проводилось для пяти ламп: одной ЛН, одной компактной ЛЛ, двух линейных ЛЛ и одной СД лампы. Проведены исследования изменения величины освещенности и коэффициента пульсаций освещенности (рисунок 1.22) при изменении величины напряжения питания.

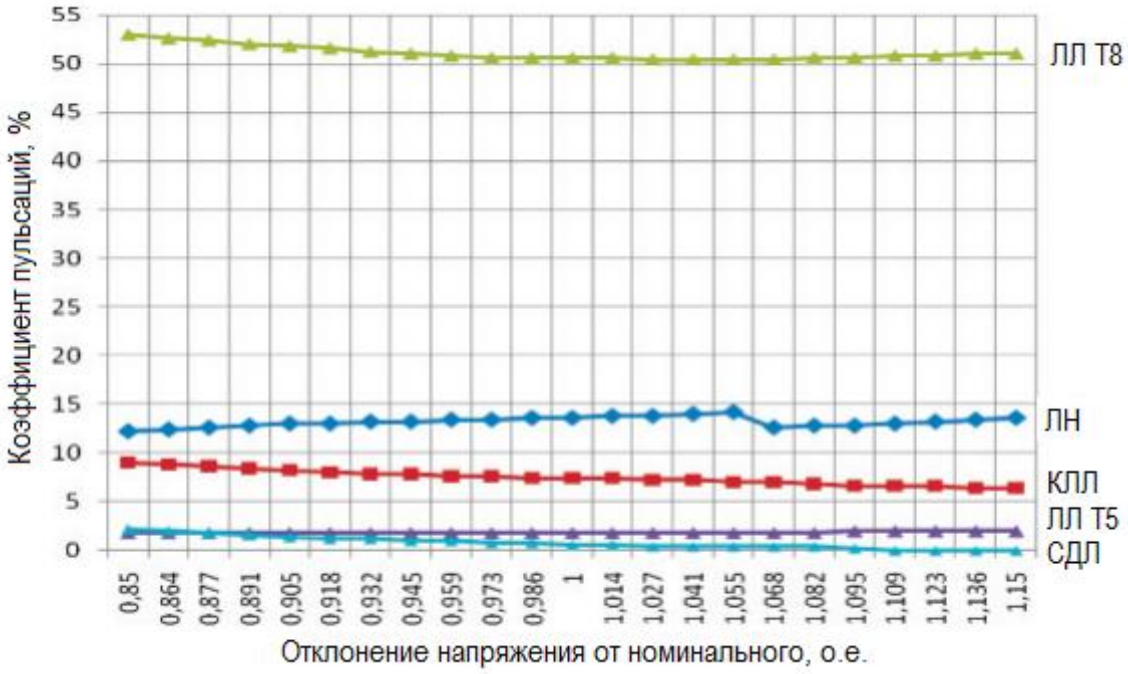
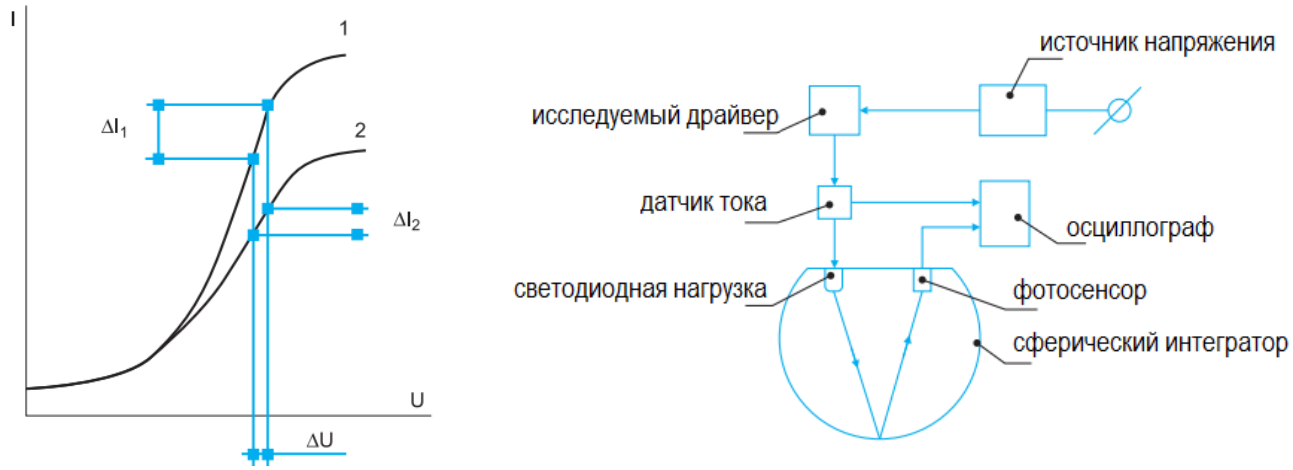


Рисунок 1.22 – Изменение коэффициента пульсации для различных типов ламп

По результатам исследований коэффициента пульсаций сделаны выводы: изменения напряжения ±15 % практически не оказывают влияния на величину коэффициента пульсаций для всех типов ламп; наименьший коэффициент пульсаций среди исследованных образцов имеют люминесцентные лампы Т5 и светодиодные лампы за счет применения электронного пускорегулирующего аппарата или драйвера.

Несмотря на применение комплексного подхода, данная работа имеет ряд недостатков: отсутствует схема экспериментальной установки, не обоснована необходимость использования анализатора КЭ – приводятся только результаты измерения величины напряжения; отсутствуют данные по потребляемому току и величине дозы фликера в питающей сети; недостаточное количество исследованных ламп (проведено исследование одной СД лампы).

В исследовании [59] рассмотрены вопросы пульсаций освещенности источников на основе СД. В работе отмечено, что поскольку негативное влияние пульсаций освещенности, воздействующих на рецепторы зрительных органов человека, усиливается с ростом глубины модуляции светового потока, то значение имеет не только пульсации напряжения на выходе драйвера, но и ВАХ применяемых светодиодов, (рисунок 1.23, а).



а) б)

Рисунок 1.23 – Зависимость пульсаций тока в нагрузках с различной вольт-амперной характеристикой от пульсаций напряжения драйвера (а); схема экспериментальной установки для исследования СД ИС (б)

Указанный подход рассмотрен в работе на примере экспериментального исследования различных типов драйверов (рисунок 1.23, б), при этом измерялись значения коэффициента пульсаций освещенности ($К_{ПО}$) и выходного тока драйвера ($К_{ПТ}$) (таблица 1.11). Эксперимент проводился при помощи датчика, подключенного к осциллографу, с

измерением: размаха пульсаций напряжения выходного сигнала $U_{ПИК}$ и среднего значения напряжения выходного сигнала регистратора $U_{СР}$.

Таблица 1.11 – Результаты исследований пульсаций выходного тока драйверов

Тип драйвера	Характеристика нагрузки		$К_{ПТ}$, %		$К_{ПО}$, %	
	Количество светодиодов	Ток нагрузки, мА	Без фильтра	С фильтром ($F_{СР}$ = 3 кГц)	Без фильтра	С фильтром ($F_{СР}$ = 3 кГц)
PSL-14	8	350	24	4	20	3,5
	12		31	4	9	2
PSL-20	12	350	17	5	20	5
PSL-22	18		11	3,5	11	3,5
PSL-26				4		4
PSL-30	16×(2×16)	600	17	16	11	9
PSL-34	28	350	13	7,5	5	4
PSL-35	(4×18)	960	19	15	23	14,5
PSL-50 V1	32	350	34	20	20	18
	40		24	14	15	11,5
PSL-50 V2	32		21	10	12	8,5
	40		19	7	9,5	6
PSL-50 V3	32		22	9	12	8,5
	40		19	7	8	5,5
PSL-50 V2D	32		23	10	12	9
	40			6,5	10	6
PSL-55	40	350	23	5,5	7,5	4
		300				
PSL-60	32	500	15	7	10	6
	40	350	19	8,5	10	7,5

При этом значение коэффициента пульсаций выходного тока вычислялось по формуле аналогично $К_{ПО}$ по выражению (1.11), где в качестве измеряемых величин использовались соответствующие параметры сигнала токового датчика.

$$K_{ПО} = \frac{U_{ПИК}}{2U_{СР}} \cdot 100 \qquad (1.11)$$

Результаты исследований, свидетельствуют о наличии в спектре пульсаций выходного тока исследуемого драйвера и в соответствующем ему спектре пульсаций светового потока СД значительной доли высокочастотных гармоник (f≥3 кГц), находящихся вне пределов нормруемого диапазона (f≤300 Гц) и не оказывающих практического влияния на центральную нервную систему человека

По результатам обзора и анализа исследований в области электромагнитной совместимости СД источников света сделаны следующие выводы:

1. Функционирование СД ИС в ряде случаев не удовлетворяет требованиям ЭМС и препятствует нормальной работе других электроприемников;
2. Характеристики представленных на рынке СД ИС в некоторых случаях не соответствуют заявленным паспортным данным, либо данные приводятся в недостаточном объеме;

3. В настоящее время на рынке представлены СД ИС с различными типами драйверов, определяющих уровень электромагнитной совместимости изделий;
4. Отсутствует комплексная методика исследования характеристик СД ИС и оценки электромагнитной совместимости систем освещения на их основе;
5. Отсутствуют исследования электромагнитной совместимости систем освещения судов на основе светодиодов;
6. Отсутствуют предложения по обеспечению электромагнитной совместимости систем освещения на основе светодиодных светотехнических изделий.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ тенденций развития источников света, нормативной базы и результатов научных исследований в области электромагнитной совместимости светодиодных источников света и систем освещения на их основе позволил сформулировать цель и задачи исследования.

Целью диссертационной работы является проведение комплекса теоретических и экспериментальных исследований энергетических характеристик светодиодных источников света и особенностей их функционирования в составе систем освещения в обычных и чрезвычайных ситуациях для обеспечения электромагнитной совместимости светодиодного освещения в системах электроснабжения объектов морской индустрии.

Поставленная цель предусматривает решение следующих задач:

– разработка методик исследования энергетических характеристик СД источников света;

– экспериментальные исследования энергетических характеристик СД источников света при параметрах напряжения, характерных для нормальных и аварийных режимов;

– экспериментальные исследования показателей электромагнитной совместимости и качества электроэнергии в системах электроснабжения объектов морской индустрии в нормальных и аварийных режимах;

– разработка математической модели судовой электроэнергетической системы морского судна и исследование электромагнитной совместимости СД светотехнических изделий в системах освещения судов;

– разработка рекомендаций по обеспечению электромагнитной совместимости СД источников света в системах освещения объектов морской индустрии в нормальных условиях и при чрезвычайных ситуациях.

2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ СВЕТОДИОДОВ

2.1 Разработка экспериментальной установки и лабораторной методики исследований энергетических характеристик светодиодных источников света

В соответствии со структурной схемой СД ИС (рисунок 1.8) в изделиях осуществляется два преобразования энергии: драйвер преобразует энергию переменного тока в постоянный, а СД модуль преобразует электрическую энергию в оптическое излучение. Следовательно, к энергетическим характеристикам СД ИС относятся измеренные амплитудно-временные зависимости для энергии на входе драйвера ($U_{вх}$, $I_{вх}$), на выходе драйвера ($U_{вых}$, $I_{вых}$) и оптического излучения СД модуля (E), а так же показатели, рассчитанные на основе указанных величин (таблица 2.1). Следовательно, комплексное исследование энергетических характеристик и показателей ЭМС СД ИС возможно в лабораторных условиях со вскрытием корпуса изделия. С учетом вышесказанного разработана блок-схема реализации методики (рисунок 2.1).

В качестве средств измерений применены: анализатор КЭ, двухканальный цифровой осциллограф, измеритель параметров освещенности, цифровые вольтметр и амперметр. Паспортные характеристики используемых средств измерений приведены в таблице 2.2.

В качестве анализатора КЭ для данного исследования используется Fluke-434. Согласно данным производителя на характеристики средств измерений [64] прибор соответствует классу B стандарта IEC 61000-4-30 [65], доза фликера измеряется в соответствии с IEC 61000-4-15 [66], гармоники - в соответствии с IEC 61000-4-7 [67]. В стандартной комплектации прибор оснащается токоизмерительными клещами Fluke i400s с верхним пределом измерений 40/400 А и минимальным измеряемым значением силы тока 0,5 А, что не позволяет точно измерить энергетические характеристики СД ламп малой мощности. Для повышения точности измерений при экспериментальных исследованиях СД ламп применены токовые клещи Fluke i5s (0,01-6 А).

Так как СД ИС потребляют несинусоидальный ток, то в ряде технических характеристик СД продукции приводится величина коэффициента мощности. Однако,

Таблица 2.1 – Перечень измеряемых и расчетных характеристик

Характеристика	Измеряемые величины	Обозначение	Ед. изм.
Показатели качества электроэнергии	Величина напряжения	$U_{вх}$	В
	Суммарный коэф. гармонических составляющих напряжения	$K_{Uвх}$	%
	Коэффициенты гармонических составляющих напряжения	$K_{Uвх(n)}$	%
	Доза фликера	P_{st}, P_{lt}	
Параметры на входе драйвера	Величина потребляемого тока	$I_{вх}$	мА
	Активная, реактивная, полная мощность	$P_{вх}$, $Q_{вх}$, $S_{вх}$	Вт, вар, ВА
	Коэффициент мощности по первой гармоники	cosφ	
	Коэффициент мощности по (2.2)	$cos\varphi_{экв}$	
	Коэффициенты гармонических составляющих тока	$K_{Iвх(n)}$	%
Графически представленные характеристики	Векторная диаграмма Амплитудно-временные характеристики тока и напряжения Амплитудно-временные характеристики освещенности	-	-
Светотехнические характеристики	Величина освещенности	E	лк
	Коэффициент пульсаций освещенности	Кп	%
Параметры на выходе драйвера	Величина напряжения	$U_{вых}$	В
	Величина потребляемого тока	$I_{вых}$	мА

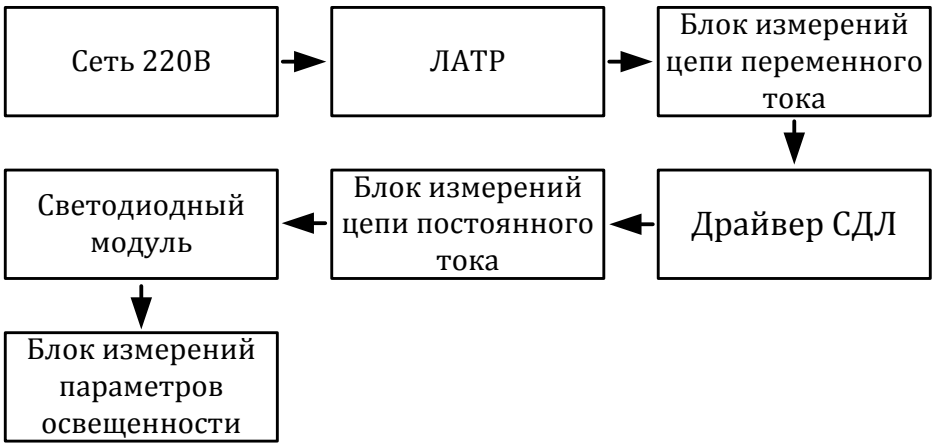
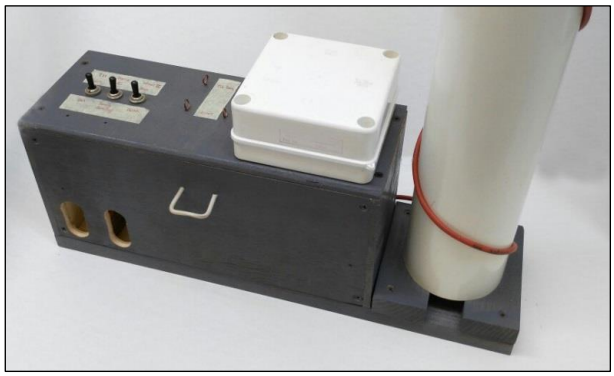


Рисунок 2.1 – Блок-схема реализации экспериментальной методики

Таблица 2.2 – Характеристики средств измерений

Прибор	Характеристика	Погрешность
Fluke 434	Величина напряжения	±0,5%
	Величина тока (прибор)	±1,0% ±5 ед. счета
	Величина тока (клещи i5s)	±1,0% ±5 ед. счета
	Активная, реактивная, полная мощность	±1,5% ±10 ед. счета
	Коэффициент мощности	±0,03
	Коэффициенты гармонических составляющих напряжения и тока	±5,0% ±2 ед. счета
	Суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения и тока	±2,5%
	Доза фликера	±5,0%
ФГ-01 (Эколайт-01)	Освещенность	±8%
	Яркость	±10%
	Коэффициент пульсаций освещенности	±10%
Ресанта DT9205A	Напряжение постоянного тока	±0,5% ±1 ед. счета
	Постоянный ток	±1,2% ±1 ед. счета
Uni-T UT210E	Напряжение постоянного тока	±0,7% ±3 ед. счета
	Постоянный ток	±2,0% ±8 ед. счета

а)



б)

Рисунок 2.2 – Экспериментальная установка для исследования светодиодных источников света: используемый прототип (а) и модель установки (б)

из приводимых данных не ясно, каким образом рассчитывается данный показатель. Как известно, данная величина может быть определена только с учетом основной гармонической составляющей тока (I_1) и напряжения (U_1) (2.1) или с учетом эквивалентной реактивной мощности по действующим значениям напряжения и тока (2.2). Эквивалентный коэффициент мощности $\cos\varphi_{экв}$ рекомендован к использованию при анализе сетей со сложным гармоническим составом тока [68].

$$cos\varphi = \frac{P}{U_1 \cdot I_1} \tag{2.1}$$

$$cos\varphi_{экв} = \frac{P}{U \cdot I} \tag{2.2}$$

С учетом указанных требований и состава оборудования разработана экспериментальная установка (рисунок 2.2) для определения характеристик СД ИС, схема которой приведена на рисунке 2.3. Для регистрации амплитудно-временных характеристик тока и напряжения используется осциллограф Welleman PCSGU250. Измерение напряжения осуществляется через разделительный трансформатор. Последующая обработка информации осуществляется с использованием ПК в программной среде PcLab2000LT.

Регистрация амплитудно-временных характеристик освещенности осуществляется на расстоянии 1 метр от источника света при помощи фотоголовки ФГ-01 от люксметра Эколайт-01, подключенной к персональному компьютеру (ПК) с использованием программного анализатора пульсаций освещенности Эколайт-АП.

Для апробации разработанной методики произведено экспериментальное исследование СД лампы мощностью 9 Вт производителя Xavax. Результаты измерений энергетических характеристик приведены в таблице 2.3. Мощность в цепи постоянного тока, имеющего пульсации, наложенные на постоянную составляющую, может быть приближенно определена по (2.3). Для точных расчетов необходимо использовать выражение (2.4).

$$P_d = U_d \cdot I_d \tag{2.3}$$

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T uidt, \tag{2.4}$$

где P_d, U_d, I_d – величина мощности, выпрямленного напряжения и тока; T – период; u, i – мгновенные значения выпрямленного напряжения и тока.

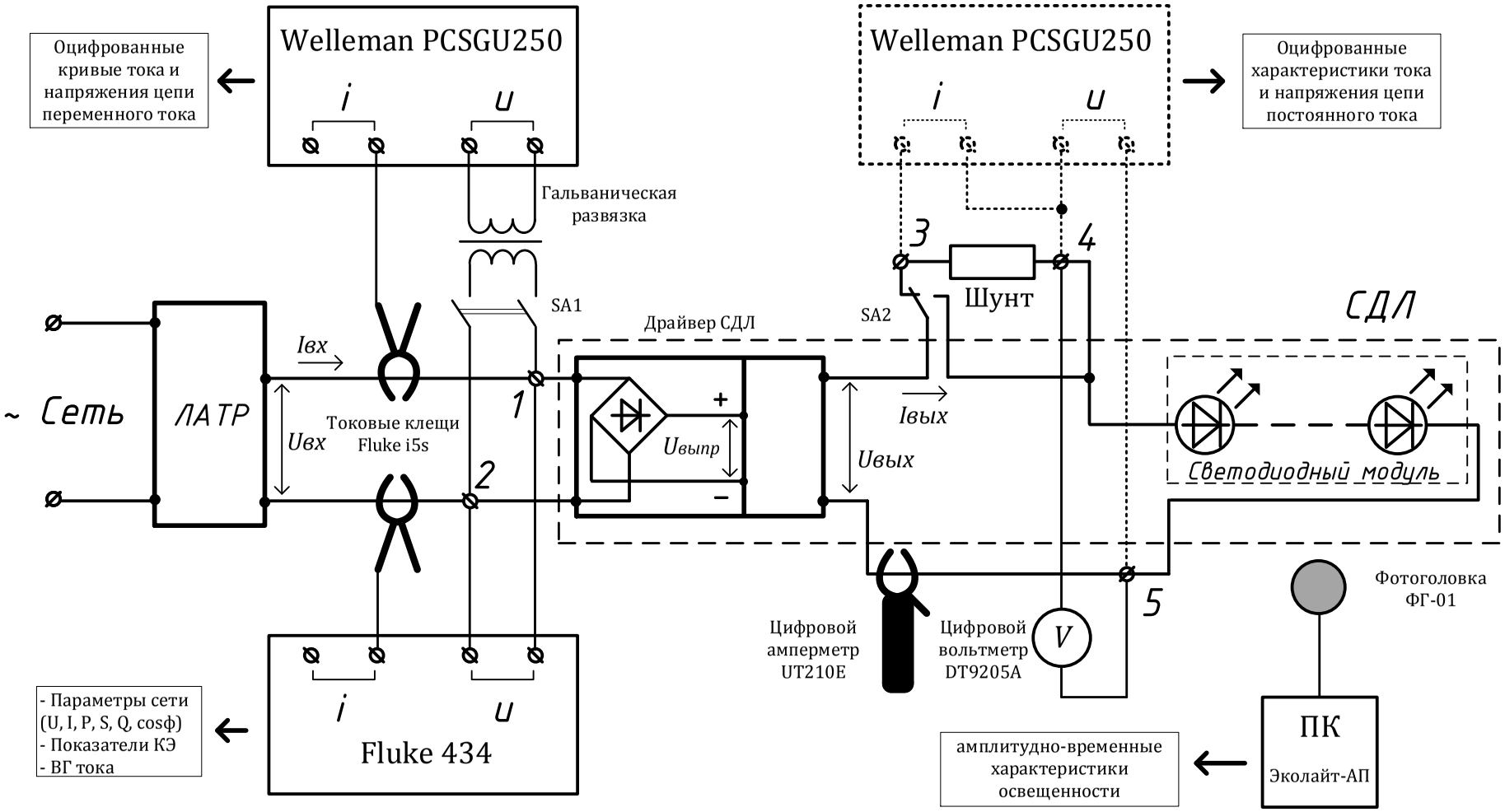


Рисунок 2.3 – Схема экспериментальной установки

Таблица 2.3 – Энергетические характеристики СД лампы Xavax 9 Вт

Цепь переменного тока (параметры измерены с использованием Fluke-434)										Цепь постоянного тока			Параметры освещенности		КПД драйвера
$U_{вх}$, В	$I_{вх}$, мА	$P_{вх}$, Вт	$S_{вх}$, ВА	$Q_{вх}$, вар	$\cos\varphi_{экв}$	$\cos\varphi$	K_U, %	K_I %	Pst	$U_{вых}$, В	$I_{вых}$, мА	$P_{вых}$, Вт	Е, лк	Кп, %	$P_{вых}/P_{вх}$
140	73	9,8	10,3	3	0,96	0,98	2,4	24,5	0,49	68,7	131,1	9,007	3,31	20	0,919
145	71	9,8	10,3	3,1	0,95	0,98	2,4	24,2	0,49	68,7	131,1	9,007	3,28	20	0,919
150	68	9,8	10,3	3,2	0,95	0,98	2,4	24,1	0,49	68,7	131	9,000	3,27	19	0,918
155	67	9,8	10,3	3,3	0,95	0,98	2,3	24,1	0,49	68,6	131	8,987	3,26	19	0,917
160	64	9,8	10,3	3,5	0,94	0,97	2,4	24,2	0,49	68,6	130,8	8,973	3,26	19	0,916
165	63	9,7	10,4	3,6	0,94	0,97	2,3	24,5	0,49	68,6	130,7	8,966	3,25	19	0,924
170	61	9,7	10,4	3,7	0,93	0,96	2,4	24,9	0,49	68,6	130,6	8,959	3,25	19	0,924
175	60	9,7	10,5	3,9	0,93	0,96	2,4	25,4	0,49	68,6	130,4	8,945	3,25	19	0,922
180	58	9,7	10,5	4,1	0,92	0,96	2,4	25,9	0,49	68,6	130,3	8,939	3,24	18	0,922
185	57	9,7	10,6	4,3	0,91	0,95	2,4	26,6	0,49	68,6	130,1	8,925	3,24	18	0,920
190	56	9,7	10,6	4,5	0,91	0,94	2,4	27	0,49	68,6	130	8,918	3,24	18	0,919
195	55	9,7	10,7	4,7	0,9	0,94	2,4	27,8	0,49	68,6	130	8,918	3,24	17	0,919
200	54	9,7	10,8	4,9	0,89	0,93	2,4	28,7	0,49	68,6	130	8,918	3,24	17	0,919
205	53	9,7	10,9	5,1	0,88	0,93	2,4	29,4	0,49	68,6	130	8,918	3,24	17	0,919
210	53	9,7	11,1	5,4	0,88	0,92	2,4	30,3	0,49	68,6	130,1	8,925	3,24	17	0,920
215	53	9,7	11,2	5,6	0,87	0,91	2,4	31,4	0,49	68,6	130,1	8,925	3,24	17	0,920
220	51	9,7	11,3	5,8	0,86	0,9	2,3	32,4	0,49	68,6	130,2	8,932	3,24	16	0,921
225	51	9,7	11,4	6,1	0,85	0,9	2,4	33,5	0,49	68,6	130,2	8,932	3,24	16	0,921
230	50	9,7	11,6	6,3	0,84	0,89	2,4	34,3	0,49	68,6	130,3	8,939	3,24	16	0,922
235	50	9,7	11,7	6,5	0,83	0,88	2,4	35,3	0,49	68,8	130,4	8,972	3,24	16	0,925
240	49	9,7	11,8	6,7	0,82	0,88	2,4	36,4	0,49	68,8	130,4	8,972	3,24	16	0,925

По результатам измерений в цепях переменного и постоянного тока рассчитан к.п.д. драйвера лампы. Результаты измерений высших гармонических составляющих напряжения и тока приведены в таблице 2.4. Для оценки уровня несинусоидальности напряжения в электрической сети в таблице приведены результаты измерения показателей несинусоидальности при чисто активной нагрузке (использована ЛН мощностью 60 Вт).

На рисунке 2.4 представлены зависимости энергетических характеристик исследуемой СД лампы от величины напряжения сети: для потребляемой мощности на входе и выходе драйвера (а); для безразмерных характеристик: к.п.д., $\cos\varphi_{экв}$, а так же величин тока $I_{ВХотн}$ (2.5) и освещенности $E_{отн}$ (2.6), отнесенные к их максимальным значениям (б); для показателей несинусоидальности тока на входе драйвера (в).

$$I_{ВХотн} = {}^{I_{ВХ}}/_{I_{ВХмакс}} \tag{2.5}$$

$$E_{отн} = {}^{E}/_{E_{макс}} \tag{2.6}$$

Для исследования процессов преобразования энергии в СД ИС при помощи осциллографа были проведены измерения амплитудно-временных характеристик $u_{вх}(t)$, $i_{вх}(t)$, $u_{вых}(t)$, $i_{вых}(t)$ и $E(t)$ (рисунок 2.5). Зависимость $u_{выпр}(t)$ определена аналитические на основе зависимости $u_{вх}(t)$.

Из рисунка 2.5 следует, что СД лампа потребляет из сети несинусоидальный ток. При энергетическом подходе к анализу несинусоидальных процессов (рисунок 2.6, а) полагают, что нелинейный элемент в силовой цепи обладает преобразовательными свойствами. Поток энергии, поступающий от генератора (мощность этого потока определяется основной гармоникой) распределяется в цепи следующим образом. Часть мощности теряется в активных сопротивлениях источника $\Delta P_г$ и сети $\Delta P_{сети}$, основная часть этой мощности Рн поступает в нагрузку, преобразуясь в другие виды энергии. Некоторая доля мощности $\Delta P_{ПП}$ в нелинейном элементе преобразуется в поток ВГ (рисунок 2.6, б). На месте нелинейного элемента появляется преобразователь в виде источника гармоник тока Jn (рисунок 2.6, в). Малая часть гармонической мощности возвращается в питающую сеть в виде мощностей $\Delta P_{сети}n$ и $\Delta P_г n$, которые рассеиваются соответственно в активных сопротивлениях сети $r_{сети}$ и генератора $r_г$ (рисунок 2.6), а большая часть гармонической мощности $\Delta P_н n$ потребляется в нагрузке.

Таблица 2.4 – Показатели несинусоидальности тока и напряжения на входе драйвера СД лампы Xavax 9 Вт

$U_{ВХ}$	Показатели несинусоидальности напряжения, %								Показатели несинусоидальности тока, %							
	K_U	K_{U3}	K_{U5}	K_{U7}	K_{U9}	K_{U11}	K_{U13}	K_{U15}	K_I	K_{I3}	K_{I5}	K_{I7}	K_{I9}	K_{I11}	K_{I13}	K_{I15}
140	2,4	0,3	1	1,8	0,3	1	0,3	0,1	24,5	18,2	13,6	6,5	1,2	4,8	2,3	0,8
145	2,4	0,4	1,1	1,8	0,3	1	0,3	0,1	24,2	17,7	13,5	6,9	1,6	4,8	2,4	0,9
150	2,4	0,4	1,1	1,8	0,3	1	0,3	0,1	24,1	17,5	13,3	7,4	2,2	4,7	2,6	1,1
155	2,3	0,4	1	1,8	0,3	1	0,3	0,1	24,1	17,3	13,3	7,7	2,7	4,6	2,7	1,3
160	2,4	0,4	1	1,8	0,3	1	0,3	0,1	24,2	17,4	13,1	7,9	3,2	4,4	2,7	1,4
165	2,3	0,4	1	1,8	0,3	1	0,3	0,1	24,5	17,7	13	8,2	3,8	4,3	2,7	1,5
170	2,4	0,4	1	1,8	0,3	1	0,3	0,1	24,9	18,1	13	8,3	4,4	4,1	2,8	1,6
175	2,4	0,4	1	1,8	0,3	1	0,4	0,1	25,4	18,5	13	8,6	4,8	4,1	3	1,5
180	2,4	0,4	1	1,8	0,3	1	0,4	0,1	25,9	19,1	12,9	8,5	5,3	3,9	3	1,6
185	2,4	0,3	1	1,8	0,3	1	0,4	0,1	26,6	19,7	13	8,7	5,8	3,8	3	1,6
190	2,4	0,4	1	1,9	0,2	1	0,4	0,1	27	20,2	13,1	8,7	5,9	3,7	3,1	1,7
195	2,4	0,3	1,1	1,8	0,2	1	0,4	0,1	27,8	21	13,2	8,7	6,4	3,5	3,3	1,7
200	2,4	0,4	1	1,8	0,2	1	0,4	0,1	28,7	21,8	13,5	8,7	6,7	3,6	3,4	1,7
205	2,4	0,3	1	1,8	0,3	1	0,4	0,1	29,4	22,4	13,78	8,5	7,2	3,1	3,7	2
210	2,4	0,3	1	1,8	0,3	1	0,4	0,1	30,3	23,3	14	8,4	7,6	2,9	3,8	2,1
215	2,4	0,4	1,1	1,8	0,3	1	0,4	0,1	31,4	24,4	14,2	8,3	8,2	3	3,9	2,2
220	2,3	0,4	1,1	1,7	0,3	0,9	0,3	0,1	32,4	25,2	14,7	8,5	8,4	3	3,8	2,5
225	2,4	0,3	1	1,8	0,3	1	0,3	0,1	33,5	26,1	15,2	8,4	8,7	2,9	4	2,7
230	2,4	0,3	1,1	1,8	0,3	1	0,3	0,1	34,3	27	15,5	8,3	8,8	2,7	4	2,8
235	2,4	0,2	1	1,9	0,3	1	0,3	0,1	35,3	27,8	16,1	8,2	9	2,3	4,2	3
240	2,4	0,2	1	1,9	0,3	1	0,3	0,1	36,4	28,8	16,5	7,8	9,4	2,1	4,4	3,2
	Показатели несинусоидальности, измеренные при активной нагрузке (лампа накаливания), %															
ЛН	2,4	0,6	1,1	1,9	0,3	0,8	0,3	0,1	2,5	1	1,1	1,8	0,3	0,8	0,3	0,1

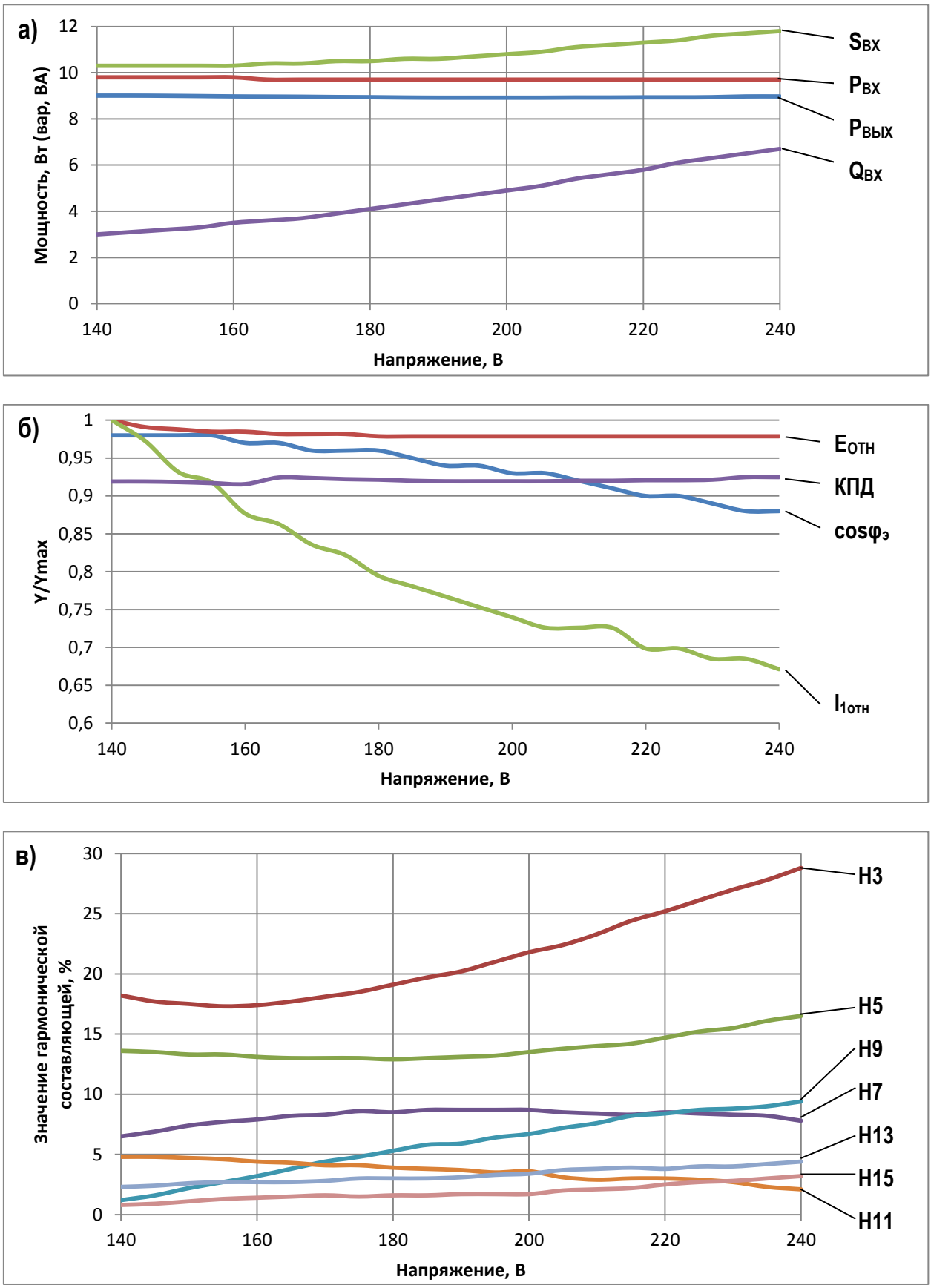


Рисунок 2.4 – Зависимости энерегетических характеристик СД лампы Xavax 9 Вт от величины напряжения в сети: для потребляемой мощности на входе и выходе драйвера (а); для к.п.д., λ, тока $I_{ВХотн}$ и освещенности $E_{отн}$ (б); для показателей несинусоидальности тока на входе драйвера (в)

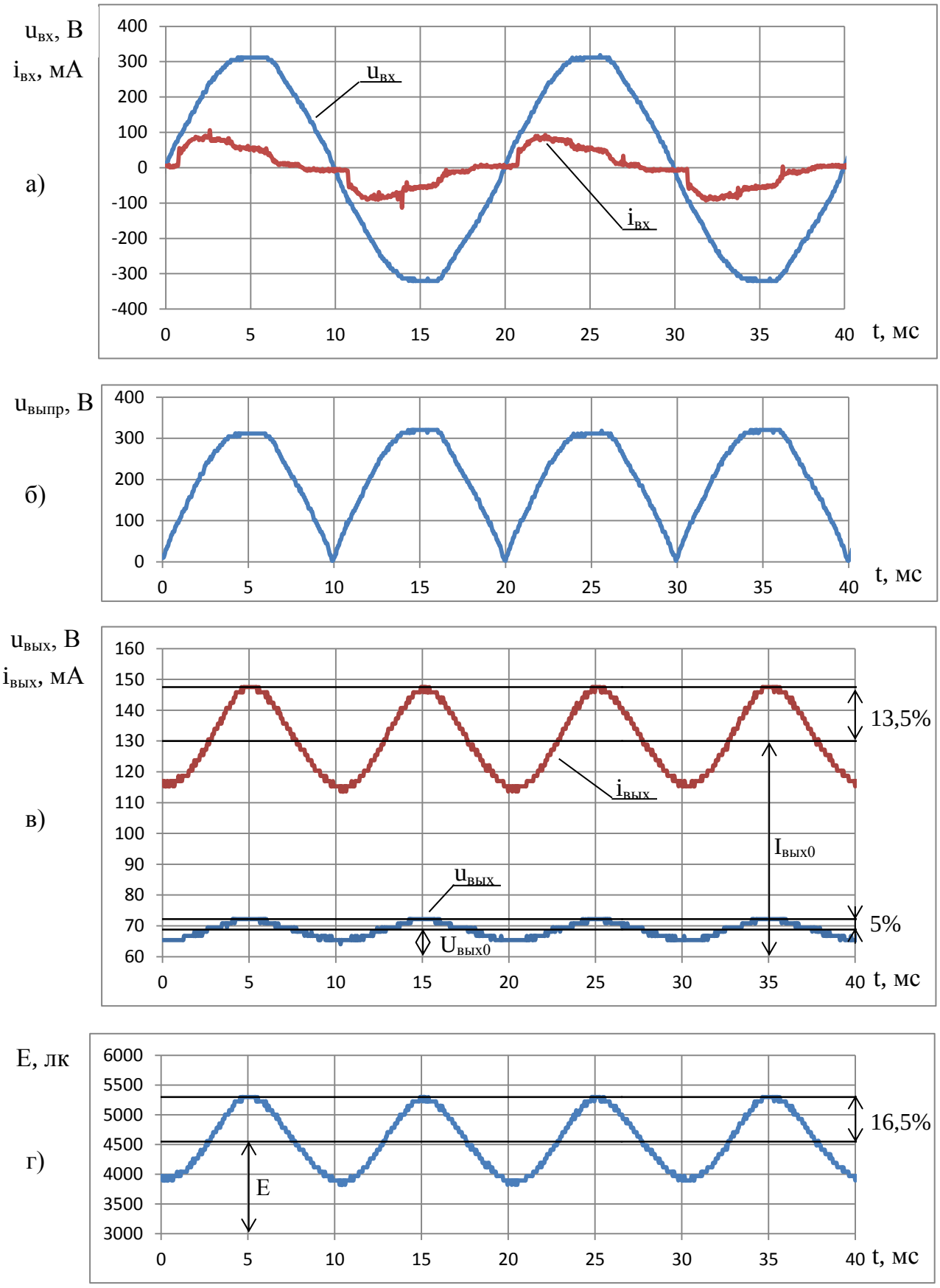


Рисунок 2.5 – Осциллограммы энергетических характеристик СД лампы: а) ток и напряжение на входе драйвера; б) напряжение после выпрямителя в составе драйвера; в) ток и напряжение на выходе драйвера; г) освещенность

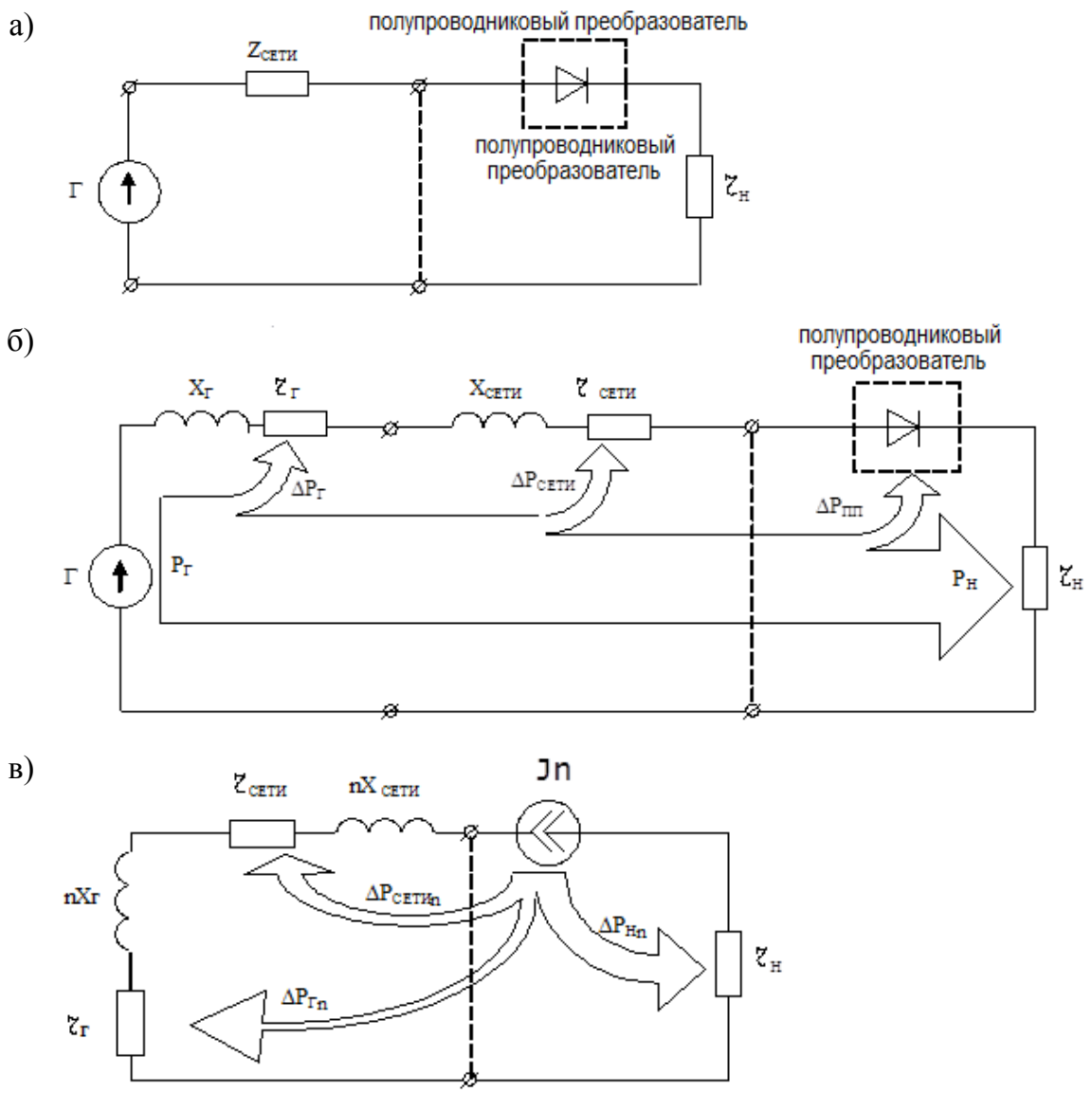


Рисунок 2.6 – Схема цепи с преобразовательным устройством (а); поток мощности на основной частоте от генератора (б); поток мощности на гармонической частоте n (в)

Для исследования распространения высших гармоник тока по элементам СД лампы произведен гармонический анализ измеренных амплитудно-временных характеристик путем представления в виде тригонометрического ряда Фурье (2.7) с использованием программного пакета Mathcad [69-71].

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty}(a_k \cos k\omega_1 t + b_k \sin k\omega_1 t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(k\omega_1 t + \varphi_k)\,, \qquad (2.7)$$

где ω_1 - угловая частота основной гармоники; a_0, a_k и b_k - коэффициенты разложения, вычисляемые по (2.8-2.11).

$$a_0 = \frac{1}{T}\int_{t_н}^{t_н+T} x(t)dt \qquad (2.8)$$

$$a_k = \frac{2}{T}\int_{t_н}^{t_н+T} x(t)\cos k\omega_1 t dt\ ;\ b_k = \frac{2}{T}\int_{t_н}^{t_н+T} x(t)\sin k\omega_1 t dt \qquad (2.9)$$

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \qquad (2.10)$$

$$\varphi_k = -arctg\frac{b_k}{a_k}, \qquad (2.11)$$

где A_k - амплитуда k-й гармоники, φ_k - фаза k-й гармоники; a_0 - среднее значение сигнала (постоянная составляющая); $k\omega_1 = \omega_k$ - угловая частота k-й гармоники; $t_н$ - момент времени, соответствующий началу периода.

Результаты расчета коэффициентов разложения в ряд Фурье в соответствии с (2.3) представлены в таблице 2.5. Значения гармонических составляющих в именованных единицах приведены в таблице 2.6. Правильность разложения сигналов в ряд Фурье подтверждена путем реконструкции сигналов по ограниченному ряду (рисунок 2.7).

Анализ результатов расчетов (рисунок 2.5, таблица 2.5, 2.6), проведенных на основе экспериментальных данных позволил выявить следующее. Форма и гармонический состав напряжения на входе драйвера определяются показателями качества электроэнергии в питающей сети. Форма и гармонический состав тока на входе драйвера обусловлены нелинейной характеристикой драйвера. Это подтверждается путем сопоставления гармонических составов токов, потребляемых СД лампой и лампой накаливания (таблица 2.4).

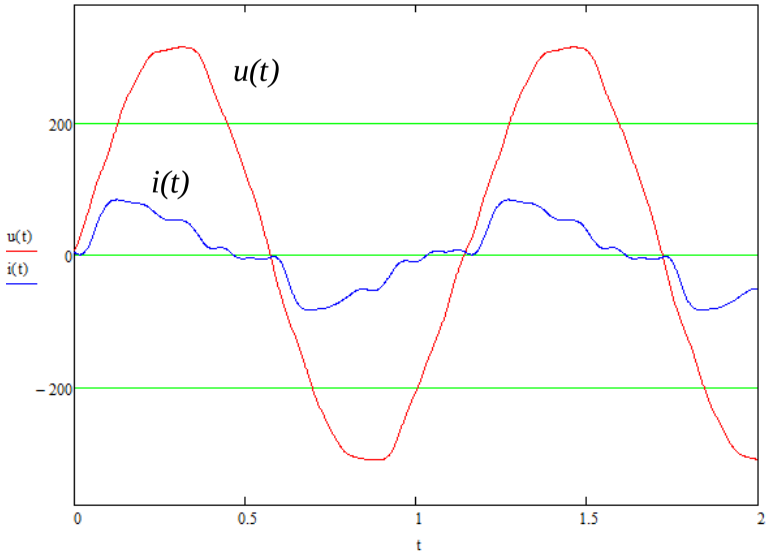
Напряжение на выходе выпрямителя является пульсирующим. При этом преобладающей является гармоническая составляющая второго порядка (таблица 2.7). Коэффициент пульсаций $К_П$ для всех величин рассчитан по выражению (1.8). Остальные гармонические составляющие имеют значение меньшее на порядок (таблица 2.5). Величина гармонических составляющих напряжения на выходе драйвера значительно снижается, что обусловлено его схемотехническими особенностями. С инженерной точки зрения, главным образом, гармонические составляющие второго порядка определяют пульсации напряжения ($U_{вых}$), тока ($I_{вых}$) и светового потока (освещенности) (E) (таблица 2.7).

Таблица 2.5 – Результаты разложения амплитудно-временных характеристик в ряд Фурье для СД лампы Xavax 9 Вт

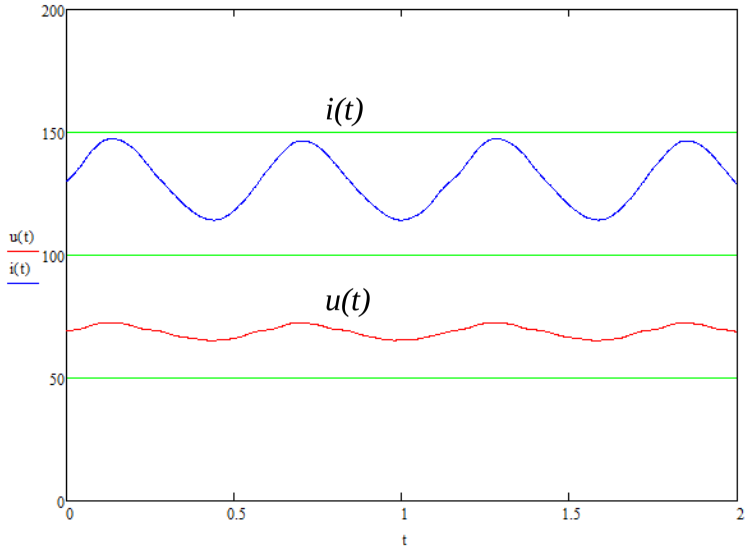
Характеристика		Параметр	Значение коэффициентов разложения в ряд Фурье для составляющих порядком от 1 до 15															
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Вход драйвера	$u_{вх}$	a_k	-	315,35	-7,127	-4,021	-2,545	-1,634	-1,072	3,601	-1,850	-1,575	-0,798	1,067	-1,241	-0,422	-1,315	-1,278
		b_k	-	3,950	0,482	-0,349	-0,795	-2,473	0,804	2,439	-0,056	0,341	0,022	-0,994	0,423	-0,328	-0,006	0,176
		A_k	3,361	315,37	7,143	4,036	2,666	2,964	1,340	4,349	1,851	1,611	0,799	1,458	1,311	0,534	1,315	1,290
		φ_k	-	0,013	-0,067	0,087	0,303	0,987	-0,643	0,595	0,030	-0,214	-0,027	-0,750	-0,328	0,660	0,005	-0,137
	$i_{вх}$	a_k	-	56,906	-1,213	4,527	-1,130	-0,930	-0,924	-5,002	-0,438	-3,443	0,335	-0,758	0,009	-1,762	0,345	-0,794
		b_k	-	32,129	-1,979	-16,47	-0,424	-10,84	1,052	-1,646	-0,044	-3,727	1,375	2,517	0,208	1,231	-0,387	0,329
		A_k	0,422	65,350	2,322	17,086	1,207	10,888	1,400	5,266	0,440	5,074	1,415	2,628	0,209	2,150	0,518	0,859
		φ_k	-	0,514	1,021	-1,303	0,359	1,485	-0,850	0,318	0,100	0,825	1,332	-1,278	1,526	-0,610	-0,843	-0,392
Драйвер	$u_{выпр}$	a_k	-	1,954	3,684	1,353	2,096	-0,534	-2,409	0,637	1,492	0,128	1,416	-0,128	-0,081	0,315	-0,288	-0,008
		b_k	-	-7,745	-136,7	0,803	-24,88	0,673	-7,746	-0,392	-8,864	0,632	-2,936	-0,082	-3,880	0,191	-2,871	0,666
		A_k	185,77	7,988	136,82	1,573	24,974	0,859	8,112	0,748	8,989	0,645	3,260	0,151	3,881	0,368	2,886	0,666
		φ_k	-	-1,324	-1,544	0,535	-1,487	-0,900	1,269	-0,552	-1,404	1,372	-1,122	0,568	1,550	0,545	1,471	-1,558
Выход драйвера	$u_{вых}$	a_k	-	0,102	3,333	-0,087	0,134	-0,058	-0,187	0,032	-0,107	0,019	-0,019	-0,027	-0,075	0,048	0,050	0,012
		b_k	-	0,051	0,283	0,028	-0,076	-0,044	-0,083	-0,023	0,137	-0,044	-0,009	-0,024	0,107	-0,022	0,033	0,023
		A_k	68,8	0,051	0,283	0,028	-0,076	-0,044	-0,083	-0,023	0,137	-0,044	-0,009	-0,024	0,107	-0,022	0,033	0,023
		φ_k	-	0,462	0,085	-0,308	-0,518	0,646	0,419	-0,618	-0,907	-1,172	0,431	0,738	-0,961	-0,419	0,578	1,078
	$i_{вых}$	a_k	-	0,632	15,924	-0,496	0,419	-0,237	-0,461	-0,117	-0,129	-0,124	-0,141	-0,116	-0,010	-0,076	-0,014	-0,058
		b_k	-	0,255	0,605	-0,054	-0,656	-0,035	0,019	-0,010	-0,001	0,001	0,071	0,053	0,036	-0,034	-0,026	0,004
		A_k	130,3	0,682	15,936	0,499	0,778	0,239	0,461	0,117	0,129	0,124	0,158	0,128	0,037	0,083	0,029	0,058
		φ_k	-	0,383	0,038	0,108	-1,002	0,145	-0,040	0,083	0,004	-0,008	-0,464	-0,430	-1,297	0,415	1,077	-0,067
E		a_k	-	37,335	940,02	-29,28	24,733	-13,98	-27,21	-6,905	-7,602	-7,320	-8,334	-6,852	-0,592	-4,499	-0,825	-3,417
		b_k	-	15,036	35,714	-3,177	-38,69	-2,038	1,100	-0,572	-0,026	0,060	4,170	3,145	2,107	-1,979	-1,527	0,230
		A_k	4543,0	40,248	940,70	29,454	45,922	14,132	27,236	6,929	7,602	7,320	9,319	7,540	2,188	4,915	1,736	3,425
		φ_k	-	0,383	0,038	0,108	-1,002	0,145	-0,040	0,083	0,003	-0,008	-0,464	-0,430	-1,297	0,414	1,076	-0,067

Таблица 2.6 – Значения составляющих ряда Фурье для амплитудно-временных характеристик СД лампы Xavax 9 Вт

Характе-ристика	Величина среднеквадратичного значения составляющей ряда Фурье															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$U_{вх}$, В	-	229,87	5,21	2,94	1,94	2,16	0,98	3,17	1,35	1,17	0,58	1,06	0,96	0,39	0,96	2,94
$I_{вх}$, мА	-	47,40	1,68	12,39	0,88	7,90	1,02	3,82	0,32	3,68	1,03	1,91	0,15	1,56	0,38	12,39
$U_{выпр}$, В	185,77	13,13	224,96	2,59	41,06	1,41	13,34	1,23	14,78	1,06	5,36	0,25	6,38	0,61	4,75	2,59
$U_{вых}$, В	68,60	2,30	67,61	1,84	3,11	1,47	4,14	0,80	3,52	0,97	0,43	0,73	2,64	1,07	1,21	1,84
$I_{вых}$, мА	130,30	5,54	129,57	4,06	6,33	1,95	3,75	0,95	1,05	1,01	1,28	1,04	0,30	0,68	0,24	4,06
E, лк	4543,0	193,18	4515,0	141,37	220,41	67,83	130,73	33,26	36,49	35,13	44,73	36,19	10,50	23,59	8,33	141,37



а)



б)

Рисунок 2.7 – Реконструкция амплитудно-временных характеристик по ограниченному ряду Фурье:

а) ток и напряжение на входе драйвера; б) ток и напряжение на выходе драйвера

Таблица 2.7 – Характеристики напряжения, тока и освещенности на выходах структурных элементов СД лампы Xavax 9 Вт

Характеристика	Параметр			
	$U_{выпр}$	$U_{вых}$	$I_{вых}$	E
A_2/A_0	0,737	0,004	0,122	0,207
$K_{П,\%}$	100	5	13,5	16,5

Как следует из рисунка 2.5, таблицы 2.7, величина пульсаций тока через СД модуль значительно выше величины пульсаций напряжения на выходе драйвера, что обусловлено нелинейностью вольт-амперной характеристики светодиода (рисунок 1.19, 1.13). Проведенное исследование показывает (рисунок 2.5), что пульсации светового потока (освещенности) определяются характером пульсаций тока, протекающего через СД модуль, с учетом ВАХ светодиодов.

2.2 Разработка инженерной методики исследования энергетических характеристик светодиодных источников света

Практическое применение изложенной ранее лабораторной методики исследования энергетических характеристик имеет ограничивающий фактор - необходимость вскрытия корпуса СД ИС для измерения параметров цепи постоянного тока. Показано, что вскрытие корпуса позволяет провести измерения для определения к.п.д. драйвера СД ИС и оценить пульсации тока на выходе драйвера. В то же время в разделе 2.1 установлено, что пульсации тока находятся во взаимосвязи с пульсациями освещенности, которая является одной из характеристик уровня электромагнитной совместимости СД ИС. Таким образом, представляется возможным разработать инженерную методику, позволяющую производить измерения без вскрытия корпуса лампы.

Инженерная методика реализуется по упрощенной схеме (рисунок 2.8) на экспериментальной установке (рисунок 2.9) с использованием приборов: анализатора КЭ Fluke-434, цифрового осциллографа PCSGU250 и фотоголовки ФГ-01 (Эколайт).

Для исследуемого СД ИС анализируются характеристики, предоставленные производителем в технической документации. Выявляется наличие данных о величине

потребляемого тока, коэффициента мощности, коэффициента пульсаций освещенности, диапазоне рабочих напряжений.

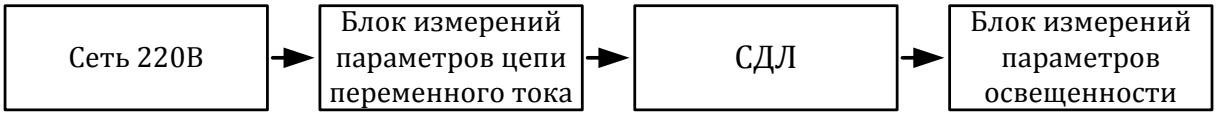


Рисунок 2.8 – Блок-схема реализации инженерной методики

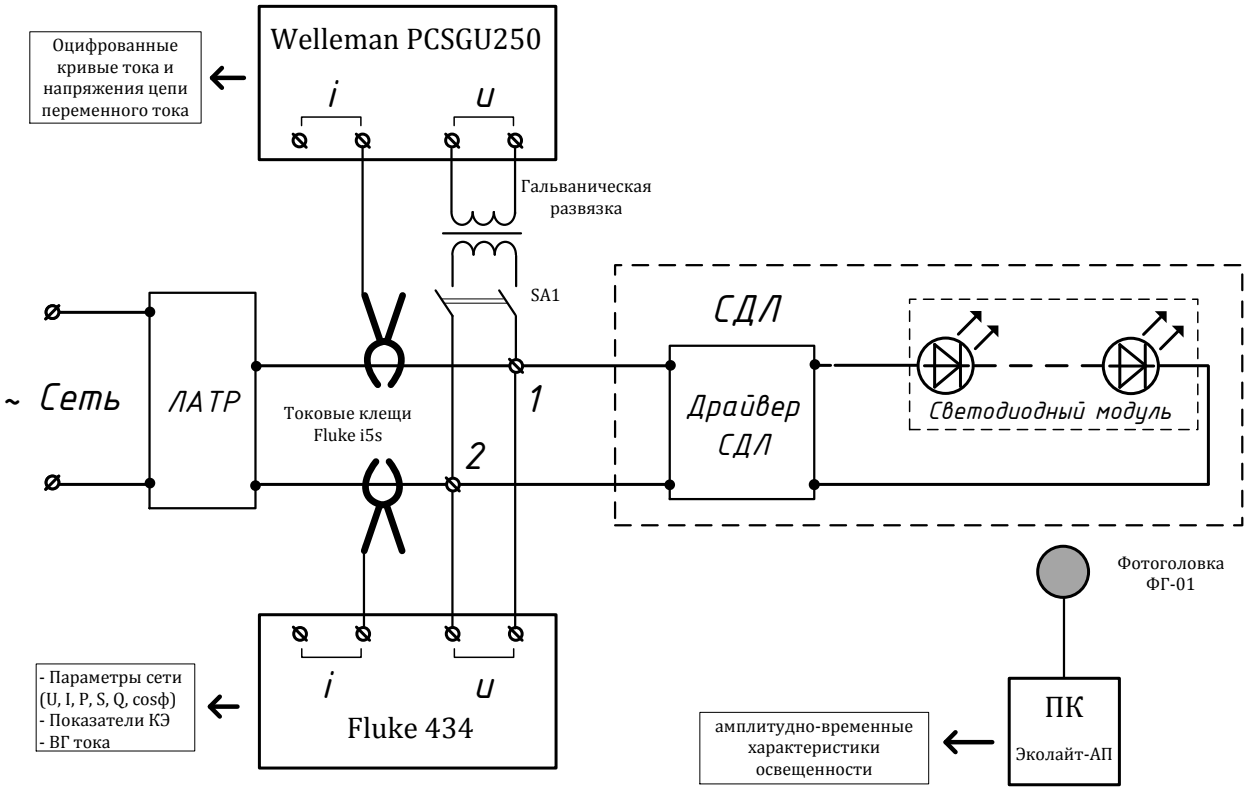


Рисунок 2.9 – Схема экспериментальной установки (инженерная методика)

Далее СД ИС подключается к экспериментальной установке. В зависимости от поставленной задачи исследование производится при заданной величине напряжения на входе СД ИС либо напряжение регулируется в заданном диапазоне. Энергетические характеристики измеряются аналогично лабораторной методике (таблица 2.1) за исключением параметров на выходе драйвера. По результатам измерений оценивается электромагнитная совместимость СД ИС.

На основании измеренных амплитудно-временных характеристик освещенности по выражениям (2.7-2.11) определяется гармонический состав пульсаций освещенности, наложенных на постоянную составляющую. По результатам расчёта оцениваются электромагнитная совместимость СД ИС и вероятность возникновения стробоскопического эффекта при использовании данного изделия.

ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ

1. Разработана лабораторная методика экспериментальных исследований характеристик электромагнитной совместимости СД источников света, реализованная на основе комплекса приборов для измерения энергетических характеристик источников света на всех этапах преобразования энергии при параметрах напряжения, характерных для нормальных и аварийных режимов.

2. В ходе анализа экспериментальных исследований СД ламп, выполненных на лабораторной установке, выявлены взаимосвязи между параметрами процессов на всех этапах преобразования энергии от электрической сети до излучаемого светового потока в СД источниках света, в том числе:

- форма и гармонический состав входного тока светодиодной лампы определяется нелинейной характеристикой драйвера;

- наличие в конструкции драйвера двухполупериодного выпрямителя обуславливает на его выходе пульсации напряжения, наложенные на постоянную составляющую, при этом в гармоническом составе преобладает (более чем на порядок) гармоническая составляющая второго порядка;

- на выходе драйвера величина высших гармонических составляющих напряжения снижается за счет схемотехнических особенностей драйвера;

- пульсации освещенности СД ИС определяются характером пульсаций тока, протекающего через СД модуль, с учетом ВАХ светодиодов;

3. На основе исследований светодиодных источников света, проведенных с использованием лабораторной методики, предложена инженерная методика исследования характеристик электромагнитной совместимости.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

3.1 Экспериментальные исследования энергетических характеристик светодиодных ламп

Исследования светодиодных ламп проведены на основе предложенной методики (инженерная) с использованием разработанной экспериментальной установки. В качестве объектов исследования выбраны восемь светодиодных ламп сетевого напряжения, представленных на рынке различными производителями. Паспортные данные ламп приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Паспортные данные исследуемых светодиодных ламп

Производитель	Цоколь	Рном, Вт	Uном, В	Iном, мА	Фуд, лм/Вт	Цв темп Тс, К
IKEA Ledare	E27	6,3	220-240	35	63	2700
ISY	GU10	3	100-250	30	67	2700
Melitech	E27	2,5	230	70	46	3200
Osram	E27	7	220-240	40	67	2700
Philips	GU10	3,5	220-240	35	69	2700
Philips	E27	6	220-240	40	78	2700
Philips	E27	11,5	220-240	105	92	2700
Xavax	E27	9	230	52	89	3000

Для оценки электромагнитной совместимости СДЛ при отклонениях напряжения в электрической сети от номинального значения проведено экспериментальное исследование всех образцов СДЛ при изменении напряжения от 0 до 250 В. При этом фиксировалось начало свечения ламп и измерялись величины потребляемого тока, активной и реактивной мощности, ВГ тока, изменение освещенности и коэффициента пульсаций $К_П$. Показатели несинусоидальности напряжения в электрической сети во время экспериментов приведены в таблице 3.2

Таблица 3.2 – Значения высших гармоник напряжения в электрической сети

K_U, %	K_{U3}, %	K_{U5}, %	K_{U7}, %	K_{U9}, %	K_{U11}, %	K_{U13}, %	K_{U15}, %
2,3	0,5	1,3	1,2	0,1	1,0	0,9	0,1

Результаты экспериментальных и аналитических исследований СД ИС рассмотрены на примере лампы Ikea мощностью 6,3 Вт в разделе 3.1.1. Результаты исследований всех образцов СД ламп приведены в приложении А.

3.1.1 Результаты исследований светодиодной лампы Ikea 6,3 Вт

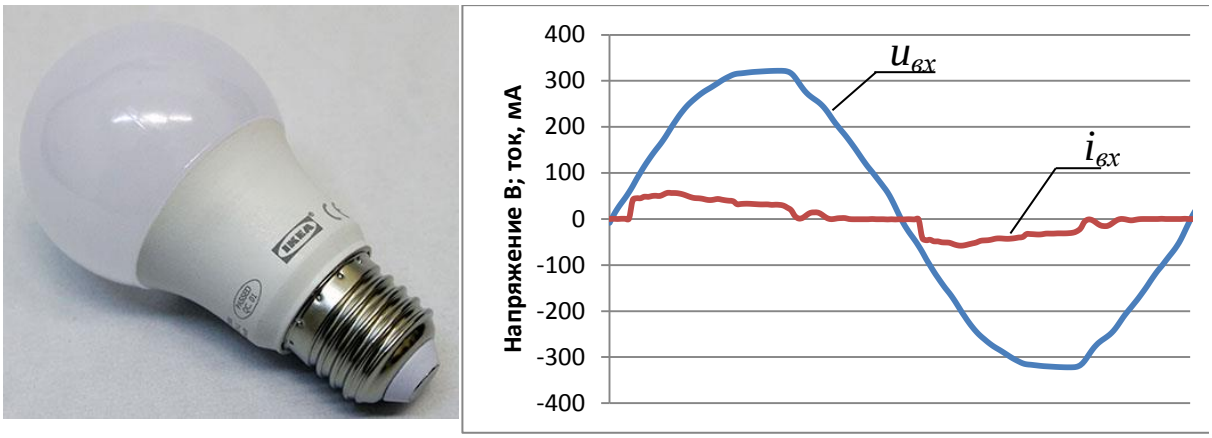
Результаты экспериментальных исследований электротехнических характеристик СД лампы Ikea мощностью 6,3 Вт приведены на рисунке 3.1, таблице 3.3. Анализ полученных в ходе исследований данных показывает, что при изменении напряжения от 100 до 250 В потребление активной мощности изменяется незначительно (в пределах 4 %). В то же время потребление реактивной мощности возрастает от 1 до 5 вар, что сопровождается уменьшением величины $\cos\varphi_{ЭКВ}$. Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока возрастает при увеличении напряжения, зависимость близка к линейной. Преобладающими среди эмиссируемых в электрическую сеть ВГ тока являются гармоники третьего и пятого порядка.

Результаты экспериментальных исследований светотехнических характеристик приведены на рисунке 3.2. Анализ результатов исследований показывает, что световой поток СД лампы пульсирует, обуславливая пульсации освещенности. Форма пульсаций освещенности, наложенных на постоянную составляющую близка к синусоидальной. Произведено разложение амплитудно-временной характеристики освещенности в ряд Фурье (выражение 3.1, таблица 3.4) при базисной частоте 50 Гц в соответствии с методикой, изложенной в разделе 2.1.

$$\begin{aligned} E(t) = {} & 1449{,}0 + 2{,}248\cos(\omega t - 1{,}298) + 218{,}043\cos(2\omega t + 0{,}164) \\ & + 1{,}035\cos(3\omega t - 0{,}924) + 15{,}577\cos(4\omega t + 0{,}315) \\ & + 3{,}064\cos(5\omega t + 0{,}973) + 4{,}283\cos(6\omega t + 1{,}364) \\ & + 2{,}651\cos(7\omega t + 1{,}534) + 1{,}183\cos(8\omega t - 0{,}363) \\ & + 1{,}820\cos(9\omega t + 1{,}201) + 1{,}743\cos(10\omega t + 1{,}545) \\ & + 1{,}747\cos(11\omega t - 1{,}324) + 0{,}900\cos(12\omega t - 1{,}442) \\ & + 1{,}351\cos(13\omega t + 1{,}253) + 1{,}873\cos(14\omega t + 1{,}261) \\ & + 1{,}522\cos(15\omega t + 1{,}242) \end{aligned} \tag{3.1}$$

Анализ функции E(t) (3.1) показывает, что преобладающей является составляющая второго порядка, что свидетельствует о пульсации освещенности с частотой 100 Гц. Коэффициент пульсаций освещенности, измеренный на расстоянии от лампы 1 м, при напряжении 230 В составляет 18,4 %.

Обобщенные результаты исследований лампы приведены на рисунке 3.3.



а) б)

Рисунок 3.1 – Внешний вид (а) и осциллограммы (б) входного тока и напряжения лампы Ikea 6,3 Вт

Таблица 3.3 – Энергетические характеристики СД лампы Ikea 6,3 Вт

$U_{вх}$, В	$I_{вх}$, мА	$P_{вх}$, Вт	$Q_{вх}$, вар	cosφ экв	E, лк	Кп, %	K_I, %	Коэффициенты ВГ тока, %						
								3	5	7	9	11	13	15
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100	60,0	5,9	1,1	0,983	1,000	22,5	13,7	6,3	7,5	7,4	5,0	1,1	2,2	0,2
110	54,0	5,8	1,3	0,976	0,991	21,9	14,5	8,3	6,7	7,1	5,3	1,3	3,0	0,5
120	49,0	5,8	1,5	0,986	0,979	21,4	15,6	10,1	6,5	6,8	5,5	1,2	3,7	1,1
130	46,0	5,7	1,7	0,953	0,972	21,0	16,8	11,5	6,7	6,6	5,8	0,9	4,2	1,6
140	43,0	5,7	1,9	0,947	0,964	20,7	18,6	13,2	7,5	6,6	6,2	0,7	4,7	2,0
150	41,0	5,7	2,1	0,927	0,957	20,4	20,4	14,7	8,4	6,5	6,5	0,4	5,2	2,4
160	39,0	5,7	2,4	0,913	0,909	20,0	22,2	16,1	9,4	6,5	6,8	0,2	5,7	2,8
170	37,0	5,7	2,7	0,906	0,907	19,8	24,1	17,4	10,6	6,8	7,3	0,7	6,3	3,2
180	36,0	5,7	3,0	0,880	0,903	19,6	26,3	18,7	12,0	7,1	7,8	0,9	6,8	3,6
190	34,0	5,7	3,3	0,882	0,901	19,3	28,3	20,1	13,4	7,3	8,5	1,4	7,3	3,8
200	34,0	5,7	3,6	0,838	0,899	19,2	30,2	21,2	14,7	7,5	8,8	1,9	7,9	4,3
210	33,0	5,7	3,9	0,823	0,896	19,0	32,5	22,4	16,3	7,9	9,6	2,5	8,2	4,6
220	32,0	5,7	4,2	0,810	0,893	18,7	34,3	24,0	17,0	7,9	10,1	2,3	8,6	4,5
230	31,0	5,7	4,4	0,799	0,891	18,4	37,3	26,6	18,3	8,3	10,6	1,6	9,3	4,2
240	31,0	5,7	4,7	0,766	0,883	17,8	39,7	28,7	19,6	8,6	11,4	1,1	9,4	3,9
250	30,0	5,7	4,9	0,760	0,881	17,6	42,2	30,9	20,7	8,7	11,5	0,5	9,5	3,6

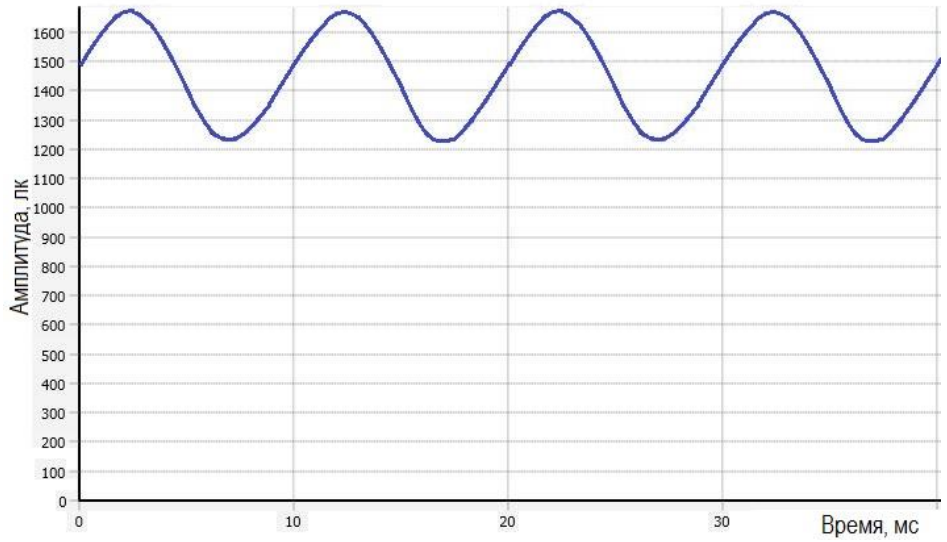


Рисунок 3.2 – Осциллограмма пульсаций освещенности лампы Ikea 6,3 Вт

Таблица 3.4 – Коэффициенты разложения амплитудно-временной характеристики освещенности в ряд Фурье для СД лампы Ikea 6,3 Вт

k	a_k	b_k	A_k	φ_k	k	a_k	b_k	A_k	φ_k
0	1449,0	0,0	1449,0	0,0	1	0,605	-2,165	2,248	-1,298
2	215,112	35,631	218,043	0,164	3	0,624	-0,826	1,035	-0,924
4	-14,809	-4,830	15,577	0,315	5	-1,724	-2,533	3,064	0,973
6	-0,879	-4,192	4,283	1,364	7	-0,093	-2,559	2,561	1,534
8	-1,106	0,420	1,183	-0,363	9	-0,657	-1,697	1,820	1,201
10	-0,045	-1,743	1,743	1,545	11	0,427	-1,694	1,747	-1,324
12	0,116	-0,893	0,900	-1,442	13	-0,423	-1,283	1,351	1,253
14	-0,571	-1,783	1,873	1,261	15	-0,491	-1,441	1,522	1,242

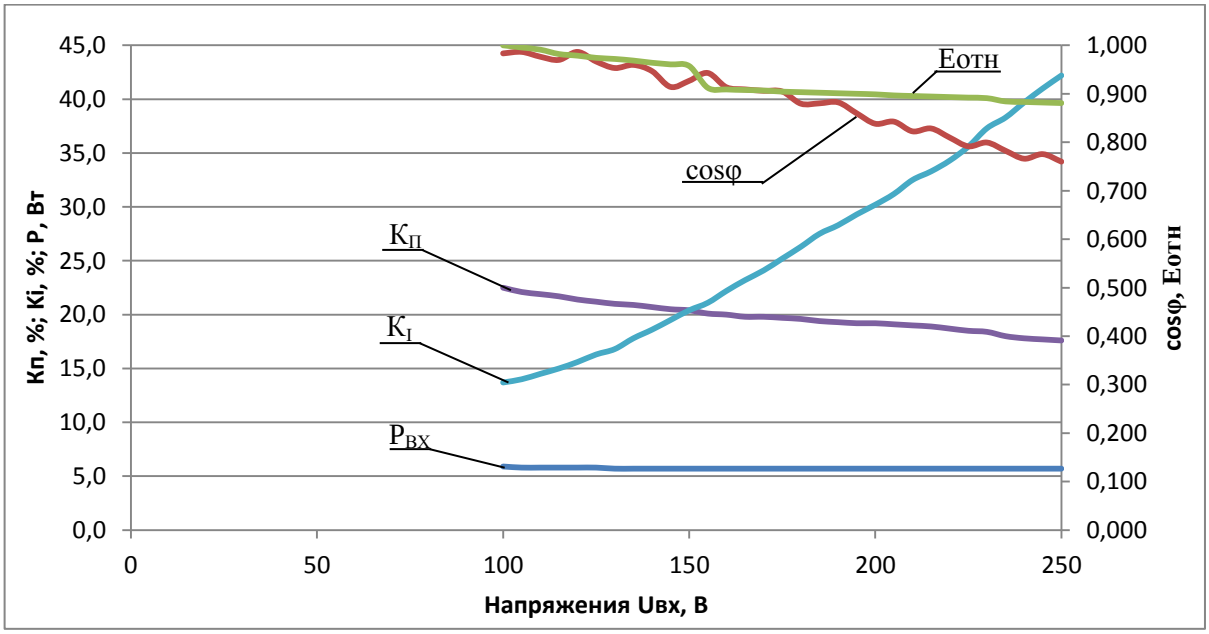


Рисунок 3.3 – Энергетические характеристики светодиодной лампы Ikea 6,3 Вт

3.2 Анализ результатов исследований светодиодных ламп

Обобщенные результаты исследования энергетических характеристик ламп, включая величину пускового тока $I_{пуск}$ и коэффициент пульсаций освещенности $К_П$, при номинальном напряжении электрической сети 230 В приведены в таблицах 3.5, 3.6. В таблице 3.7 представлены уровни эмиссии ВГ тока (мА/Вт) в сопоставлении с нормами ГОСТ 30804.3.2-2013 [72]. Анализ данных таблицы 3.7 показывает, что только лампа Osram 7 Вт полностью удовлетворяет требованиям стандарта. Лампы Ikea 6,3 Вт, Philips 6 Вт и Xavax 9 Вт соответствуют нормам эмиссии ВГ тока за исключением составляющей 13го порядка.

Величина тока включения определена при помощи анализатора КЭ Fluke 434 как максимальное значение тока в серии включений/выключений СД ламп. На рисунке 3.4 представлен пример регистрации величины тока включения для СД лампы Philips 11,5 Вт. Кратность тока включения составляет $8{,}3xI_{ном}$ при скорости нарастания 2,8 А/с.

В соответствии с результатами экспериментальных исследований рассматриваемые образцы в зависимости от характера изменения светового потока при измерении напряжения можно разделить на СД лампы со стабилизированным (СДЛС) (рисунок 3.5, 3.6) и регулируемым (СДЛР) (рисунок 3.7, 3.8) световым потоком, что зависит от схемотехнических особенностей драйвера. Изделия с регулируемым потоком допускается использовать в системах освещения, оснащенных светорегуляторами (диммерами). Данные группы имеют принципиальные различия зависимостей E=f(U). У исследованных СДЛС при изменении напряжения в рабочем диапазоне освещенность изменяется в пределах 10% от максимального значения. В случае СДЛР освещенность плавно изменяется в пределах от 0 до максимального значения, что соответствует диапазону в 100%.

При снижении напряжения в сети до значения 100 В освещенность от СДЛС не уменьшается относительно номинального значения, в то время как освещенность от СДЛР снижается в среднем более чем на 50%.

С учетом проведенных исследований можно сделать вывод, что с точки зрения обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях, сопряженных со снижением величины напряжения в электрических сетях объектов морской индустрии, СДЛС являются более предпочтительными, поскольку способны обеспечить постоянную

Таблица 3.5 – Результаты экспериментальных исследований СД ламп

Производитель	U, В	I, мА	P, Вт	Q, вар	S, ВА	cosφ	$cos\varphi_{экв}$	$I_{пуск}$, мА	Кратн. $I_{пуск}$	$К_П$, %
Ikea	230	32	5,9	4,4	7,4	0,86	0,8	88	2,75	18,4
ISY	230	26	3,2	4,9	5,9	0,99	0,54	399	15,35	0,1
Melitec	230	72	2,4	16,3	16,5	0,15	0,14	232	3,22	100
Osram	230	36	7,7	3,1	8,3	0,93	0,93	78	2,17	20,1
Philips	230	32	3,2	6,6	7,4	0,51	0,44	90	2,81	58,9
Philips	230	35	5,9	5,6	8,1	0,82	0,72	97	2,77	19
Philips	230	83	10,8	15,2	18,6	0,97	0,58	691	8,33	4,6
Xavax	230	49	9,4	6,3	11,3	0,89	0,83	105	2,14	21,2

Таблица 3.6 – Результаты исследований несинусоидальности тока потребляемого СД лампами

Лампа	$К_I$, %	$К_{I3}$, %	$К_{I5}$, %	$К_{I7}$, %	$К_{I9}$, %	$К_{I11}$, %	$К_{I13}$, %	$К_{I15}$, %
Ikea 6,3 Вт	38,7	26,2	20,4	9,1	8,2	1,6	9,7	2,4
ISY 3 Вт	153,1	88,4	70,3	51,2	38,5	35,7	35,9	33,5
Melitech 2,5 Вт	20,9	11,5	9,7	6,0	9,0	1,7	1,8	5,4
Osram 7 Вт	9,6	3,6	5,5	1,4	2,3	1,9	4,1	1,0
Philips 3,5 Вт	57,6	46,4	15,9	11,0	11,6	11,1	4,9	10,6
Philips 6 Вт	52,5	43,5	22,3	6,5	7,7	5,2	10,8	3,2
Philips 11,5 Вт	133,7	83,8	61,7	45,2	40,6	38,1	30,6	20,3
Xavax 9 Вт	36,5	26,2	18,6	9,7	6,3	5,1	7,3	1,6

Таблица 3.7 – Показатели эмиссии высших гармоник тока мА/Вт

Лампа	Порядок гармонической составляющей тока						
	3	5	7	9	11	13	15
Ikea 6,3 Вт	1,421	1,106	0,494	0,445	0,087	0,526	0,130
ISY 3 Вт	7,183	5,712	4,160	3,128	2,901	2,917	2,722
Melitech 2,5 Вт	3,450	2,910	1,800	2,700	0,510	0,540	1,620
Osram 7 Вт	0,168	0,257	0,065	0,108	0,089	0,192	0,047
Philips 3,5 Вт	4,640	1,590	1,100	1,160	1,110	0,490	1,060
Philips 6 Вт	2,581	1,323	0,386	0,457	0,308	0,641	0,190
Philips 11,5 Вт	6,440	4,742	3,474	3,120	2,928	2,352	1,560
Xavax 9 Вт	1,366	0,970	0,506	0,328	0,266	0,381	0,083
Норма по ГОСТ	3,4	1,9	1,0	0,5	0,35	0,296	0,257

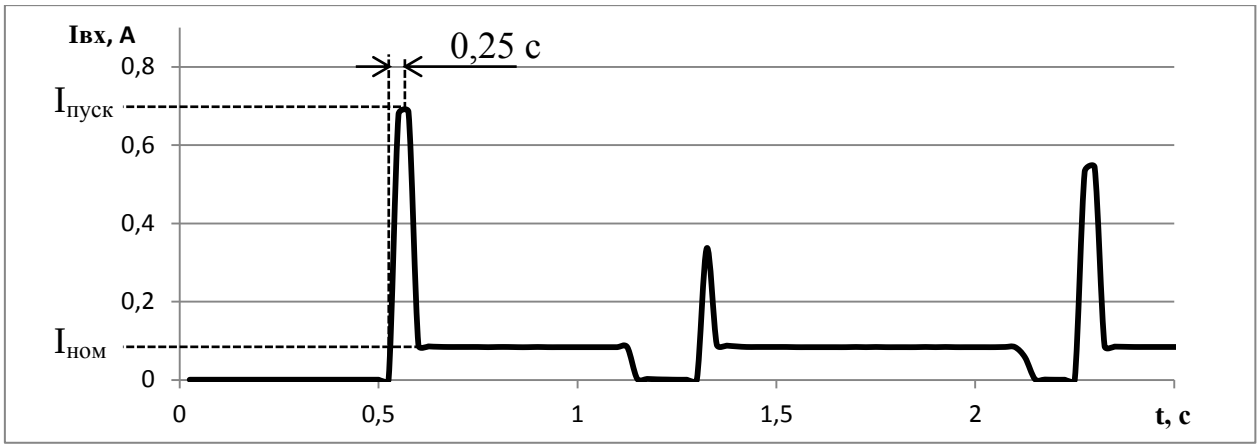


Рисунок 3.4 – Регистрация тока включения светодиодной лампы Philips 11,5 Вт

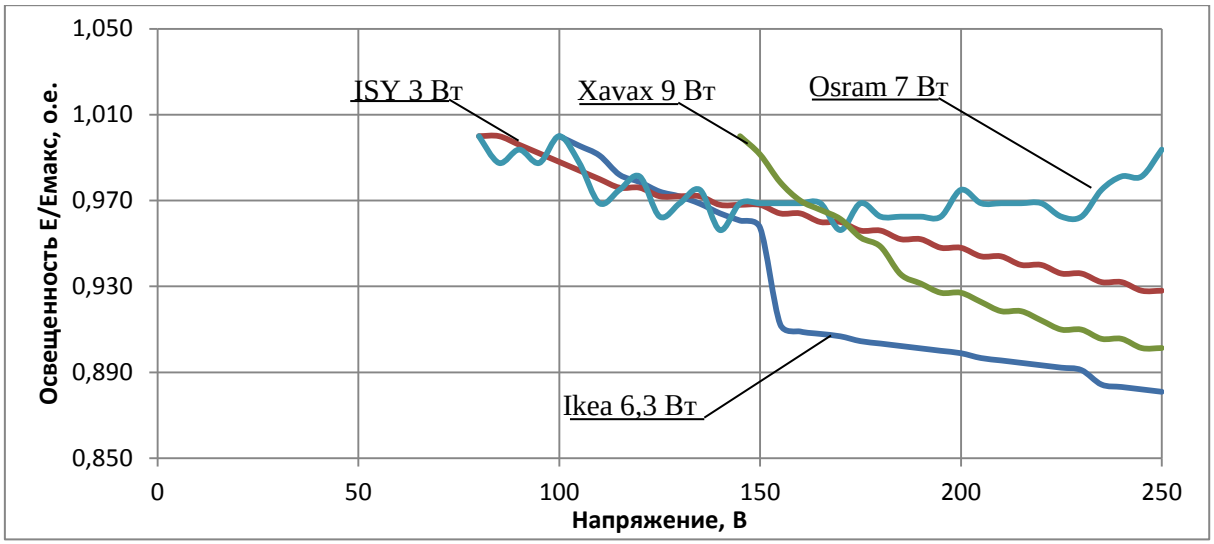


Рисунок 3.5 – Зависимость освещенности от напряжения сети для СД ламп со стабилизированным световым потоком

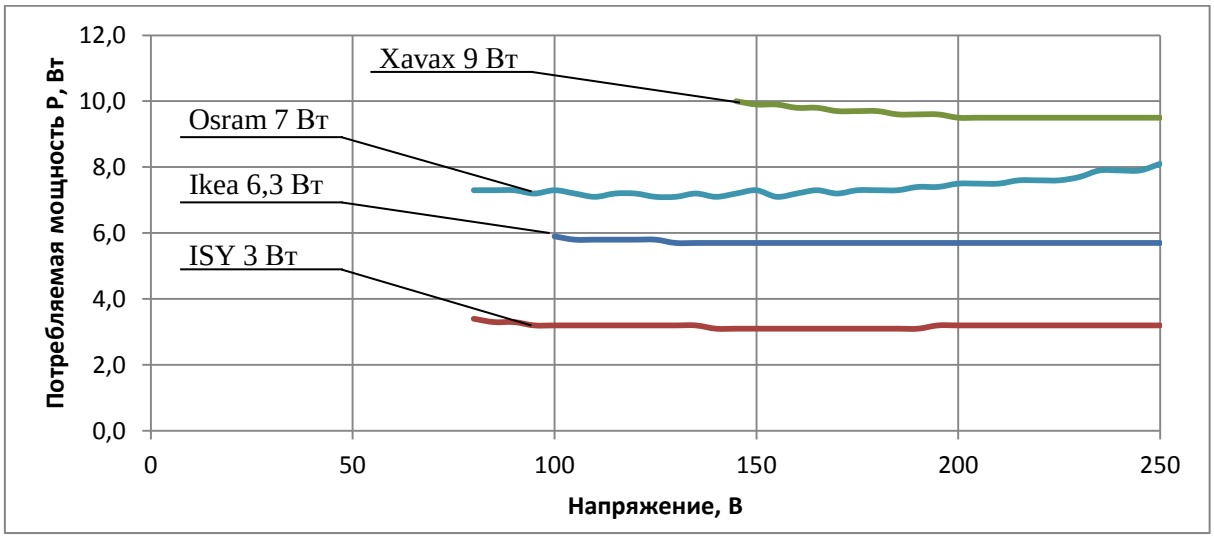


Рисунок 3.6 – Зависимость потребляемой мощности от напряжения сети для СД ламп со стабилизированным световым потоком

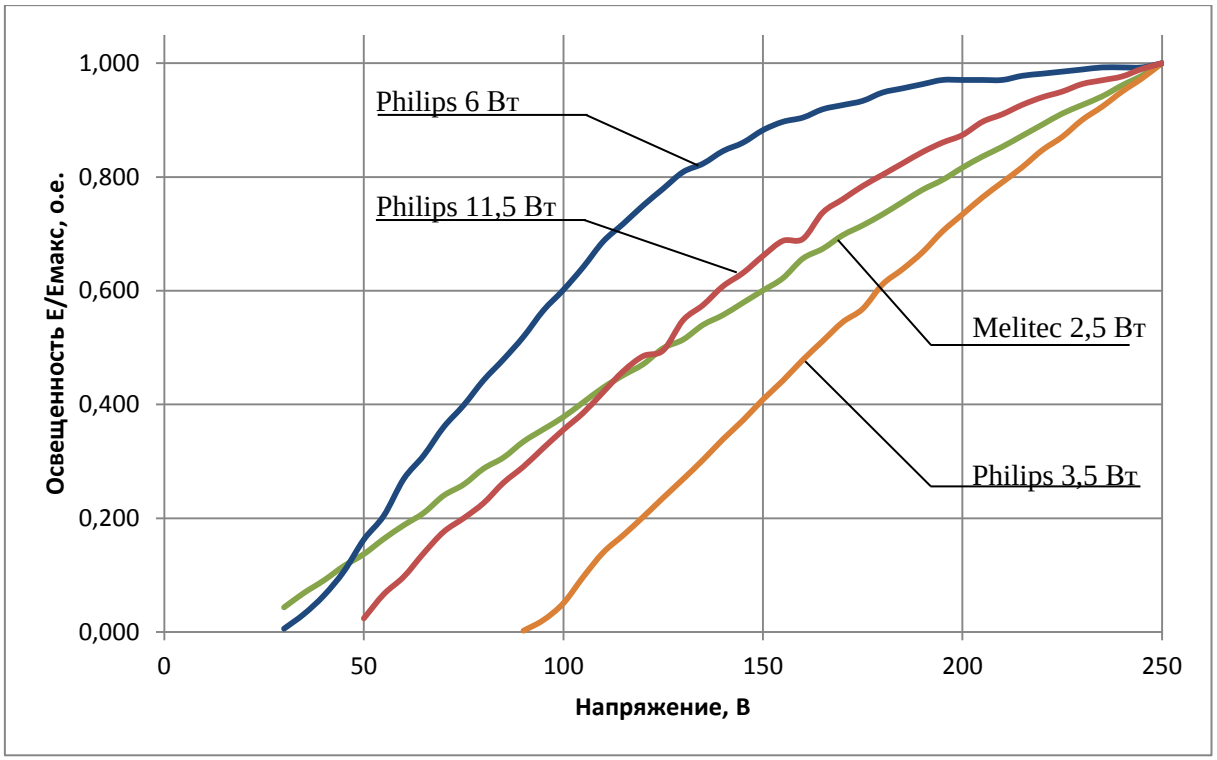


Рисунок 3.7 – Зависимость освещенности от напряжения сети для СД ламп с регулируемым световым потоком

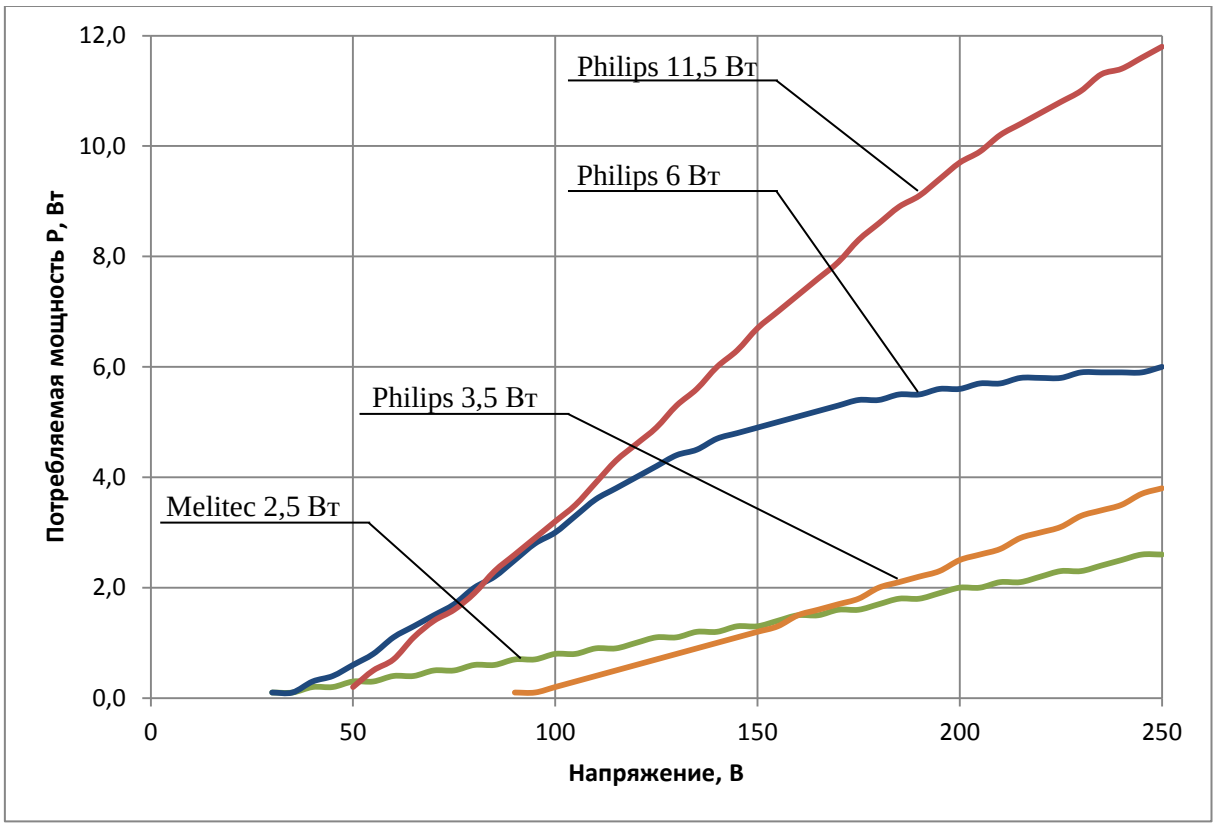


Рисунок 3.8 – Зависимость потребляемой мощности от напряжения сети для СД ламп с регулируемым световым потоко

величину освещенности при значительном отклонении напряжения от номинального значения.

Результаты анализа зависимости $К_П$=f(U) приведены на рисунке 3.9. Коэффициент пульсаций находится в диапазоне от 0,1 % (Isy 3 Вт) до 100 % (Melitec 2,5 Вт). Частота пульсаций светового потока составляет 100 Гц, что обусловлено наличием во всех лампах двухполупериодного выпрямителя (рисунок 1.8) В ходе исследований не было выявлено явных закономерностей для зависимости $К_П$=f(U) у СДЛС и СДЛР.

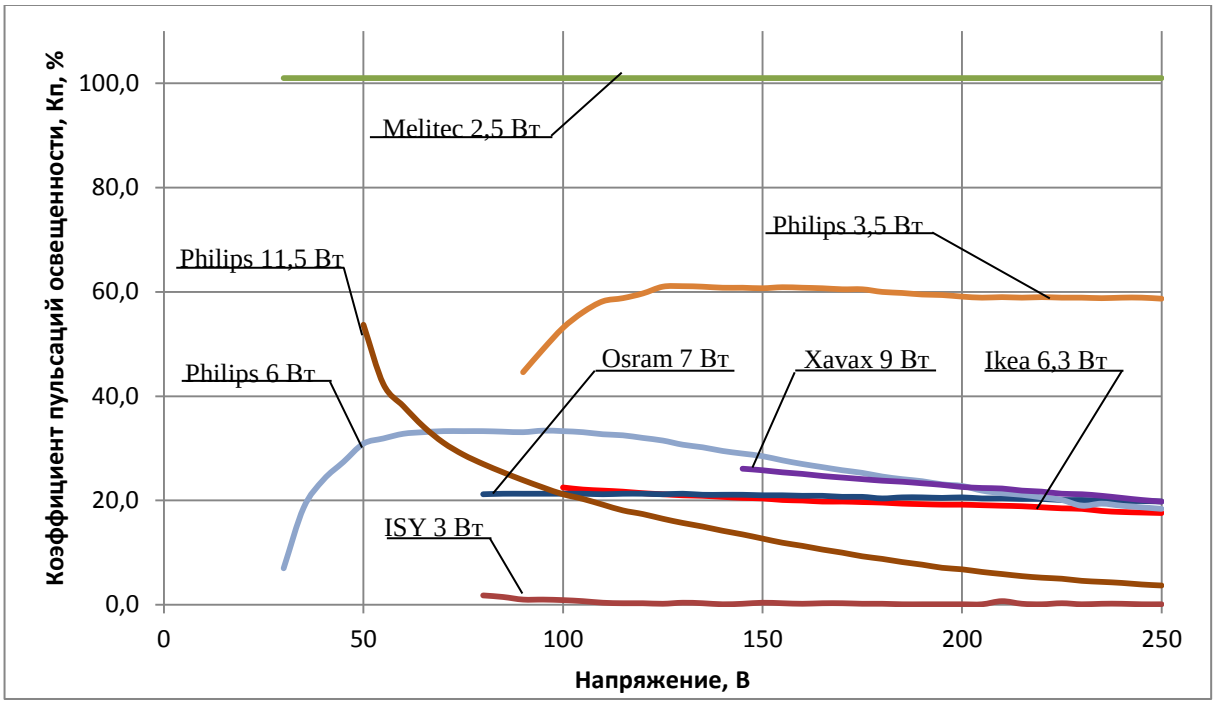


Рисунок 3.9 – Зависимость коэффициента пульсации освещенности от напряжения для исследованных СД ламп

3.3 Исследование энергетических характеристик светодиодных световых приборов

К СД световым приборам относятся светильники и прожекторы различного назначения. В качестве объектов исследования выбраны 12 световых приборов различных конструкций и назначений. Описание и их технические характеристики приведены в таблице 3.8. Результаты исследований электро- и светотехнических характеристик и показателей несинусоидальности потребляемого тока приведены в таблице 3.9. В таблице 3.10 представлены уровни эмиссии ВГ тока в сопоставлении с нормами ГОСТ 30804.3.2-2013 с учетом принятого в стандарте разделения световых приборов по мощности.

Таблица 3.8 – Паспортные данные исследуемых светодиодных световых приборов

№ образца	Тип изделия	Производитель	Модель	Рном, Вт	Uном, В	Iном, А	cosφ	T_C, К	Св. поток Ф, лм	Фуд, лм/Вт
1	Светильник линейный	Leek	LE T5 LED 14W	14	220	-	-	4000	1100	78
2	Светильник линейный	Ledcraft	LC-T8-150-22-W	22	85-230	-	0,94	6400	1820	83
3	Светильник линейный	ЛУЧ	4x8 LED 1,2	36	220	-	1	5700	4250	118
4	Светильник линейный	Fereks	ДСО-01-45-50-Д	45	176-264	0,22	0,96	5528	5000	111
5	Светильник	Ledcraft	LC-US-40	40	220	-	0,98	4200	3500	88
6	Универсальный драйвер	-	-	100	-	-	-	-	-	-
7	Универсальный драйвер	Promstar	YMSLV-120100K	100	-	-	-	-	-	-
8	Прожектор	Liteco	LRF-01-LED-50-6500-OP-GR	50	170-265	-	-	6500	4300	86
9	Прожектор	Maysun	MS-2078-60W/LED	60	90-264	-	-	6000	5700	95
10	Прожектор	Fereks	ДКУ 04-80-50 Ш	85	176-264	0,36	0,96	5300	8587	101
11	Прожектор	Fereks	ДСП 04-90-50Д120	90	176-264	0,41	0,96	5300	9884	110
12	Прожектор	Лидер Лайт	LL-ДБУ-01-095-0204-65Д	95	176-264	-	-	6500	8000	84

Таблица 3.9 – Результаты экспериментальных исследований светодиодных световых приборов

№ образца	U, В	I, мА	P, Вт	Q, вар	S, ВА	cosφ	cosφ экв	Iпуск, мА	Кратн. Iпуск	Кп, %	Показатели несинусоидальности потребляемого тока, %							
											K_I	K_{I3}	K_{I5}	K_{I7}	K_{I9}	K_{I11}	K_{I13}	K_{I15}
1	230	118	14,3	22,2	26,5	0,95	0,54	351	2,97	1,4	141,7	84,3	63,1	46,4	41,1	39,5	34,1	26,5
2	230	117	25,7	8,5	27,1	0,98	0,95	439	3,75	34	23,4	19,1	10,3	5,5	5,5	2,7	9	1,8
3	230	208	32,1	46,8	34,1	0,99	0,68	1300	6,25	0,2	94,1	70,2	46,6	21,3	15,9	18,3	13,9	9,3
4	230	219	50	7,9	50,7	1	0,99	464	2,12	0,4	18,1	16,3	6,9	3,2	0,5	1	1,1	0,6
5	230	205	45,8	7,8	46,5	0,99	0,99	1802	8,79	0,1	8,2	4,7	5,1	1,8	1,8	2,2	1,1	0,7
6	230	307	48,7	50,7	70,3	0,99	0,69	3796	12,36	0,2	90,1	71,7	46,8	15,8	7,9	14	9,8	2,3
7	230	345	51,7	59,6	78,9	0,99	0,66	3764	10,91	0,2	99,8	75,3	52,9	25	11,1	14,3	13,2	7,6
8	230	202	45,4	46,6	10,4	1	0,97	216	1,07	66	24,4	22,9	6,4	2,8	1,5	1,1	0,6	0,9
9	230	276	63	8,4	63,6	1	0,99	2856	10,35	0,3	12,2	4,8	7,9	3,5	4,4	4,4	1,2	1,2
10	230	386	85,7	18,2	87,6	1	0,98	829	2,15	0,7	24	20,9	9	5,3	2,3	2,5	2,8	1,6
11	230	410	92,6	17,9	94,3	1	0,98	874	2,13	0,4	22,5	19,7	8,4	4,9	2	2,2	2,3	1,3
12	230	450	101,9	10,8	10,5	1	0,99	914	2,03	11	13,2	12,6	3,1	1,7	0,3	0,6	0,9	0,2

Таблица 3.10 – Показатели эмиссии высших гармоник тока

№ образца	Порядок гармонической составляющей тока						
	3	5	7	9	11	13	15
Световые приборы с потребляемой активной мощностью менее 25 Вт							
1	6,956	5,207	3,829	3,391	3,259	2,814	2,187
2	0,870	0,469	0,250	0,250	0,123	0,410	0,082
Норма по ГОСТ	3,4	1,9	1,0	0,5	0,35	0,296	0,257
Световые приборы с потребляемой активной мощностью более 25 Вт							
№ образца	Коэффициенты гармонических составляющих тока						
	K_{I3}	K_{I5}	K_{I7}	K_{I9}	K_{I11}	K_{I13}	K_{I15}
3	70,2	46,6	21,3	15,9	18,3	13,9	9,3
4	16,3	6,9	3,2	0,5	1	1,1	0,6
5	4,7	5,1	1,8	1,8	2,2	1,1	0,7
6	71,7	46,8	15,8	7,9	14	9,8	2,3
7	75,3	52,9	25	11,1	14,3	13,2	7,6
8	22,9	6,4	2,8	1,5	1,1	0,6	0,9
9	4,8	7,9	3,5	4,4	4,4	1,2	1,2
10	20,9	9	5,3	2,3	2,5	2,8	1,6
11	19,7	8,4	4,9	2	2,2	2,3	1,3
12	12,6	3,1	1,7	0,3	0,6	0,9	0,2
Норма по ГОСТ	-	10	7	5	3	3	3

Как следует из экспериментальных данных, исследованные образцы имеют низкий коэффициент пульсаций освещенности: менее 1,5 %, за исключением светильника Ledcraft 40 Вт (34 %) и прожектора Liteco 50 Вт (66 %). Коэффициент мощности по основной частоте у большинства образцов равен единице, более половины образцов имеют коэффициент мощности с учетом ВГ близкий к единице. Уровни эмиссии ВГ тока у ряда образцов превышают установленные нормы. В то же время некоторые образцы отличаются высокими пусковыми токами (до 12-ти кратных значений), что требует особого внимания при выборе защитных аппаратов, в том числе, с точки зрения предотвращения возможных чрезвычайных ситуаций.

3.4 Расчет дозы фликера в системах освещения на основе светодиодных источников света

В первой главе приведен обзор методики [36] оценки дозы фликера для СД ИС, основанной на определении передаточных функций для каждого СД изделия. Однако в предложенной методике не обоснованы метод и достоверность измерений светового потока и математическая обработка измерений. Измерительный комплекс имеет сложную конструкцию, а выводы даны по результатам исследования одной СД лампы.

С учетом вышесказанного, предлагается методика оценки дозы фликера на основе анализа амплитудно-временной характеристики освещенности. Исследования СД ламп, проведенные на разработанной лабораторной установке, выявили взаимосвязи параметров процессов преобразования энергии в СД лампе. В разделе 2.1 показано, что изменение светового потока СД лапы определяется изменением прямого тока I_f через СД, который, в свою очередь, зависит от приложенного к СД напряжения U_f. Гармонический состав пульсаций светового потока (освещенности) и тока при этом совпадает (рисунок 2.5, таблица 3.11), а амплитуда определяется характеристиками СД.

Таблица 3.11 – Гармонические составы амплитудно-временных характеристик тока и освещенности и соотношение их амплитудных значений

Параметр	Амплитудные значения коэффициентов разложения в ряд Фурье для составляющих порядком от 1 до 10									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I_f	0,682	15,936	0,499	0,778	0,239	0,461	0,117	0,129	0,124	0,158
E	40,248	940,70	29,454	45,922	14,132	27,236	6,929	7,602	7,320	9,319
E / I_f	59,015	59,030	59,026	59,028	59,130	59,080	59,222	58,930	59,032	58,981

Обобщенные зависимости перечисленных величин представлены на рисунке 3.10. Поскольку величина прямого тока I_f через СД является связующим параметром между колебаниями напряжения и светового потока, то зависимости $I_f = f(U_f)$ и $\Phi = f(I_f)$ построены с общей осью абсцисс (I_f).

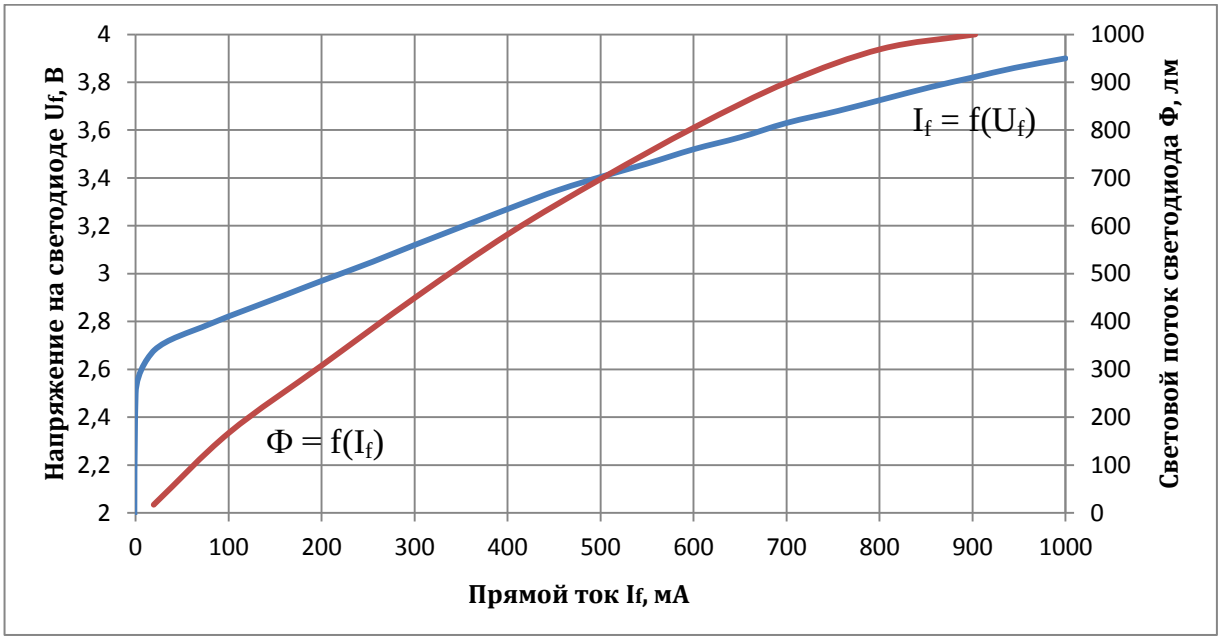


Рисунок 3.10 – Зависимости величины прямого тока от напряжения $I_f = f(U_f)$ и величины светового потока от тока $\Phi = f(I_f)$ для белого светодиода У-133Бл

Из данных рисунка 3.10 следует, что приращение величины напряжения δU_f, приложенного к СД вызывает приращение прямого тока δI_f, что в свою очередь приводит к изменению светового потока $\delta\Phi$. В то же время приращение δU_f определяется колебаниями напряжения в электрической сети и, как было показано в разделе 2.1, зависит от схемотехнических особенностей драйвера. С учетом результатов проведенных исследований восьми СД ламп (раздел 3.1) можно сделать вывод о достоверности метода оценки дозы фликера на основе анализа амплитудно-временной характеристики светового потока.

Поскольку измерение величины светового потока ИС в соответствии с ГОСТ Р 55702-2013 необходимо производить на специальной лабораторной установке с использованием фотометрического шара, то для упрощения измерений предложенная методика основывается на измерении величины освещенности. Освещенность, измеряемая люксметрами, соответствует отношению светового потока лампы к единице величины площади освещаемой поверхности. С увеличением расстояния от источника света, создаваемая им освещенность уменьшается, а в случае точечного источника света изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния в соответствии с законом обратных квадратов. Следовательно, в рамках предложенной методики возникает вопрос о достоверности и повторяемости измерений значений функции $E_{отн} = f(U)$ при различных расстояниях h от источника света до фотодатчика.

Применяема в соответствии с ГОСТ Р 51317.4.15-2012 кривая Pst=1 (рисунок 1.11) устанавливает взаимосвязь между числом изменений напряжения и величиной относительного изменения напряжения d. Величина d определяется по выражению (3.2):

$$d = \Delta U_{hp} / U_n \qquad (3.2)$$

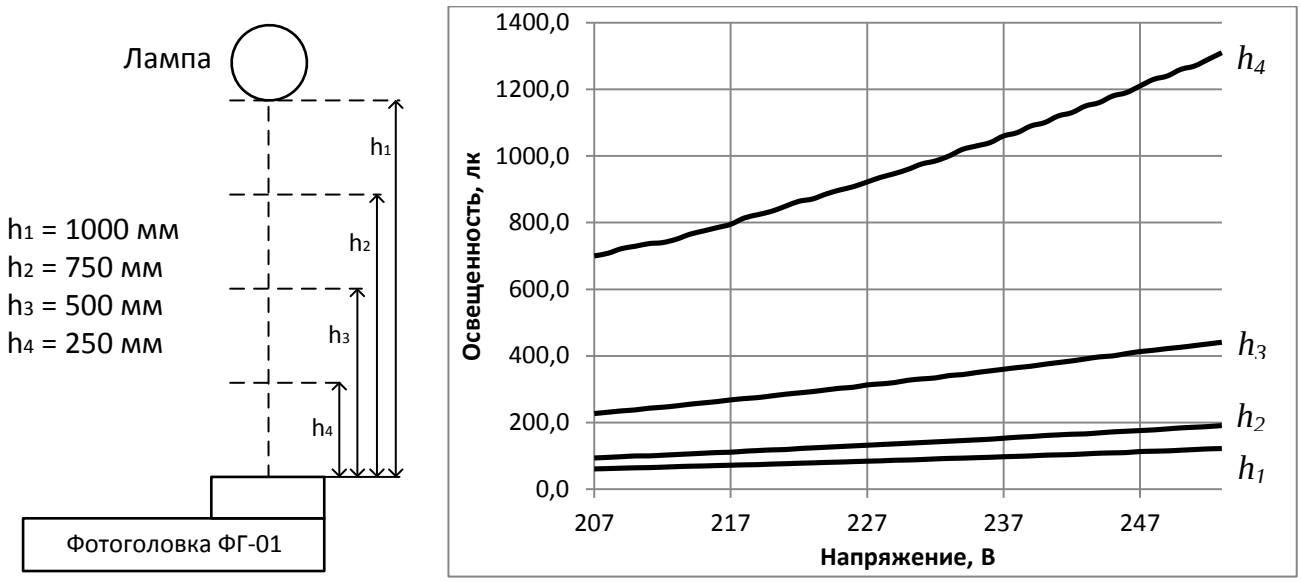
$$\Delta U_{hp}(t) = U_{hp}(t_1) - U_{hp}(t_2), \qquad (3.3)$$

где Un – номинальное значение напряжения сети (Un = 230 В согласно ГОСТ Р 51317.4.15-2012); $U_{hp}(t1)$ - среднеквадратичное значение за половину периода с началом в момент времени t1; $U_{hp}(t2)$ - среднеквадратичное значение за половину периода с началом в момент времени t2.

В то же время анализ кривой Pst=1 показывает, что определение дозы фликера осуществляется при диапазоне относительного изменения напряжения d в пределах от 0,1 до 10%. Согласно выражению (3.2) данный диапазон соответствует изменениям

напряжения в пределах от 207 В до 253 В. Таким образом, для выявления зависимости необходимо рассмотреть функцию $E_{отн} = f(U)$ на указанном интервале.

С целью экспериментальной проверки гипотезы о постоянстве значений функции $E_{отн} = f(U)$ при различных расстояниях h (250-1000 мм) от лампы до фотодатчика были проведены соответствующие лабораторные исследования (рисунок 3.11).



а) б)

Рисунок 3.11 – Измерение величины освещенности при различных расстояниях от источника света: схема измерений (а), полученные зависимости E = f(U, h) (б)

На рисунке 3.12 представлены экспериментальные зависимости, отнесенные к номинальному значению освещенности (при напряжении в сети 230 В).

Рисунок 3.12 – Семейство экспериментальных зависимостей относительной величины освещенности от напряжения в сети при различных расстояниях $E_{отн} = (U, h)$

Из данных рисунка 3.12 следует, что значения функций $E_{отн}$ = (U, h) для определенного аргумента при различных расстояниях от лампы до измерительной фотоголовки близки по величине. Таким образом, с учетом результатов проведенных исследований, можно констатировать, что относительное приращение светового потока, используемое в традиционной методике оценки дозы фликера для формирования передаточных функций ИС, может быть заменено приращением освещенности.

Поскольку доза фликера является количественной характеристикой воздействия светового потока на организм человека, то с учетом вышесказанного её величина может быть с инженерной точностью оценена на основе анализа амплитудно-временной характеристики освещенности по выражению для дозы колебаний освещенности (3.5).

$$\psi_E = \frac{1}{\theta} \cdot \int_{t-\theta}^{t} \sum g_f^2 \cdot \delta E_f^2 \, dt \qquad (3.5)$$

где g_f – коэффициент приведения действительных размахов освещенности к эквивалентным (таблица 3.12); θ – интервал времени усреднения, равный 10 мин; δE_f – действующие значения составляющих разложения в ряд Фурье изменений величин с размахом δE_t, определяемых по (3.6).

$$\delta E_t = \frac{|E_j - E_{j+1}|}{\sqrt{2} E_{ном}} \qquad (3.6)$$

где E_j, E_{j+1} – значения следующих друг за другом экстремумов (или экстремума и горизонтального участка) огибающей амплитудных значений освещенности.

Таблица 3.12 – Значения коэффициентов приведения g_f

Частота изменений освещенности, 1/мин	g_f	Частота изменений освещенности, 1/мин	g_f	Частота изменений освещенности, 1/мин	g_f
0,0167	0,0967	8,0	0,207	100	0,408
0,76	0,0967	9,0	0,215	200	0,460
0,8	0,1	10	0,223	300	0,492
0,9	0,104	20	0,264	400	0,573
1,0	0,107	30	0,299	500	0,592
2,0	0,132	40	0,322	600	0,659
3,0	0,153	50	0,341	700	0,744
4,0	0,161	60	0,363	800	0,829
5,0	0,171	70	0,377	900	0,935
6,0	0,181	80	0,387	1000	0,983
7,0	0,193	90	0,397	1052	1,0

3.5 Исследование стробоскопического эффекта в системах освещения на основе светодиодных источников света

В соответствии с ГОСТ ИСО 8995-2002 [73] под стробоскопическим эффектом понимается кажущаяся неподвижность или кажущееся изменение движения объекта, освещаемого с периодически изменяющейся интенсивностью с соответствующей частотой. Возникновение стробоскопического эффекта на объектах морской индустрии представляет угрозу безопасности персонала, может явиться причиной несчастных случаев. В связи с этим, как отмечалось в первой главе, ряд нормативных документов [15, 19] устанавливает требования по предотвращению возникновения стробоскопического эффекта в помещениях, где эксплуатируются механизмы с открытыми вращающимися частями.

С точки зрения стробоскопического эффекта определяющими факторами являются размах и частота пульсаций освещённости. Согласно [74] возникновение стробоскопического эффекта возможно при коэффициенте пульсаций освещенности, превышающем 10%.

Частота пульсаций освещенности, при которой возникает стробоскопический эффект, определяется частотой вращения приводов и исполнительных механизмов. На объектах морской индустрии в качестве приводов в большинстве случаев применяются асинхронные двигатели. Частота вращения двигателя, выраженная в оборотах в секунду определяется по выражению (3.7):

$$n = \frac{f}{p} \cdot (1 - s), \tag{3.7}$$

где n – частота вращения вала двигателя; f – частота переменного тока в электрической сети; p – число пар полюсов; s – скольжение.

В соответствии с (3.1) вращение асинхронных электродвигателей происходит с частотой несколько отличающейся в меньшую сторону от синхронных частот 50, 25, 16,6 и 12,5 об/сек. Проведенные экспериментальные исследований СД ИС показывают, что у всех рассмотренных образцов пульсации освещенности происходят на частоте 100 Гц и более. Следовательно, возникновение стробоскопического эффекта в системах освещения на основе СД ИС по причине совпадения частот вращения механизмов и пульсации освещенности для механизмов, приводимых во вращение непосредственно асинхронными двигателями, маловероятно (рисунок 3.13).

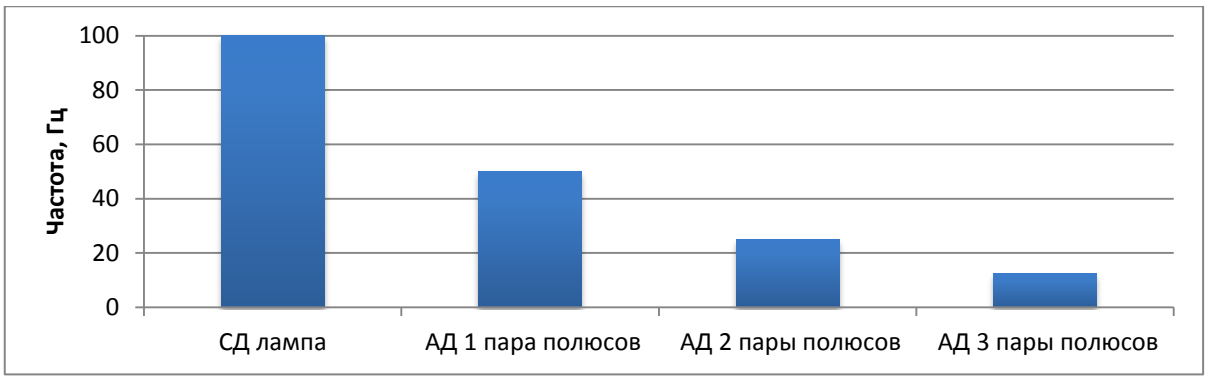


Рисунок 3.13 – Соотношение частоты пульсаций освещенности СД ламп и синхронных частот вращения асинхронных двигателей

На рисунке 3.14 представлен сравнительный анализ коэффициентов пульсации освещенности для исследованных СД ИС. Как следует из рисунка, возникновение стробоскопического эффекта возможно для большинства исследованных СД ламп и некоторых исследованных СД световых приборов.

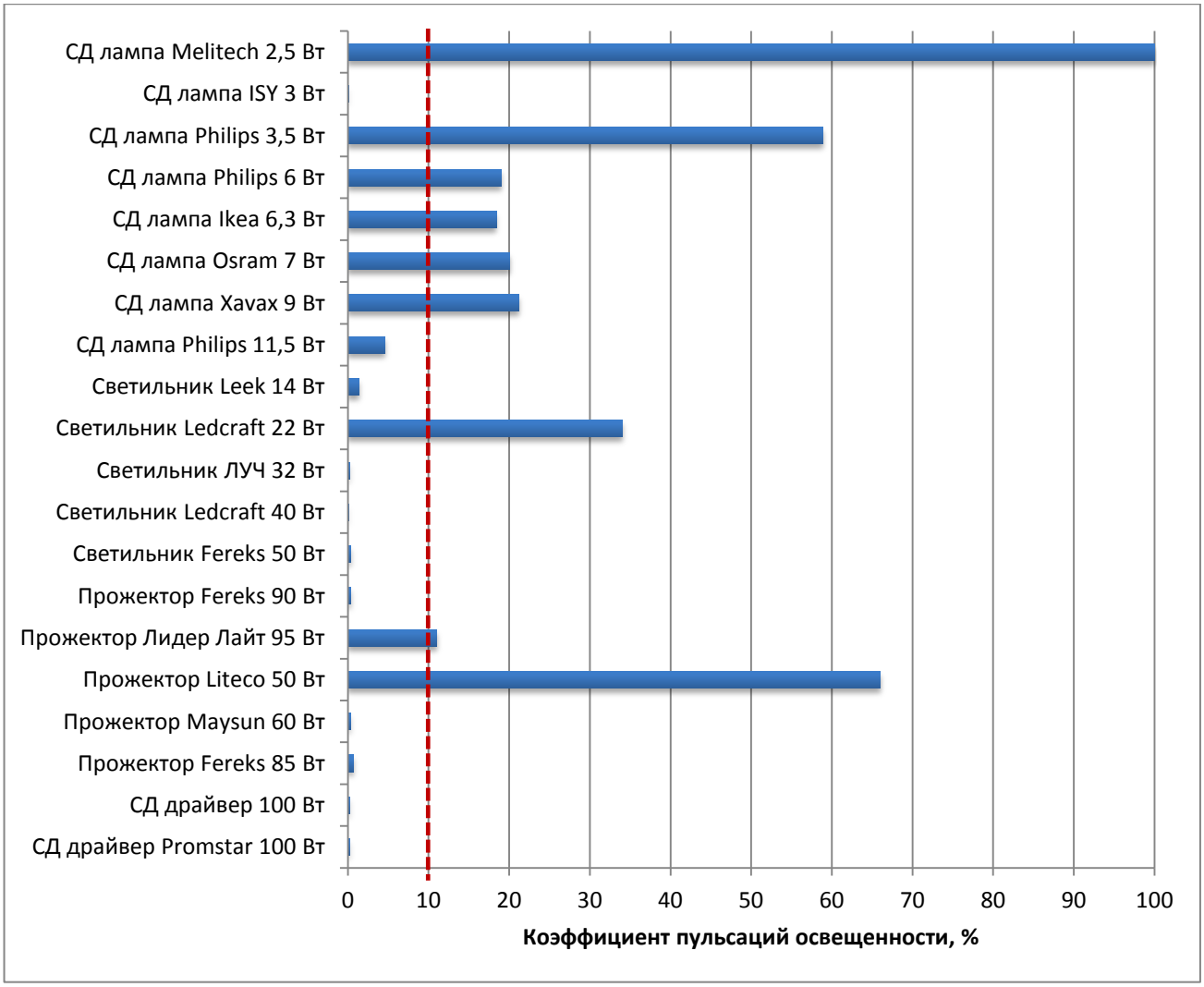


Рисунок 3.14 – Величина коэффициента пульсаций освещенности для различных СД изделий в сравнении с пороговым значением проявления стробоскопического эффекта

ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ

1. Анализ экспериментальных исследований энергетических характеристик СД ИС при параметрах напряжения, характерных для чрезвычайных ситуаций, выявил:

- эмиссию высших гармоник тока в электрическую сеть (преимущественно третья и пятая высшие гармонические составляющие);

- широкий разброс потребления реактивной мощности, что характеризуется $\cos\varphi_{ЭКВ}$ в диапазоне от 0,14 (Melitec 2,5 Вт) до 0,99.

- световой поток, создаваемый СД источниками света, пульсирует с частотой 100 Гц, что обусловлено работой двухполупериодного выпрямителя в составе электрической схемы драйвера СД источника света (рисунок 1.8).

2. Существующие СД источники разделяются на изделия с регулируемым (величиной напряжения на вводе) и стабилизированным световым потоком. Изменение светового потока светодиодных ламп со стабилизированным световым потоком при изменении величины питающего напряжения от 100 до 250 В составляет не более 10 % от номинального значения, что актуально с точки зрения обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях.

3. Исследованные СД световые приборы дальнего действия характеризуются высоким $\cos\varphi_{ЭКВ}$ и низким коэффициентом пульсаций освещенности (1 %), за исключением СД прожекторов Liteco 50 Вт ($К_П$ = 66 %) и Лидер Лайт 95 Вт ($К_П$ = 11 %). В то же время все исследованные образцы светодиодных ламп за исключением ISY 3 Вт ($К_П$ = 0,1 %) и Philips 11,5 Вт ($К_П$ = 4,6 %) имеют коэффициент пульсаций более 15 %.

4. Ряд СД источников света из числа исследованных образцов имеют большое значение пускового тока: от $6{,}25 x I_{ном}$ (Луч 36 Вт) до $15{,}35 x I_{ном}$ (ISY 3 Вт), для остальных образцов среднее значение пускового тока составляет $2{,}5 x I_{ном}$.

5. На основании экспериментальных исследований энергетических характеристик СД ламп обоснована методика расчета дозы фликера для практических целей на основе анализа амплитудно-временной характеристики освещенности, измеренной при помощи цифрового люксметра.

6. Установлено, что стробоскопический эффект в системах освещения, построенных на основе СД источников света может проявляться при наличии механизмов с частотой вращения 6000 об/мин и коэффициенте пульсаций освещенности более 10%.

4 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ИНДУСТРИИ

4.1 Анализ систем освещения ряда судов флота рыбной промышленности

Для выявления особенностей построения и функционирования систем освещения судов были проанализированы судовые ЭЭС четырех различных типов промысловых судов флота рыбной промышленности (ФРП). Технические характеристики исследованных судов приведены в таблице 4.1.

Схемы ЭЭС рассмотренных судов приведены на рисунках 1.6 а, 4.1, 4.2. Анализ схем показывает, что генерирующий комплекс состоит из валогенераторов, вспомогательных и аварийных дизель-генераторов с номинальным напряжением 400 В. К главному распределительному щиту (ГРЩ) через два силовых трансформатора (схема соединения «звезда-треугольник» или «треугольник-звезда») подключены системы шин (СШ) распределительного щита 220В, питающего системы освещения и хозяйственно-бытовые нагрузки. Осветительные сети, питающие светильники как общего, так и местного освещения подключаются к групповым щитам освещения (ГрЩО). От данных щитов так же получают питание некоторые розетки, в том числе, в каютах экипажа, к которым подключаются бытовые нагрузки.

Как отмечалось ранее (первая глава), системы освещения судов отделены от электрических нагрузок на напряжении 380 В трансформаторной связью (рисунок 4.3).

Анализ систем освещения судов ФРП показывает, что они построены преимущественно с использованием световых приборов на основе ламп накаливания и люминесцентных ламп. В качестве примера в таблице 4.2 приведены данные по количеству и типу осветительных приборов в системе освещения БАТМ «Братья Стояновы».

Таблица 4.1 – Характеристики ипромысловых судов

Назначение	СТМ	БМРТ	БАТМ	РТМКС
Проект	Атлантик-333	В-673	1288	Атлантик-488
Тип	Орленок	Langusta	Пулковский меридиан	Моонзунд
Судно	«Карачарово»	«Алексей Аничкин»	«Братья Стояновы»	«Куршская коса»
Водоизмещение, т	2508	4815	5720	9260
Мощность главных двигателей, л.с.	2х880	1х5000	2х2580	2х3600
Мощность валогенераторов, кВт	1х640 1х325	1х1200	2х1600	2х1500
Мощность дизель-генераторов, кВт	2х568	2х640	3х200	2х760

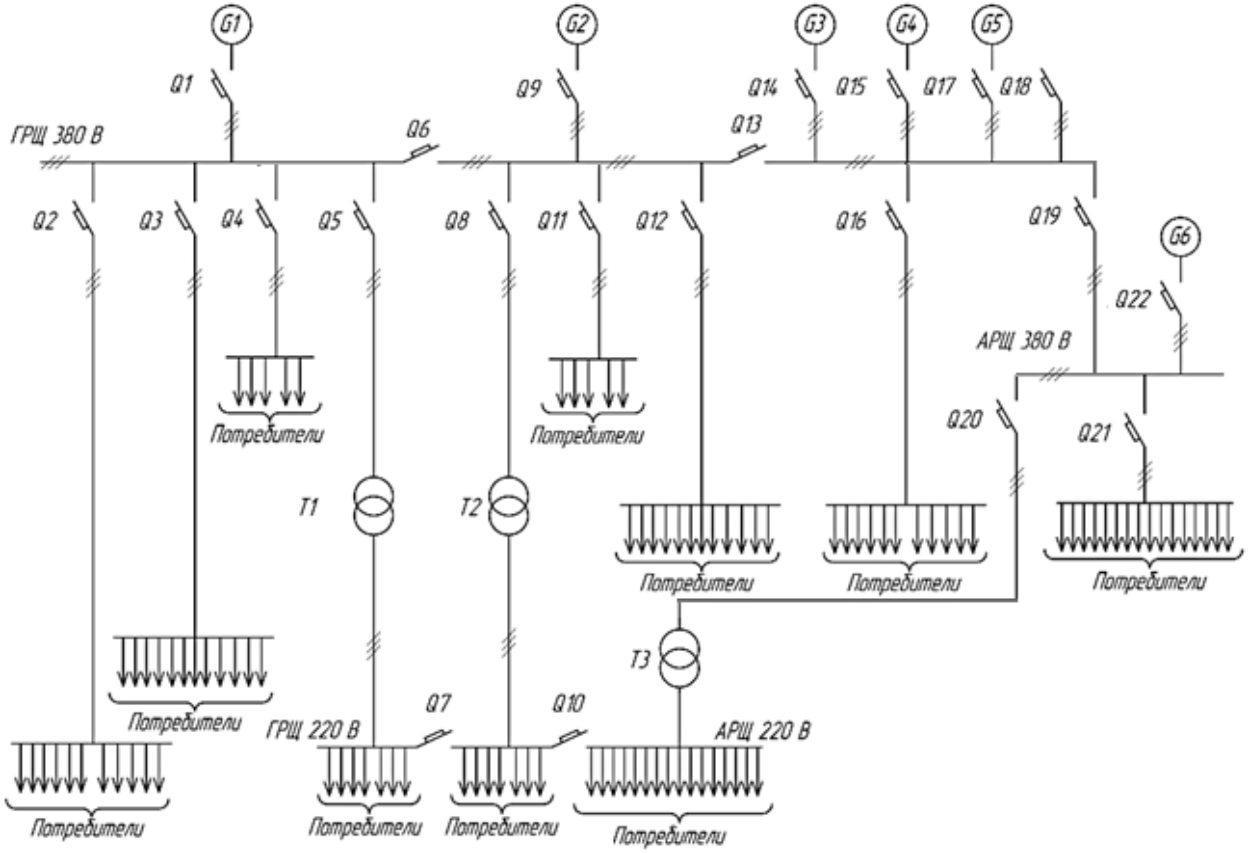


Рисунок 4.1 – Схема электроэнергетической системы БАТМ «Братья Стояновы»

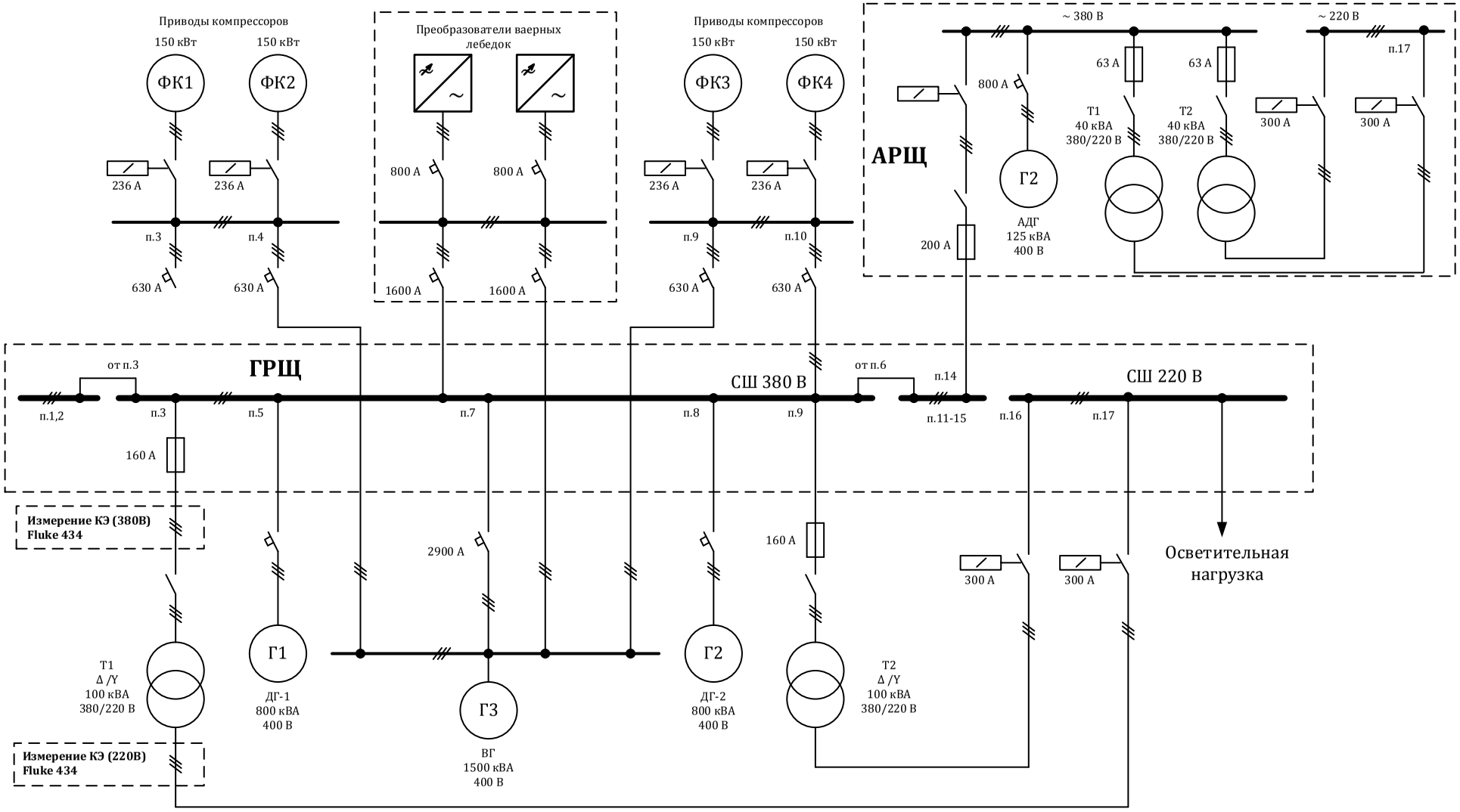


Рисунок 4.2 – Схема электроэнергетической системы БМРТ «Алексей Аничкин»

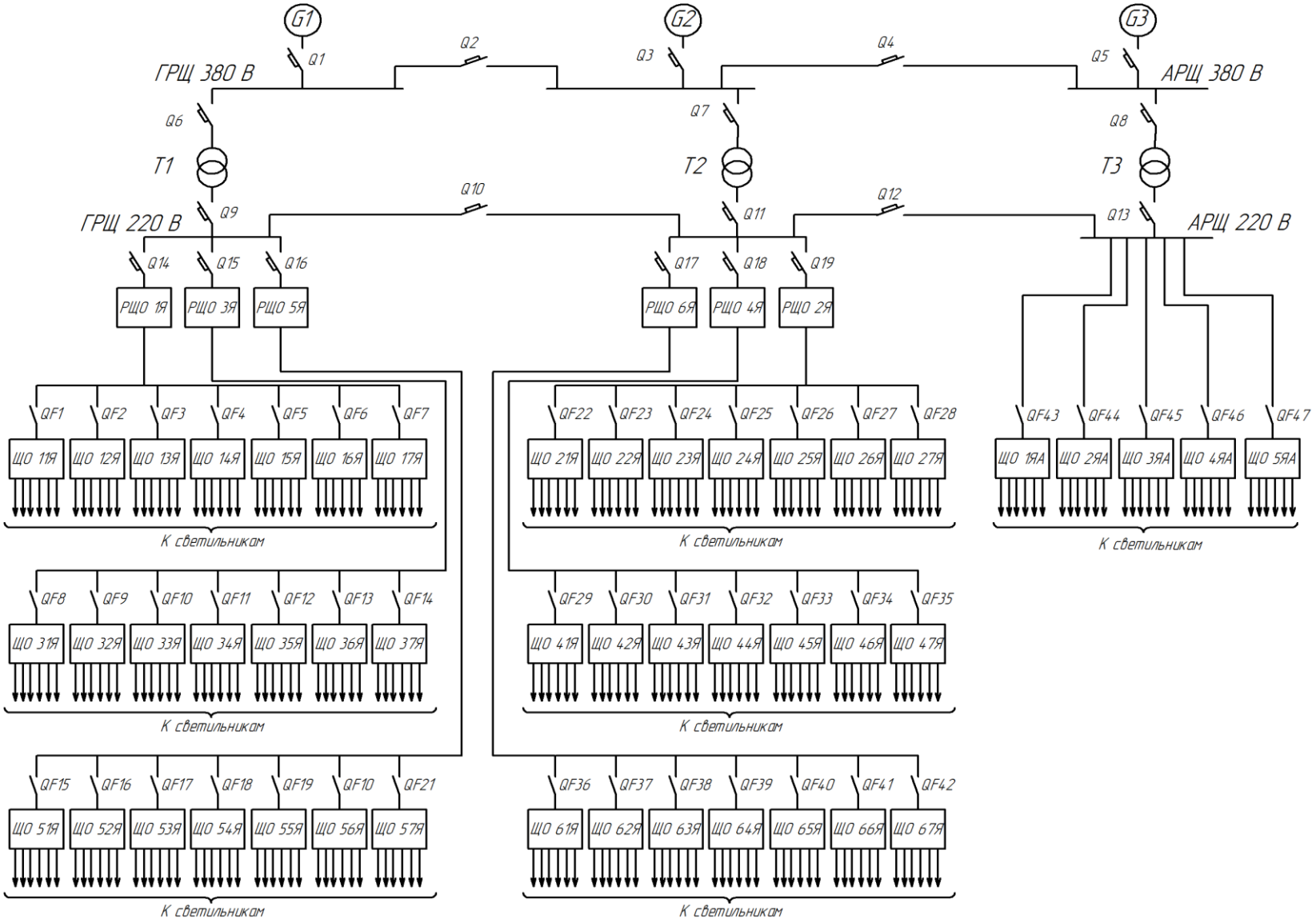


Рисунок 4.3 – Схема системы освещения БАТМ «Братья Стояновы»

Таблица 4.2 – Осветительные приборы в системе освещения БАТМ «Братья Стояновы»

№	Количество, шт	Число ламп в светильнике	Мощность лампы, Вт	Цоколь	Всего ламп, шт	Примечание
1	96	1	ЛБ-18	G13	96	Каютные
2	31	1	ЛБ-36	G13	31	Освещение рыбцеха
3	96	2	ЛБ-36	G13	192	Освещение рыбцеха
4	69	2	ЛБ-36	G13	138	Каютные двухламповые
5	55	1	ЛБ-36	G13	55	Коридоры , угловые
6	27	1	ЛБ-36	G13	27	ЦПУ , угловые
7	897	1	40-60	E27	897	Повсеместно
8	104	1	150-200	E27	104	МО, РМУ, рыбцех
9	28	1	500	E40	28	Наружное освещение
10	25	1	300	E27	25	Наружное освещение
11	26	1	25	E27	25	Сигнальные лампы, цилиндрические
12	39	1	25	E27	39	Подсветка МО, цилиндрические
13	329	1	40-60	E27	329	Освещение в трюмах
14	340	1	40-60	E27	340	Общее освещение
15	144	1	40-60	E27	144	Туалетные
16	4	1	40-60	E27	4	Одноламповые, освещение кают
17	51	2	40-60	E27	102	Двухламповые светильники
18	85	3	40-60	E27	255	Трехламповые светильники
19	32	2	25	B22d	64	Бра
20	134	1	25	B22d	134	Надкоечные
21	50	1	40-60	E27	50	Встроенный в подволок, ночной
22	7	1	60	E27	7	Взрывобезопасный
23	2	1	100	E27	2	Взрывобезопасный
24	3	1	1000	E40	3	Прожектора
25	14	3	60	E27	42	Трюмные люстры

Итого в системе освещения установлено: люминесцентных ламп: 539 шт. суммарной установленной мощностью 17,7 кВт; ламп накаливания: 2588 шт. суммарной установленной мощностью 160,2 кВт.

4.2 Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости и качества электроэнергии в системе освещения судна типа БМРТ

В качестве объекта исследований выбрано промысловое судно – большой морозильный рыболовный траулер (БМРТ) «Алексей Аничкин» проекта В-673 тип Langusta. Внешний вид судна представлен на рисунке 4.4, технические характеристики приведены в таблице 4.3. Генерирующие мощности, крупные потребители и структура судовой ЭЭС представлены на рисунке 4.2.

Экспериментальные исследования показателей КЭ на судне проводились в условиях стоянки при работе судовой ЭЭС от вспомогательного дизель-генератора с использованием анализатора КЭ Fluke 434. Нагрузка генератора по активной мощности на момент проведения измерений составляла 150 кВт. Основные потребители на момент измерений: осветительная нагрузка, электродвигатели системы вентиляции, оборудование камбуза. Измерения проводились в двух точках: на генераторном напряжении на шинах ГРЩ СШ 380В и на напряжении 220 В на линии от трансформатора Т1 к шинам ГРЩ СШ 220В (рисунок 4.2). Результаты измерений характеристик напряжения в судовой сети приведены в таблице 4.4.

Результаты измерений показателей несинусоидальности напряжения и тока для двух точек измерений приведены в таблице 4.5. Сравнительный анализ результатов измерения показателей несинусоидальности напряжения, норм Правил КПМС РМРС и ГОСТ 32144-2013 приведен на рисунке 4.5, данные по току приведены на рисунке 4.6 (обозначение THD соответствует суммарному коэффициенту гармонических составляющих).

Как следует из таблиц 4.4 и 4.5 показатели КЭ в исследуемой судовой ЭЭС при заданном режиме работы удовлетворяют требованиям правил КПМС и ГОСТ 32144-2013 с учетом изолированного режима работы судовой ЭЭС.

Анализ нагрузок судовой ЭЭС с номинальным напряжением 220 В приведен в таблице 4.6. Структура нагрузок представлена на рисунке 4.7.

Как следует из таблицы 4.6, номинальная мощность внутренних систем освещения судна составляет 46,7 кВт, что соответствует 37% суммарной установленной мощности нагрузок на напряжении 220 В.

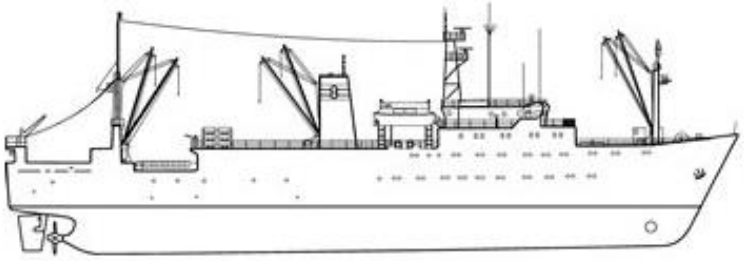


Рисунок 4.4 – Внешний вид БМРТ «Алексей Аничкин»

Таблица 4.3 – Технические характеристики траулеров проекта В-673

Класс Регистра	КМ*Л4 рыболовное
Длина (м)	93,65
Ширина (м)	15,99
Высота борта до верхней палубы (м)	9,91
Осадка средняя в грузу (м)	5,7
Водоизмещение наибольшее (т)	4792
Скорость (уз)	14,4
Количество коечных мест	82
Главные двигатели:	
Количество и мощность (л.с. каждый)	1x5000
Марка	B&W 8L 35MC
Частота вращения (об/мин)	164
Количество и мощность валогенераторов (кВт каждый)	1x1200
Вспомогательные дизель-генераторы:	
Марка дизеля	Cegielski-Sulzer 5 AT 25H
Частота вращения (об/мин)	750
Количество и мощность генераторов (кВт)	2x640
Напряжение генератора (В)	400
Завод-строитель	Stocznia im. Komuny Paryskiej, г. Гдыня, Польша

Таблица 4.4 – Результаты измерений показателей качества электроэнергии в электроэнергетической системе БМРТ «Алексей Аничкин»

Параметр	Сеть 380 В			Сеть 220 В		
	U_{AB}	U_{BC}	U_{AB}	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}
Величина напряжения, В	386,9	386,3	387,3	221,4	221,6	222,5
Отклонение напряжения, %	1,82	1,66	1,92	0,64	0,73	1,14
Частота, Гц	49,59					
Отклонение частоты, Гц	0,41					
Коэффициент несимметрии по обратной последовательности	0,2			0,2		
Доза фликера P_{st}	0,35	0,3	0,3	0,39	0,35	0,39

Таблица 4.5 – Результаты измерений несинусоидальности напряжения и тока в электроэнергетической системе БМРТ «Алексей Аничкин»

Показатель	Сеть 380 В			Сеть 220 В					
	Напряжение			Напряжение			Ток		
	U_{AB}	U_{BC}	U_{AB}	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	I_A	I_B	I_C
К, %	1,5	1,4	1,9	1,9	2,0	2,0	5,4	3,2	3,1
$К_{(3)}$, %	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	2,1	1,8	1,8
$К_{(5)}$, %	0,6	0,6	1,0	1,0	1,0	1,0	1,6	1,3	1,3
$К_{(7)}$, %	1,0	0,9	1,3	1,3	1,3	1,4	1,6	1,0	0,9
$К_{(9)}$, %	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,6	0,3	0,3
$К_{(11)}$, %	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5	0,6	0,2	0,2
$К_{(13)}$, %	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,3	0,5	0,7	0,7
$К_{(15)}$, %	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3

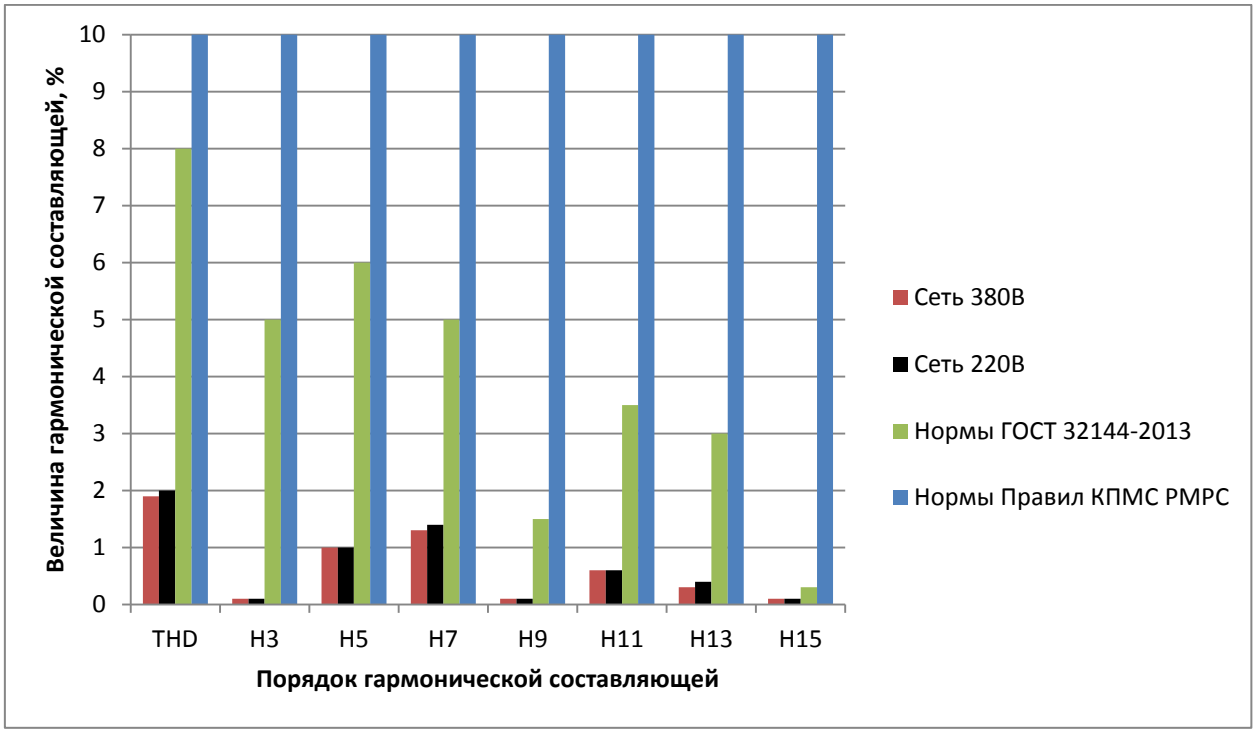


Рисунок 4.5 – Сравнительный анализ показателей несинусоидальности напряжения в электроэнергетической системе БМРТ «Алексей Аничкин»

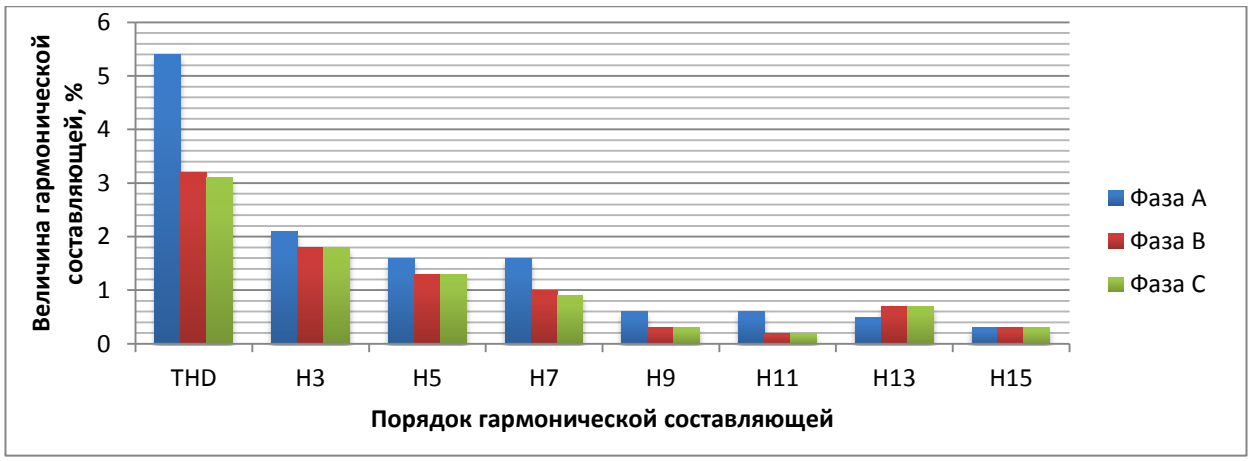


Рисунок 4.6 – Показатели несинусоидальности тока в сети с напряжением 220 В

Таблица 4.6 – Величина нагрузок в сети с номинальным напряжением 220 В

Наименование нагрузки	Номинальная мощность, кВт
Отопление помещений главной палубы	24,5
Отопление помещений траловой палубы	32,7
Освещение помещений силовой установки	9,7
Освещение помещений рыбообработки	9,8
Освещение помещений	6,4
Освещение главной палубы	6,4
Оборудование силовой установки	1,2
Внешнее освещение	21,2
Освещения рефрижераторных помещений	1,9
Освещение помещений полубака	4,3
Освещение помещений траловой палубы	8,2
Итого по группам:	
Отопление	57,2
Освещение внутреннее	46,7
Освещение наружное	21,2
Другое	1,2
Итого	126,3

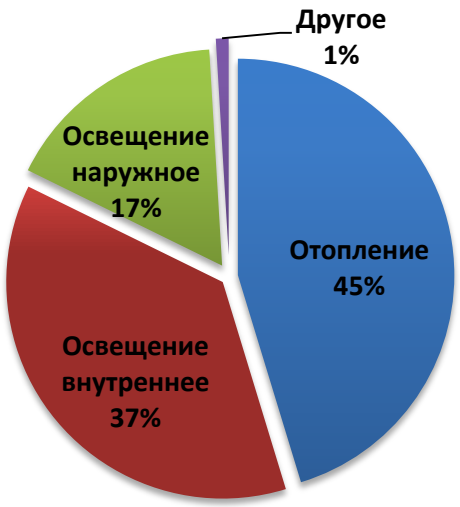


Рисунок 4.7 – Структура нагрузок в сети с номинальным напряжением 220 В

Анализ системы освещения БМРТ «Алексей Аничкин» показывает, что для освещения внутренних помещений судна используются преимущественно потолочные люминесцентные светильники накладного подволочного и встраиваемого исполнения с линейными лампами мощностью 2х18 Вт с электромагнитной пускорегулирующей аппаратурой (ПРА). В системе аварийного освещения применяются аналогичные светильники, в конструкции которых предусмотрена лампа накаливания с байонетным цоколем 2Ш15 (B15d) на напряжение 24В.

Было проведено исследование системы освещения с точки зрения уровней освещенности, обеспечиваемых в различных помещениях судна. Измерения проводились с использованием люксметра Эколайт-01 (блок обработки БОИ-1 и фотоголовка ФГ-01). В зависимости от помещения измерения проводились на установленном в Правилах КПМС уровне над настилом (0,8 м), на уровне рабочей поверхности, на настиле. Результаты измерений и нормы Правил КПМС приведены в таблице 4.7. Прочерк в графе «норма» означает, что Правилами освещенность для данного помещения не нормируется.

Коэффициент пульсаций освещенности на судах Правилами не нормируется. Для береговых объектов промышленности данный показатель нормируется СП 52.13330.2011 [75]. Допустимый уровень $K_П$ определяется разрядом зрительных работ и составляет от 10 до 20 %.

Проведенные исследования показывают, что уровень освещенности в помещениях судна не соответствует установленным нормам [15]. Снижение освещенности может быть обусловлено загрязнением ламп, плафонов и рассеивателей светильников, деградацией люминофора люминесцентных ламп. В ходе исследований выявлено, что работа светильников характеризуется высоким коэффициентом пульсаций освещенности. Как упоминалось ранее, пульсации освещенности влияют на циркадные (суточные) ритмы, эмоциональную сферу, работоспособность и самочувствие экипажа.

Для определения энергетических характеристик судовых светильников проведены экспериментальные исследования двух образцов с линейными лампами мощностью 2х18 Вт. Тип ПРА – электромагнитный. Результаты исследований приведены в таблицах 4.8, 4.9. Осциллограммы тока и напряжения исследуемых изделий приведены на рисунке 4.8.

Таблица 4.7 – Результаты измерений освещенности в помещениях судна

Помещение	Положение фотоголовки	Освещенность		$К_П$, %
		Е, лк	Норма, лк	
Щитовая ГРЩ	0,8 м над настилом	67,5	75	48,1
	Настил	35,5	-	47,7
Пульт управления	Поверхность пульта управления	93,3	100	45,7
	Настил	78,8	-	37,4
Трап к ГРЩ	Настил	57,0	75	41,5
Коридор	Настил	80,0	75	15,8
Рыбцех	Рабочее место рыбообработчика	138,0	-	43,4
	Настил	136,0	-	36

Таблица 4.8 – Результаты исследования энергетических характеристик судовых люминесцентных светильников

Образец	$U_{ном}$, В	Лампы	I, А	P, Вт	S, ВА	Q, вар	$\cos\varphi_{ЭКВ}$	$К_П$, %
Изделие 1	220	2х18 Вт	0,313	37,9	70,1	59	0,54	39
Изделие 2	220	2х18 Вт	0,364	44,4	81,5	68,3	0,55	38,3

Таблица 4.9 – Результаты исследования эмиссии высших гармоник тока судовыми люминесцентными светильниками в электрическую сеть

Образец	K_I, %	$K_{I(3)}$, %	$K_{I(5)}$, %	$K_{I(7)}$, %	$K_{I(9)}$, %	$K_{I(11)}$, %	$K_{I(13)}$, %	$K_{I(15)}$, %
Изделие 1	11,1	10,6	2,6	0,8	0,7	0,4	0,2	0,2
Изделие 2	10,2	9,8	2,5	1,0	0,6	0,5	0,2	0,2

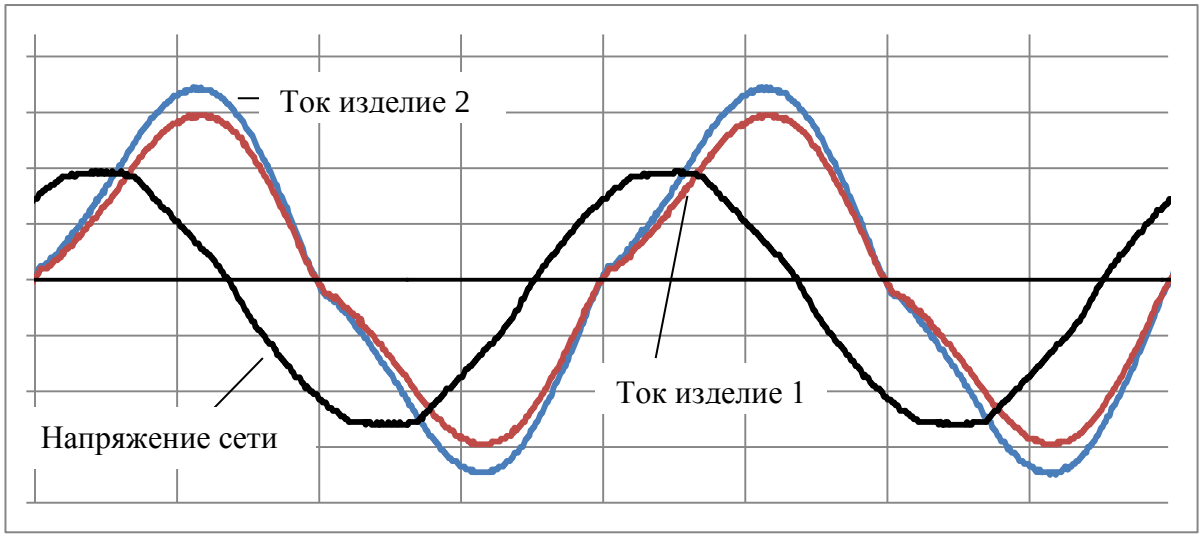


Рисунок 4.8 – Осциллограммы токов и напряжения для судовых светильников с люминесцентными лампами ЛБ-18

Анализ результатов исследований показывает, что люминесцентные светильники с электромагнитным ПРА отличаются высоким потреблением реактивной мощности и сравнительно низкими показателями несинусоидальности (K_I, $K_{I(n)}$). Форма потребляемого тока идентична для двух исследованных изделий и характеризуется низким уровнем искажений, обусловленных работой электромагнитного ПРА.

4.3 Разработка и исследование на математической модели судовой электроэнергетической системы распространения высших гармоник тока

Анализ распространения ВГ тока с использованием расчетных методик, рекомендованных для промышленных предприятий, осложняется изолированным режимом работы судовой ЭЭС. В связи с работой системы на напряжении до 1 кВ и большой протяженностью кабельных линий необходимо учитывать емкостную проводимость относительно корпуса судна [76, 77].

Расчет проводится для режима работы судовой ЭЭС от дизель-генератора, аналогичного экспериментальному. Расчетная электрическая схема судовой ЭЭС приведена на рисунке 4.9, где $НГ_{осв}$ является эквивалентной нелинейной нагрузкой осветительных приборов в системе внутреннего освещения судна. Характеристики генерирующего и распределительного оборудования приведены в таблице 4.10.

Для анализа сетей с нелинейными электроприемниками рекомендуется расчетная методика [78], основанная на использовании метода узловых потенциалов. Также известно, что токи ВГ кратных трем протекают по путям токов нулевой последовательности [79]. Поскольку трансформаторы в составе судовой ЭЭС имеют схему соединения «треугольник-звезда» без нулевого проводника, то протекание данных токов теоретически невозможно. Однако ввиду своей большой протяженности кабельные линии судовой ЭЭС имеют емкостную проводимость относительно корпуса судна и между фазами.

С учетом указанных особенностей судовой ЭЭС анализ распространения ВГ тока будет произведен с использованием различных методов: метода контурных токов при трехлинейной схеме замещения для токов ВГ, кратных трем и метода узловых потенциалов при однолинейной схеме замещения для токов ВГ, не кратных трем.

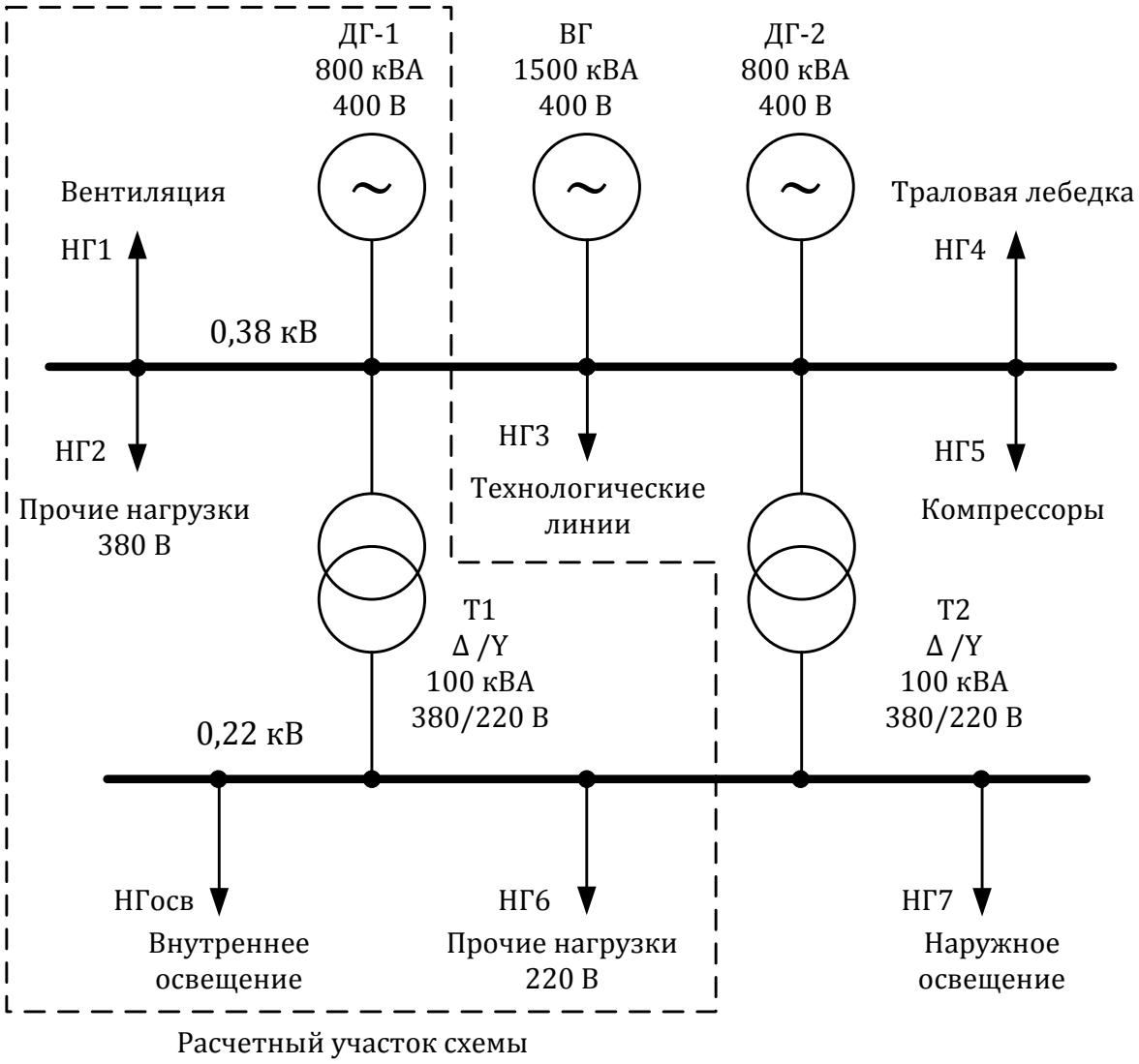


Рисунок 4.9 – Исследуемый участок схемы судовой ЭЭС

Таблица 4.10 – Характеристики электрооборудования судна

Генератор					
Параметр	$U_{ном}$, В	$P_{ном}$, кВт	$S_{ном}$, кВА	$R_г$, Ом	
Значение	400	640	800	0,03	
Параметр	x_d	x_d'	x_d''	x_2	x_0
Значение	2,7	0,23	0,16	2,7	0,23

Трансформатор						
Параметр	$S_{ном}$, кВА	$U_{вн}$, В	$U_{нн}$, В	$U_{к.з.}$, %	$P_{к.з.}$, Вт	$P_{х.х.}$, Вт
Значение	100	400	231	3,33	1180	516

Трехлинейная схема замещения для ВГ тока третьего порядка приведена на рисунке 4.10. Токи ВГ третьего порядка создают в трансформаторе магнитное поле нулевой последовательности (рисунок 4.11), индукционные линии которого замыкаются через воздушный зазор и стенки бака трансформатора [80]. В связи с этим обмотки высокого и низкого напряжения соответствующих фаз представлены на схеме замещении в виде магнитосвязынных цепей.

Нелинейная осветительная нагрузка представлена на схеме замещения источниками ВГ тока третьего порядка. Поскольку гармонический состав тока в ходе экспериментальных исследований на судне измерялся для линейных проводников, то источники тока вводятся в схему замещения аналогичным образом с соединением в звезду. Сопротивления источников при этом преобразованы (4.1). Расчетная схема замещения приведена на рисунке 4.12.

$$\begin{aligned} Z_a &:= \frac{Z_{ab} \cdot Z_{ca}}{Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca}} \\ Z_b &:= \frac{Z_{bc} \cdot Z_{ab}}{Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca}} \\ Z_c &:= \frac{Z_{bc} \cdot Z_{ca}}{Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca}} \end{aligned} \tag{4.1}$$

Нулевой провод с емкостным сопротивлением X_c моделирует емкость кабельных линий по отношению к корпусу судна. Величина емкости осветительной сети принята равной 3,6 мкФ в соответствии с [81].

Расчет схемы производится в программе Mathcad на основе метода контурных токов в матричной форме. Для схемы (рисунок 4.12) составлены матрица контуров (4.2) и матрица сопротивлений ветвей (4.3).

$$B := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \end{pmatrix} \tag{4.2}$$

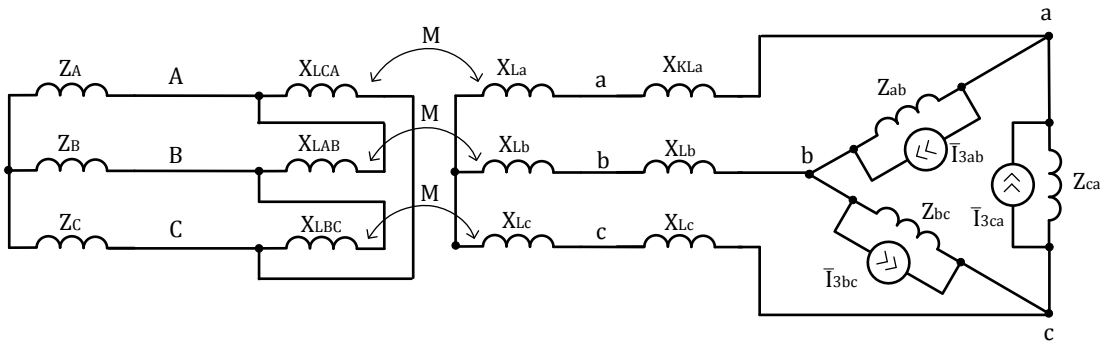


Рисунок 4.10 – Трёхлинейная схема замещения участка судовой ЭЭС для токов ВГ третьего порядка

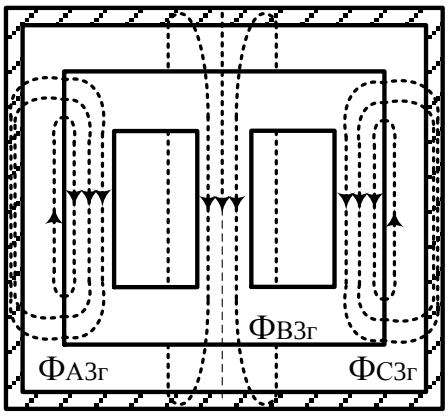


Рисунок 4.11 – Распределение индукционных линий магнитного поля нулевой последовательности в трехобмоточном трансформаторе

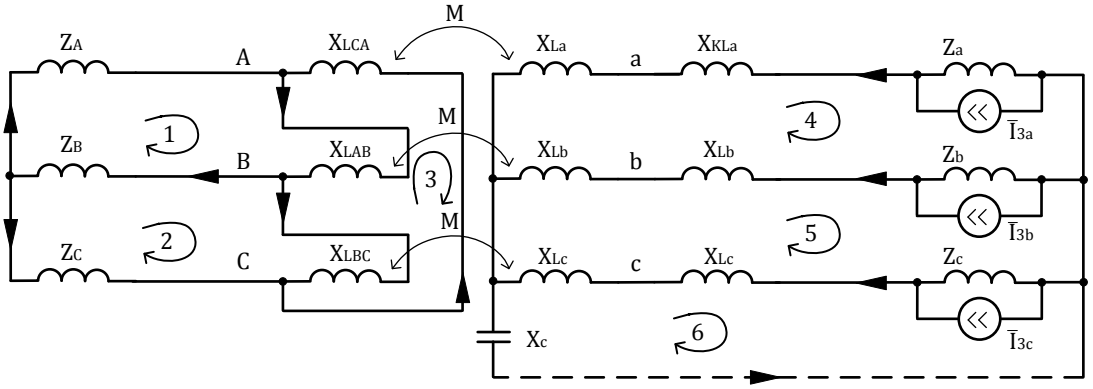


Рисунок 4.12 – Трёхлинейная расчетная схема замещения участка судовой ЭЭС для токов ВГ третьего порядка

$$Z := \begin{pmatrix} Z_A & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_B & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X_{LB} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{LC} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_{LA} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_{La} + Z_{KLa} + Z_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_{Lb} + Z_{KLb} + Z_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_{Lc} + Z_{KLc} + Z_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_c \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Матрица контурных сопротивлений определена по (4.4). Далее по выражению (4.5) определены токи в ветвях схемы:

$$Z_K := B \cdot Z \cdot B^T \quad (4.4)$$

$$Z_K \cdot \overline{I_K} = \overline{E_K} \quad (4.5)$$

Поскольку токи источников на стороне низкого напряжения совпадают по фазе, то токи в обмотках высокого напряжения трансформатора имеют вид (4.6). Таким образом, по первому закону Кирхгофа токи ВГ третьего порядка в сети высокого напряжения за пределами обмоток трансформатора равны нулю (4.7):

$$i_{AB} = i_{BC} = i_{CA} = I_m \cdot e^{j(3\omega t + 150)} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} i_A &= i_{AB} - i_{CA} = 0 \\ i_B &= i_{AB} - i_{BC} = 0 \\ i_C &= i_{CA} - i_{BC} = 0 \end{aligned} \quad (4.7)$$

Результаты расчета токов в ветвях схемы приведены в таблице 4.11. Следовательно, в судовой ЭЭС при соединении трансформатора по схеме Δ/Y токи ВГ, кратных трем, эмиссируемые в осветительные сети симметричной нелинейной осветительной нагрузкой, не распространяются в сеть высокого напряжения.

Анализ распространения ВГ тока, не кратных трем, выполнен с использованием метода узловых потенциалов. Схема замещения представлена на рисунке 4.13 Нелинейная нагрузка моделируется источником токов ВГ In. Также принимается допущение, что дизель-генератор не является источником ВГ. Параметры элементов схемы замещения определяются по выражениям (4.8 – 4.10).

Таблица 4.11 – Результаты расчетного исследования распространения токов высших гармоник третьего порядка в судовой электроэнергетической системе

Сеть 380 В			Трансформатор			Сеть 220 В		
I_A, А	I_B, А	I_C, А	I_{AB}, А	I_{BC}, А	I_{CA}, А	I_a, А	I_b, А	i_c, А
0	0	0	2,51	2,51	2,51	4,08	4,08	4,08

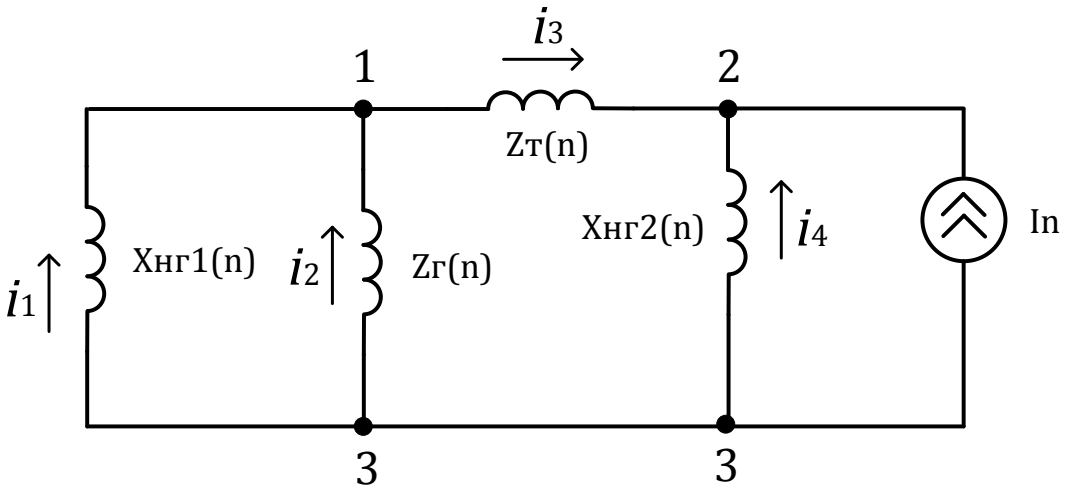


Рисунок 4.13 – Однолинейная схема замещения расчетного участка судовой ЭЭС для токов ВГ высшего порядка, некратных трем

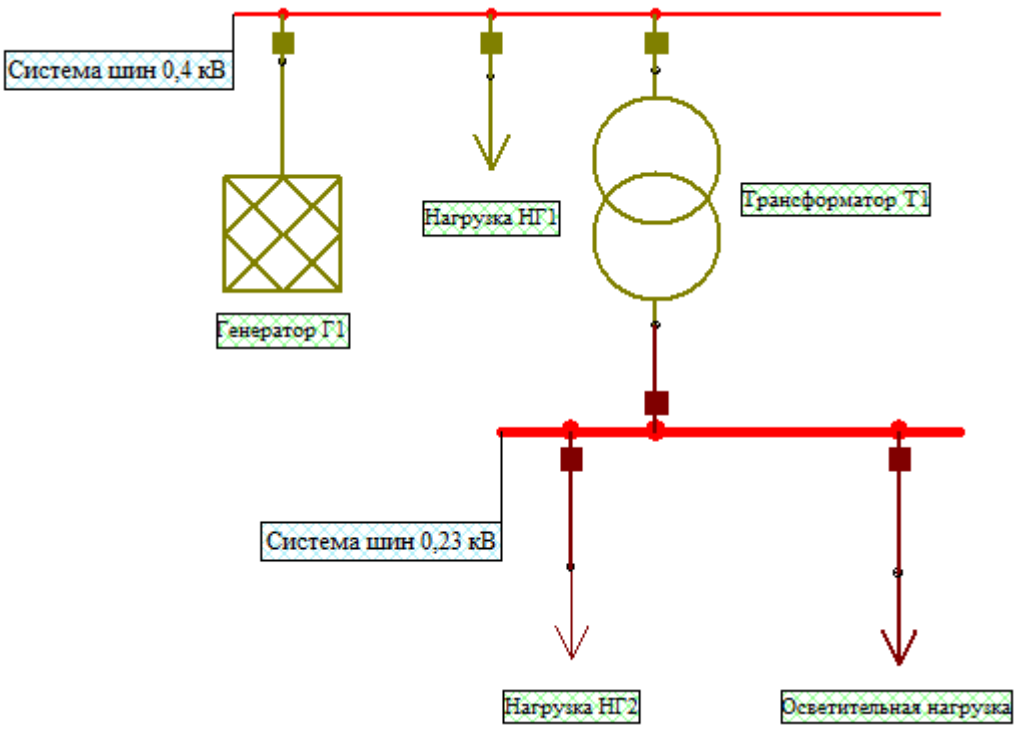


Рисунок 4.14 – Расчетная схема судовой электроэнергетической системы в программе Neplan

Генератор $$Z_{\text{Г}}(n) = jn \cdot X \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{ном}}}, \quad (4.8)$$

где X – сопротивление генератора: x_d'' – для 1,7,13 гармоники, x_2 – для 5,11 гармоники (таблица 4.10)

Трансформатор $$Z_{\text{Т}}(n) = (\sqrt{n} \cdot \frac{\Delta P_{\text{к}}}{S_{\text{ном}}} + jn \cdot \frac{U_{\text{к}}}{100}) \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{ном}}} \quad (4.9)$$

Нагрузка $$X_{\text{НГ}}(n) = jn \cdot X \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{ном}}} \quad (4.10)$$

В связи с особенностями магнитной системы синхронной машины [80] сопротивления токам прямой, обратной (X_2) и нулевой (X_0) последовательности различаются. Для явнополюсной машины справедливо выражение (4.11).

$$\begin{cases} x_2 = 0{,}2 \div 0{,}4 \\ r_2 \ll x_2 \end{cases} \quad (4.11)$$

Токи нулевой последовательности создают в воздушном зазоре синхронной машины пульсирующее магнитное поле, при этом индуктивное сопротивление X_0 определяется полями рассеяния обмотки якоря. В соответствии с [82] для явнополюсных машин $x_2 = 0{,}07 \div 0{,}1$.

Задача нахождения коэффициентов гармонических составляющих в узлах расчетной схемы решается с применением ЭВМ методом матричных уравнений узловых потенциалов (4.12) [82].

$$g^{(y)} \cdot \varphi = J_c, \quad (4.12)$$

где $g^{(y)}$ – квадратная матрица узловых проводимостей; φ – матрица-столбец потенциалов узлов; J_c – матрица-столбец токов источников токов в узлах.

С учетом особенностей схемы замещения СЭЭС матрицу узловых проводимостей ветвей целесообразно составлять с применением формулы (4.13).

$$g^{(y)} = A \cdot g_d \cdot A^T, \quad (4.13)$$

где A – матрица соединения узловых проводимостей ветвей схемы; g_d – диагональная матрица проводимостей ветвей; A^T – транспонированная матрица соединения узловых проводимостей ветвей схемы.

Для схемы замещения на рисунке 4.11 данные матрицы имеют вид (4.14,4.15)

$$g_{(d)} := \begin{pmatrix} g_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g_5 \end{pmatrix} \tag{4.14}$$

$$A := \begin{pmatrix} -1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \tag{4.15}$$

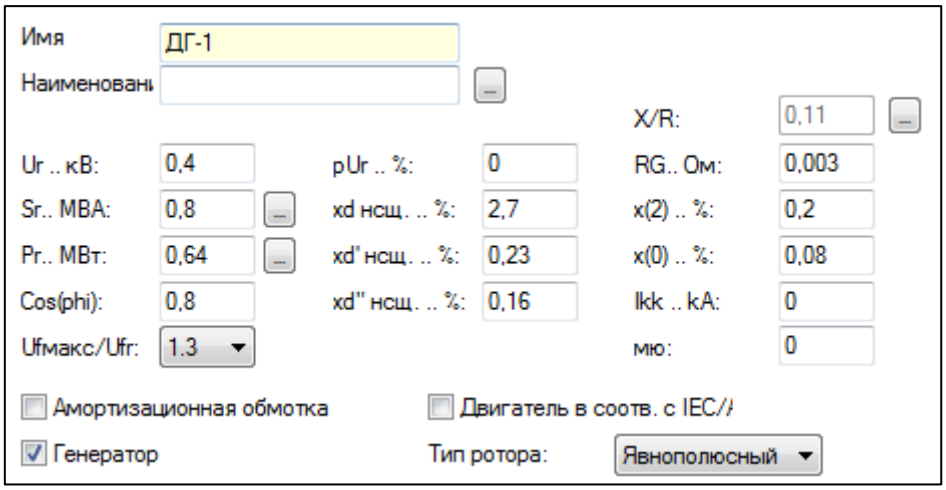
Расчет схемы производится с использованием программного пакета Neplan на основе полученных в ходе экспериментов показателей несинусоидальности тока для двух типов светильников: люминесцентного и светодиодного. Расчетная схема, выполненная в программной среде Neplan приведена на рисунке 4.14, параметры элементов расчетной схемы даны на рисунке 4.15. Характеристики светильников приведены в таблице 4.12. В качестве перспективного варианта принята прямая замена линейных ЛЛ ЛБ-18 (со световым потоком 850 лм) в существующих светильниках на светодиодные линейные лампы с потребляемой мощностью 8 Вт и световым потоком 750 лм [83].

Таблица 4.12 – Характеристики осветительных приборов, используемых при моделировании системы освещения судна

Светильник	P, Вт	Ф, лм	cosφ экв	Показатели несинусоидальности тока, %							
				K_I	$K_{I(3)}$	$K_{I(5)}$	$K_{I(7)}$	$K_{I(9)}$	$K_{I(11)}$	$K_{I(13)}$	$K_{I(15)}$
Существующий	36	1700	0,55	11,1	10,6	2,6	0,8	0,7	0,4	0,2	0,2
Перспективный	16	1500	0,98	45,2	35,2	21,3	10,0	7,3	7,3	8,0	3,9

Результаты расчета показателей несинусоидальности напряжения в сетях СЭЭС с номинальным напряжением 220 В и 380 В в сравнении с результатами измерений на судне приведены в таблице 4.13. Для оценки достоверности модели определена относительная погрешность для измеренных и рассчитанных значений. Как следует из таблицы 4.13, максимальная погрешность составляет 14,6%, а для большинства значений погрешность не превышает 10%. Согласно [84] данная величина погрешности является удовлетворительной с учетом принятых допущений.

а)



б)

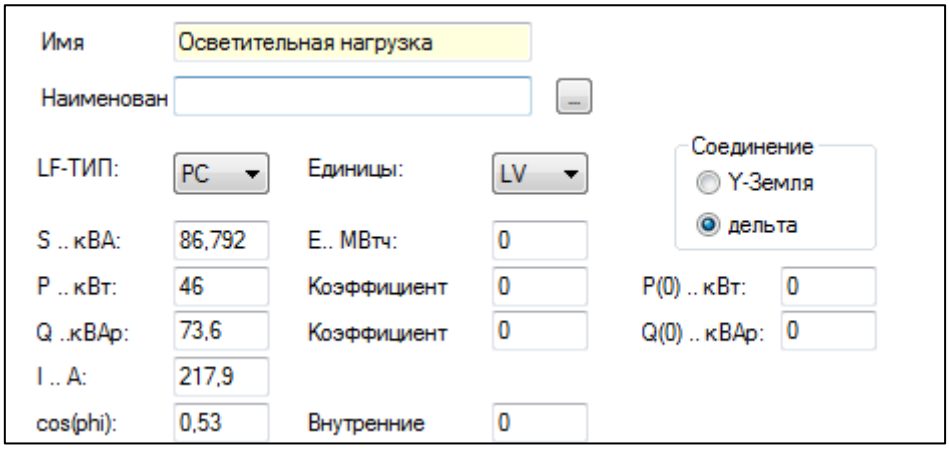


Рисунок 4.15 – Блоки задания параметров моделей генератора (а) и осветительной нагрузки (б) в программе Neplan

Таблица 4.13 – Результаты расчета показателей несинусоидальности в системе освещения с люминесцентными светильниками

Параметр	Показатели несинусоидальности напряжения, %							
	K_U	$K_{U(3)}$	$K_{U(5)}$	$K_{U(7)}$	$K_{U(9)}$	$K_{U(11)}$	$K_{U(13)}$	$K_{U(15)}$
Сеть 380 В								
Измерено	1,600	0,100	0,733	1,067	0,100	0,533	0,233	0,067
Рассчитано	1,817	0	0,794	0,95	0	0,494	0,213	0
Погрешность, %	13,56	-	8,27	10,94	-	7,38	8,71	-
Сеть 220 В								
Измерено	1,967	0,067	1,000	1,333	0,067	0,533	0,300	0,100
Рассчитано	2,133	0,059	1,113	1,245	0,059	0,519	0,323	0,093
Погрешность, %	8,46	11,50	11,30	6,62	11,50	2,69	7,67	7,00

Результаты расчета показателей несинусоидальности в случае замены люминесцентных ламп на перспективные светодиодные приведены в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Результаты расчета показателей несинусоидальности напряжения при установке в систему освещения судна светодиодных светильников

Тип светильника	Показатели несинусоидальности напряжения, %							
	K_U	$K_{U(3)}$	$K_{U(5)}$	$K_{U(7)}$	$K_{U(9)}$	$K_{U(11)}$	$K_{U(13)}$	$K_{U(15)}$
Сеть 380 В								
Люминесцентный	1,600	0	0,733	1,067	0	0,533	0,233	0
Светодиодный	1,807	0	0,794	0,95	0	0,611	0,245	0
Сеть 220 В								
Люминесцентный	1,967	0,067	1,000	1,333	0,067	0,533	0,300	0,100
Светодиодный	2,321	0,071	1,435	1,714	0,081	0,745	0429	0,094

Как следует из таблицы показатели несинусоидальности напряжения для большинства гармонических составляющих увеличились незначительно, что обусловлено: 1) уменьшением суммарной потребляемой мощности СД светильниками в сравнении с люминесцентными; 2) высоким сопротивлением судовой ЭЭС для протекания преобладающих у СД светильников токов третьей гармоники. Наибольшее увеличение показателей несинусоидальности приходится на пятую и седьмую гармонические составляющие напряжения. В то же время замена линейных ЛЛ (светоотдача 47,2 лм/Вт) на светодиодные аналоги (93,8 лм/Вт) обеспечивает уменьшение установленной мощности осветительных приборов судна на 55%.

4.4 Экспериментальные исследования распространения токов высших гармоник в судовой электроэнергетической системе

Поскольку в ходе экспериментальных исследований на судне был измерен только гармонический состав токов в сети низкого напряжения, то для подтверждения расчетных исследований на разработанных математических моделях проведено экспериментальное исследование распространения ВГ тока на лабораторной физической модели судовой ЭЭС (рисунок 4.16). Паспортные характеристики примененного электрооборудования приведены в таблице 4.15. В ходе эксперимента измерялся гармонический состав тока в сети низкого и высокого напряжения, а так же тока в цепи обмоток трансформатора, соединенных в «треугольник» (рисунок 4.16). Результаты измерений для различных режимов работы установки приведены в таблице 4.16. Недостатком экспериментальных исследований является соизмеримость токов СД ламп,

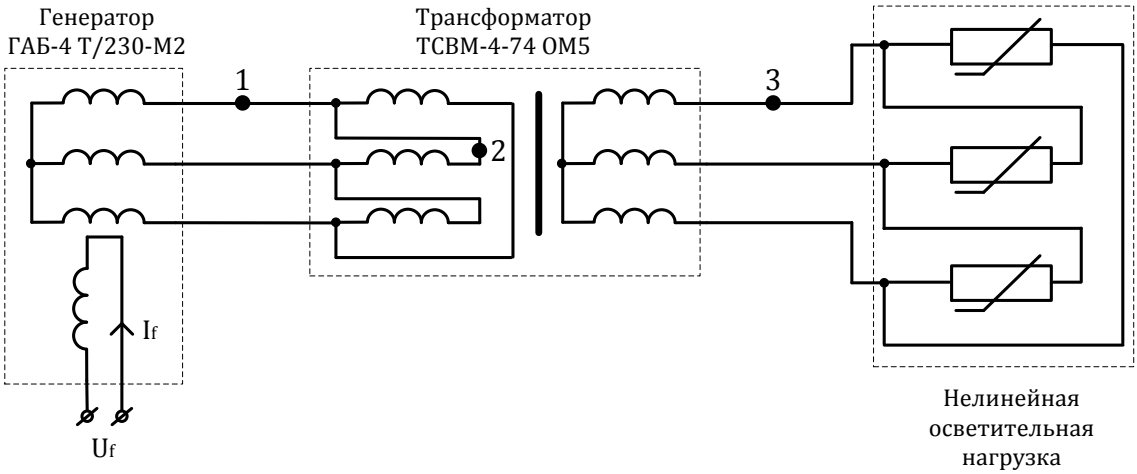


Рисунок 4.16 – Схема лабораторной физической модели судовой электроэнергетической системы и системы освещения судна

Таблица 4.15 – Характеристики электрооборудования в составе физической модели судовой электроэнергетической системы

Генератор ГАБ-4Т/230-М2				
Параметр	$U_{ном}$, В	$P_{ном}$, кВт	n, об/мин	R_a, Ом
Значение	230	4	3000	0,47
Параметр	$I_{ном}$, А (cosφ=1)	$I_{ном}$, А (cosφ=0,8)	$I_{возб}$, А	
Значение	10	12,6	5,9	
Трансформатор ТСВМ-4-74 ОМ5				
Параметр	$S_{ном}$, кВА	$U_{вн}$, В	$U_{нн}$, В	$U_{к.з.}$, %
Значение	4	380/220	230/133	3

Таблица 4.16 – Результаты измерений показателей несинусоидальности тока и напряжения на лабораторной физической модели судовой ЭЭС

Нелинейная нагрузка	СД лампы						нет	
Точка измерений	**1**		**2**		**3**		**1**	
$U_Л$, В	220	160	220	160	220	160	220	160
I, А	0,6	0,35	0,33	0,21	0,145	0,16	0,63	0,26
K_I, %	12	10	12,5	10,2	35,2	26,5	14,9	6,4
K_{I3}, %	3,0	2,7	7,6	3,9	2,2	1,6	3,0	2,8
K_{I5}, %	9,1	5,5	7,2	4,5	24,6	20,2	13,9	5,6
K_{I7}, %	4,5	4,8	4,6	5,0	7,0	9,8	4,9	1,0
Показатели несинусоидальности напряжения без нелинейной нагрузки								
$U_Л$, В	K_U, %		K_{U3}, %		K_{U5}, %		K_{U7}, %	
160	5,3		0,9		4,9		0,6	
230	4,8		5,0		9,8		1,0	

используемых в качестве нелинейной нагрузки, и тока намагничивания трансформатора. Анализ результатов измерений показывает: 1) протекание токов ВГ кратных трем в судовой ЭЭС без нулевого провода при симметричной нагрузке невозможно в отсутствии емкостной проводимости между фазами и относительно корпуса судна; 3) Ввиду отсутствия путей для протекания токов высшей гармоники третьего порядка в трехпроводных трехфазных системах, данная составляющая выпадает из гармонического состава токов СД источников света; 3) токи ВГ некратных трем, эмиссируемые нелинейной нагрузкой, распространяются по судовой ЭЭС через трансформаторы со схемой соединения «треугольник-звезда» без нулевого провода.

Результаты экспериментальных исследований на лабораторной модели (таблица 4.16), в частности распространения токов ВГ третьего порядка, подтверждают достоверность результатов математического моделирования.

4.5 Экспериментальные исследования гармоник тока и напряжения в системе электроснабжения объекта берегового базирования

Системы электроснабжения общепромышленного назначения, в том числе и системы электроснабжения объектов морской индустрии берегового базирования, имеют четырех- или пяти проводное исполнения с нулевым проводником.

Особенности функционирования систем освещения на основе СД ИС на объектах берегового базирования выявлены в ходе экспериментального исследования уровней и распространения ВГ тока и напряжения в системе освещения складского комплекса ООО «ТД Строитель», построенной преимущественно на основе СД ИС. На рассматриваемом объекте для освещения используются СД светильники Jazzway PWP-1200-SMD мощностью 40 Вт [85]. Энергетические характеристики светильника приведены в таблице 4.17, осциллограммы тока и напряжения даны на рисунке 4.17.

Система электроснабжения объекта, в том числе система освещения, получает питание от шин 0,4 кВ центра распределения питания (ЦРП) (рисунок 4.18). На объекте предусмотрена дизельная электростанция для автономного электроснабжения при авариях и в условиях чрезвычайных ситуаций. Система освещения объекта имеет трехфазное исполнение с распределением светильников по фазам. Помимо осветительных приборов от щитов системы освещения также получают питание иные нагрузки малой мощности.

Таблица 4.17 – Энергетические характеристики светодиодного светильника Jazzway PWP-1200-SMD мощностью 40 Вт

$P_{ном}$, Вт	Ф, лм	$\cos\varphi_{ном}$	Показатели несинусоидальности, %							
			K_I	$K_{I(3)}$	$K_{I(5)}$	$K_{I(7)}$	$K_{I(9)}$	$K_{I(11)}$	$K_{I(13)}$	$K_{I(15)}$
40	3400	0,95	117,7	77,4	51,2	40,2	37,0	27,3	16,3	13,0

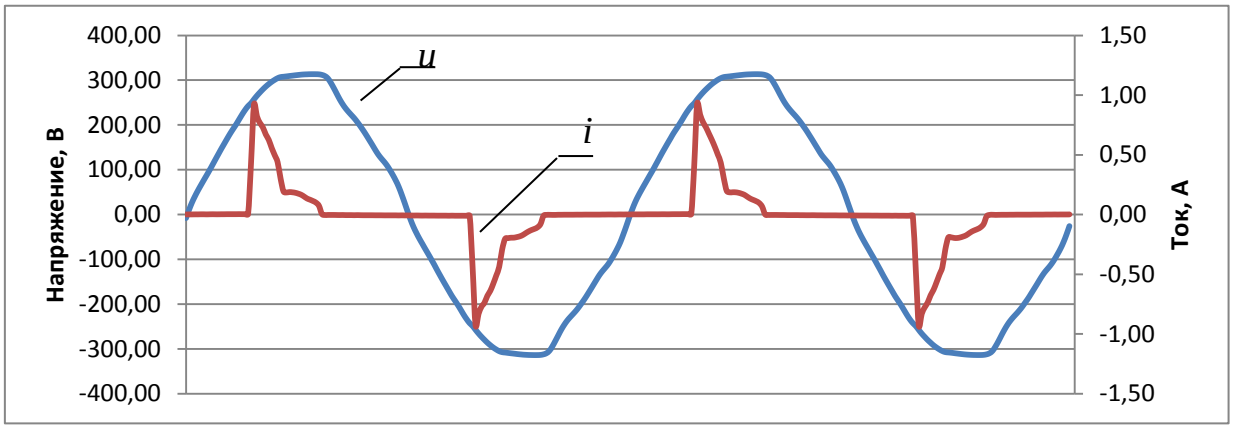


Рисунок 4.17 – Осциллограммы тока и напряжения СД светильника Jazzway

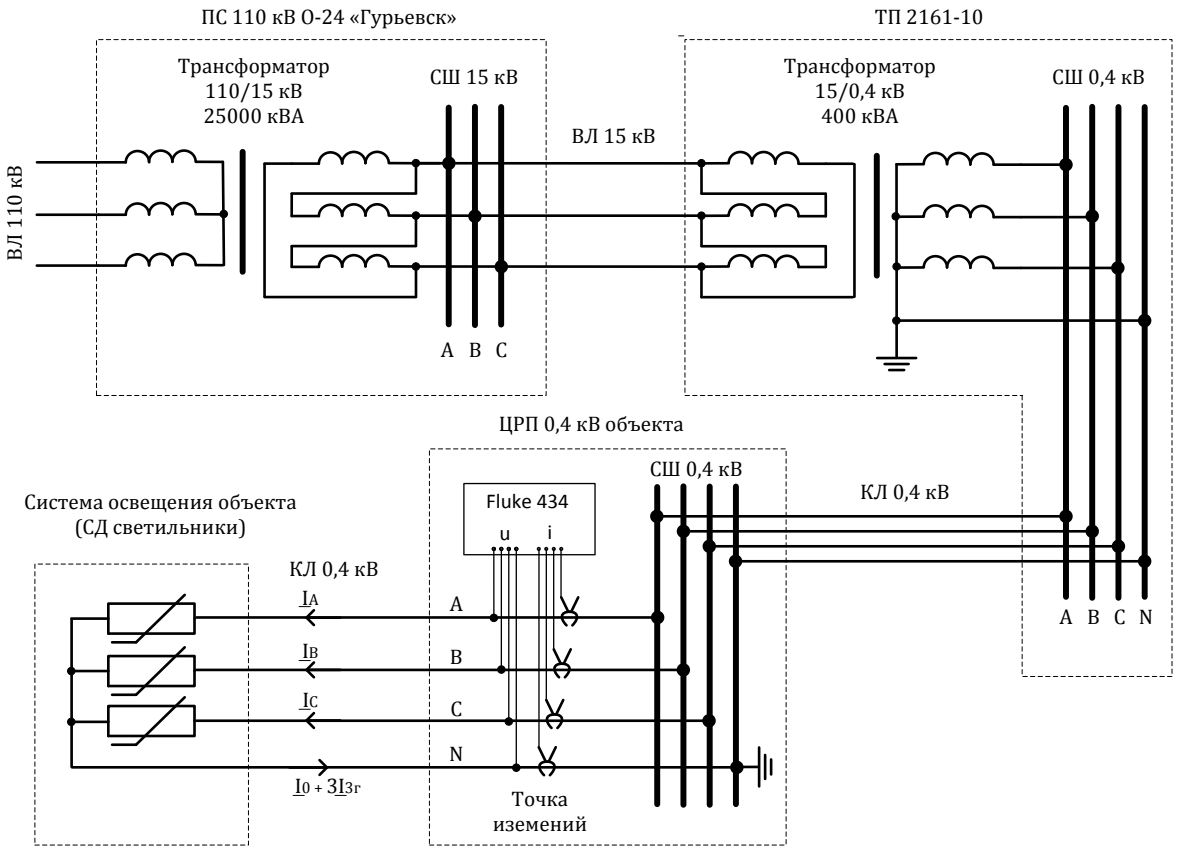


Рисунок 4.18 – Схема электроснабжения промышленного объекта и система освещения на основе СД светильников

Измерение при помощи прибора Fluke-434 проведены в точке присоединения кабельной линии системы освещения к шинам ЦРП для двух режимов: электроснабжение ЦРП от энергосистемы и от резервной дизельной электростанции. Показатели энергопотребления системы освещения приведены в таблице 4.18. Результаты исследования несинусоидальности тока и напряжения в системе освещения приведены в таблице 4.19.

Анализ осциллограммы токов в фазных и нулевом проводниках (рисунок 4.19) показывает, что по нулевому проводнику в системе освещения протекает преимущественно ток с частотой 150 Гц, что соответствует ВГ тока третьего порядка, обусловленной функционированием СД светильников. При этом величина среднеквадратического значения тока в нулевом проводнике составляет от 75 до 98 % значения тока фазного проводника (таблица 4.18) (4.16).

$$\sum \overline{I_0} = 3\overline{I_{3Г}} + \overline{I_0} \tag{4.16}$$

Таким образом, показатели несинусоидальности потребляемого СД ИС тока, в частности, величина ВГ третьего порядка, должны учитываться при построении систем освещения на основе ИС данного типа в целях недопущения перегрузки нулевого проводника при трехфазном исполнении системы освещения, а так же при выборе параметров автономных источников питания (дизельных электростанций и т.д.)

4.6 Разработка устройства для обеспечения электромагнитной совместимости систем освещения на основе светодиодных источников света

С учетом результатов проведенных исследований функционирования СД светильников в трехфазных системах электроснабжения с нулевым проводником была предложена концепция фильтрокомпенсирующего устройства для компенсации тока третьей гармоники в нулевом проводнике и повышений качества электроэнергии.

Устройство разработано на основе аналогичного изделия [86], состоящего из комбинации реактора, конденсатора и резистора, подключенных к вторичным выводам одноименных обмоток трехстержневого трансформатора, подключаемого к фазным проводникам питающей сети.

Недостатком данного изделия является применение схемы соединения «звезда» для емкостных и индуктивных компонентов. В процессе работы за счет переменных

Таблица 4.18 – Показатели энергопотребления системы освещения объекта

Проводник	$U_ф$, В	$I_ф$, А	P, кВт	S, кВА	Q, квар	$cos\varphi_{экв}$	P_{st}
Электроснабжения от энергосистемы (ТП2161-10)							
Фаза А	219,8	105	22,6	23,8	7,4	0,95	0,68
Фаза В	227,5	80	17,4	18,9	7,5	0,92	0,71
Фаза С	231,2	100	21,8	23,3	8,2	0,94	1,14
Нейтраль	-	78	-	-	-	-	-
Электроснабжения от дизельной электростанции							
Фаза А	226,9	97	20,6	22,2	8,3	0,93	0,74
Фаза В	230,6	82	17,3	18,9	7,6	0,92	0,82
Фаза С	228,5	95	20,5	21,8	7,4	0,94	1,06
Нейтраль	-	74	-	-	-	-	-

Таблица 4.19 – Показатели несинусоидальности тока и напряжения

Характе-ристика	Проводник	Показатели несинусоидальности, %							
		K	$K_{(3)}$	$K_{(5)}$	$K_{(7)}$	$K_{(9)}$	$K_{(11)}$	$K_{(13)}$	$K_{(15)}$
Электроснабжения от энергосистемы (ТП2161-10)									
Напря-жение	Фаза А	8,6	8,3	1,6	0,2	1,0	0,3	0,5	0,4
	Фаза В	7,8	7,6	1,1	0,5	0,8	0,4	0,4	0,1
	Фаза С	8,9	8,7	1,4	0,3	1,1	0,2	0,4	0,2
Ток	Фаза А	22,0	20,7	6,0	2,8	0,8	2,0	2,0	0,5
	Фаза В	34,1	32,1	10,0	3,6	2,3	2,0	2,6	0,9
	Фаза С	29,4	27,8	8,3	1,2	2,7	2,6	1,3	0,7
Электроснабжения от дизельной электростанции									
Напря-жение	Фаза А	8,4	0,8	7,1	2,4	2,0	2,9	0,8	0,8
	Фаза В	8,7	1,2	7,4	3,7	0,8	1,9	1,0	0,2
	Фаза С	7,5	3,3	5,3	3,1	1,0	1,6	1,6	0,3
Ток	Фаза А	28,5	25,7	11,2	1,0	4,0	1,6	0,9	1,6
	Фаза В	35,6	31,9	14,1	5,0	3,3	2,9	0,8	1,3
	Фаза С	32,0	30,8	4,8	3,4	2,9	1,0	0,5	0,8

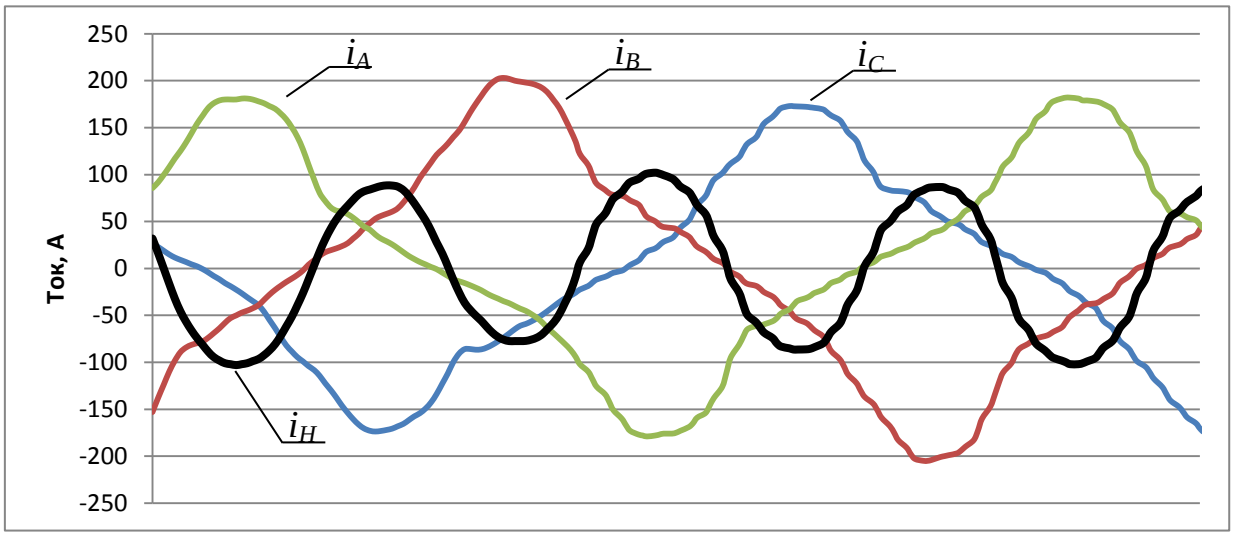


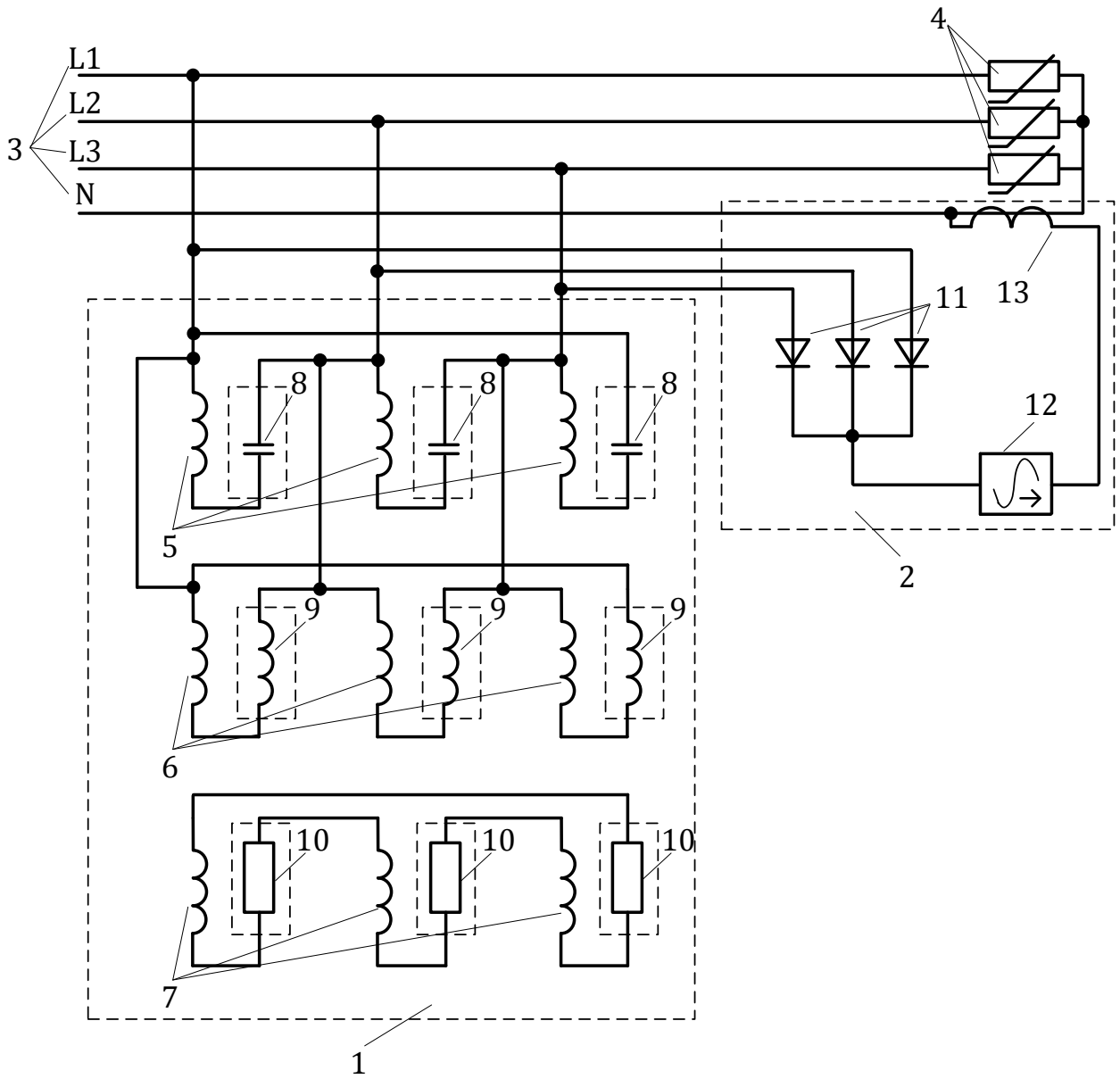
Рисунок 4.19 – Осциллограммы токов в фазных и нейтральном проводниках системы электроснабжения исследуемого объекта (питание от энергосистемы)

нагрузок и непостоянного теплового режима данных элементов происходит изменение их емкостных и индуктивных сопротивлений. В результате происходит смещение потенциала нулевой точки фильтрокомпенсирующего устройства, что оказывает негативное влияние на симметричность режима работы устройства и сети, и приводит к снижению качества электроэнергии. Кроме того, данное устройство, ввиду особенностей трехстержневого трансформатора, не позволяет подавлять третью гармонику тока, что не позволяет решить поставленную задачу.

Для получения технического результата в разработанном устройстве (рисунок 4.20, содержащем трехфазный трехобмоточный трехстержневой трансформатор, три обмотки каждой фазы которого расположены на одном стержне, первые одноименные выводы первой и второй обмоток подключены к питающей сети системы электроснабжения, к вторым выводам первой обмотки подключены конденсаторы, к вторым выводам второй обмотки подключены реакторы, выводы третьей обмотки соединены с резистором, предлагается соединить обмотки трансформатора по схеме «треугольник», выбрать емкость конденсаторной батареи с учетом предотвращения резонанса напряжений в рабочем диапазоне частот, дополнительно оснастить устройство блоком компенсации токов третьей гармоники.

Как показано на схеме устройство состоит из двух функциональных элементов: блока (1) компенсации высших гармоник тока в фазных проводниках (БКФ), содержащего трехобмоточный трансформатор, сборки конденсаторов, реакторов и резисторов, и блока (2) компенсации тока третьей гармоники в нулевом проводнике (БКН), содержащего источник тока частотой 150 Гц, фазосдвигающий модуль и трансформатор тока, установленный в нулевом проводнике сети.

Снижение уровня несимметрии фазных напряжений достигается за счет исключения смещения потенциала нулевой точки БКФ путем соединения обмоток трекстержневого трехфазного трансформатора по схеме «треугольник». Данное решение обеспечивает симметричную работу фильтрокомпенсирующего устройства вне зависимости от его нагрузки. Однако при схеме соединения «треугольник» в одной из обмоток реактивная компонента оказывается включена последовательно с индуктивностью обмотки трансформатора, что создает предпосылки для возникновения резонанса напряжений.



L 1, L2, L3 - фазные проводники трехфазной сети; N - нулевой проводник; 1 - блок компенсации высших гармоник тока в фазных проводниках; 2 - блок компенсации тока третьей гармоники в нулевом проводнике; 3 - электрическая сеть 0,4 кВ; 4 - нелинейная нагрузка; 5, 6, 7- трехфазные обмотки трансформатора; 8 - сборка конденсаторов; 9 - сборка реакторов; 10 - сборка резисторов; 11 - фильтр третьей гармоники тока; 12 - фазосдвигающее устройство; 13 - трансформатор тока

Рисунок 4.20 – Схема разработанного фильтрокомпенсирующего устройства

БКФ подключается к электрической сети (3), питающей нелинейную нагрузку (4). БКФ состоит из трехфазного трансформатора с тремя трехфазными обмотками (5, 6, 7), конденсаторной батареи (8), реактора (9) и резистора (10). При этом выводы обмоток 5 и 6 с подключены к фазным проводникам сети. В цепь обмотки 5 подключена сборка конденсаторов, а в цепь обмотки 6 подключена сборка реакторов. Обмотка 7 соединена в «треугольник» и содержит активную нагрузку.

Номиналы конденсатора и реактора подбираются таким образом, чтобы протекающие через них токи промышленной частоты имели одинаковую величину. С учетом требований о недопущении резонанса напряжений на рабочем диапазоне частот расчет параметров БКФ проводится на основе системы уравнений (4.17):

$$\begin{cases} W_1 = W_2 \\ C_K = 1/(\omega^2 L_p) \\ C_K \neq 1/(\omega^2 L_T), \end{cases} \qquad (4.17)$$

где W1 и W2 - соответственно число витков первичной и вторичной обмотки трансформатора; Ск - ёмкость конденсатора; ω - частота протекающего тока (с учетом компенсируемых высших гармоник); L_p - индуктивность реактора; L_T - эквивалентная индуктивность обмотки трансформатора, в цепи которой установлен конденсатор.

При создании указанных условий на основной частоте токи в обмотках 5 и 6 уравновешены и в обмотке 7 не индуцируется ЭДС, что позволяет избежать потерь на активном сопротивлении от токов промышленной частоты. При протекании токов высших гармоник за счет разности емкостного и индуктивного сопротивления происходит индицирование ЭДС в обмотке 7 и энергия гармоник рассеивается на активном сопротивлении, в результате чего достигается снижение несинусоидальности тока в фазных проводниках за счет подавления высших гармоник тока.

Соединение обмоток трансформатора по схеме «треугольник» позволяет обеспечить симметричный режим работы устройства вне зависимости от нагрузки и теплового режима.

За счет использования трехстержневого трансформатора БКФ представляет собой большое сопротивление для токов третьей гармоники. Поэтому фазные токи третьей гармоники используются для компенсации тока третьей гармоники в нулевом проводнике посредством БКН.

БКН подключается к сети параллельно с БКФ. На входе устройства в каждой фазе установлены диоды 11, генерирующие ток с частотой 150 Гц. Далее следует блок узкополосной фильтрации третьей гармоники и фазосдвигающее устройство (ФЗУ) 12, где третья гармоника устанавливается в противофазу с утроенным током третьей гармоники, протекающим в нулевом проводнике, что позволяет осуществить его компенсацию посредством трансформатора тока 13. В результате достигается улучшение формы кривой тока путем подавления третьей гармоники тока в нулевом проводнике.

Проверка работоспособности устройства была проведена на математической модели электрической трехфазной сети с нелинейными нагрузками. Фазная несимметрия индуктивных и емкостных компонентов моделируется за счет изменения их номиналов на +10% и -10% для фаз L1 и L3 соответственно. Расчет производится для случая симметрии нелинейной нагрузки сети. По величине напряжений, измеренных на зажимах фильтрокомпенсирующего устройства, рассчитан оценочный показатель - коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности ($К_{U0}$). Для схемы соединения «звезда», примененной в прототипе для расчетной схемы $К_{U0}$ = 2,36, для предложенного устройства со схемой «треугольник» данный показатель составил $К_{U0}$ = 1,07. В результате обеспечивается снижение уровня несимметрии фазных напряжений.

Нелинейная нагрузка моделируется посредством источников тока высших гармоник с усредненными величинами токов. До подключения устройства коэффициенты высших гармоник тока в сети составляли: $К_{U3}$=20%, $К_{U5}$=14%, $К_{U7}$=5%, $К_{U9}$=3%. После подключения устройства в фазных проводниках амплитудное значение тока: третьей гармоники уменьшилось на 7%, пятой гармоники уменьшилось на 45,3%, седьмой гармоники уменьшилось на 62,7%, девятой гармоники - на 54,6%. В нулевом проводе произошли следующие изменения: значение амплитуды третьей гармоники уменьшилось на 64%, пятой гармоники - на 3%, седьмой гармоники - на 3,6%, девятой - на 2%.

Для сравнения, при включении в сеть ближайшего аналога в фазных проводниках амплитудное значение тока: третьей гармоники уменьшилось на 1,3%, пятой гармоники уменьшилось на 46,1%, седьмой гармоники уменьшилось на 60,2%, девятой гармоники - на 52,1%. В нулевом проводнике гармонический состав тока не изменился.

ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ

1. Экспериментальные исследования качества электроэнергии в судовой ЭЭС БМРТ «Алексей Аничкин» и эмиссии высших гармонических составляющих тока судовыми люминесцентными светильниками показали, что в системах освещения судов преобладающей высшей гармонической тока является составляющая пятого порядка.

2. Разработаны математические модели судовой электроэнергетической системы для исследования распространения высших гармонических составляющих тока, отличительной особенностью которых является использование метода контурных токов и учет емкостной проводимости кабельных линий относительно корпуса судна для расчета распространения гармоник тока кратных трем и метода узловых потенциалов для высших гармонических составляющих тока, не кратных трем.

3. Результаты исследований на физической и математических моделях судовой ЭЭС (трансформатор со схемой соединения Δ/Y) показывают, что высшие гармонические составляющие тока кратные трем при симметричной нагрузке не распространяются в сеть высокого напряжения, а циркулируют по обмотке трансформатора, соединенной в «треугольник». Высшие гармонические составляющие тока, не кратные трем, распространяются от источника по всей судовой ЭЭС.

4. Замена существующих ЛЛ на светодиодный аналог при незначительном увеличении показателей несинусоидальности напряжения в диапазоне допустимых значений позволяет достичь снижения установленной мощности осветительных приборов в судовой ЭЭС на 55% за счет внедрения энергоэффективных СД ламп.

5. Экспериментальное исследование несинусоидальности тока и напряжения в системе освещения берегового объекта, построенной на основе СД ИС, выявило наличие в нулевом проводнике системы освещения тока с частотой 150 Гц, величина которого соизмерима со значениями токов в фазных проводниках. Данное явление представляет опасность для надежного функционирования систем освещения в чрезвычайных ситуациях и должно быть учтено при проектировании систем освещения на основе СД источников света и выборе параметров автономных источников питания.

6. Разработано фильтрокомпенсирующее устройство для обеспечения электромагнитной совместимости систем освещения на основе СД источников света, отличающееся от известных возможностью компенсации тока третьей гармоники в фазных и нулевом проводниках (Пат. 158871, МПК H02J3/01, опуб. 20.01.2016).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований получены следующие научные и практические результаты.

1. Предложены методики экспериментальных исследований характеристик электромагнитной совместимости СД источников света, реализованные на основе комплекса приборов для измерения энергетических характеристик источников света на всех этапах преобразования энергии при параметрах напряжения, характерных для нормальных и аварийных режимов.

2. Выявлены взаимосвязи между параметрами процессов на всех этапах преобразования энергии от электрической сети до излучаемого светового потока в СД источниках света.

3. На основе экспериментальных и расчетных исследований СД источников света различных производителей установлено: форма и гармонический состав входного тока СД источника света определяются нелинейной характеристикой драйвера; световой поток, создаваемый СД источниками света, пульсирует с частотой 100 Гц, что обусловлено работой двухполупериодного выпрямителя в составе электрической схемы драйвера.

4. Измерены и проанализированы значения токов включения СД источников света в электрической сети. Установлено, что для ряда СД световых приборов ток включения может достигать двенадцатикратного значения по отношению к номинальному. В судовых системах аварийного освещения одновременное подключение световых приборов с большим током включения при высокой скорости его нарастания способно вызвать срабатывание защитных аппаратов, что может привести к неработоспособности системы аварийного освещения при возникновении чрезвычайной ситуации.

5. Выявлено, что изменение освещенности СД источников света со стабилизированным световым потоком при изменении величины питающего напряжения от 100 до 250 В составляет не более 10% от номинального значения, что позволяет обеспечить требования по освещенности при снижении величины напряжения в сети в результате возникновения чрезвычайных ситуаций.

6. Установлено, что стробоскопический эффект в системах освещения на основе СД изделий может проявляться при наличии механизмов с частотой вращения 6000 об/мин и коэффициенте пульсаций освещенности более 10%.

7. Разработаны математические модели судовой электроэнергетической системы для исследования распространения ВГ составляющих тока, отличительной особенностью которых является использование метода контурных токов для расчета распространения ВГ тока кратных трем и метода узловых потенциалов для ВГ составляющих тока некратных трем.

8. Результаты исследований на физической и математических моделях судовой электроэнергетической системе (трансформатор со схемой соединения Δ/Y) показывают, что ВГ составляющие тока, кратные трем, при симметричной нагрузке не распространяются в сеть высокого напряжения. В то же время ВГ составляющие тока, не кратные трем, распространяются от источника по всей судовой электроэнергетической системе.

9. Установлено, что замена существующих люминесцентных ламп в системе освещения БМРТ «Алексей Аничкин» на СД аналоги при незначительном увеличении показателей несинусоидальности напряжения в диапазоне допустимых значений позволяет достичь снижения установленной мощности осветительных приборов в судовой электроэнергетической системе на 55%.

10. Разработано фильтрокомпенсирующее устройство для обеспечения электромагнитной совместимости систем освещения на основе СД источников света в нормальных условиях и при чрезвычайных ситуациях, отличающееся от известных возможностью компенсации токов ВГ третьего порядка (Пат. RU 158871 U1, МПК H02J 3/01, опуб. 20.01.2016).

11. Полученные в ходе диссертационного исследования результаты внедрены в ООО «Рефтрансфлот инжиниринг» на уровне специалистов по монтажу, ремонту и наладке судового электрооборудования в качестве рекомендаций по обеспечению электромагнитной совместимости систем освещения на основе светодиодных источников света и типовых исходных характеристик светодиодной светотехнической продукции. Практическая значимость результатов подтверждена справкой о возможности использования результатов диссертационного исследования в практической деятельности проектной организации ООО «Азимут-Проект».

Выполненный комплекс исследований позволяет констатировать, что обеспечение электромагнитной совместимости светодиодного освещения в системах электроснабжения объектов морской индустрии при нормальной работе и в

чрезвычайных ситуациях достигается за счет совершенствования нормативных документов на основе полученных результатов; использования разработанных методик для выбора СД ламп и световых приборов с наименьшим уровнем электромагнитных помех при проектировании светодиодных систем освещения; внедрения фильтрокомпенсирующих устройств для ограничения воздействия СД источников света на питающую электрическую сеть в нормальных и аварийных режимах.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АД – асинхронный двигатель

АПК – аппаратно-программный комплекс

БАТМ – большой автономный траулер морозильный

БМРТ – большой морозильный рыболовный траулер

ВАХ – вольт-амперная характеристика

ВГ – высшая гармоника

ГРЛВД – газоразрядная лампа высокого давления

ГРЩ – главный распределительный щит

ГрЩО – групповой щит освещения

ИИП – импульсный источник питания

ИС – источник света

ККМ – корректор коэффициента мощности

КПД – коэффициент полезного действия

КПМС – классификация и постройка морских судов

КЭ – качество электрической энергии

ЛЛ – люминесцентная лампа

ЛН – лампа накаливания

ПК – персональный компьютер

ПРА – пускорегулирующий аппарат

РМРС – Российский морской регистр судоходства

СД – светодиод

СДЛС – светодиодная лампа со стабилизированным световым потоком

СДЛР – светодиодная лампа с регулируемым световым потоком

СШ – система шин

ФКУ – фильтрокомпесирующее устройство

ФРП – флот рыбной промышленности

ЦРП – центральный распределительный пункт

ЭМС – электромагнитная совместимость

ЭЭС – электроэнергетическая система

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Provoost, R. A global transition to efficient lighting [Электронный ресурс]/ Rudy Provoost, Martin Goetzeler // Climate action. Assisting business towards carbon neutrality. –P.84-85 –Режим доступа: http://www.unep.org/climatechange/Portals/5/documents/global_transition_efficient_lighting.pdf
2. Solid-State Lighting Research and Development: Multi-Year Program Plan [Электронный ресурс] / US Department of Energy. –2012. – Режим доступа: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_mypp2012_web.pdf
3. Solid-State Lighting: R&D Plan [Электронный ресурс] / US Department of Energy: Energy Efficiency and Renewable Energy. –2015. – Режим доступа: http://energy.gov/sites/prod/files/2015/06/f22/ssl_rd-plan_may2015_0.pdf
4. Сандольская, Д.В. Повышение энергетической эффективности. Энергосберегающие лампы. Academia. Архитектура и строительство. –2010. –№3. –С.486-490.
5. Закгейм, А.Л. Светодиодные системы освещения: энергоэффективность, зрительное восприятие, безопасность для здоровья (обзор) / А.Л. Закгейм // Светотехника. – 2012. – № 6. – С. 12-25.
6. Robert S. Simpson Lighting control. Technology and applications. -2003.-564С.
7. Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council of 6 July 2005establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-using products and amending Council Directive 92/42/EEC and Directives 96/57/EC and 2000/55/EC of the European Parliament and of the Council.
8. Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products.
9. Informe técnico preliminar - Estándar mínimo de eficiencia energética. Ministry of Energy. Santiago, Chile. 2013.
10. Proposal to Phase-Out Inefficient Incandescent Light Bulbs - Discussion draft for stakeholder comment issued under the auspices of the Ministerial Council on Energy. Report No 2008/08. Equipment Energy Efficiency Committee. Regulatory Impact Statement Consultation Draft. Prepared by Syneca Consulting for DEWHA. September 2008.

11. Минаматская конвенция о ртути – текст и приложения. // ЮНЕП, ООН, Октябрь 2013 года.
12. Solid-State Lighting: R&D Plan [Электронный ресурс] / US Department of Energy: Energy Efficiency and Renewable Energy. –2016. –Режим доступа: http://energy.gov/sites/prod/files/2016/06/f32/ssl_rd-plan_%20jun2016_2.pdf.
13. W. Rhodes, Illuminating Your IQ, Smart Lighting Market Market Today and Future / in Smart Lighting, Berlin, Germany, May 2015.
14. Jim McHale Longer Life-Cycles & Price Pressure Push LED Manufacturers Towards Smart Lighting Control / Energy manager today. –2014.
15. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. –2016. Издание утв. 15.09.2015 г.
16. Санитарные правила для морских судов СССР / Минздрав СССР №2641-82.
17. Нормы искусственного освещения на судах морского флота / Минздрав СССР № 2506-81.
18. Санитарные правила для морских судов промыслового флота СССР / Минздрав СССР № 1814-77.
19. Дополнение «Нормы искусственного освещения для морских судов флота рыбной промышленности» / Минздрав СССР № 4066-86.
20. В.К. Шурпяк Анализ аварийности на судах и технология технического наблюдения [Электронный ресурс]: –Режим доступа: http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=2395.
21. Кацман Ф.М. Аварийность морского флота и проблемы безопасности судоходства /Ф.М. Кацман, А.А. Ершов // Транспорт Российской Федерации. –2006.–№ 5. –С. 82-84.
22. Авраменко Д.В. Причины аварийности морских судов и повышения безопасности мореплавания / Д.В. Авраменко, И.П. Касаткин // Мореходство и морские науки - 2011. Избранные доклады Третьей сахалинской региональной морской научно-технической конференции. –2011. –С. 276-279.
23. Власов А.Б. Анализ надежности электрооборудования судов рыболовецких компаний Северо-Запада / А.Б. Власов, С.А. Буев // Вестник МГТУ. –2013. –Т. 16. –№ 4. –С. 663-671.

24. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
25. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения.
26. Дохтуров В. Контроль теплового режима кристаллов в светодиодных лампах / В. Дохтуров, С. Смирнов // Полупроводниковая светотехника. –2012.–№ 19. –С. 94-95.
27. Халилов Ф.Х. Электромагнитная совместимость электроэнергетики, техносферы и биосферы. Учебное пособие. СПб.: Издание НОУ «Центр подготовки кадров энергетики». –2014. –190 с.
28. ГОСТ 13109-67 Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения.
29. Директива 2004/108/ЕС Европейского Парламента и Совета ЕС о сближении законодательств государств-членов ЕС относительно электромагнитной совместимости и об отмене директивы 89/336/ЕС. –Страсбург. –2004.
30. EN 50160:2010 Voltage Characteristics in Public Distribution Systems.
31. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
32. ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
33. Олещук, В. Иван Грачев: «Ключевая проблема – в курсе на сырьевую экономику» /В. Олещук // Энергетика и промышленность России. –2012. –№19. –С. 2,6.
34. ГОСТ Р 51317.4.15-2012 Совместимость технических средств электромагнитная. Фликерметр. Функциональные и конструктивные требования.
35. ГОСТ 13109-87 Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения.
36. Лисицкий, К.Е. Совершенствование метода оценки фликера / Системные исследования в энергетике: труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН. –Иркутск. –2014. –С. 50-55.
37. ГОСТ Р МЭК 62471-2013 Лампы и ламповые системы. Светобиологическая безопасность.

38. ГОСТ Р 54945-2012. Здания и сооружения. Методы измерения коэффициента пульсации освещенности
39. Ошурков, И.А. К вопросу о пульсациях выходного напряжения (тока) драйверов для светодиодного освещения / И.А. Ошурков, А.В. Лукин // Практическая силовая электроника. –2012. –№ 4. –С. 2-5
40. Перечень основных действующих нормативных и методических документов по гигиене и эпидемиологии на транспорте. –М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, –2004. –15 с.
41. Романовский А. не верь глазам своим или технологии обмана / А. Романосвкий // Полупроводниковая светотехника. –2011. –№ 15. –С. 14-15.
42. Варфоломеев Л.П. О действительной энергоэффективности применения светодиодов в осветительных установках / Л.П. Варфоломеев // Светотехника. –2012. –№ 6. –С. 22-25.
43. Ван Гилс М. Характеристики линейных светодиодных ламп прямой замены / М. Ван Гилс, Г. Дьюринк, Я. Оденат, В.Р. Рикаерт, И.А. Роеландц, С. Форсмен, П. Ханселаер //Светотехника. –2012. –№ 1. –С. 37-45.
44. Духовников В.К. Компенсатор реактивной мощности как средство улучшения качества потребляемой электроэнергии / Духовников В.К. // Международная научная конференция «Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке»: сб. науч. тр. – Хабаровск. –2011. –С. 35-45.
45. Николаев Д. Электромагнитная совместимость светодиодных светильников: соблюдать или не соблюдать? / Д. Николаев // Полупроводниковая светотехника. –2009. –№ 2. –С. 32-33.
46. Анчарова Т.В. Оценка влияния эмиссии высших гармонических составляющих напряжения и тока от бытовых электроприемников на питающую сеть / Анчарова Т. В., Бодрухина С. С., Цырук С. А., Янченко С. А. // Промышленная энергетика. –2012. –№ 9. –С. 36-42.
47. Вагин Г.Я. Исследование высших гармоник тока, генерируемых энергосберегающими источниками света / Г.Я. Вагин, А.А. Севостьянов, Е.Б. Солнцев, П.В. Терентьев, А.С. Шевченко // Промышленная энергетика. –2014. –№ 6. –С. 51-55.

48. Миронов С. Режим питания нарушать нельзя: модули питания для осветительных светодиодов / С. Миронов // Новости электротехника + светотехника. –2013. –№ 1. –С. 20-29.
49. Галущак В.С. Промышленный светодиодный светильник как дополнительный источник реактивной мощности / В.С. Галущак, К.Н. Бахтиаров, Т.В. Копейкина, С.А. Петренко, С.В. Хавроничев, Ю.Н. Самойленко, Б.А. Холонюк // Международный журнал экспериментального образования. –2015. –№ 6. –С. 72-73.
50. Радкевич В.Н. Характеристики электропотребления светодиодных световых приборов и их учет при расчете электрических сетей / В.Н. Радкевич, Я.В. Михайлова // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. –2016. –№ 4. –С. 289-300.
51. Евминов Л.И. Область применения и экспериментальные исследования электрических и светотехнических характеристик светильников для наружного и внутреннего освещения // Л.И. Евминов, В.С. Кизева // Вестник гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. –2014. –№ 3. –С. 36-44.
52. Колмаков В.О. Электромагнитная совместимость и энергосберегающее оборудование / В.О. Колмаков, В.И. Пантелеев // Энергетик. –2012. –№ 11. –С. 47-49.
53. ГОСТ Р 54350-2015 Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний.
54. Лисицкий К.Е. Разработка метода оценки погрешности нормативных способов измерения фликера при использовании альтернативных источников энергии / К.Е. Лисицкий, А.В. Струмеляк // Системы. Методы. Технологии. –2010. –№ 7. –С. 91-94.
55. Лисицкий К.Е. Разработка аппаратного обеспечения для определения передаточных функций альтернативных источников света при оценке дозы фликера /К.Е. Лисицкий, А.В. Струмеляк / Системы. Методы. Технологии. –2012. –№ 1. –С. 98-101.
56. Лисицкий К.Е. Аппаратный комплекс для определения передаточных функций искусственных источников света при оценке дозы фликера (патент на полезную модель) / К.Е. Лисицкий, А.В. Струмеляк // Пат. RU 00119892 U1; МПК G01R 23/00; заявитель и патентообладатель Братский государственный университет. –№ 2011149905/28 заявл. 07.12.2011.

57. Лисицкий К.Е. Совершенствование стандартной модели фликерметра для оценки дозы фликера в сетях общего назначения / К.Е. Лисицкий, А.В. Струмеляк // Технологии электромагнитной совместимости. –2014. –№ 1. –С. 10-15.
58. Вагин Г.Я. Влияние качества питающего напряжения на параметры искусственного освещения рабочего места / Г.Я. Вагин, О.В. Маслеева, Г.В. Пачурин, П.В. Терентьев // Фундаментальные исследования. –2014. –№ 3. –С. 247-252.
59. Архипов А. О пульсациях освещенности, создаваемых светодиодными светильниками / А. Архипов, А. Зорькин, И. Коростелев, П. Мачалин // Полупроводниковая светотехника. –2011. –№ 13. –С. 74-76.
60. Георгобиани С.А. Пульсация светового потока светодиодов и особенности её измерения и нормирования / С.А. Георгобиани, М.Е. Клыков, М.В. Лобанов // Светотехника. –2015. –№ 4. –С. 14-17.
61. Веденеева Л.М. Влияние характеристик источников света на здоровье человека / Л.М. Веденеева, А.Г. Болотова // Вестник пермского национального исследовательского политехнического университета. Безопасность и управление рисками. –2014. –№ 1. –С. 52-66.
62. Киндеева Е.А. Применение светодиодных ламп для снижения коэффициента пульсации освещенности / Е.А. Киндеева, А.В. Иванова, Ю.С. Канагина, А.А. Фокина // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. –2015. –№ 7. –С. 467-471.
63. Драч В.Е. Повышение уровня стабилизации драйвера светодиодов / В.Е. Драч, А.Е. Корчикова // Вестник инженерной школы дальневосточного федерального университета. –2016. –№ 1. –С. 10-16.
64. Руководство по эксплуатации прибора Fluke 434/435 Three Phase Power Quality Analyzer Users Manual April 2006, rev. 3, Dec. 2008. Fluke Corporation. Printed in The Netherlands.
65. IEC 61000-4-30 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods.
66. IEC 61000-4-15 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-15: Testing and measurement techniques - Flickermeter - Functional and design specifications.

67. IEC 61000-4-7 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto.
68. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники: учеб. для вузов. В 3т. Т.1. Линейные электрические цепи с сосредоточенными постоянными / К.М.Поливанов. –М.: Энергия, 1972. –240 с.
69. Давыдов А.В. Цифровая обработка сигналов: Тематические лекции. – Екатеринбург: УГГУ, ИГиГ, ГИН, Фонд электронных документов, 2005. –185 с.
70. Холоднов В. А. Технология вычислений в системе компьютерной математики Mathcad: учебное пособие / В. А. Холоднов, В. П. Дьяконов, В. В. Фонарь, Р. Ю. Кулишенко, И. В. Ананченко. – СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2013. –154 с.
71. Данилин Г. А., Математические методы с Mathcad: Учебное пособие / Г. А. Данилин, П. А. Курзин, В. М. Курзина. – М.: МГУЛ, 2003. –152 с.
72. ГОСТ 30804.3.2-2013 Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний.
73. ГОСТ ИСО 8995-2002 Принципы зрительной эргономики. Освещение рабочих систем внутри помещений.
74. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Айзенберга Ю.Б. –2-е изд., перераб. и доп. –Москва : Энергоатомиздат, 1995. –526 с. : ил.
75. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95.
76. Иванов В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В.С. Иванов, В.И. Соколов. –М.: Энергоатомиздат, 1987. –336 с.: ил.
77. Шейнихович В.В. Качаство электрической энергии на судах: Справочник / В.В. Шейнихович, О.Н. Климанов, Ю.И. Пайкин, Ю.Я. Зубарев. –Л.: Судостроение, 1988. –160 с., ил.
78. Жкежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. –5е изд., перераб. и доп. –М.: Энергоатомиздат, 2004. –358 с.

79. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процесы в электрических системах. Учебник для электротехнических и энергетических вузов и факультетов. –М.: Энергия, 1970. –520 с.
80. Петров Г.Н. Электрические машины. В 3-х частях. Ч.1. Введение. Трансформаторы. Учебник для вузов. М.: Энергия, 1974. –240 с.
81. Защитные устройства в судовых и береговых электроустановках рыбной промышленности / под ред. А. П. Ксенофонтова. –Москва: Легкая и пищевая промышленность, 1984. –254с.: ил.
82. Копылов И.П. Электрические машины: Учеб. Для вузов. –2-е изд., перераб. –М.: Высш. шк.; Логос, 2000. –607 с.
83. Светодиодные лампы для замены ЛБ20, ЛБ40 [Электронный ресурс] –Режим доступа: http://svetlow.com/office.php.
84. Локтионов В.И. Анализ уровня допустимой погрешности исходных данных в процессе управления энергетическими системами / В.И. Локтионов // Эконмический анализ: теория и практика. –2016. –№ 8. –С. 43-54.
85. Светодиодные пылевлагозащищенные светильники Jazzway [Электронный ресурс] –Режим доступа: http://www.jazz-way.com/catalog/prozhektory/ svetodiodnye-pylevlagozashchishchennye-svetil-niki/svetil-niki-svetodiodnye-pylevlagozashchishchennye-pwp-smd/.
86. Устройство для компенсации тока 3-й гармоники нейтрали сети (патент на изобретение) / О.В. Кобзистый, М.А. Юндин, К.М. Юндин // Пат. RU2447563U1. МПК H02J3/01. заявитель и патентообладатель Федеральное государственное учреждение высшего профессионального образования "Азово-Черноморская государственная агроинженерная академия".

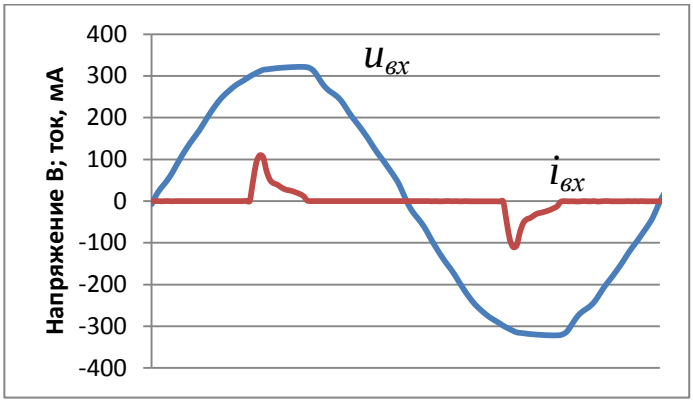
ПРИЛОЖЕНИЕ А

(ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ)

Результаты экспериментальных исследований светодиодных ламп

1) Результаты экспериментальных исследований СД лампы Isy 3 Вт

а)



б)

Рисунок А.1 – Внешний вид (а) и осциллограммы (б) входного тока и напряжения лампы Isy 3 Вт

Таблица А.1 – Энергетические характеристики СД лампы Isy 3 Вт

$U_{вх}$, В	$I_{вх}$, мА	$P_{вх}$, Вт	$Q_{вх}$, вар	cosφ экв	E, лк	Кп, %	K_I, %	Коэффициенты ВГ тока, %						
								3	5	7	9	11	13	15
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	64	3,4	3,9	0,664	1	1,8	77,3	59,3	29,9	24,3	16,5	17,8	10,3	6,8
90	55	3,3	3,7	0,667	0,996	1	84,1	65	32,5	24,6	16,3	17,8	17,3	10,8
100	49	3,2	3,7	0,653	0,988	0,9	91,8	70,2	37	25,3	17,7	12,2	17,5	15,8
110	44	3,2	3,7	0,661	0,98	0,4	97,4	74,2	43,5	27	19,7	9,6	12,9	15,3
120	41	3,2	3,7	0,65	0,976	0,3	103,3	77,3	48,8	30,6	23,2	13,2	5,8	11,8
130	38	3,2	3,8	0,648	0,972	0,4	109,8	79,7	53,5	34,5	27,8	19,4	8,4	6,2
140	36	3,1	4	0,615	0,968	0,1	117,4	81,8	57,8	38,8	31	25,5	15,9	7
150	35	3,1	4,2	0,59	0,968	0,4	124,9	83,5	61,4	42,4	34	30	22,4	12,7
160	34	3,1	4,4	0,57	0,964	0,2	133,3	85,1	64,8	46,1	36,8	33,6	28,4	19,7
170	32	3,1	4,5	0,57	0,96	0,3	137,8	85,8	66,5	47,9	38	35	31,2	23,7
180	32	3,1	4,8	0,538	0,956	0,2	142,6	86,7	68,3	49,8	39,1	35,9	33,4	27,3
190	30	3,1	4,9	0,544	0,952	0,1	146,5	87,2	69,7	51,5	40	36,5	34,8	29,9
200	30	3,2	5	0,533	0,948	0,1	151,4	87,9	71,4	53,4	41,1	36,8	35,9	32,4
210	29	3,2	5,1	0,525	0,944	0,7	152,8	88,2	71,9	53,8	40,8	36	35,6	32,8
220	27	3,2	5,2	0,539	0,94	0,1	154,9	88,5	72,7	54,8	41,2	35,5	35,2	33,3
230	27	3,2	5,3	0,515	0,936	0,1	156,5	88,8	73,4	55,6	41,3	34,8	34,6	33,4
240	26	3,2	5,5	0,513	0,932	0,2	160,7	89,3	74,6	57,3	42,7	35,3	34,7	34,1
250	25	3,2	5,5	0,512	0,928	0,1	162,6	89,6	75,3	58,2	43,2	35	34,1	34

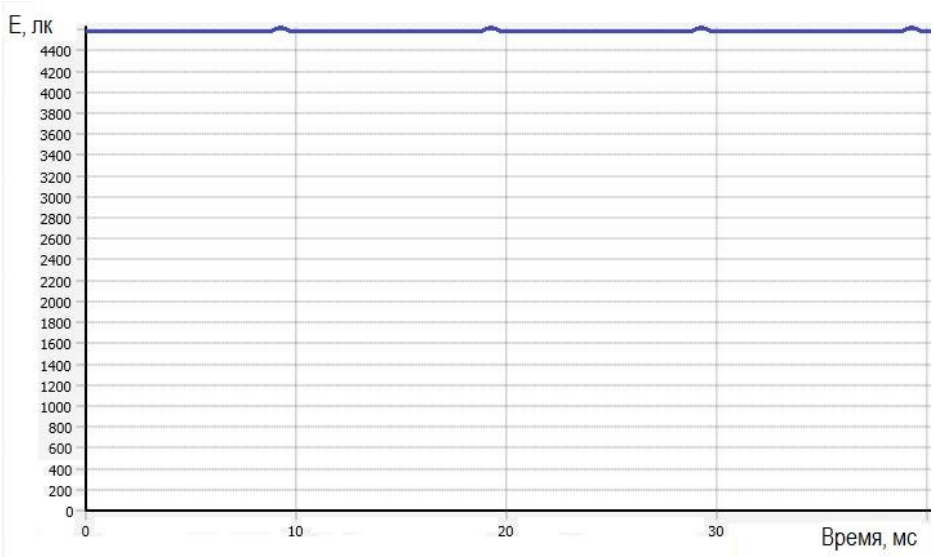


Рисунок А.2 – Осциллограмма пульсаций освещенности лампы Isy 3 Вт

Таблица А.2 – Коэффициенты разложения амплитудно-временной характеристики освещенности в ряд Фурье для СД лампы Isy 3 Вт

k	a_k	b_k	A_k	φ_k	k	a_k	b_k	A_k	φ_k
0	4593,00	0,00	4593,00	0,00	1	-0,45	-4,50	4,52	1,47
2	-1,84	-1,54	2,40	0,70	3	-0,24	-4,50	4,51	1,52
4	-2,93	-2,65	3,95	0,74	5	-0,25	-4,50	4,51	1,52
6	-0,25	-4,50	4,51	1,52	7	-0,29	-4,50	4,50	1,51
8	-3,10	-5,57	6,37	1,06	9	-0,33	-4,48	4,50	1,50
10	-2,20	-6,58	6,93	1,25	11	-0,39	-4,47	4,48	1,48
12	-1,01	-6,95	7,02	1,43	13	-0,46	-4,45	4,47	1,47
14	0,08	-6,67	6,67	-1,56	15	-0,54	-4,43	4,46	1,45

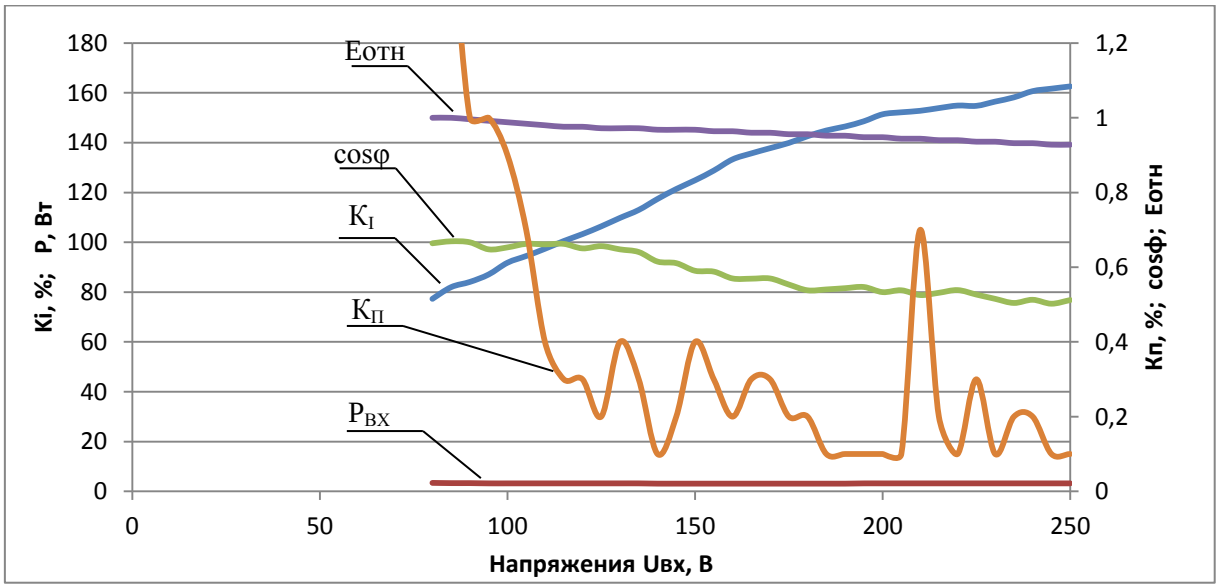
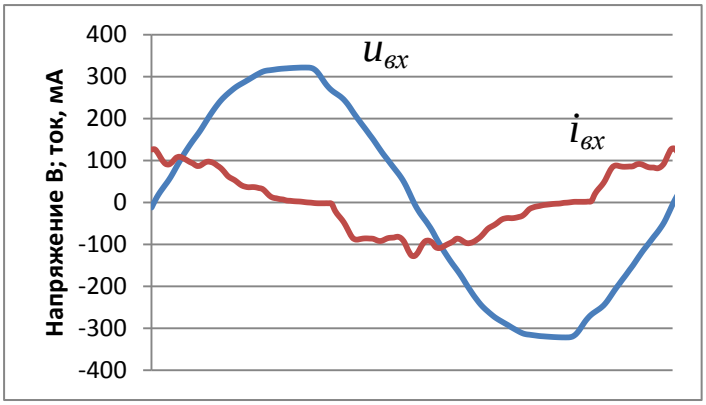


Рисунок А.3 – Энергетические характеристики СД лампы Isy 3 Вт

2) Результаты экспериментальных исследований СД лампы Melitec 2,5 Вт



а) б)

Рисунок А.4 – Внешний вид (а) и осциллограммы (б) входного тока и напряжения лампы Melitec 2,5 Вт

Таблица А.3 – Энергетические характеристики СД лампы Melitec 2,5 Вт

$U_{вх}$, В	$I_{вх}$, мА	$P_{вх}$, Вт	$Q_{вх}$, вар	cosφ экв	E, лк	Кп, %	K_I, %	Коэффициенты ВГ тока, %						
								3	5	7	9	11	13	15
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	9,0	0,2	0,3	0,556	0,091	101,0	52,3	46,2	16,1	10,7	7,4	8,6	3,1	4,6
50	13,0	0,3	0,6	0,462	0,137	101,0	46,7	38,9	14,7	11,7	11,5	7,5	6,7	6,5
60	16,0	0,4	0,9	0,417	0,188	101,0	41,2	34,5	14,6	11,1	10,1	3,7	5,4	1,9
70	19,0	0,5	1,3	0,376	0,240	101,0	35,6	29,7	13,8	9,6	6,3	2,0	1,0	4,2
80	23,0	0,6	1,7	0,326	0,287	101,0	32,5	27,0	12,8	7,7	3,8	3,8	2,2	5,7
90	26,0	0,7	2,3	0,299	0,335	101,0	29,7	24,2	12,1	6,3	1,0	5,5	4,6	5,8
100	29,0	0,8	2,8	0,276	0,378	101,0	27,8	21,8	11,6	5,1	2,8	6,5	5,8	5,1
110	33,0	0,9	3,5	0,248	0,430	101,0	26,4	19,8	11,1	4,6	4,7	7,1	6,4	3,8
120	35,0	1,0	4,1	0,238	0,471	101,0	25,4	18,2	10,6	4,8	6,2	7,4	6,6	2,5
130	39,0	1,1	5,0	0,217	0,514	101,0	24,4	16,9	10,2	5,0	7,3	7,2	6,5	1,3
140	42,0	1,2	5,8	0,204	0,557	101,0	23,6	15,9	9,9	5,1	8,0	6,8	6,1	0,5
150	46,0	1,3	6,7	0,188	0,600	101,0	22,5	14,8	9,3	5,4	8,7	6,2	5,4	1,0
160	49,0	1,5	7,7	0,191	0,657	101,0	22,0	14,0	9,0	5,6	8,9	5,7	5,1	1,6
170	52,0	1,6	8,7	0,181	0,698	101,0	21,0	13,2	8,7	5,7	9,0	5,2	4,3	2,1
180	55,0	1,7	9,8	0,172	0,734	101,0	20,3	12,4	8,7	5,7	8,9	4,8	3,9	2,3
190	58,0	1,8	11,0	0,163	0,778	101,0	19,3	11,7	8,1	5,7	8,7	3,9	3,3	3,0
200	62,0	2,0	12,2	0,161	0,816	101,0	18,6	11,1	7,6	5,8	8,5	3,4	2,9	3,3
210	65,0	2,1	13,5	0,154	0,853	101,0	18,0	10,5	7,3	5,9	8,3	2,9	2,5	3,5
220	68,0	2,2	14,8	0,147	0,892	101,0	17,6	10,0	6,9	5,9	8,2	2,4	2,5	3,5
230	71,0	2,3	16,3	0,141	0,927	101,0	17,3	9,5	7,0	5,7	7,9	2,2	2,7	3,7
240	74,0	2,5	17,7	0,141	0,961	101,0	16,8	8,9	6,4	6,0	7,7	1,8	2,5	3,9
250	78,0	2,6	19,4	0,133	1,000	101,0	16,7	8,5	6,4	5,8	7,4	1,7	3,0	4,0

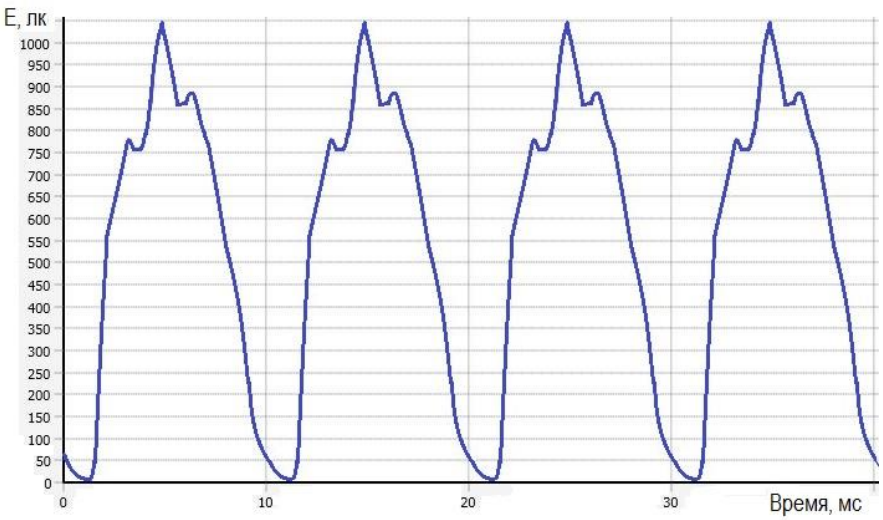


Рисунок А.5 – Осциллограмма пульсаций освещенности лампы Melitec 2,5 Вт

Таблица А.4 – Коэффициенты разложения амплитудно-временной характеристики освещенности в ряд Фурье для СД лампы Melitec 2,5 Вт

k	a_k	b_k	A_k	φ_k	k	a_k	b_k	A_k	φ_k
0	580	0,00	580	0,00	1	0,69	12,53	12,55	1,52
2	-31,09	-438,83	439,93	1,50	3	1,21	-2,32	2,62	-1,09
4	-39,10	-92,11	100,07	1,17	5	0,42	-3,62	3,65	-1,45
6	-38,21	-29,66	48,37	0,66	7	-1,24	-5,81	5,94	1,36
8	-36,32	35,46	50,76	-0,77	9	-6,99	0,24	6,99	-0,03
10	33,68	9,15	34,90	0,27	11	0,95	-0,46	1,06	-0,45
12	1,05	14,24	14,28	1,50	13	-2,44	1,95	3,13	-0,67
14	25,51	1,05	25,53	0,04	15	4,09	1,83	4,48	0,42

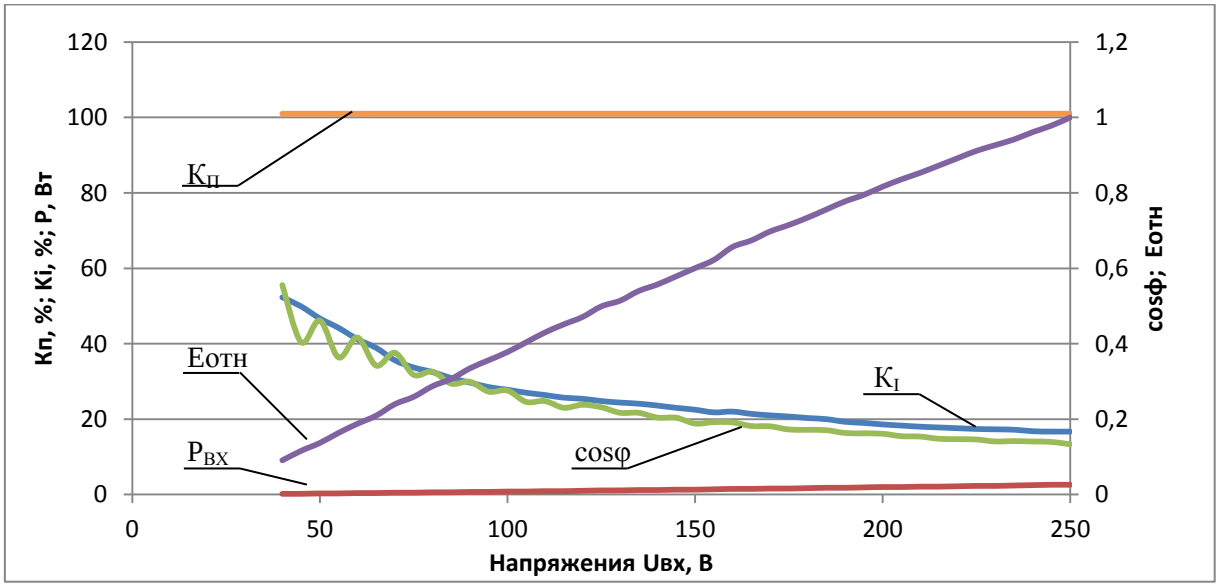
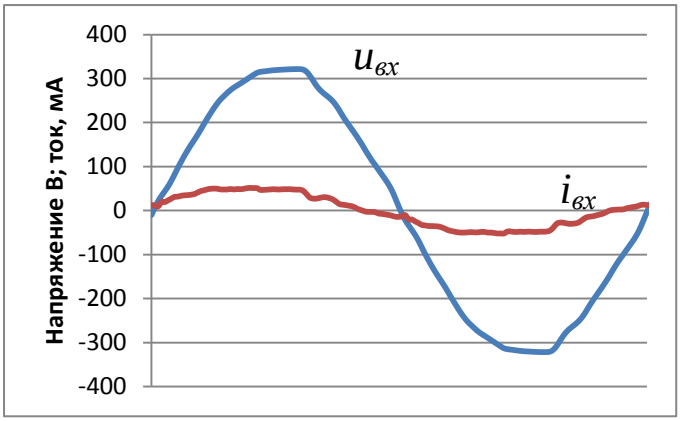


Рисунок А.6 – Энергетические характеристики СД лампы Melitec 2,5 Вт

3) Результаты экспериментальных исследований СД лампы Osram 7 Вт



а) б)

Рисунок А.7 – Внешний вид (а) и осциллограммы (б) входного тока и напряжения лампы Osram 7 Вт

Таблица А.5 – Энергетические характеристики СД лампы Osram 7 Вт

$U_{вх}$, В	$I_{вх}$, мА	$P_{вх}$, Вт	$Q_{вх}$, вар	$\cos\varphi_{экв}$	E, лк	Кп, %	K_I, %	Коэффициенты ВГ тока, %						
								3	5	7	9	11	13	15
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	22,0	0,6	0,2	0,909	0,098	16,5	21,3	18,6	2,7	3,1	1,7	4,7	2,2	1,9
40	36,0	1,4	0,3	0,972	0,256	19,3	19,8	18,4	3,5	2,0	0,6	2,8	1,2	1,2
50	50,0	2,0	0,4	0,800	0,418	20,4	16,5	14,8	5,9	1,2	0,6	1,8	0,8	0,7
60	65,0	3,1	0,6	0,795	0,607	21,0	13,5	11,1	6,6	2,3	0,2	1,8	0,9	0,5
70	79,0	4,7	0,7	0,850	0,800	21,1	11,6	9,1	6,1	3,0	1,0	1,5	0,9	0,4
80	91,0	7,3	0,8	1,000	1,000	21,2	10,3	7,7	5,5	3,3	1,7	1,1	0,9	0,3
90	81,0	7,3	0,9	1,000	0,994	21,3	10,4	8,0	5,3	3,2	1,5	1,3	1,0	0,3
100	74,0	7,3	0,9	0,986	1,000	21,3	10,4	8,1	5,2	2,9	1,2	1,5	1,1	0,4
110	64,0	7,1	1,0	1,000	0,969	21,2	10,3	8,0	5,1	2,7	1,2	1,5	1,2	0,7
120	60,0	7,2	1,1	1,000	0,981	21,3	10,1	7,9	4,9	2,6	1,1	1,7	1,3	0,8
130	55,0	7,1	1,2	0,993	0,969	21,3	9,9	7,8	4,5	2,4	1,1	1,8	1,5	0,9
140	51,0	7,1	1,3	0,994	0,956	21,1	9,7	7,6	4,4	2,3	1,2	1,9	1,7	1,0
150	49,0	7,3	1,4	0,993	0,969	21,0	9,5	7,3	4,1	2,1	1,4	2,0	2,1	1,2
160	46,0	7,2	1,6	0,978	0,969	20,9	9,5	7,1	4,0	2,0	1,5	2,2	2,3	1,4
170	44,0	7,2	1,8	0,963	0,956	20,7	9,4	6,8	3,9	1,9	1,7	2,3	2,5	1,6
180	42,0	7,3	2,0	0,966	0,963	20,4	9,3	6,5	3,8	1,7	2,0	2,4	3,0	1,8
190	40,0	7,4	2,2	0,974	0,963	20,6	9,4	6,2	3,7	1,6	2,2	2,4	2,3	2,0
200	39,0	7,5	2,4	0,962	0,975	20,6	9,5	5,8	3,8	1,5	2,5	2,6	3,7	2,2
210	38,0	7,5	2,6	0,940	0,969	20,4	9,6	5,6	3,8	1,5	2,6	2,8	3,8	2,2
220	37,0	7,6	2,8	0,934	0,969	20,3	9,9	5,2	4,1	1,4	2,8	2,9	4,2	2,6
230	36,0	7,7	3,1	0,930	0,963	20,1	10,2	5,0	4,3	1,3	3,1	3,1	4,4	2,7
240	36,0	7,9	3,4	0,914	0,981	19,9	10,5	4,9	4,4	1,4	3,2	3,2	4,6	2,8
250	35,0	8,1	3,7	0,926	0,994	19,8	11,0	4,8	4,7	1,5	3,5	3,4	4,8	3,1

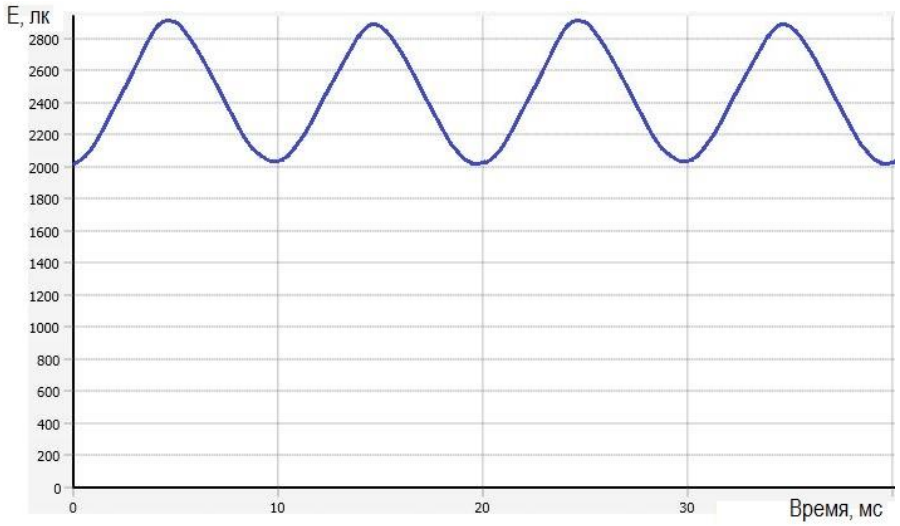


Рисунок А.8 – Осциллограмма пульсаций освещенности лампы Osram 7 Вт

Таблица А.6 – Коэффициенты разложения амплитудно-временной характеристики освещенности в ряд Фурье для СД лампы Osram 7 Вт

k	a_k	b_k	A_k	φ_k	k	a_k	b_k	A_k	φ_k
0	2456,00	0,00	2456,00	0,00	1	12,04	-11,13	16,39	-0,75
2	44,01	-432,18	434,42	-1,47	3	-2,31	-3,50	4,19	0,99
4	-6,76	12,71	14,39	-1,08	5	0,01	-0,28	0,28	-1,53
6	5,54	-12,58	13,74	-1,16	7	0,57	-3,47	3,52	-1,41
8	-5,46	1,14	5,58	-0,21	9	-0,86	-1,71	1,91	1,10
10	0,47	-1,00	1,11	-1,13	11	0,31	-0,40	0,50	-0,91
12	-0,71	-2,72	2,81	1,31	13	0,18	-1,81	1,82	-1,47
14	-0,61	-3,00	3,06	1,37	15	0,14	-1,64	1,65	-1,49

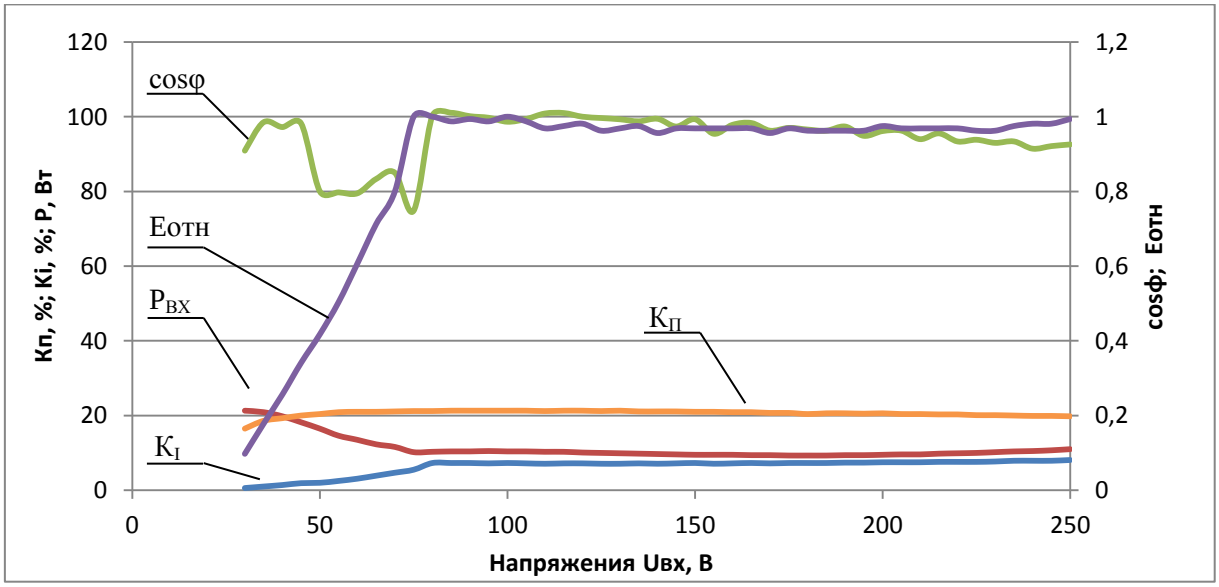
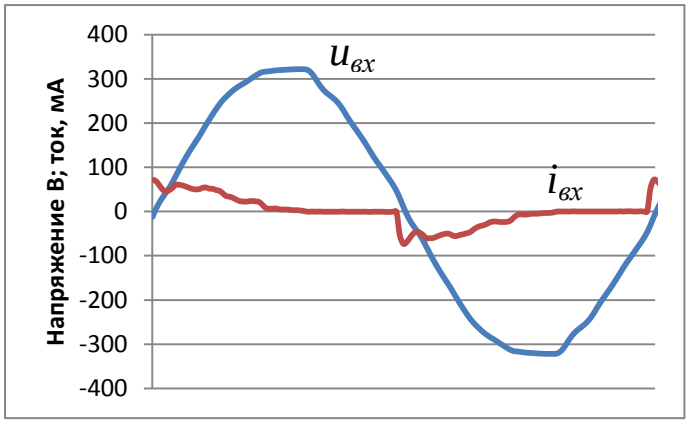


Рисунок А.9 – Энергетические характеристики СД лампы Osram 7 Вт

4) Результаты экспериментальных исследований СД лампы Philips 3,5 Вт



а) б)

Рисунок А.10 – Внешний вид (а) и осциллограммы (б) входного тока и напряжения лампы Philips 3,5 Вт

Таблица А.7 – Энергетические характеристики СД лампы Philips 3,5 Вт

$U_{вх}$, В	$I_{вх}$, мА	$P_{вх}$, Вт	$Q_{вх}$, вар	cosφ экв	E, лк	Кп, %	K_I, %	Коэффициенты ВГ тока, %						
								3	5	7	9	11	13	15
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	2,0	0,1	0,1	0,556	0,0	44,6	162,4	84,3	70,8	57,0	49,7	46,0	42,3	36,9
100	3,0	0,2	0,3	0,667	0,1	53,1	129,6	82,6	64,5	47,8	36,4	28,7	18,5	13,1
110	6,0	0,4	0,6	0,606	0,1	58,2	108,1	76,3	49,7	29,3	18,6	17,8	22,8	21,2
120	9,0	0,6	0,9	0,556	0,2	59,7	98,7	72,2	42,5	24,9	20,9	22,8	21,1	13,8
130	11,0	0,8	1,2	0,559	0,3	61,1	90,3	68,6	36,8	23,2	21,8	20,7	13,0	6,4
140	13,0	1,0	1,5	0,549	0,3	60,8	81,8	65,0	32,0	21,5	19,5	14,3	5,3	8,6
150	15,0	1,2	1,9	0,533	0,4	60,7	74,1	60,4	26,9	19,6	15,3	6,4	8,6	10,7
160	17,0	1,5	2,3	0,551	0,5	60,8	70,6	58,0	24,6	18,3	12,6	5,5	11,9	9,9
170	19,0	1,7	2,8	0,526	0,5	60,5	65,8	54,6	21,9	16,6	9,7	8,3	13,1	7,4
180	21,0	2,0	3,3	0,529	0,6	60,0	62,8	52,7	20,5	15,4	9,0	9,8	12,1	5,4
190	23,0	2,2	3,8	0,503	0,7	59,5	59,1	50,3	18,8	13,9	8,1	11,0	9,7	3,6
200	25,0	2,5	4,4	0,500	0,7	59,1	35,5	47,9	17,4	12,7	8,2	11,6	7,2	4,2
210	27,0	2,7	5,1	0,476	0,8	59,0	54,7	45,4	16,9	11,8	8,8	11,8	4,3	6,3
220	29,0	3,0	5,7	0,470	0,8	59,0	54,0	43,7	16,3	11,8	10,0	11,7	3,7	8,2
230	32,0	3,3	6,5	0,448	0,9	58,9	53,1	42,1	16,2	11,7	11,3	11,5	4,4	9,2
240	34,0	3,5	7,3	0,429	1,0	58,9	52,1	40,8	16,1	11,7	12,1	11,2	5,6	9,7
250	36,0	3,8	8,1	0,422	1,0	58,7	50,7	39,2	16,0	11,8	12,8	10,6	7,1	9,9

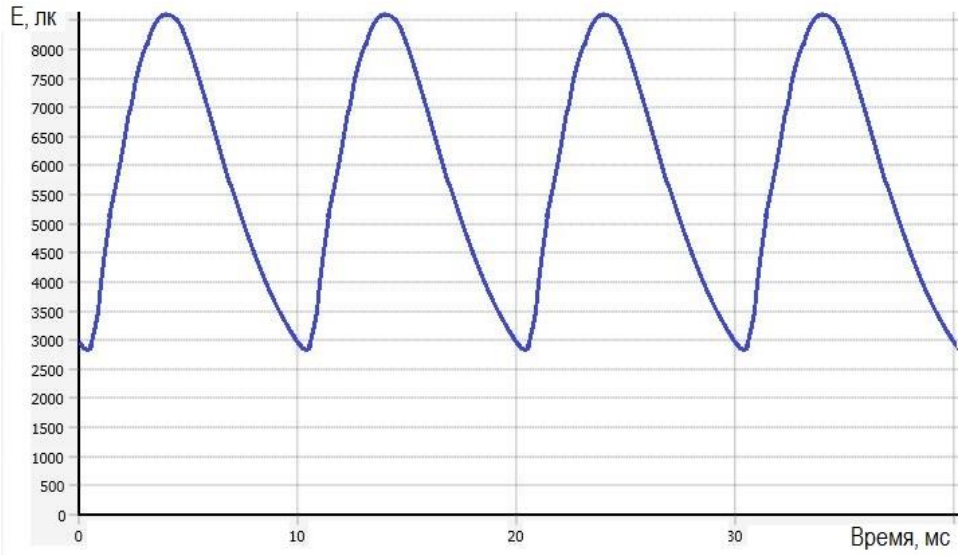


Рисунок А.11 – Осциллограмма пульсаций освещенности лампы Philips 3,5Вт

Таблица А.8 – Коэффициенты разложения амплитудно-временной характеристики освещенности в ряд Фурье для СД лампы Philips 3,5 Вт

k	a_k	b_k	A_k	φ_k	k	a_k	b_k	A_k	φ_k
0	5924,00	0,00	5924,00	0,00	1	-4,33	37,86	38,10	-1,46
2	763,80	-2554,00	2666,00	-1,28	3	19,69	-19,71	27,86	-0,79
4	-389,59	-250,15	462,98	0,57	5	0,03	-12,03	12,03	-1,57
6	-124,60	-85,89	151,33	0,60	7	-0,74	-11,33	11,36	1,51
8	-93,65	-7,26	93,93	0,08	9	-3,32	-8,96	9,55	1,22
10	-64,34	12,21	65,49	-0,19	11	-4,81	-8,35	9,64	1,05
12	-41,48	34,07	53,68	-0,69	13	-7,47	-5,44	9,24	0,63
14	-1,19	34,31	34,33	-1,54	15	-6,25	-2,13	6,60	0,33

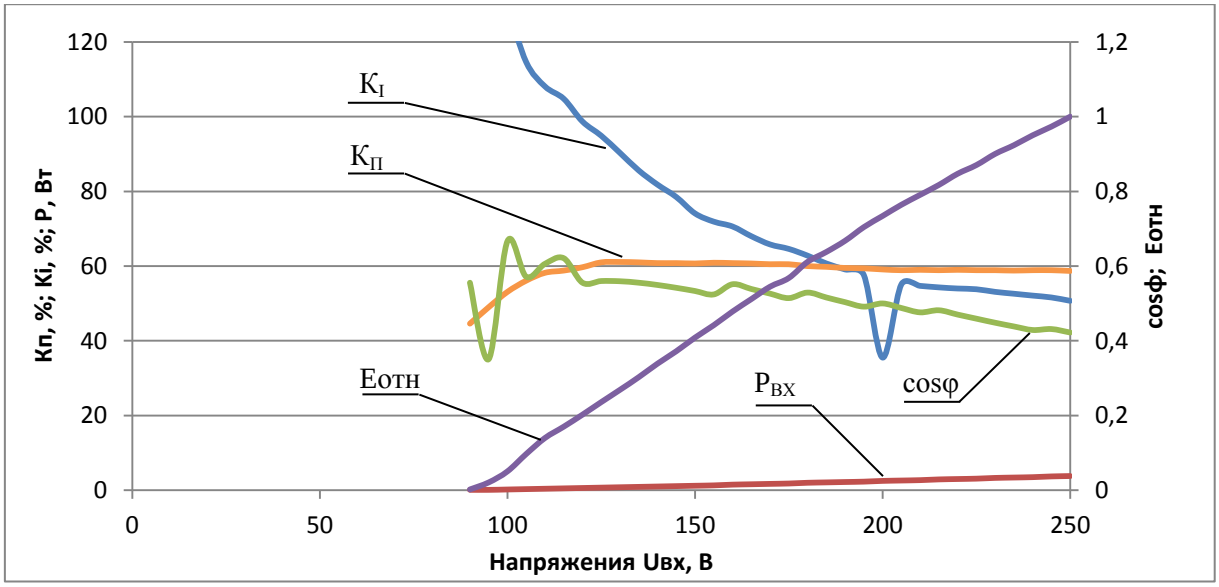
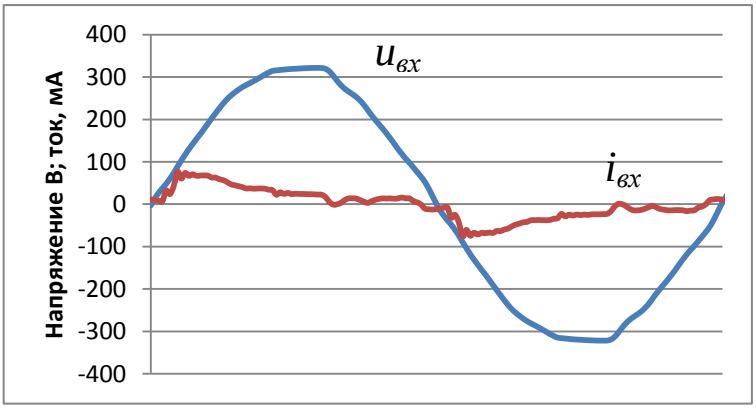


Рисунок А.12 – Энергетические характеристики СД лампы Philips 3,5 Вт

5) Результаты экспериментальных исследований СД лампы Philips 6 Вт



а) б)

Рисунок А.13 – Внешний вид (а) и осциллограммы (б) входного тока и напряжения лампы Philips 6 Вт

Таблица А.9 – Энергетические характеристики СД лампы Philips 6 Вт

$U_{вх}$, В	$I_{вх}$, мА	$P_{вх}$, Вт	$Q_{вх}$, вар	cosφ экв	E, лк	Кп, %	K_I, %	Коэффициенты ВГ тока, %						
								3	5	7	9	11	13	15
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	8,0	0,3	0,2	0,9	0,064	24,0	43,8	39,8	10,8	9,7	6,8	3,8	4,9	2,3
50	14,0	0,6	0,3	0,9	0,163	30,9	42,6	40,5	4,9	8,8	2,7	2,2	5,7	1,5
60	19,0	1,1	0,4	1,0	0,269	32,8	33,8	30,9	10,7	5,2	4,0	4,5	4,7	2,7
70	22,0	1,5	0,5	1,0	0,360	33,3	27,6	22,2	13,0	4,8	3,0	6,3	2,6	2,7
80	26,0	2,0	0,6	1,0	0,443	33,3	22,9	15,6	13,1	7,0	0,7	6,2	1,4	2,0
90	29,0	2,5	0,7	1,0	0,519	33,1	20,5	12,0	12,5	8,2	1,2	5,5	1,3	2,1
100	31,0	3,0	0,9	1,0	0,601	33,3	18,5	9,2	11,2	9,1	2,9	4,4	1,7	2,1
110	34,0	3,6	1,1	1,0	0,687	32,7	17,5	8,1	9,9	9,2	4,1	3,8	2,2	2,0
120	35,0	4,0	1,3	1,0	0,750	32,0	17,6	9,0	9,1	9,1	4,9	3,5	2,8	1,7
130	36,0	4,4	1,6	0,9	0,809	30,7	19,7	12,4	8,6	9,2	5,2	3,7	3,7	1,3
140	36,0	4,7	1,9	0,9	0,846	29,5	22,9	16,4	8,2	9,7	5,4	4,1	4,9	1,1
150	36,0	4,9	2,3	0,9	0,882	28,5	26,2	20,3	7,6	10,3	5,6	4,2	6,8	0,8
160	36,0	5,1	2,6	0,9	0,904	27,0	29,7	24,4	6,8	10,6	6,2	4,0	6,8	0,8
170	36,0	5,3	3,0	0,9	0,926	25,8	34,1	29,0	6,9	11,0	7,0	3,8	7,6	1,0
180	36,0	5,4	3,4	0,8	0,949	24,6	37,3	32,2	8,1	10,7	7,6	3,7	8,1	2,4
190	35,0	5,5	3,8	0,8	0,963	23,7	40,6	35,3	9,8	10,3	8,3	3,9	8,6	2,5
200	35,0	5,6	4,3	0,8	0,971	22,8	43,1	37,2	11,7	9,5	8,9	4,2	9,0	2,8
210	35,0	5,7	4,7	0,8	0,971	21,4	45,7	39,3	14,2	8,8	9,0	4,5	9,8	3,1
220	35,0	5,8	5,2	0,8	0,982	20,6	47,8	41,0	16,7	7,9	9,2	4,7	10,5	3,7
230	35,0	5,9	5,6	0,7	0,989	19,0	50,0	42,4	18,8	6,9	9,1	4,5	11,3	4,3
240	35,0	5,9	6,1	0,7	0,993	19,0	51,5	43,2	20,6	6,3	9,1	4,4	11,9	4,9
250	36,0	6,0	6,6	0,7	1,000	18,4	52,2	43,4	22,6	4,8	8,6	2,2	11,8	6,2

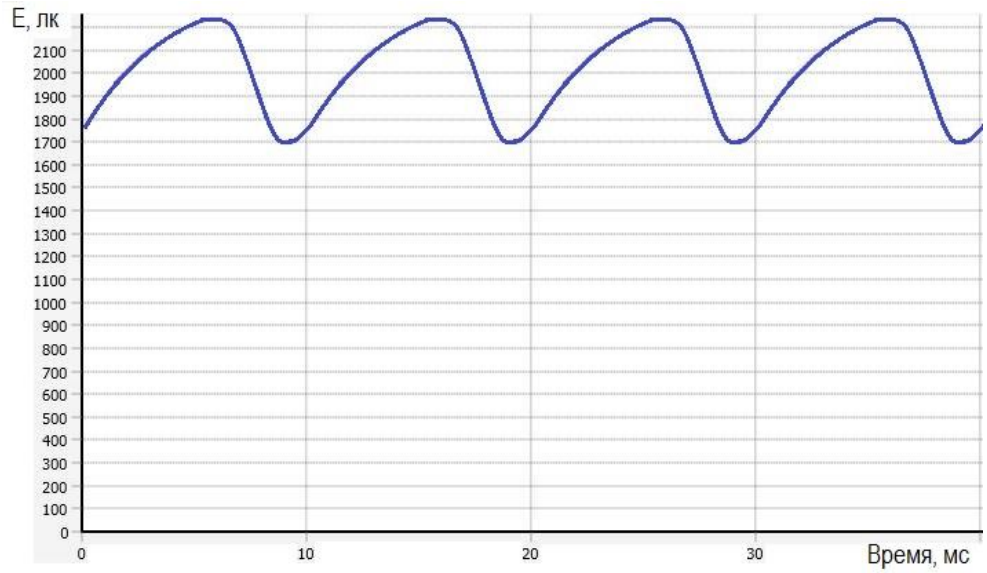


Рисунок А.14 – Осциллограмма пульсаций освещенности лампы Philips 6 Вт

Таблица А.10 – Коэффициенты разложения амплитудно-временной характеристики освещенности в ряд Фурье для СД лампы Philips 6 Вт

k	a_k	b_k	A_k	φ_k	k	a_k	b_k	A_k	φ_k
0	2016,00	0,00	2016,00	0,00	1	-0,02	-1,95	1,95	1,56
2	8,55	-251,95	252,10	-1,54	3	0,08	-1,42	1,42	-1,51
4	66,78	-38,38	77,03	-0,52	5	-0,18	-1,35	1,36	1,44
6	15,33	12,61	19,85	0,69	7	-0,19	-1,49	1,51	1,45
8	-4,09	2,35	4,71	-0,52	9	-0,19	-1,53	1,54	1,45
10	-1,43	-3,00	3,33	1,13	11	-0,16	-1,56	1,57	1,47
12	-0,57	-0,55	0,79	0,77	13	-0,17	-1,54	1,54	1,46
14	-2,27	-1,68	2,82	0,64	15	-0,12	-1,61	1,62	1,50

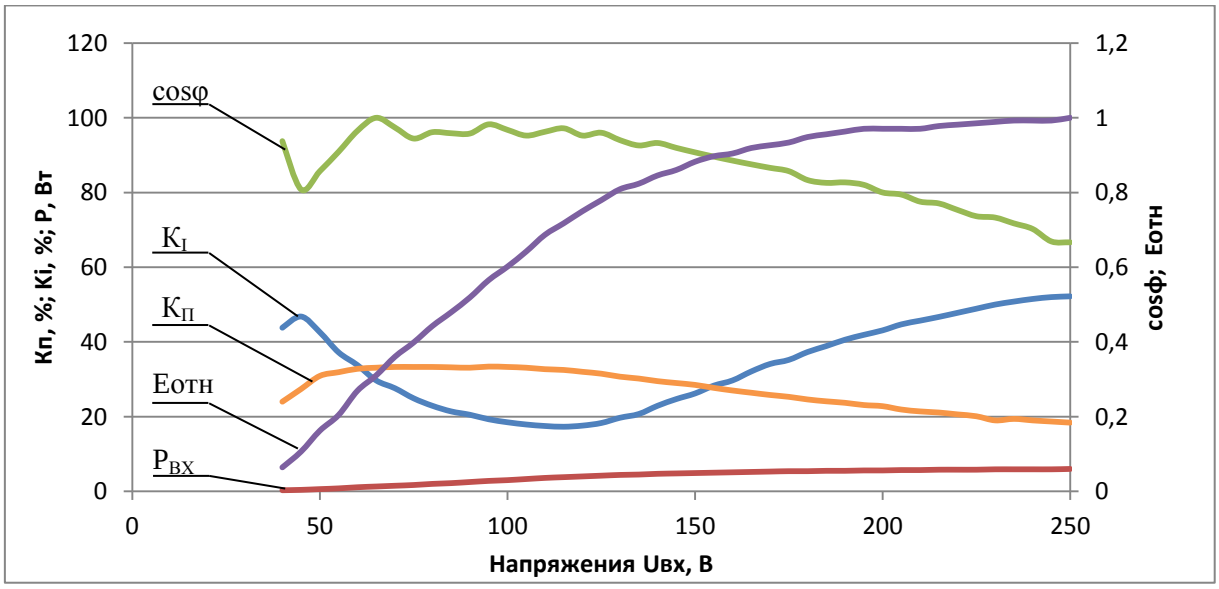
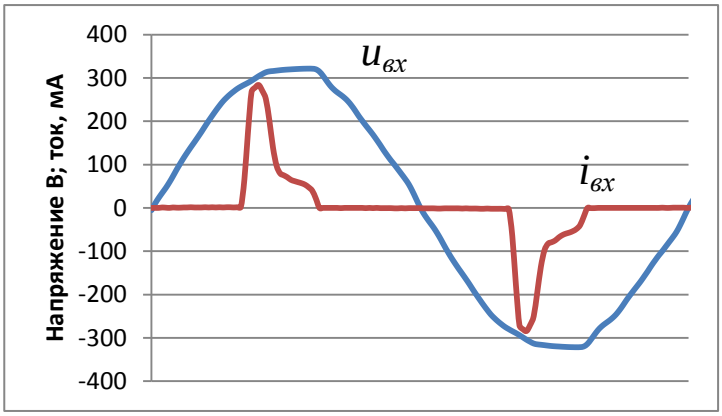


Рисунок А.15 – Энергетические характеристики СД лампы Philips 6 Вт

6) Результаты экспериментальных исследований СД лампы Philips 11,5 Вт



а) б)

Рисунок А.16 – Внешний вид (а) и осциллограммы (б) входного тока и напряжения лампы Philips 11,5 Вт

Таблица А.11 – Энергетические характеристики СД лампы Philips 11,5 Вт

$U_{вх}$, В	$I_{вх}$, мА	$P_{вх}$, Вт	$Q_{вх}$, вар	cosφ экв	E, лк	Кп, %	K_I, %	Коэффициенты ВГ тока, %						
								3	5	7	9	11	13	15
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	9,0	0,2	0,4	0,444	0,024	53,7	161,6	89,2	73,2	55,3	42,3	38,2	39,5	39,0
60	21,0	0,7	1,0	0,556	0,097	38,1	139,8	85,6	65,5	47,9	40,6	39,2	35,9	26,8
70	31,0	1,4	1,7	0,645	0,176	31,1	122,0	82,4	59,0	41,0	34,8	30,5	21,4	9,7
80	39,0	1,9	2,3	0,609	0,227	27,0	115,8	80,9	55,9	38,2	32,4	26,5	15,0	4,6
90	45,0	2,6	3,2	0,642	0,291	23,9	113,4	80,4	54,9	37,1	31,0	24,0	12,0	4,3
100	50,0	3,2	3,9	0,640	0,355	21,2	112,8	80,1	54,4	36,8	30,8	23,5	11,2	5,0
110	56,0	3,9	4,8	0,633	0,422	19,2	114,5	80,6	55,5	37,9	31,6	24,4	12,2	4,3
120	61,0	4,6	5,6	0,628	0,485	17,4	115,5	80,8	65,8	38,4	32,2	25,1	13,0	4,5
130	65,0	5,3	6,6	0,627	0,548	15,7	116,7	81,2	56,7	39,1	32,5	25,7	13,8	4,6
140	69,0	6,0	7,6	0,621	0,608	14,2	118,4	81,6	57,5	39,9	33,4	26,9	15,4	5,4
150	72,0	6,7	8,5	0,620	0,661	12,7	120,6	82,2	58,6	40,9	34,2	28,2	17,2	6,4
160	75,0	7,3	9,4	0,608	0,691	11,3	122,9	82,7	59,7	42,0	35,1	29,6	19,2	7,8
170	76,0	7,9	10,2	0,611	0,761	10,0	123,7	83,0	60,2	42,2	35,0	29,8	19,8	8,7
180	78,0	8,6	11,3	0,613	0,804	8,8	126,2	83,7	61,5	43,4	35,8	30,8	21,8	10,5
190	79,0	9,1	12,1	0,606	0,844	7,7	128,1	84,2	62,6	44,5	36,2	31,2	22,8	12,8
200	81,0	9,7	12,6	0,599	0,874	6,8	130,7	84,6	63,4	45,3	37,2	32,9	25,0	14,4
210	81,0	10,2	13,7	0,600	0,910	5,9	134,3	85,3	64,9	47,0	38,4	34,3	27,3	17,1
220	82,0	10,6	14,5	0,588	0,940	5,2	139,1	86,2	66,9	49,3	40,1	36,1	30,1	20,7
230	82,0	11,0	15,3	0,583	0,963	4,6	140,9	86,6	67,8	50,3	40,5	36,3	30,8	22,8
240	82,0	11,4	15,9	0,579	0,977	4,2	143,4	87,0	68,8	51,4	41,2	37,1	32,0	23,8
250	81,0	11,8	16,5	0,583	1,000	3,7	147,6	87,6	70,1	53,0	42,9	38,7	34,5	26,9

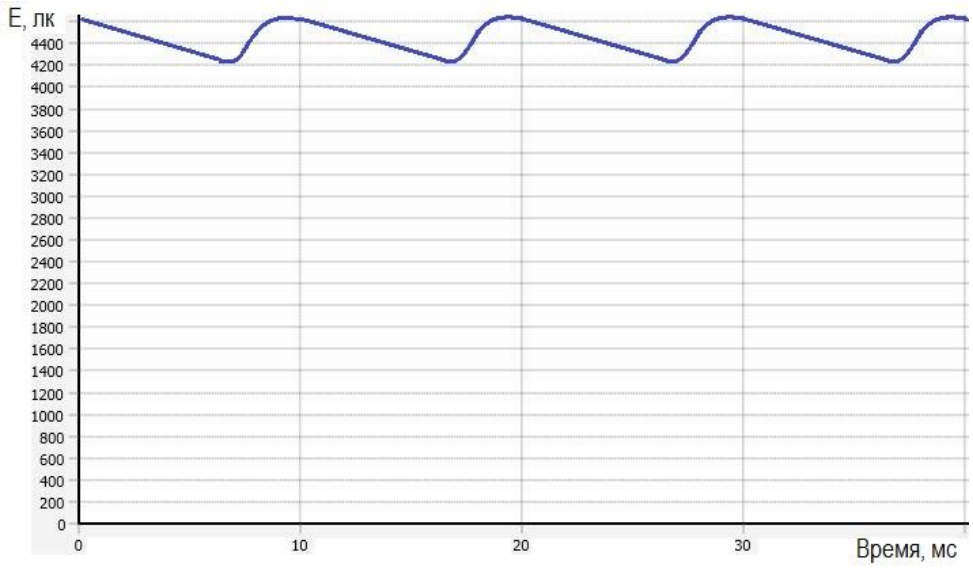


Рисунок А.17 – Осциллограмма пульсаций освещенности лампы Philips 11,5 Вт

Таблица А.12 – Коэффициенты разложения амплитудно-временной характеристики освещенности в ряд Фурье для СД лампы Philips 11,5 Вт

k	a_k	b_k	A_k	φ_k	k	a_k	b_k	A_k	φ_k
0	4458,00	0,00	4458,00	0,00	1	-0,47	-3,64	3,67	1,44
2	52,90	159,06	167,62	1,25	3	0,52	-3,70	3,73	-1,43
4	-55,48	29,49	62,83	-0,49	5	-1,15	-3,31	3,50	1,24
6	-17,61	-27,75	32,87	1,01	7	-1,54	-4,86	5,09	1,26
8	11,64	-12,66	17,20	-0,83	9	-0,07	-5,52	5,52	1,56
10	3,41	1,90	3,91	0,51	11	0,13	-4,57	4,57	-1,54
12	-3,92	-3,01	4,94	0,65	13	-0,66	-4,13	4,19	1,41
14	-0,93	-6,44	6,50	1,43	15	-1,21	-4,49	4,65	1,31

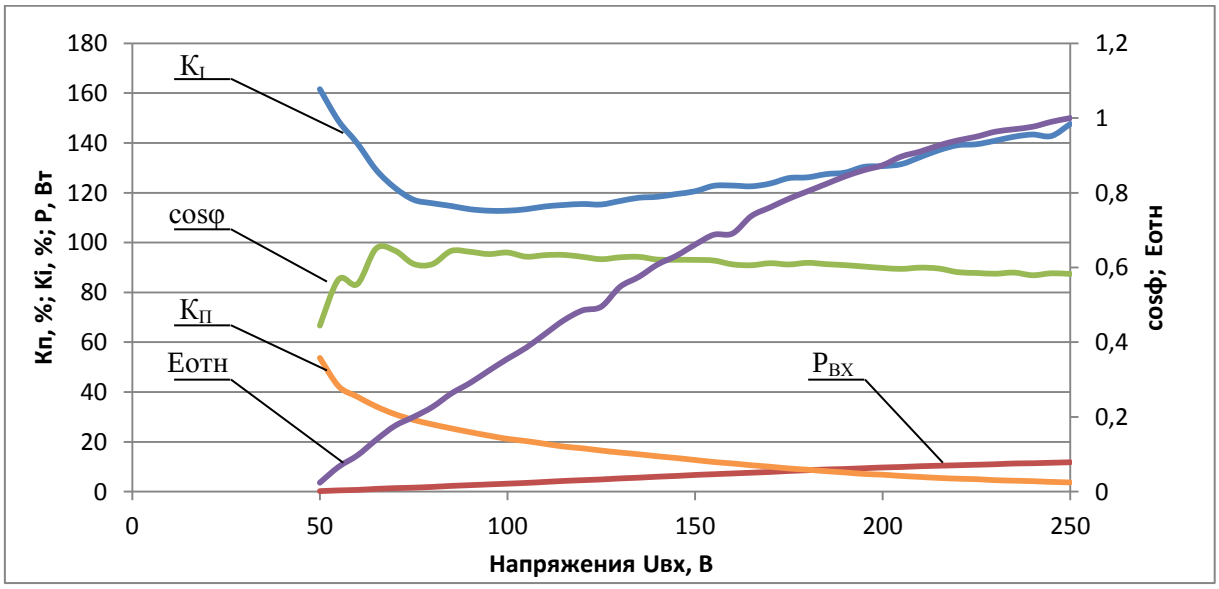
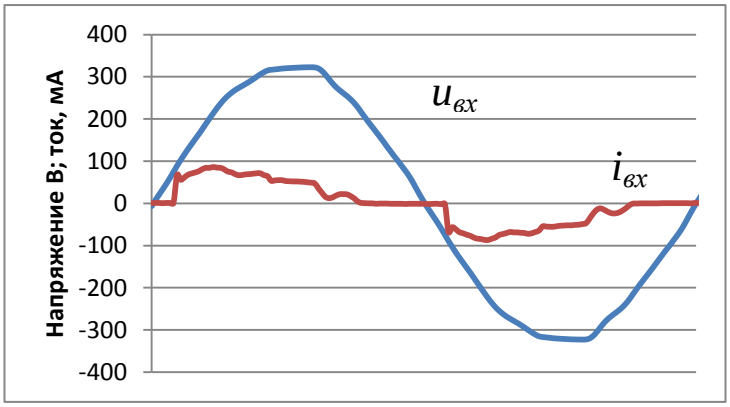


Рисунок А.18 – Энергетические характеристики СД лампы Philips 11,5 Вт

7) Результаты экспериментальных исследований СД лампы Xavax 9 Вт



а) б)

Рисунок А.19 – Внешний вид (а) и осциллограммы (б) входного тока и напряжения лампы Xavax 9 Вт

Таблица А.13 – Энергетические характеристики СД лампы Xavax 9 Вт

$U_{вх}$, В	$I_{вх}$, мА	$P_{вх}$, Вт	$Q_{вх}$, вар	cosφ экв	E, лк	Кп, %	K_I, %	Коэффициенты ВГ тока, %						
								3	5	7	9	11	13	15
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
110	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
120	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
130	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
140	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
150	69,0	9,9	3,1	0,957	0,991	25,8	23,9	16,5	13,4	7,9	1,6	5,6	2,4	1,5
160	65,0	9,8	3,4	0,942	0,970	25,1	24,3	16,6	13,2	8,5	2,4	5,4	3,0	1,5
170	61,0	9,7	3,7	0,935	0,961	24,4	25,3	17,2	13,2	9,0	3,3	5,3	3,8	1,4
180	58,0	9,7	4,0	0,929	0,948	23,8	26,7	18,5	13,4	9,4	4,2	5,2	4,7	1,1
190	56,0	9,6	4,4	0,902	0,931	23,3	28,1	19,7	13,7	9,4	4,9	4,9	5,7	0,7
200	53,0	9,5	4,8	0,896	0,927	22,6	30,1	21,4	14,2	9,6	5,6	4,8	6,7	0,5
210	52,0	9,5	5,3	0,870	0,918	22,3	32,0	23,0	14,9	9,7	6,1	4,7	7,6	0,6
220	51,0	9,5	5,8	0,847	0,914	21,7	34,1	24,7	15,7	9,7	6,6	4,6	8,6	0,9
230	49,0	9,5	6,3	0,843	0,910	21,2	36,2	26,6	16,4	9,7	7,5	4,3	9,3	1,2
240	48,0	9,5	6,7	0,825	0,906	20,5	38,4	28,4	17,1	9,7	8,1	3,9	9,8	1,4
250	48,0	9,5	7,2	0,792	0,901	19,8	40,7	30,2	18,3	9,6	9,4	3,5	10,0	2,3

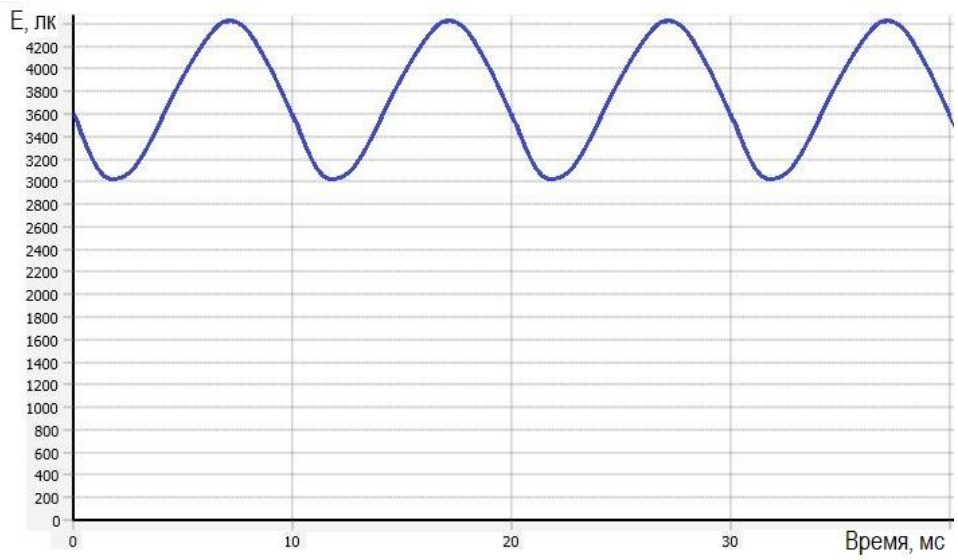


Рисунок А.20 – Осциллограмма пульсаций освещенности лампы Xavax 9 Вт

Таблица А.14 – Коэффициенты разложения амплитудно-временной характеристики освещенности в ряд Фурье для СД лампы Xavax 9 Вт

k	a_k	b_k	A_k	φ_k	k	a_k	b_k	A_k	φ_k
0	3764,00	0,00	3764,00	0,00	1	-0,51	-3,66	3,69	1,43
2	-670,46	-178,77	693,89	0,26	3	0,68	-3,50	3,56	-1,38
4	-33,46	6,18	34,03	-0,18	5	0,27	-3,37	3,38	-1,49
6	7,79	10,69	13,22	0,94	7	0,18	-3,56	3,57	-1,52
8	-3,00	5,77	6,50	-1,09	9	0,04	-3,44	3,44	-1,56
10	3,56	0,09	3,56	0,03	11	0,01	-3,57	3,57	-1,57
12	2,41	-2,99	3,84	-0,89	13	-0,20	-3,54	3,54	1,52
14	1,43	-4,98	5,19	-1,29	15	-0,30	-3,59	3,61	1,49

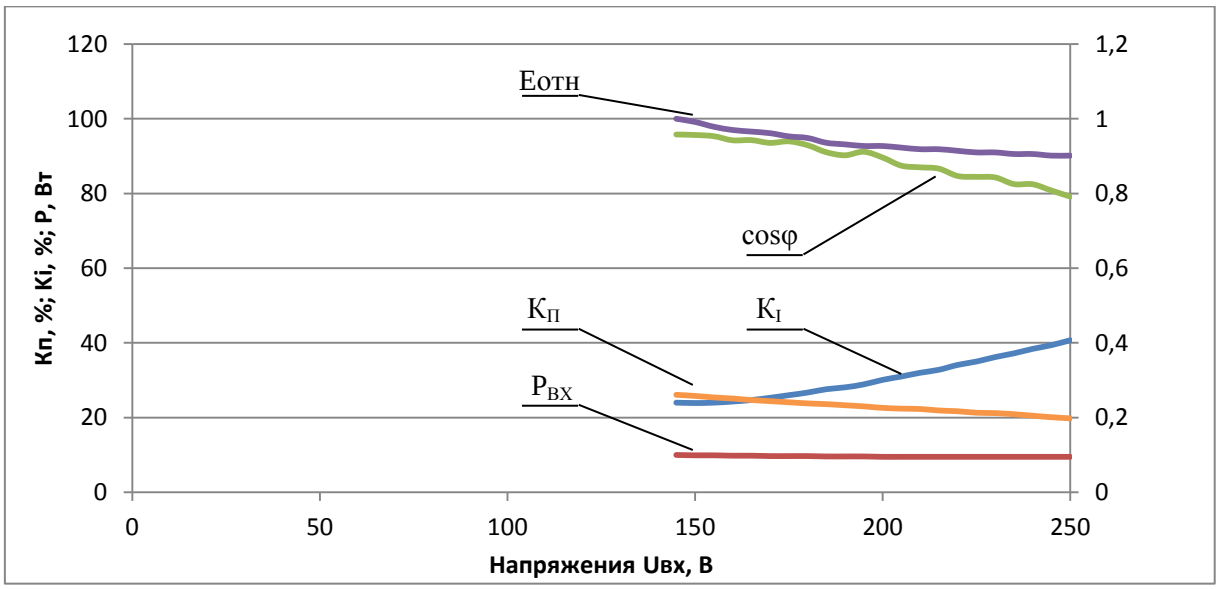


Рисунок А.21 – Энергетические характеристики СД лампы Xavax 9 Вт

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(ИНФОРМАЦИОННОЕ)

Документы, подтверждающие внедрение (возможность применения) результатов диссертационного исследования

REFTRANSFLOT-ENGINEERING Ltd

Dvinskayat., 95
KALININGRAD 23601 RUSSIA
tel (4012) 656 588
tel/fax (4012) 696 376
e-mail: refeng2005@yandex.ru

РЕФТРАНСФЛОТ-ИНЖИНИРИНГ
общество с ограниченной ответственностью

РОССИЯ, 236011 КАЛИНИНГРАД
ул. Двинская, 95
тел. (4012) 656 588
тел./факс (4012) 696 376
эл.почта:refeng2005@yandex.ru

УТВЕРЖДАЮ
Технический директор
ООО «Рефтрансфлот инжиниринг»
_____/А.Н. Кондратьев/
«13» 09 2016 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук
Харитонова Максима Сергеевича

Настоящим актом подтверждается, что результаты работы: «Обеспечение электромагнитной совместимости светодиодного освещения в чрезвычайных ситуациях на объектах морской индустрии» **выполненной:** соискателем кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» Харитоновым Максимом Сергеевичем

внедрены: ООО «Рефтрансфлот инжиниринг» на уровне специалистов по монтажу, ремонту и наладке судового электрооборудования в качестве типовых исходных характеристик светодиодной светотехнической продукции и научно-практических рекомендаций по обеспечению электромагнитной совместимости систем освещения на основе светодиодных источников света.

Вид внедренных результатов:

– результаты экспериментальных исследований энергетических характеристик светодиодных источников света при параметрах напряжения, характерных для нормальных и аварийных режимов;

– результаты экспериментальных исследований токов включения светодиодных источников света;

– результаты оценки возможности возникновения стробоскопического эффекта в системах освещения, построенных на основе светодиодных источников света;

– результаты исследования распространения высших гармонических составляющий токов от нелинейной осветительной нагрузки по элементам судовой электроэнергетической системы;

– рекомендации по обеспечению биоэлектромагнитной совместимости светодиодных источников света в системах освещения объектов морской индустрии в нормальных условиях и при чрезвычайных ситуациях.

Перечисленные научно-практические результаты обоснованы соискателем на примере БМРТ «Алексей Аничкин» проекта В-673 и прошли апробацию в ходе технического обслуживания промыслового судна проекта 1288 БАТМ «Замоскворечье», проводимого специалистами ООО «РТФ-инжиниринг» при участии соискателя Харитонова М.С.

По результатам апробации сделан вывод о достоверности и практической значимости результатов проведенного исследования и принято решение об использовании данных результатов и научно-практических рекомендаций в профессиональной деятельности специалистов ООО «РТФ-инжиниринг».

Инженер по диагностике
судовых технических средств
ООО «РТФ-инжиниринг» А.В.Москалёв

1-й электромеханик
БАТМ «Замоскворечье Ю.В.Панков

Российская Федерация
Закрытое акционерное общество
БАТМ
Замоскворечье
ВЕСТРЫБФЛОТ
г.Калининград

Общество с ограниченной ответственностью
«Азимут-Проект»
(ООО «Азимут-Проект»)

Карла Маркса ул., д. 18, Калининград, 236022
Тел/факс (4012) 93-35-98; 93-35-83;
93-29-23; 95-76-17
E-mail: azimut@tis-dialog.ru
ИНН/КПП 3908016106/390801001
ОГРН 1023901867131

12.08.2016г. № 86

На № _____ от _____

СПРАВКА

о возможности применения результатов диссертационного исследования «Обеспечение электромагнитной совместимости светодиодного освещения в чрезвычайных ситуациях на объектах морской индустрии»
М.С. Харитонова

Ознакомившись с основными положениями диссертационного исследования, выполненного Харитоновым Максимом Сергеевичем, подтверждаю, что следующие результаты:

- результаты экспериментальных исследований электротехнических характеристик светотехнических изделий на основе светодиодов, в частности: данные о величине потребляемой реактивной мощности и показатели несинусоидальности потребляемого тока;
- результаты экспериментальных исследований протекания токов высших гармоник в фазных и нулевом проводниках системы освещения трехфазного исполнения, реализованной с использованием светотехнических изделий на основе светодиодов;
- рекомендации по проектированию систем освещения на основе светодиодных источников света;
- фильтрокомпенсирующее устройство для трехфазных систем электроснабжения с нелинейными нагрузками;

могут применяться в практической деятельности организации при проектировании систем освещения с использованием светотехнических изделий на основе светодиодов, а также иных систем электроснабжения с нелинейными нагрузками.

Результаты исследования, представляющие наибольшую практическую ценность для организации, опубликованы в рецензируемых научных изданиях и патенте:

1. Статья «Некоторые рекомендации для систем освещения на основе энергосберегающих ламп» / В.Ф. Белей, М.С. Харитонов // Промышленная энергетика. –2014. –№ 6. –С.41-47.
2. Статья «Результаты экспериментальных исследований светодиодных ламп сетевого напряжения» / В.Ф. Белей, М.С. Харитонов // Промышленная энергетика. –2012. –№ 9. С. 9-14.
3. Патент на полезную модель «Фильтрокомпенсирующее устройство для трехфазных систем электроснабжения с нелинейными нагрузками» / В.Ф. Белей, М.С. Харитонов // Пат. RU 158 871 U1; МПК H02J 3/01; заявитель и патентообладатель Калининградский гос. техн. университет. – №2015117043/07; заявл. 05.05.2015;опуб. 20.01.2016; бюл. № 2

С уважением,
Директор

Российская Федерация
Общество с ограниченной ответственностью
АЗИМУТ ПРОЕКТ
г.Калининград обл.

О.В. Ягодкина

« 12 » августа 2016 г.

Исполнитель:
Вербицкий А.В.
Тел. (4012) 93-35-98