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)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Калининград - 2017

Работа выполнена на кафедре «Электрооборудование судов и электроэнергетика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Калининградский государственный технический университет»

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор, заслуженный работник рыбного хозяйства РФ, заведующий кафедрой «Электрооборудование судов и электроэнергетика» ФГБОУ ВО «Калининградской государственный технический университет» Белей Валерий Феодосиевич
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение, электрооборудование и автоматика» Военного института (инженерно-технического) ФГКВОУ ВПО «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева» Фоминич Эдуард Николаевич
	кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и электротехнологии» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» Янченко Сергей Александрович
Ведущая организация:	Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего профессионального образования Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота «Военно-морская академия им. Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова»

Защита состоится «12» сентября 2017 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 307.007.02 ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», 236000, г. Калининград, Советский проспект, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» www.klgtu.ru.

Электронная версия автореферата размещена на официальном сайте ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» www.klgtu.ru «12» мая 2017 г. и на официальном сайте ВАК Министерства образования и науки РФ http://vak3.ed.gov.ru «12» мая 2017 г.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Н.Ю. Бугакова

Общая характеристика работы

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 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 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 системах электроснабжения объектов морской индустрии, являются актуальной проблемой повышения устойчивости функционирования данных систем в условиях чрезвычайных ситуаций.

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 при этом практически не рассматриваются.

Таким образом, существующее состояние исследований в области электромагнитной совместимости СД источников света и систем освещения на их основе характеризуется разносторонностью при отсутствии системного подхода и единой методологии исследований, что затрудняет сопоставление имеющихся результатов. Исследования данных аспектов 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 нормальных 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 светодиодных источников света;

– экспериментальные исследования энергетических характеристик светодиодных 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 светодиодных светотехнических изделий в системах освещения судов;

– разработка рекомендаций по обеспечению электромагнитной совместимости светодиодных 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 светодиодных 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 некратных трем;

– обоснованы предложения по обеспечению электромагнитной совместимости светотехнических изделий на основе СД в системах освещения объектов морской индустрии в нормальных 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 светодиодных 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 основного 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.

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», 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.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 86 наименований. Работа содержит 145 страниц текста, 87 иллюстраций, 63 таблицы и 2 приложения.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, дана общая характеристика работы, ее краткое содержание и структура.

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 (таблица 1). Кроме того разрядные лампы, как правило, содержат пары ртути и представляют биологическую опасность, имеют низкий коэффициент мощности и являются источником ВГ составляющих тока. Анализ рынка светотехнической продукции показывает рост доли СД источников света при сокращении доли ламп накаливания.

Талица 1 – Характеристики различных типов ламп

Тип лампы	Достигнутая светоотдача, лм/Вт	Теоретическая светоотдача, лм/Вт	Срок службы, тыс. ч.
Накаливания	20	53,5	до 10
Люминесцентная	108	240	до 25
Светодиодная	102 (лампа) 205 (светодиод)	более 300	до 100

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.

Анализ исследований в области аварийности морских судов показывает, что отказы элементов судовых электроэнергетических систем являются одной из наименее распространенных причин серьезных аварий на судах. В то же время аварии в смежных системах могут приводить к нарушению нормальной работы систем освещения при низком уровне их электромагнитной совместимости.

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, существующий 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 (рисунок 1). Проведены исследования взаимосвязи энергетических характеристик и конструктивных особенностей СД лампы с характеристиками её светового потока, по результатам которых предложена упрощенная инженерная методика исследования.

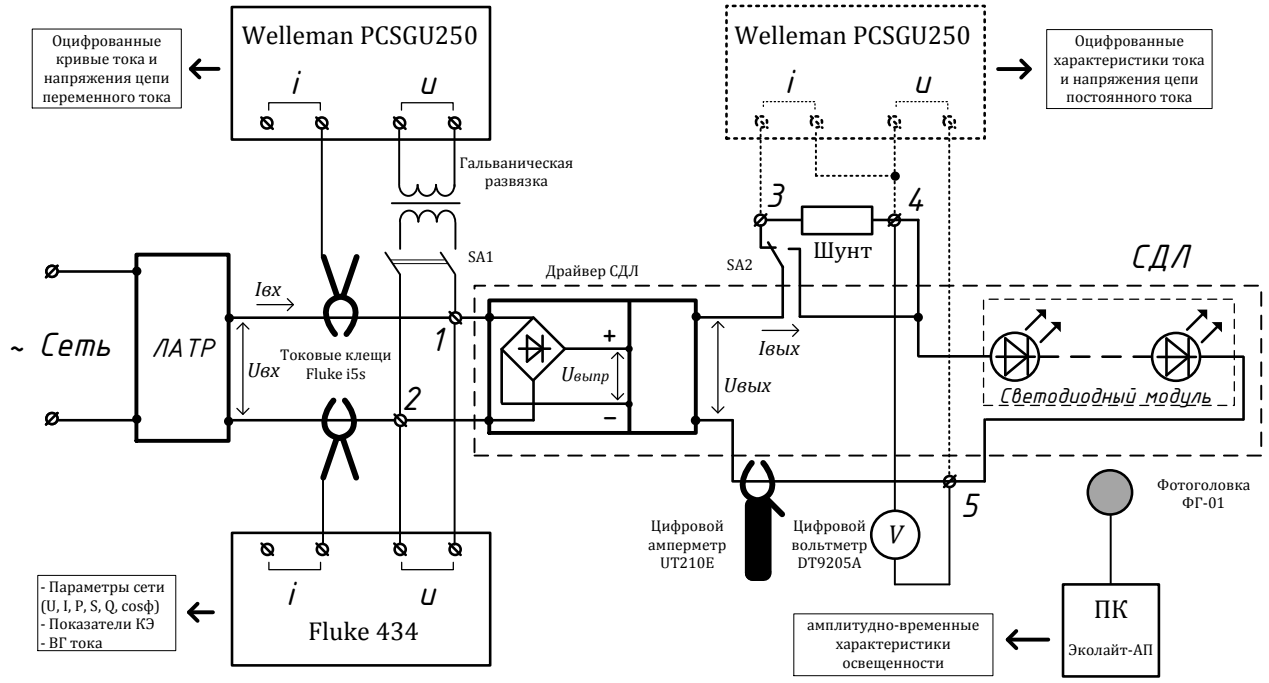


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

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 $E(t)$ (рисунок 2).

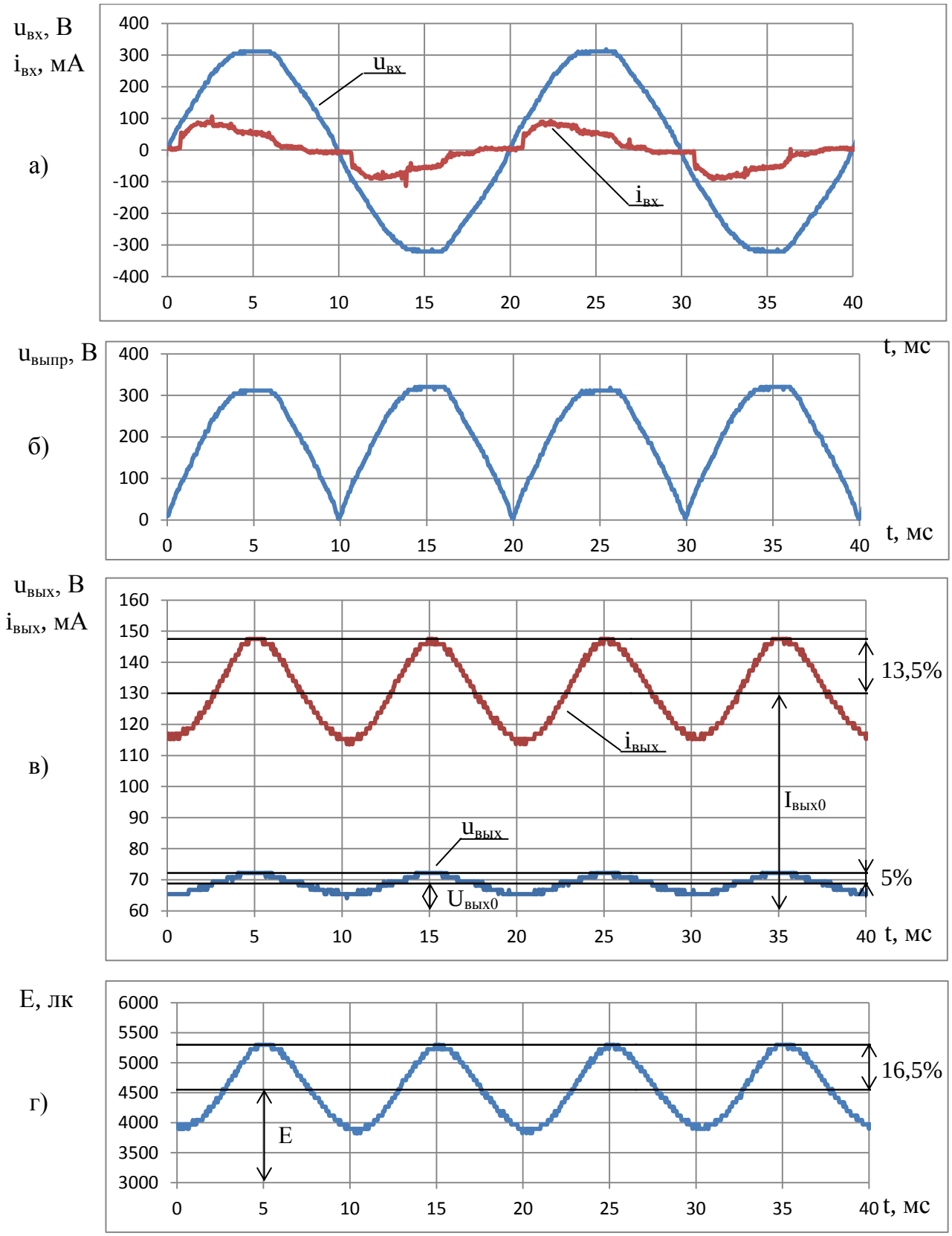


Рисунок 2 – Осциллограммы энергетических характеристик светодиодной лампы: а) ток и напряжение на входе драйвера; б) напряжение после выпрямителя; в) ток и напряжение на выходе драйвера; г) освещенность

Разработанная лабораторная методика основана на измерении амплитудно-временных зависимостей параметров электроэнергии 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, цифровых: осциллографа, люксметра и мультиметров (рисунок 1).

Исследование распространения ВГ тока по элементам светодиодной лампы произведено методом гармонического анализа измеренных амплитудно-временных характеристик путем представления в виде тригонометрического ряда Фурье (1) с использованием программного пакета Mathcad.

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

Напряжение на выходе выпрямителя является пульсирующим (рисунок 2), при этом преобладающей является гармоническая составляющая второго порядка. С инженерной точки зрения, главным образом, гармонические составляющие второго порядка определяют пульсации напряжения ($U_{вых}$), тока ($I_{вых}$) и светового потока (E).

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 (рисунок 3) и получены амплитудно-временные характеристики освещенности, которые были исследованы путем гармонического анализа методом разложения в ряд Фурье (1) для определения частоты пульсаций освещенности (светового потока) (таблица 2).

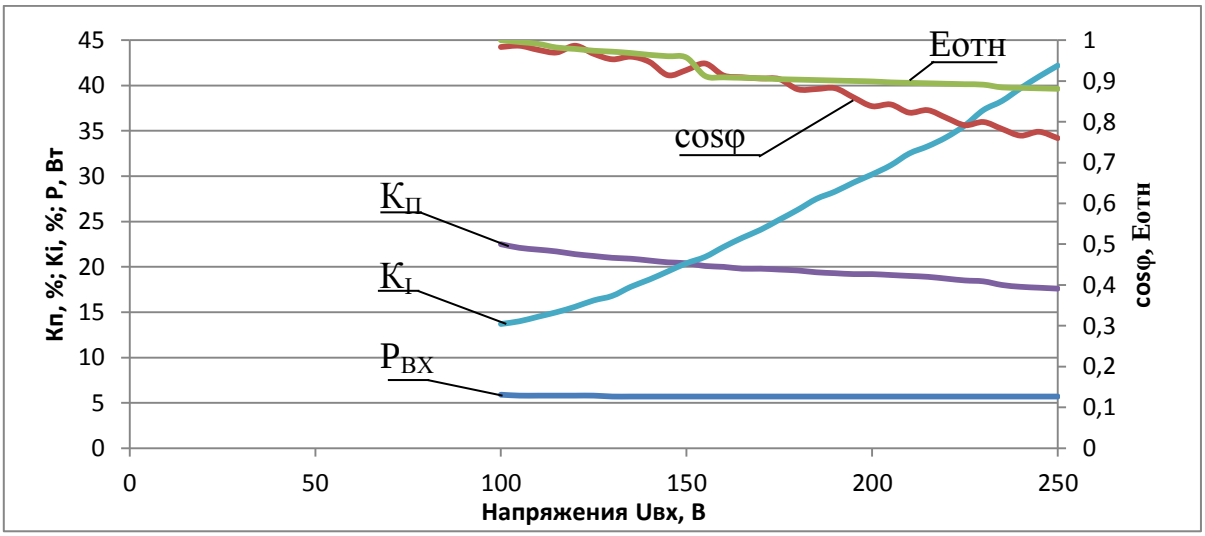


Рисунок 3 – Энергетические характеристики светодиодной лампы Ikea 6,3 Вт

Таблица 2 – Коэффициенты разложения амплитудно-временных характеристик тока и освещенности в ряд Фурье и соотношение их амплитудных значений для светодиодной лампы Ikea 6,3 Вт

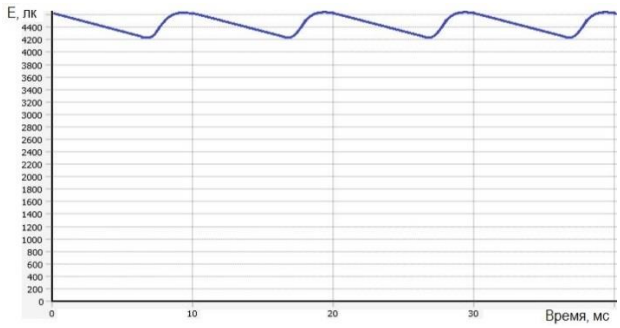
Функция x(t)	Амплитудные значения коэффициентов разложения в ряд Фурье (A_k) для составляющих порядком от 1 до 10									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_{вых}$	0,68	15,93	0,49	0,77	0,23	0,46	0,11	0,12	0,12	0,15
E	40,24	940,7	29,45	45,92	14,13	27,23	6,92	7,60	7,32	9,31
E / $I_{вых}$	59,01	59,03	59,02	59,02	59,13	59,08	59,22	58,93	59,03	58,98

Помимо частоты пульсаций для всех образцов СД изделий измерен коэффициент пульсаций освещенности по ГОСТ Р 54945-2012 (2).

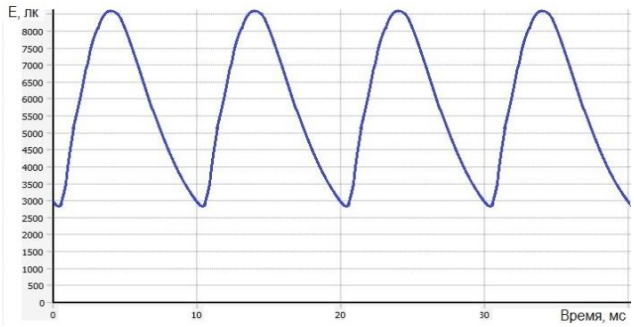
$$K_{П} = \frac{E_{макс} - E_{мин}}{2\frac{1}{T}\int_0^1 E(t)dt}, \quad (2)$$

где $E_{макс}$ и $E_{мин}$ – соответственно максимальное и минимальное значение освещенности за период её колебания; Т- период, соответствующий изменению освещенности от минимального до максимального значения

Анализ результатов измерений показывает, 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 (рисунок 4).



а)



б)

Рисунок 4 – Осциллограммы пульсаций освещенности для СД ламп различной мощности: а) Philips 11,5 Вт ($К_П$ = 4,6 %); б) Philips 3,5 Вт ($К_П$ = 58,9 %)

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% (согласно опыту эксплуатации систем освещения). При этом возникновение стробоскопического эффекта более вероятно при освещении СД лампами ввиду большего по величине коэффициента 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 по-

током. 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.

С учетом результатов проведенных исследований предложена и обоснована методика оценки дозы фликера на основе анализа амплитудно-временной характеристики освещенности. Методика отличается от известных использованием выявленных особенностей функционирования драйвера СД лампы при упрощенном анализе характеристик освещенности (изменение освещенности рассматривается как периодический процесс). Анализ полученных результатов исследований энергетических характеристик (рисунок 2, таблица 2) позволяет сделать вывод об идентичности гармонического состава пульсаций освещенности и тока через СД, которые, в свою очередь, определяются: изменением приложенного к СД напряжения; формой вольт-амперной характеристики СД; зависимостью светового потока от величины тока $\Phi = f(I_{вых})$. На основе анализа результатов экспериментальных исследований восьми СД ламп следует, что пульсации освещенности не зависят от напряжения сети и имеют периодический характер с преобладающей частотой пульсаций 100 Гц, что обусловлено наличием практически у всех СД ламп двухполупериодного выпрямителя на входе драйвера. Для периодических или близких к периодическим колебаниям напряжения доза фликера с достаточной для практических целей точностью может быть оценена по выражению для дозы колебаний освещенности (3).

$$\psi_E = \frac{1}{\theta} \cdot \int_{t-\theta}^{t} \sum g_f^2 \cdot \delta E_f^2 \, dt \qquad (3)$$

$$\delta E_t = \frac{|E_j - E_{j+1}|}{\sqrt{2} E_{ном}} \quad , \qquad (4)$$

где g_f – коэффициент приведения действительных размахов освещенности к эквивалентным; θ – интервал времени усреднения, равный 10 мин; δE_f – действующие значения составляющих разложения в ряд Фурье изменений величин с размахом δE_t; E_j, E_{j+1} – значения следующих друг за другом экстремумов огибающей амплитудных значений освещенности.

Для оценки воздействия СД источников света на питающую сеть проведено измерение токов включения СД ламп и световых приборов при помощи анализатора Fluke-434 (рисунок 5). Выявлено, что для ряда СД световых приборов ток включения может достигать двенадцатикратного значения по отношению к номинальному. В системах аварийного освещения одновременное подключение световых приборов с большим током включения способно вызвать срабатывание защитных аппаратов, и неработоспособности системы аварийного освещения при возникновении чрезвычайной ситуации.

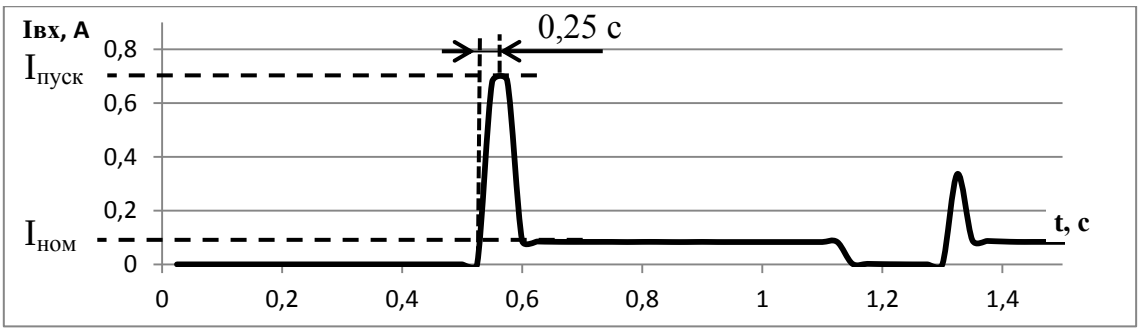


Рисунок 5 – Зависимость действующего значения тока от времени при включении светодиодной лампы Philips 11,5 Вт ($I_{ном}$=83 мА, $I_{пуск}$=691 мА, скорость нарастания тока включения 2,8 А/с)

В четвертой главе приведены результаты исследований электромагнитной совместимости светодиодных источников света в системах электроснабжения объектов морской индустрии.

Выполнен анализа систем электроснабжения промысловых судов проектов «Атлантик-333», «В-673», «1288», «Атлантик-488». Проведено экспериментальное исследование качества электроэнергии в судовой электроэнергетической системе БМРТ «Алексей Аничкин» (рисунок 6, таблица 3).

Рисунок 6 – Внешний вид БМРТ «Алексей Аничкин»

Таблица 3 – 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 напряжения по обратной последовательности	0,2			0,2		
Доза фликера P_{st}	0,35	0,3	0,3	0,39	0,35	0,39

Анализ результатов исследований показывает, что в исследуемой судовой электроэнергетической системе (рисунок 7) 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.

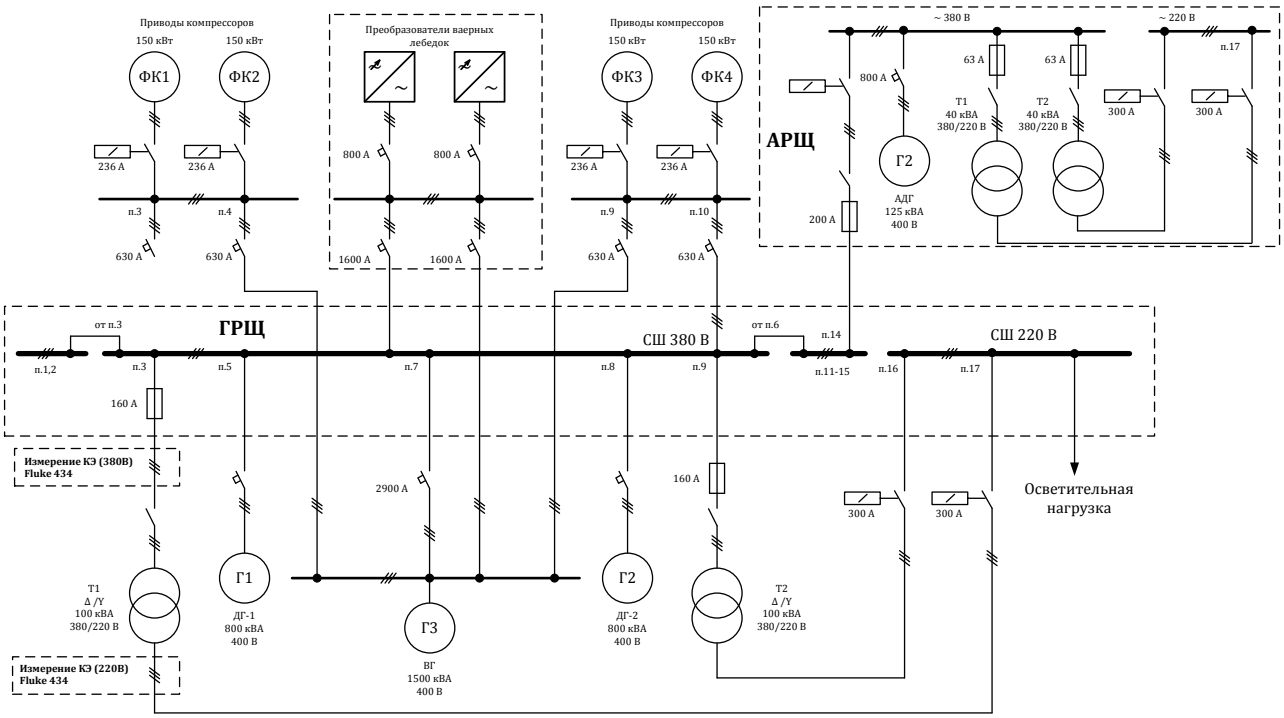


Рисунок 7 – Схема судовой электроэнергетической системы БМРТ «Алексей Аничкин»

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 некратных трем. Модели разработаны для расчетного участка судовой электроэнергетической системы (рисунок 8), соответствующего режиму работы во время проведения экспериментальных исследований.

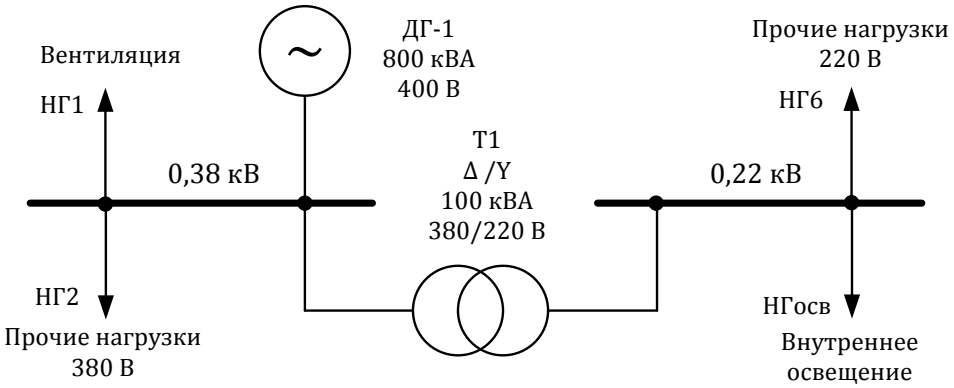


Рисунок 8 – Исследуемый участок схемы судовой энергосистемы

Расчет методом контурных токов осуществляется в матричной форме для трехлинейной схемы замещения с учетом емкостной проводимости между линией и корпусом (рисунок 9) по выражениям (5-7).

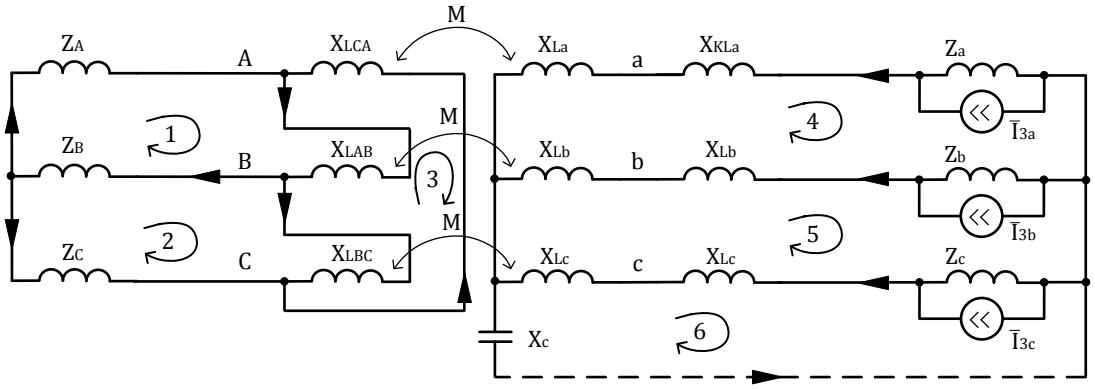


Рисунок 9 – Трёхлинейная расчетная схема замещения.

$$Z_K := B \cdot Z \cdot B^T;\ Z_K \cdot \overline{I_K} = \overline{E_K} \tag{5}$$

$$Z_{\Sigma a} := X_{La} + Z_{KLa} + Z_b;\quad Z_{\Sigma b} := X_{Lb} + Z_{KLb} + Z_b;\quad Z_{\Sigma c} := X_{Lc} + Z_{KLc} + Z_c \tag{6}$$

$$B := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \end{pmatrix} \quad Z := \begin{pmatrix} Z_A & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_B & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X_{LB} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{LC} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_{LA} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{\Sigma a} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{\Sigma b} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{\Sigma c} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_c \end{pmatrix} \tag{7}$$

Поскольку токи источников на стороне низкого напряжения совпадают по фазе, то токи в обмотках высокого напряжения трансформатора имеют вид (8). Таким образом, токи ВГ третьего порядка в сети высокого напряжения за пределами обмоток трансформатора равны нулю (9).

$$i_{AB} = i_{BC} = i_{CA} = I_m \cdot e^{j(3\omega t + 150)} \tag{8}$$

$$i_A = i_{AB} - i_{CA} = 0;\ i_B = i_{AB} - i_{BC} = 0;\ i_C = i_{CA} - i_{BC} = 0 \tag{9}$$

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 некратных трем выполнен с использованием метода узловых потенциалов. Задача нахождения коэффициентов гармонических составляющих в узлах расчетной схемы решена методом матричных уравнений узловых потенциалов (10).

$$g^{(y)} \cdot \varphi = J_c; \quad g^{(y)} = A \cdot g_d \cdot A^T, \tag{10}$$

где $g^{(y)}$ –матрица узловых проводимостей; φ – матрица потенциалов узлов; J_c – матрица токов источников токов в узлах; A – матрица соединения узловых проводимостей ветвей; g_d – диагональная матрица проводимостей; A^T – транспонированная матрица соединения узловых проводимостей ветвей схемы.

Для расчётной схемы данные матрицы имеют вид (11).

$$g_{(d)} := \begin{pmatrix} g_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g_5 \end{pmatrix} \qquad A := \begin{pmatrix} -1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \tag{11}$$

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. Результаты расчета показателей несинусоидальности в случае замены люминесцентных ламп на перспективные светодиодные приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты расчета показателей несинусоидальности напряжения при установке на судне 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 результатов расчета (таблица 3), 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%.

Исследования на математических моделях подтверждены результатами экспериментальных исследований распространения ВГ тока на лабораторной установке, моделирующей судовую электроэнергетическую систему с нелинейной осветительной нагрузкой (рисунок 10). Измерения проведены в трех точках модели (таблица 5).

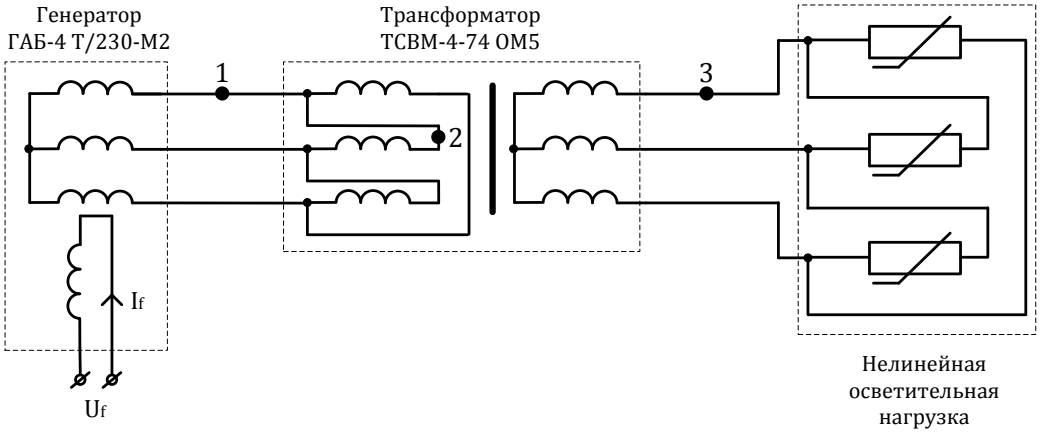


Рисунок 10 – Схема лабораторной модели судовой электроэнергетической системы

Таблица 5 – Результаты измерений на лабораторной модели судовой электроэнергетической системы

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	

Выявлено, что ВГ тока третьего порядка выпадает из гармонического состава токов СД источников света; токи ВГ некратных трем, эмиссируемые нелинейной нагрузкой, распространяются по судовой электроэнергетической системе через трансформаторы со схемой соединения «треугольник-звезда» без нулевого провода (таблица 5).

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 (рисунок 11) для режима электроснабжения объекта от единой энергосистемы и от аварийного дизель генератора (резервного источника в условиях чрезвычайных ситуаций).

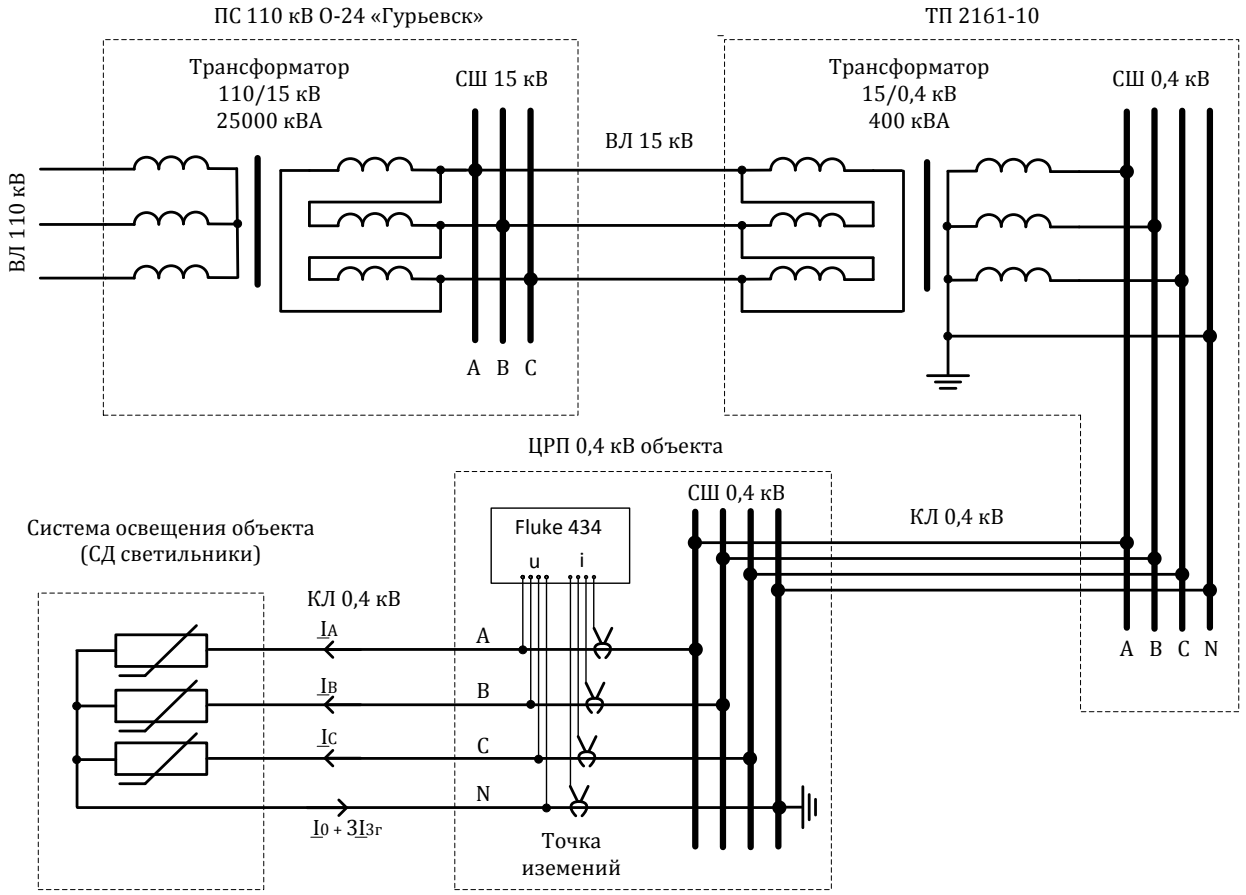


Рисунок 11 – Схема электроснабжения промышленного объекта и система освещения на основе СД светильников

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 (рисунок 12). При этом величина тока в нулевом проводнике составляет от 75 до 98 % значения тока фазного проводника (таблица 6).

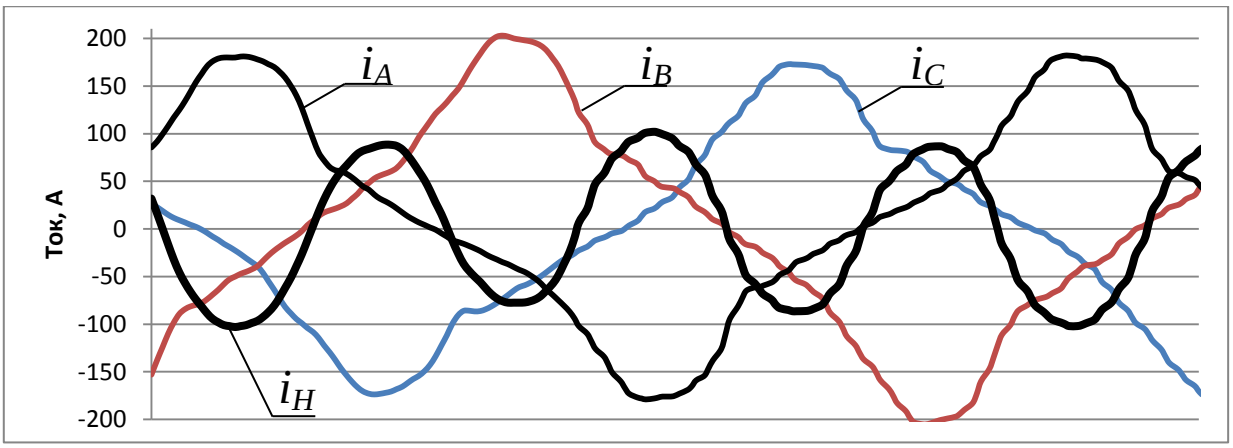


Рисунок 12 – Осциллограммы токов в фазных и нейтральном проводниках системы электроснабжения исследуемого объекта

Таблица 6 – Показатели энергопотребления системы освещения объекта

Проводник	U, В	I, А	P, кВт	S, кВА	Q, квар	$\cos\varphi_{экв}$	P_{st}
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	-	-	-	-	-

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).

Заключение

На основании выполненных теоретических, расчетных 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. Как следует из опыта эксплуатации систем освещения, данное явление может возникать при 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 некратные 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 до-

пустимых 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.

Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях:

а) научные статьи, опубликованные в ведущих российских периодических изданиях, рекомендуемых ВАК Минобранауки РФ:

1. Белей, В.Ф. Светодиодные лампы в системах судового освещения: вопросы электромагнитной совместимости / В.Ф. Белей, М.С. Харитонов // Вестник МГТУ. –2016. –Т.19. –№ 4. –С.687-696.

2. Белей, В.Ф. Стандарты в области качества электроэнергии: проблемы и тенденции / В.Ф. Белей, М.С. Харитонов // Информационные ресурсы России. –2016. –№ 1. –С.10-14.

3. Белей, В.Ф. Некоторые рекомендации для систем освещения на основе энергосберегающих ламп / В.Ф. Белей, М.С. Харитонов // Промышленная энергетика. –2014. –№ 6. –С.41-47.

4. Белей, В.Ф. Результаты экспериментальных исследований светодиодных ламп сетевого напряжения / В.Ф. Белей, М.С. Харитонов // Промышленная энергетика. –2012. –№ 9. –С.9-14.

б) научные статьи в прочих научных изданиях:

5. Харитонов, М.С. Анализ технических и нормативных документов, регламентирующих применение осветительных приборов в системах освещения судов / IV Международный балтийский морской форум [Электронный ресурс]: материалы международного форума. −Калининград: Изд-во БГАРФ, –2016. –С. 262-267.

6. Белей, В.Ф. Перспективы применения светодиодного освещения на судах / В.Ф. Белей, М.С. Харитонов // III Международная конференция «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии» III Балтийский морской форум: тезисы докладов. –Калининград : Изд-во БГАРФ, 2015. –С. 98-102.

7. Харитонов М.С. Проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях при использовании в судовых системах освещения светодиодных светильников и некоторые пути их решения / М.С. Харитонов, В.Ф. Белей // Вестник молодежной науки. –Калининград: Изд-во КГТУ. –2016. –№ 3 (5). –С. 12.

8. Харитонов М.С. Результаты экспериментальных исследований качества электроэнергии в судовой электроэнергетической системе БМРТ «Алексей Аничкин» / М.С. Харитонов, В.Ф. Белей // Вестник молодежной науки. –Калининград: Изд-во КГТУ. –2016. –№ 3 (5). –С. 11.

9. Харитонов М.С. Результаты исследований особенностей применения светодиодного освещения на промышленном предприятии / М.С. Харитонов, Г.А. Решетников // Вестник молодежной науки. –Калининград: Изд-во КГТУ. –2016. –№ 3 (5). –С. 13.

10. Белей, В.Ф. Анализ российских и европейских стандартов по оценке качества электроэнергии в системах электроснабжения / В.Ф. Белей, М.С. Харитонов // Новые технологии газовой, нефтяной промышленности, энергетики и связи. XXII международный технологический конгресс: сб. науч. тр. –Москва. –2015. –С. 259-265.

11. Белей, В.Ф. Проблемы электромагнитной совместимости систем электроснабжения застроенной среды / В.Ф. Белей, М.С. Харитонов // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании. Международная научная конференция: сб. науч. тр. / МГСУ. – Москва. –2015. –С. 515-520.

12. Белей, В.Ф. Качество электроэнергии в судовых электроэнергетических системах: современное состояние нормативной базы / В.Ф. Белей, М.С. Харитонов // Инновации в науке, образовании и бизнесе 2014. XII международная научная конференция : сб. науч. тр. / КГТУ. – Калининград : Изд-во КГТУ, 2014. –Ч.1. –С. 320-323

13. Белей, В.Ф. Качество электроэнергии на объектах застроенной среды: проблемы, методы его обеспечения / В.Ф. Белей, М.С. Харитонов // IV Международная научно-практическая конференция «Экономика, оценка и управление недвижимостью и природными ресурсами»: материалы конференции / БГТУ. – Минск. –2014. –С. 143-149

14. Белей, В.Ф. Анализ нормативных документов, регламентирующих качество электроэнергии в системах электроснабжения / В.Ф. Белей, М.С. Харитонов // Инновации в науке, образовании и бизнесе 2012. X международная научная конференция : сб. науч. тр. / КГТУ. – Калининград : Изд-во КГТУ, 2012. –Ч.1. –С. 94-97.

в) отчеты по научно-исследовательским работам:

15. Исследование проблем электромагнитной совместимости систем освещения на основе светодиодных ламп на судах и объектах рыбной промышленности: отчет о НИР (ФГАНУ ЦИТиС Рег. № АААА-А14-116072810005-1) / В.Ф. Белей, М.С. Харитонов. –Калининград: КГТУ, –2016.

16. Разработка рекомендаций по внедрению светодиодных систем освещения на судах и объектах рыбной промышленности: отчет о НИР (ФГНУ ЦИТиС Рег. № 115052010031) / В.Ф. Белей, М.С. Харитонов. –Калининград: КГТУ, –2015.

17. Разработка предложений по корректировке требований в области качества электроэнергии для электроэнергетических систем судов и объектов рыбной промышленности: отчет о НИР (ФГНУ ЦИТиС Рег. № 01201465758) / В.Ф. Белей, М.С. Харитонов. – Калининград: КГТУ, 2014.

18. Исследование и разработка технических решений по обеспечению качества электроэнергии электротехнических комплексов и систем; отчет о НИР (ФГНУ ЦИТиС Рег. № 01201364337) / В.Ф. Белей, М.С. Харитонов. – Калининград: КГТУ, 2013.

г) патенты на изобретения и полезные модели:

19. Пат. 158871 Российская Федерация. МПК H02J 3/01. Фильтрокомпенсирующее устройство для трехфазных систем электроснабжения с нелинейными нагрузками / В.Ф. Белей, М.С. Харитонов; заявитель и патентообладатель Калининградский гос. техн. университет. –№2015117043/07; заявл. 05.05.2015; опуб. 20.01.2016; бюл. № 2