



РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ  
В СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ БМРТ  
«АЛЕКСЕЙ АНИЧКИН»

М.С. Харитонов, ст. преп.,  
engineeringlifestyle@gmail.com

В.Ф. Белей, д-р техн. наук, профессор,  
vbeley@klgtu.ru

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный  
технический университет»

Приведены результаты экспериментальных исследований качества электроэнергии в электроэнергетической системе БМРТ «Алексей Аничкин», дан анализ искажающих нагрузок и структуры систем освещения. Рассмотрены вопросы функционирования систем освещения судна.

*судовая электроэнергетическая система, система освещения, качество электроэнергии, несинусоидальность*

Системы освещения судов флота рыбной промышленности в большинстве случаев выполнены на основе ламп накаливания (ЛН) и люминесцентных ламп (ЛЛ). В то же время в мире прослеживаются тенденции к повсеместному внедрению более эффективных светодиодных ламп (СДЛ). Анализ рынка светотехнической продукции показывает рост доли СДЛ на фоне явного сокращения доли ЛН. Светодиоды могут применяться как одиночные элементы, так и в составе групп, в конструкциях различных светотехнических изделий: от ламп с винтовым цоколем до прожекторов. Прогноз специалистов указывает на снижение стоимости светодиодных ламп в ближайшей перспективе, что создаёт предпосылки для широкого внедрения СДЛ, в том числе, в системах освещения судов. Однако при этом необходимо обеспечить требования электромагнитной совместимости систем освещения.

Важным аспектом в данном случае являются требования к качеству электроэнергии (КЭ): уровень КЭ определяет условия работы СДЛ, а функционирование СДЛ оказывает влияние на КЭ. Требования к качеству электроэнергии в судовых электроэнергетических системах (СЭЭС) приводятся в Правилах классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства (КПМС РМРС) [1]. Экспериментальные исследования и анализ показателей КЭ в СЭЭС промысловых судов позволяет оценить технические перспективы внедрения СДЛ в системы освещения судов.

В качестве объекта экспериментальных исследований выбрано промышленное судно – большой морозильный рыболовный траулер (БМРТ) «Алексей Аничкин» проекта В-673 тип Langusta. Внешний вид судна представлен на рис. 1, технические характеристики приведены в табл. 1.

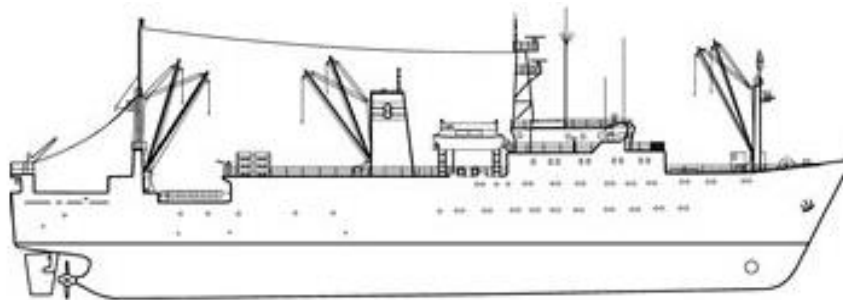


Рисунок 1 – Внешний вид БМРТ «Алексей Аничкин»

Таблица 1 – 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)	1*5000
Марка	B&W 8L 35MC
Частота вращения (об/мин)	164
Количество и мощность валогенераторов (кВт каждый)	1*1200
Вспомогательные дизель-генераторы:	
Марка дизеля	Cegielski-Sulzer 5 AT 25H
Частота вращения (об/мин)	750
Количество и мощность генераторов (кВт)	2*640
Напряжение генератора (В)	400
Завод-строитель	Stocznia im. Komuny Paryskiej, г. Гдыня, Польша

Генерирующий комплекс судна состоит из одного валогенератора (ВГ), двух вспомогательных и одного аварийного дизель-генераторов, с номинальным напряжением 400 В. Генерирующие мощности, крупные потребители и структура СЭЭС представлены на рис. 2. Энергия от генераторов поступает на шины главного распределительного щита (ГРЩ). К ГРЩ через два силовых трансформатора (схема соединения Y/Δ) подключены системы шин (СШ) распределительного щита 220В, питающего системы освещения и хозяйственно-бытовые нагрузки.

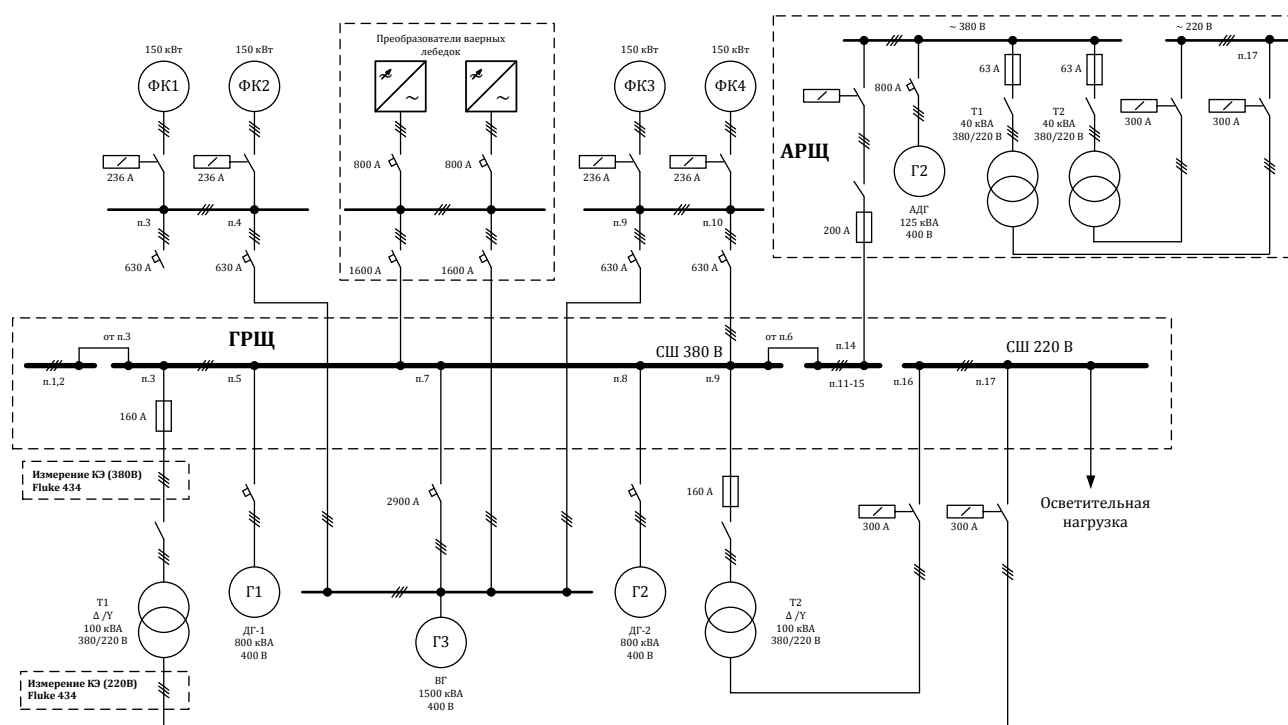


Рисунок 2 – Схема электроэнергетической системы БМРТ «Алексей Аничкин»

Осветительные сети, питающие светильники как общего, так и местного освещения, подключаются к групповым щитам освещения (ГрЩО). От данных щитов также получают питание некоторые розетки, в том числе, в каютах экипажа, к которым подключаются бытовые нагрузки. Перечень характерных потребителей электроэнергии приведен в табл. 2.

Таблица 2 – Электрические нагрузки в составе СЭЭС БМРТ «Алексей Аничкин»

Номинальное напряжение	Потребитель	Тип нагрузки	Примечание
380В	Траловая лебедка	Полупроводниковый преобразователь	–
380В	Компрессоры	Асинхронный двигатель	–
380В	Технологические линии	Асинхронный двигатель	–
380В	Вентиляция	Асинхронный двигатель	–
220В	Хозяйственные нужды	Электронагреватели	Электрооборудование камбуза
220В	Системы освещения	Светильники	Используются линейные ЛЛ и ЛН
	Бытовые электроприборы	Бытовая электроника с импульсными блоками питания	Личная электроника экипажа

Экспериментальные исследования ПКЭ на судне проводились в условиях стоянки при работе СЭЭС от вспомогательного дизель-генератора с использованием анализатора ПКЭ Fluke 434. Нагрузка генератора по активной мощности на момент проведения замеров составляла 150 кВт. Основные потребители на момент замера: 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 (рис. 2). Результаты измерений характеристик напряжения в судовой сети приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Результаты измерений характеристик напряжения

Параметр	Напряжение 380 В			Напряжение 220 В		
	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$
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

Результаты измерений показателей несинусоидальности напряжения и тока для двух точек измерений приведены в табл. 4. Сравнительный анализ результатов измерения показателей несинусоидальности напряжения, норм Правил КПМС РМРС и ГОСТ 32144-2013 приведен на рис. 3. ГОСТ 32144-2013 является основополагающим стандартом в области КЭ для береговых сетей на территории РФ [2]. Учет положений стандарта необходим для оценки допустимых уровней искажений при применении светильников различных исполнений и назначений.

Таблица 4 – Результаты измерений несинусоидальности напряжения и тока

Показатель	Напряжение 380 В			Напряжение 220 В			Ток 220 В		
	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_A$	$I_B$	$I_C$
$K_3, \%$	1,5	1,4	1,9	1,9	2,0	2,0	5,4	3,2	3,1
$K_{(3)}, \%$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	2,1	1,8	1,8
$K_{(5)}, \%$	0,6	0,6	1,0	1,0	1,0	1,0	1,6	1,3	1,3
$K_{(7)}, \%$	1,0	0,9	1,3	1,3	1,3	1,4	1,6	1,0	0,9
$K_{(9)}, \%$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,6	0,3	0,3
$K_{(11)}, \%$	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5	0,6	0,2	0,2
$K_{(13)}, \%$	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,3	0,5	0,7	0,7
$K_{(15)}, \%$	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3

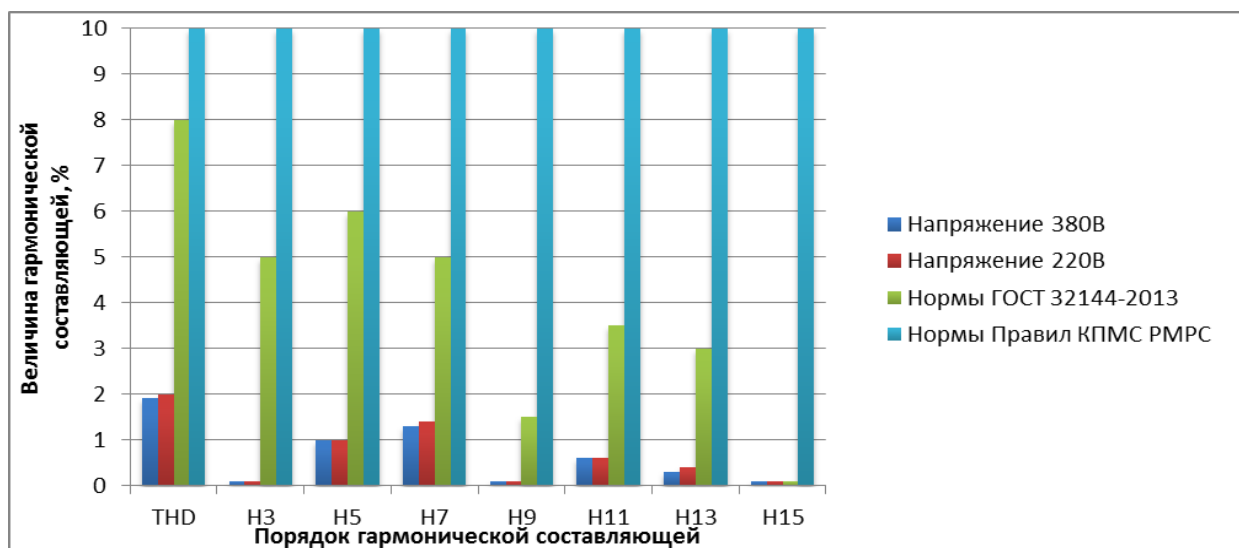


Рисунок 3 – Результаты исследования соответствия уровня несинусоидальности напряжения установленным нормам

Как следует из табл. 3 и 4, ПКЭ в исследуемой СЭЭС при указанном режиме работы удовлетворяют требованиям стандартов с учетом изолированного режима работы системы.

Анализ нагрузок СЭЭС с номинальным напряжением 220 В приведен в табл. 5.

Таблица 5 – Характеристики нагрузок 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
<b>Итого по группам:</b>	
Отопление	57,2
Освещение внутреннее	46,7
Освещение наружное	21,2

Как следует из табл. 5, номинальная мощность внутренних систем освещения судна составляет 46,7 кВт, что соответствует 37% суммарной установленной мощности нагрузок на напряжении 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 2×18 Вт с электромагнитной пускорегулирующей аппаратурой (ПРА). В соответствии с паспортными данными величина тока, потребляемого одним светильником, составляет 0,37 А при  $\cos \varphi = 0,55$ . В системе аварийного освещения применяются аналогичные светильники, в конструкции которых предусмотрена лампа накаливания с байонетным цоколем 2Ш15 (В15d) на напряжение 24В.

Результаты научных исследований люминесцентных ламп свидетельствуют об эмиссии высших гармоник тока в питающую сеть со стороны данных ламп [3]. В связи с этим для определения энергетических характеристик судовых светильников проведены экспериментальные исследования двух образцов с линейными лампами мощностью 2×18 Вт. Тип ПРА – электромагнитный. Результаты исследований приведены в табл. 6, 7. Осциллограммы тока и напряжения исследуемых изделий приведены на рис. 4.

Таблица 6 – Результаты исследования энергетических характеристик судовых люминесцентных светильников

Образец	$U_{ном}, В$	Лампы	$I, А$	$P, Вт$	$S, ВА$	$Q, вар$	$\cos \varphi$	$K_{П}, \%$
Изделие 1	220	2×18 Вт	0,313	37,9	70,1	59	0,54	39
Изделие 2	220	2×18 Вт	0,364	44,4	81,5	68,3	0,55	38,3

Таблица 7 – Результаты исследования несинусоидальности тока, потребляемого судовыми люминесцентными светильниками

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

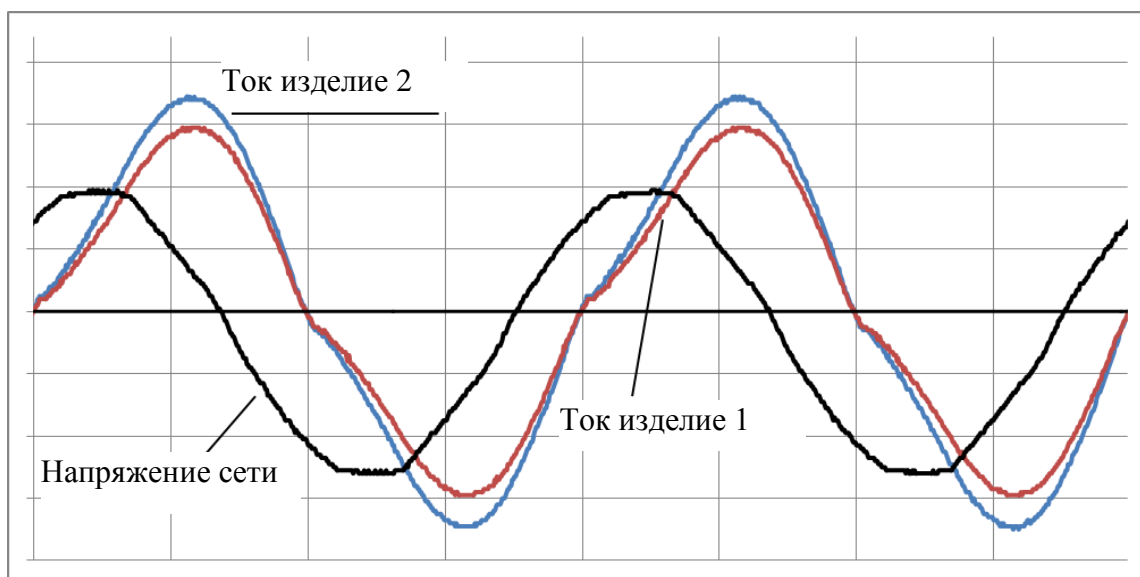


Рисунок 4 – Осциллограммы токов и напряжения для исследуемых светильников

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.

При реконструкции или модернизации систем освещения судов с использованием светодиодных светильников необходимо учитывать уровень эмиссии высших гармоник тока в питающую сеть, поскольку СДЛ характеризуются более высокими показателями несинусоидальности, чем люминесцентные лампы [4]. Предварительный расчет показателей несинусоидальности напряжения обеспечивает прогнозирование влияния высших гармоник на работу силового электрооборудования, устройств автоматики, телемеханики и связи.

Существуют различные методы расчета высших гармоник в системах электроснабжения промышленных объектов [5]. С учетом проведенных экспериментальных исследований расчет целесообразно производить на основе полученных значений ВГ тока в системах освещения судна. Однако применение методик расчета, используемых для промышленных предприятий, осложняется изолированным режимом работы СЭЭС. В связи с работой системы на напряжении до 1 кВ необходимо также учитывать активные сопротивления её элементов. С учетом наличия на судне ряда искажающих нагрузок, включая преобразовательные установки большой мощности, разработка комплексной методики расчета показателей несинусоидальности в СЭЭС для оценки перспектив её модернизации представляет собой актуальную научную задачу.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Российский морской регистр судоходства. Правил классификации и постройки морских судов. Издание, утв. 15.09.2015 г.
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. Компактные люминесцентные лампы: электрические характеристики, проблемы электромагнитной совместимости / В.Ф. Белей // Электротехника. – 2002. – № 7. – С. 48–51.
4. 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.
5. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.

#### ANALYSIS OF POWER QUALITY IN THE SHIPBOARD ELECTRICAL POWER SYSTEM OF HARVESTING VESSEL “ALEXEY ANICHKIN”

M. Kharitonov, Senior lecturer, Kaliningrad State Technical University,  
engineeringlifestyle@gmail.com

V. Beley, Dr. Sc., professor, Kaliningrad State Technical University  
vbeley@klgtu.ru

The results of experimental studies of power quality in electrical power system of harvesting vessel "Alexey Anichkin" are given. The structure of distorting loads and lighting systems of vessel is analyzed. Aspects of lighting system operation are described.

*shipboard electrical power system, lighting system, electrical power quality, nonsinusoidality*