

Научная статья

УДК 629.5.064.5

DOI 10.46845/1997-3071-2022-66-129-142

Результаты экспериментальных и расчетных исследований электромагнитных помех, генерируемых электрооборудованием судовых энергетических установок и их элементов с нелинейными характеристиками

Валерий Феодосиевич Белей¹, Роман Олегович Брижак², Кирилл Викторович Коротких³

^{1,2,3}Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

¹vbeley@klgtu.ru

²brizhak12@gmail.com

³kirill-korotkikh@bk.ru

Аннотация. Показано, что использование в судовых энергетических установках и их элементах полупроводниковой преобразовательной техники и электротехнологий с нелинейными характеристиками обуславливает в судовых электроэнергетических системах электромагнитные помехи, основу которых составляют высшие гармоники. Приведен и дан анализ показателей качества электроэнергии, регламентирующих гармоники напряжения и тока в системах электрооборудования. С целью разработки решений и подходов по обеспечению электромагнитной совместимости электрооборудования судовых энергоустановок и их элементов выполнены экспериментальные исследования электромагнитных помех, обусловленных работой судового электрооборудования, реализованного на основе элементов с нелинейными характеристиками, а также расчетные исследования на математической модели распространения высших гармонических тока и напряжения по элементам судовой электроэнергетической системы. Исследования высших гармонических были проведены в электроэнергетической системе учебного парусного судна "Крузенштерн". Анализ результатов исследований судового электрооборудования – полупроводниковых преобразователей, силовых трансформаторов, частотно-регулируемых электропроводов, светодиодных светильников и др. – показал, что при их работе имеет место эмиссия нечетных гармоник тока от третьей и выше в судовую электроэнергетическую систему. Приведены результаты исследований распространения высших гармонических и связанных с ними эффектов на математической модели, разработанной на основе схемы замещения судовой электроэнергетической системы для высших гармоник нечетного порядка, некратных трем. На математической модели оценен вклад на суммарный коэффициент гармонических составляющих по напряжению от полупроводниковых преобразователей, питающих нагрузку постоянного тока. Установлена взаимосвязь от влияния высших гармонических на работу асинхронных электродвигателей.

© Белей В. Ф., Брижак Р. О., Коротких К. В., 2022

Ключевые слова: судовые энергоустановки, электромагнитные помехи, судовое электрооборудование, судовая электроэнергетическая сеть, высшие гармоники, ток, напряжение.

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90128\20.

Для цитирования: Белей В. Ф., Брижак Р. О., Коротких К. В. Результаты экспериментальных и расчетных исследований электромагнитных помех, генерируемых электрооборудованием судовых энергетических установок и их элементов с нелинейными характеристиками // Известия КГТУ. 2022. № 66. С. 129–142.

Original article

Results of experimental and computational studies of electromagnetic interference generated by the electrical equipment of ship power facilities and their elements with non-linear characteristics

Valeriy F. Beley¹, Roman O. Brizhak², Kirill V. Korotkikh³

^{1,2,3}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

¹vbeley@klgtu.ru

²brizhak12@gmail.com

³kirill-korotkikh@bk.ru

Abstract. It is shown that the use of semiconductor converter equipment and electrical technologies with non-linear characteristics in ship power facilities and their elements causes electromagnetic interference in ship power systems, which are based on higher harmonics. The paper presents the analysis of the power quality indicators that regulate voltage and current harmonics in power supply systems. In order to develop solutions and approaches to ensure the electromagnetic compatibility of electrical equipment of ship power plants and their elements, the following have been performed: experimental studies of electromagnetic interference caused by the operation of ship electrical equipment, implemented on the basis of elements with non-linear characteristics; computational studies on a mathematical model of the propagation of higher harmonics of current and voltage through the elements of the ship's electric power system. Experimental studies of power quality indicators - higher harmonics, caused by the operation of electrical equipment with non-linear characteristics, have been carried out in the electric power system of the "Kruzenshtern" sailing training vessel. An analysis of the results of experimental studies of ship electrical equipment: semiconductor converters, power transformers, frequency-controlled electrical wires, LED lamps, and others showed that during their operation, odd current harmonics from the third and higher are emitted into the ship's electrical power system. The results of studies of the propagation of higher harmonic and related effects on a mathematical model developed on the basis of the equivalent circuit of a ship's electric power system for higher harmonics of an odd order, not multiples of three, are presented. On the mathematical model, the contribution has been estimated to the total coefficient of harmonic voltage components from semiconductor converters that feed the DC load. A relationship has been established from the influence of higher harmonics on the operation of asynchronous electric motors.

Keywords: ship power facilities, electromagnetic interference, ship electrical equipment, ship power network, higher harmonics, current, voltage.

Funding: the study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project no. 20-38-90128\20.

For citation: Beley V. F., Brizhak R. O., Korotkikh K. V. Results of experimental and computational studies of electromagnetic interference generated by the electrical equipment of ship power facilities and their elements with non-linear characteristics // *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2022;(66):129–142.(in Russ.).

ВВЕДЕНИЕ

Широкое внедрение на судах полупроводниковой преобразовательной техники и электротехнологий, реализованных на нелинейных элементах, обуславливают в судовых электроэнергетических системах кондуктивные электромагнитные помехи, основу которых составляют высшие гармонические. Гармоники тока, эмитируемые в сеть нелинейными элементами электрооборудования судовых энергетических установок и их элементов, распространяясь по элементам электроэнергетической системы, вызывают ряд негативных явлений: снижение эффективности генерации, передачи и использования электрической энергии; увеличение токов и напряжений гармоник вследствие параллельного и последовательного резонансов; старение изоляции электрооборудования судовых энергоустановок и их элементов, сокращение вследствие этого его срока службы; ложную работу оборудования; шум в линиях связи. По мнению специалистов, решение проблемы высших гармонических является одной из важнейших при обеспечении электромагнитной совместимости работы электрооборудования судовых энергетических установок и их элементов. С целью разработки решений и подходов по обеспечению электромагнитной совместимости судового электрооборудования необходимо провести экспериментальные исследования электромагнитных помех, обусловленных работой судового электрооборудования, реализованных на нелинейных элементах, а также расчетные исследования на математической модели распространения высших гармонических по элементам судовой электроэнергетической системы.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Результаты экспериментальных исследований электромагнитных помех, обусловленных работой судового электрооборудования, реализованных на основе нелинейных элементов

Электромагнитные помехи (ЭМП), обусловленные нелинейными электроприемниками, согласно нормативным документам РФ характеризуются следующими основными показателями: суммарным коэффициентом несинусоидальности ($K_{\text{нсU}}$, % – THD), n -гармонической составляющей напряжения ($K_{U(n)}$) кривой напряжения, колебаниями напряжения (δU) и его производной – фликером [1–3]:

$$K_{\text{НСU}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N (U_{(n)}^2)}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100 \%; \quad (1)$$

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{(\text{НОМ})}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где $U_{(n)}$ – действующее значение амплитуды n -ой гармоники напряжения; n – порядок гармонической составляющей напряжения; N – порядок последней из учитываемых гармонических составляющих напряжения.

Следует отметить, что важнейшим фактором, определяющим влияние ЭМП на работу судовой электроэнергетической сети, являются гармоники тока, эмиттируемые нелинейными электроприемниками в питающую сеть (рис. 1). Поэтому стандарты ряда стран регламентируют гармоники тока [1, 4].

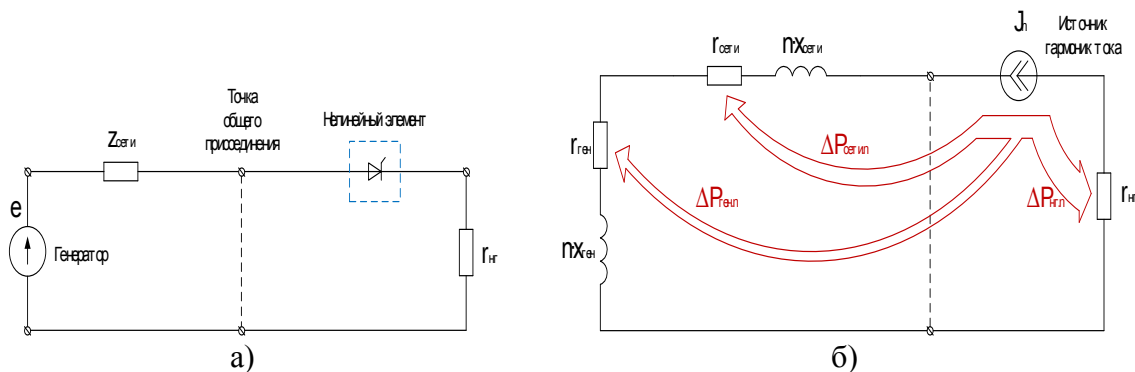


Рис. 1. Диаграмма гармонического потока мощности в системе переменного тока:
а) электрическая схема однофазной сети; б) поток мощности гармонической частоты

Fig. 1. Diagram of harmonic power flow in an alternating current system: a) electrical circuit of a single-phase network; b) harmonic frequency power flow

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N (I_{(n)}^2)}}{I_1} \cdot 100\%; \quad (3)$$

$$K_{I(n)} = \frac{I_{(n)}}{I_{(1)}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $I_{(n)}$ – действующее значение амплитуды n -й гармоники тока; n – порядок гармонической составляющей тока; N – порядок последней из учитываемых гармонических составляющих.

Экспериментальные исследования показателей качества электроэнергии (ПКЭ) – высших гармонических, обусловленных эксплуатацией нелинейных судовых электроприемников – были выполнены на учебном парусном судне (УПС) "Крузенштерн" (рис. 2). При проведении исследований использовались анализатор ПКЭ и цифровой осциллограф (рис. 3).

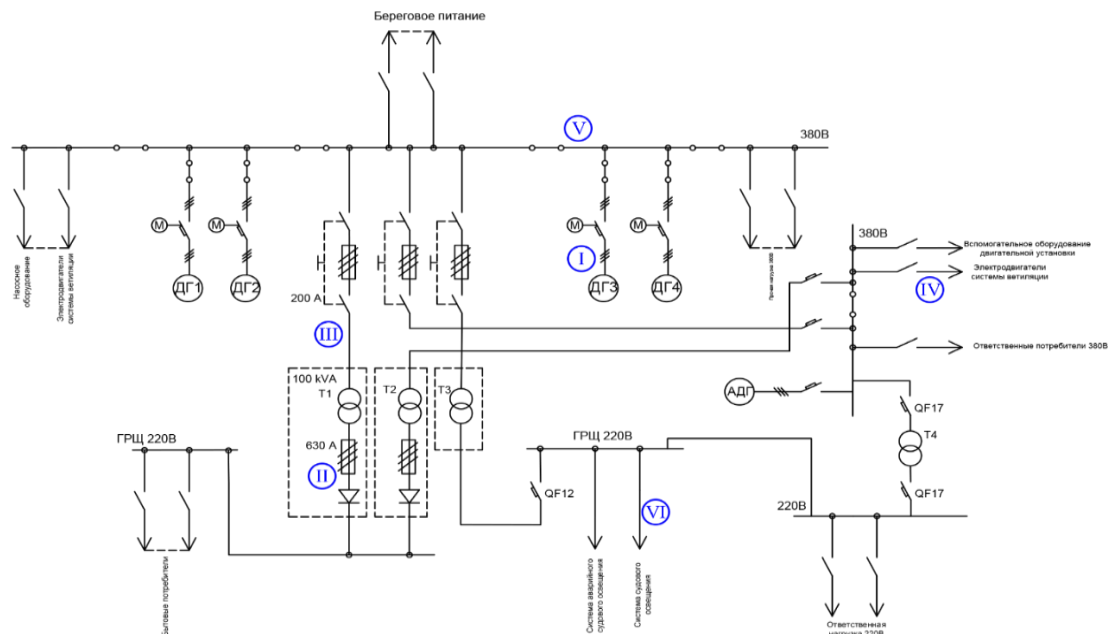


Рис. 2. Электрическая схема электроэнергетической системы УПС "Круzenshtern" (точки измерений ПКЭ от 1 до 6)

Fig. 2. Electrical diagram of the STV "Kruzenshtern" electric power system (points of measurement of PQI from 1 to 6)

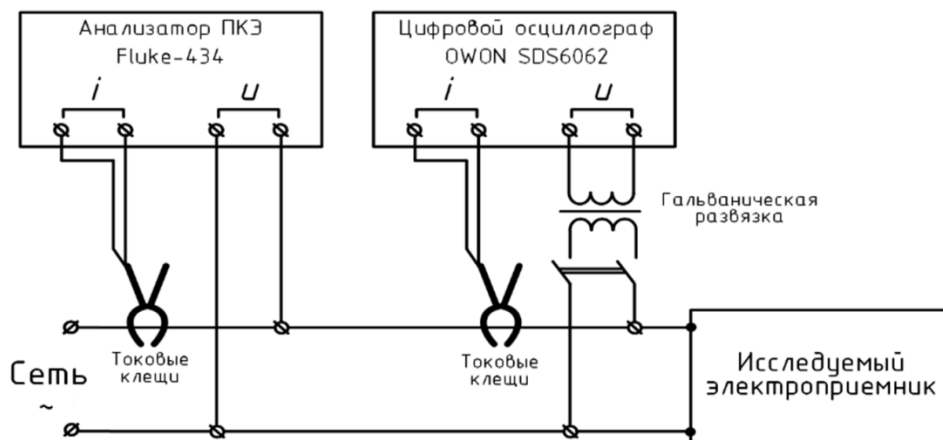


Рис. 3. Схема подключения контрольно-измерительного оборудования для исследования показателей качества электроэнергии

Fig. 3. Connection diagram of control and measuring equipment for the study of power quality indicators

Результаты исследований ПКЭ на входе шестифазного выпрямителя (обмотка низкого напряжения трансформатора T1), питающего нагрузку постоянного тока, и на входе обмотки высокого напряжения трансформатора T1 приведены на рис. 4 и в табл. 1.



Рис. 4. Осциллограммы напряжения и тока в цепи низкой стороны трансформатора
Fig. 4. Voltage and current waveforms in the low side circuit of the transformer

Таблица 1. Значения показателей качества электроэнергии в цепи трансформатора Т1 во вторичной и первичной его обмотках
Table 1. Values of power quality indicators in the circuit of the transformer T1 in its secondary and primary windings

Параметры, место измерений	$\delta U, \%$	Гармоники напряжения		Гармоники тока		Фликер
		THD, %	$H_{N\%7}$	THD, %	$H_{N\%5}$	
Трансформатор Т1, точка II (рис. 1)	0,86	3,5	2,6	17,5	11,6	0,58
Трансформатор Т1, точка III (рис. 1)	0,32	3,1	2,3	19,2	12,5	0,58

Состав гармоник тока, эмитируемых в питающую сеть полупроводниковым преобразователем в зависимости от его фазности:

$$N = 6 \cdot p \pm 1; \quad I_n \approx I_1 / N, \quad (5)$$

где $p = 1, 2 \dots n$; I_1 и I_n – соответственно первая и N гармоники тока.

Таблица 2. Состав гармоник тока, эмитируемых в питающую сеть полупроводниковым преобразователем в зависимости от его фазности
Table 2. Composition of current harmonics emitted into the supply network by a semiconductor converter, depending on its phase

Фазность	Состав гармоник тока									
Шестифазный	5	7	11	13	17	19	23	25	29	31
Двенадцатифазный	–	–	11	13	–	–	23	25	–	–
Двадцатичетырехфазный	–	–	–	–	–	–	23	25	–	–

В качестве примера состав гармоник тока (N), эмитируемых в питающую сеть выпрямителем асинхронного электропривода с частотным регулированием (рис. 5), определяется выражением (5). Поскольку выпрямитель в рассматривае-

мой схеме (рис. 5) шестифазный, то в питающую сеть генерируются 5, 7, 11, 13-я гармоники тока и так далее (табл. 2).

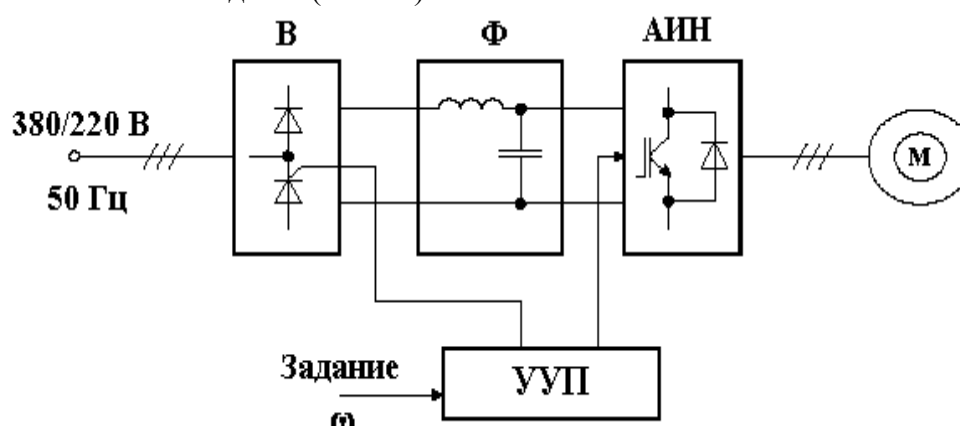


Рис. 5. Функциональная схема частотно-регулируемого электропривода
Fig. 5. Functional diagram of the frequency-controlled electric drive

На основе экспериментальных исследований однофазного трансформатора гармонические составляющие тока холостого хода представлены на рис. 6.

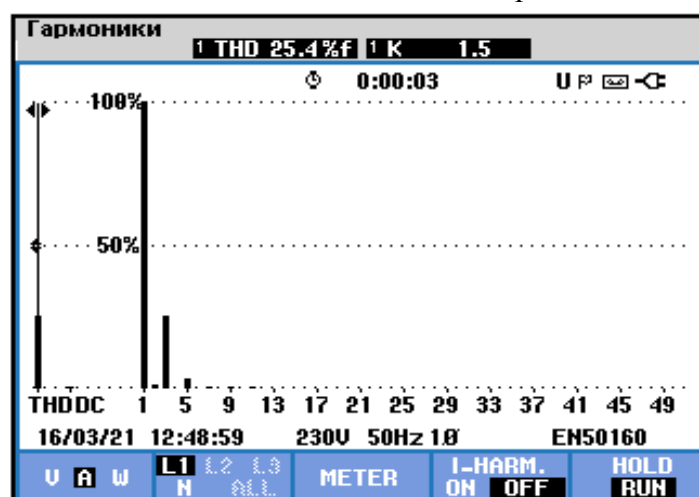


Рис. 6. Уровень гармоник тока однофазного трансформатора в режиме холостого хода: $k_1 = 25,4\%$; (THD = 25,4%, $k_3 = 25,3\%$; $k_5 = 3,4\%$; $k_7 = 0,7\%$; $k_9 = 0,61\%$; $k_{11} = 0,55\%$)

Fig. 6. Level of current harmonics of the single-phase transformer in no load operation $k_1 = 25,4\%$; (THD = 25,4%, $k_3 = 25,3\%$; $k_5 = 3,4\%$; $k_7 = 0,7\%$; $k_9 = 0,61\%$; $k_{11} = 0,55\%$)

Как следует из полученных данных, наибольшей является третья гармоника тока. Однако схема соединения обмоток трансформатора Т1 – Δ/Δ , поэтому третья гармоника и кратные ей в питающую сеть не проникают.

В настоящее время на судах внедряются светодиодные светильники, отличающиеся эффективностью и высоким сроком службы [4].

Таблица 3. Характеристики распространенных источников света
Table 3. Characteristics of common light sources

Тип лампы	Теоретический предел светоотдачи, лм/Вт	Достигнутая светоотдача, лм/Вт	Срок службы, тыс. ч	Вредные вещества
Накаливания	53,5	15	1	Нет
Галогеновая		20	10	
Линейная люминесцентная	Для источника белого света 254	108	25	До 10 мг ртути
Компактная люминесцентная		70	12	
Светодиодная	Более 300	102 (лампа) 205 (СД)	90	Нет

На рис. 7 представлены осциллограммы линейного тока и фазного напряжения светодиодной лампы "Xavax 9 Вт". В табл. 4 приведены результаты обработки экспериментальных данных.

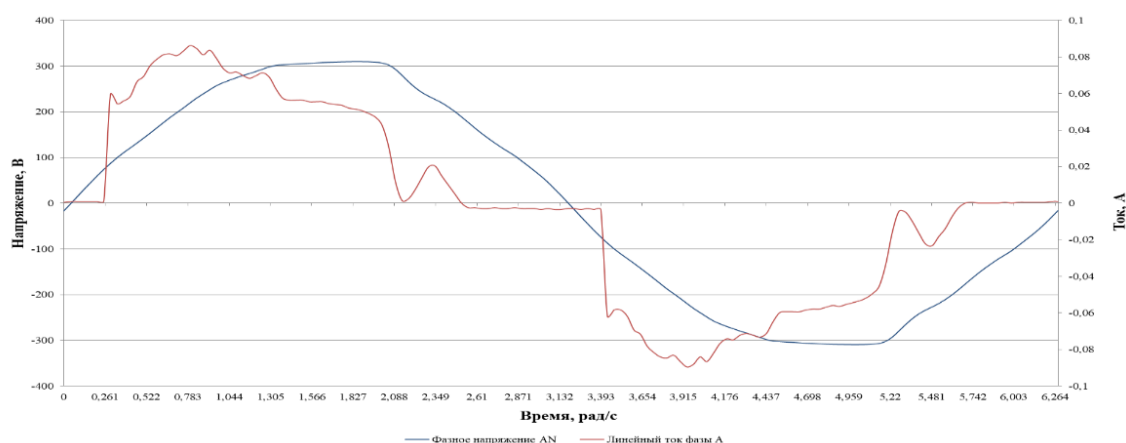


Рис. 7. Осциллограммы линейного тока и фазного напряжения СДЛ "Xavax 9 Вт"
Fig. 7. Line current and phase voltage waveforms of Xavax 9W LED lamp

Таблица 4. Результаты экспериментальных исследований показателей несинусоидальности потребляемого тока светодиодными лампами

Table 4. Results of experimental studies of non-sinusoidality indicators of the current consumed by LED lamps

Тип лампы	U, В	I, мА	Суммарный коэффициент гармонических составляющих по току (THD), %	Содержание гармонической составляющей тока, в % от основной гармоники				
				H3	H5	H7	H9	H11
"Xavax 9 Вт"	223,2	51	33,5	23	18	7	7	2
"Philips 11 Вт"	222,9	82	128	82	58	43	40	37

Анализ результатов экспериментальных исследований судового электрооборудования, реализованного на нелинейных элементах, показал, что при их ра-

боте имеет место эмиссия нечетных гармоник тока от трех и выше. Как известно, третьи и кратные им гармоники образуют нулевую последовательность [1]; 5, 11-я и далее – обратную; 7, 13-я и далее – прямую последовательность. Таким образом, исследование распространения высших гармонических и связанных с ними эффектов следует проводить на математической модели, разработанной на основе схемы замещения судовой электроэнергетической системы для высших гармоник нечетного порядка, некратных трем [5, 6].

2. Результаты расчетных исследований распространения высших гармонических по элементам судовой электроэнергетической системы

Судовая электроэнергетическая система УПС "Крузенштерн" имеет изолированную нейтраль, нагрузка носит преимущественно симметричный характер, поэтому можно рассмотреть однолинейную схему замещения. Такая схема для высших гармоник нечетного порядка, некратных трем, разработанная на основе электрической схемы электроэнергетической системы УПС "Крузенштерн", приведена на рис. 8 [6, 7].

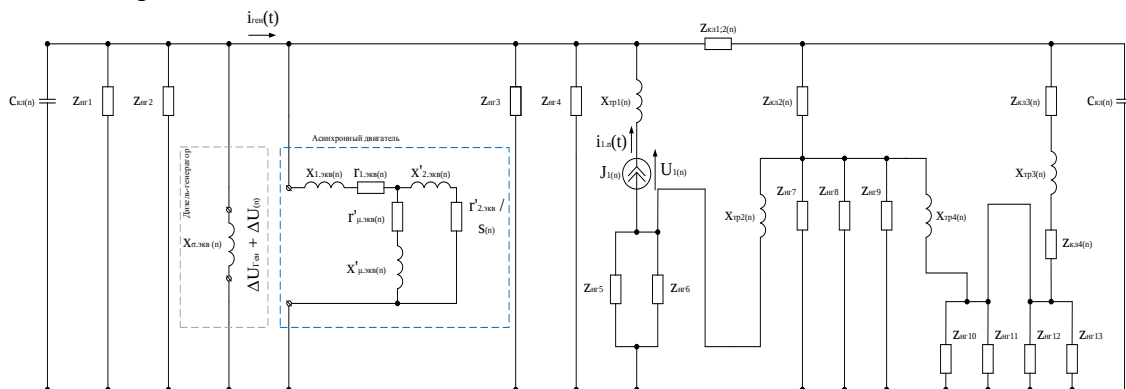


Рис. 8. Схема замещения судовой электроэнергетической системы УПС "Крузенштерн" для высших гармоник нечетного порядка, некратных трем
Fig. 8. Equivalent circuit of the ship electric power system of STV Kruzenshtern for higher harmonics of odd order and non-multiples of three

Технические данные генерирующего оборудования, используемого на судне, представлены в табл. 5.

Таблица 5. Состав генерирующего оборудования УПС "Крузенштерн"
Table 5. Composition of the generating equipment of STV "Kruzenshtern"

Тип	Количество (м), шт.	S, кВА	P, кВт	U _{НОМ} , В	I _{НОМ} , А	n _{НОМ} , об/мин
Дизель-генераторы						
LSAM46.2L C6/4	2 (№ 1 и № 3)	215	172	400	316	1500
LSAM46.2L6	2 (№ 2 и № 4)	187	150	390	271	1500

Технические данные кабельных линий, используемых на судне, приведены в табл. 6.

Таблица 6. Состав кабельного оборудования УПС "Крузенштерн"
Table 6. Composition of the cable machinery of STV "Kruzenshtern"

№ п/п	Кабель от – к	Попереч- ное сече- ние (q), мм ²	Длина кабеля (l), м	Количество параллельных кабелей (m), шт.	$r_{кл} = \frac{r_0 \cdot l}{m}$	$x_{кл} = \frac{x_0 \cdot l}{m}$
1	Генератор – ГРЩ	70	10	2	1,4	0,375
2	ГРЩ – распред. сеть 380 В	70	40	1	11,2	3
3	ГРЩ – транс- форматор № 3	35	40	2	11,2	1,96
4	Трансформатор № 3 – распре- д. сеть 220 В	70	6	2	0,84	0,225

Технические данные трансформаторов, используемых на судне, представ-
лены в табл. 7.

Таблица 7. Состав трансформаторного оборудования УПС "Крузенштерн"
Table 7. Composition of the transformer equipment of STV "Kruzenshtern"

№	Тип	S, кВА	$U_{ВН.ном}/U_{НН.ном},$ В	$I_{ВН.ном}/I_{НН.ном},$ А	$r_{тр},$ Ом	$x_{тр},$ Ом	$Z_{кз},$ Ом
1, 2, 3, 4	ДТ- 100	100	380/220	150/247	0,0085	0,0221	0,0365

Напряжение n-й гармоники на шинах дизель-генератора (а при пренебре-
жении сопротивлением тракта дизель-генератор – шины ГРЩ на шинах ГРЩ) бу-
дет определяться по выражению [7]:

$$U_{(n)} = -I_{(n)} \cdot Z_{экв(n)}, \quad (6)$$

где $I_{(n)}$ – ток n-й гармоники, А;

$Z_{экв(n)}$ – эквивалентное полное сопротивление сети для n-гармоники,
Ом.

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора явнополюсного
генератора без учета вытеснения тока в пазу для n-й гармоники тока [6]:

$$x_{дг(n)} = n \cdot k_{2(n)} \cdot x_2, \quad (7)$$

где n – номер гармоники;

$k_{2(n)}$ – среднее значение коэффициента для 5 и 7-й гармоник, равен 0,75;

x_2 – сопротивление обратной последовательности генератора, Ом.

Полное сопротивление асинхронного двигателя для n-й гармоники при
резком появлении поверхностного эффекта ($r_{k(n)} = r_k \sqrt{n}$) [6]:

$$Z_{ад(n)} = \sqrt{r_{k.ад(n)}^2 + x_{k.ад(n)}^2} = \sqrt{n^2 \cdot x_{k.ад}^2 + n \cdot r_{k.ад}^2} \approx n \cdot x_{k.ад}, \quad (8)$$

где $r_{k.ад(n)}$, $x_{k.ад(n)}$ – активное, реактивное сопротивления короткого замыка-
ния асинхронного двигателя на частоте n-й гармоники, Ом;

$r_{k.ад}$, $x_{k.ад}$ – активное, реактивное сопротивления короткого замыкания
асинхронного двигателя при промышленной частоте, Ом.

Полное сопротивление m -трансформатора для n -й гармоники [6, 7]:

$$Z_{\text{тр}m(n)} \approx n \cdot x_{k.\text{тр}}, \quad (9)$$

где m – номер трансформатора (1, 2, 3, 4);

$x_{k.\text{тр}}$ – сопротивление короткого замыкания трансформатора при промышленной частоте, Ом.

Полное сопротивление фазных проводов кабельной линии для n -й гармоники [6]:

$$Z_{\text{кл}m(n)} = \sqrt{n^2 \cdot x_{\text{ф.с}}^2 + n \cdot r_{\text{ф.с}}^2}, \quad (10)$$

где m – номер кабельной трассы (1, 2, 3, 4);

$x_{\text{ф.с}}$ – реактивное сопротивление фазы сети на частоте 50 Гц, Ом;

$r_{\text{ф.с}}$ – активное сопротивление фазы сети на частоте 50 Гц, Ом.

Полное сопротивление нагрузки [7]:

$$Z_{\text{нг}m} = \sqrt{x_{\text{нг}}^2 + r_{\text{нг}}^2}, \quad (11)$$

где m – номер нагрузки (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13);

$x_{\text{нг}}$ – реактивное сопротивление нагрузки на частоте 50 Гц, Ом;

$r_{\text{нг}}$ – активное сопротивление нагрузки при промышленной частоте, Ом.

Коэффициент n -й гармонической составляющей тока [7]:

$$K_{I(n)} = \frac{I_{(n)}}{I_{\text{ном}}}, \quad (12)$$

где I_n , $I_{\text{ном}}$ – действующее значение тока n -й гармоники и номинального фазного, А.

В табл. 8 сведены расчетные и экспериментальные данные, характеризующие уровни гармоник тока и напряжения 5, 7, 11 и 13-го порядков, суммарные коэффициенты гармонических составляющих по току и напряжению в рассматриваемой электроэнергетической сети УПС "Крузенштерн".

Таблица 8. Расчетные и экспериментальные данные, характеризующие уровни гармоник тока и напряжения 5, 7, 11 и 13-го порядков в рассматриваемой сети УПС "Крузенштерн"

Table 8. Calculation and experimental data characterizing the levels of current and voltage harmonics of the 5th, 7th, 11th and 13th orders in the considered network of STV "Kruzenshtern"

Параметр	Номер гармоники	Расчетные значения
Полное сопротивление n -й гармонической составляющей $z_{\text{экв}(n)}$, Ом	H5	0,56
	H7	0,6
	H11	0,44
	H13	0,35
Ток n -й гармонической составляющей $I_{(n)}$, А	H5	8,63
	H7	9,88
	H11	2,193
	H13	2,824
Напряжение n -й гармонической составляющей $U_{(n)}$, В	H5	4,83
	H7	5,934
	H11	0,981
	H13	1,007

Окончание таблицы 8

Параметр	Номер гармоник	Расчетные значения	Данные, снятые с анализатора ПКЭ "Fluke-434"
Коэффициент n-й гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$, %	H5	2,198	2,2
	H7	2,699	2,6
	H11	0,446	0,4
	H13	0,458	0,5
Коэффициент n-й гармонической составляющей тока $K_{I(n)}$, %	H5	9,746	9,6
	H7	11,158	10,6
	H11	2,476	2,7
	H13	3,189	3,0
Суммарный коэффициент гармонических составляющих по напряжению $K_{\Sigma U(n)}$, %	–	3,596	3,5
Суммарный коэффициент гармонических составляющих по току $K_{\Sigma I(n)}$, %	–	16,162	15,9

Токи 5, 7, 11 и 13-й высших гармоник, как наибольшие по величине и характеру воздействия, создают моменты прямой и обратной последовательностей, их влияние на средний момент незначительно (менее 2 %). Однако это приводит к возникновению вибраций вала асинхронных двигателей на частоте 6-й и 12-й.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментальные исследования высших гармонических, обусловленных эксплуатацией электрооборудования с нелинейными характеристиками судовых энергоустановок и их элементов, проведенные на УПС "Крузенштерн", показали, что при их работе имеет место эмиссия в судовую сеть нечетных гармоник тока от 3-й и выше.

2. На основе схемы замещения судовой электроэнергетической системы "Крузенштерн" для высших гармоник нечетного порядка, некратных трем, составлена математическая модель распространения высших гармонических по элементам судовой электроэнергетической системы.

3. На математической модели оценен вклад в суммарный коэффициент гармонических составляющих по напряжению от полупроводниковых преобразователей, питающих нагрузку постоянного тока (3,6 %) (рис. 2, позиция II).

4. Установлена взаимосвязь от влияния высших гармонических на работу асинхронных электродвигателей. Наличие 5 и 7-й гармоник напряжения приводит к возникновению вибраций вала двигателя на частоте 300 Гц, 11 и 13-ой гармоник – на частоте 600 Гц. Влияние моментов данных гармоник на средний момент незначительно, однако при совпадении с частотой собственных колебаний вращающихся частей электропривода уровень 5, 7, 11 и 13-й гармоник напряжения может повыситься.

Список источников

1. Управление качеством электроэнергии: учеб. пособие для вузов / И. И. Карташев, Р. Г. Шаманов, А. Ю. Воробьев, Ю. В. Шаров, В. Н. Тульский; под ред. Ю. В. Шарова. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 360 с.
2. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XI "Электрическое оборудование". НД № 2-020101–138. Санкт-Петербург, 2021. URL: <http://www.normacs.ru/Doclist/doc/1unh4.html> (дата обращения: 05.06.2022).
3. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартиформ, 2014. 19 с.
4. Арриллага Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
5. Белей В. Ф., Брижак Р. О. Теоретический анализ электромагнитных помех, обусловленных работой электрооборудования судовых энергетических установок и их элементов // Известия КГТУ, 2021. № 63. С. 103–115.
6. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1984. 160 с.
7. Шидловский А. К., Жаркин А. Ф. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях; под ред. И. Л. Макаренко И. Л. Киев: Наукова думка, 2005. 211 с.

References

1. Kartashev I. I., Shamanov R. G., Vorobyov A. Yu., Sharov Yu. V., Tulskey V. N. *Upravleniye kachestvom elektroenergii: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Power quality management: textbook for universities]. Moscow, MEI Publ., 2006, 360 p.
2. Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva. *Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Chast' XI "Elektricheskoye oborudovaniye"* [Russian Maritime Register of Shipping. Rules for the classification and construction of sea vessels. Part XI "Electrical equipment"], no 2-020101–138. Saint-Petersburg, 2021. Available at: <http://www.normacs.ru/Doclist/doc/1unh4.html> (Accessed 5 July 2022).
3. State Standard 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 19 p. (In Russian).
4. Arryllaga J., Bradley D., Bodger P. *Garmoniki v elektricheskikh sistemakh* [Power system harmonics]. Moscow, Energoatomizdat, 1990, 320 p.
5. Beley V. F., Brizhak R. O. *Teoreticheskiy analiz elektromagnitnykh pomekh, obuslovlennykh rabotoy elektrooborudovaniya sudovykh energeticheskikh ustanovok i ikh elementov* [Theoretical analysis of electromagnetic interference caused by the operation of electrical equipment of ship power plants and their elements]. *Izvestiya KGTU*, 2021, no. 63, pp. 103–115.

6. Zhezhelenko I. V. *Vysshiye garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatiy* [Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises]. Moscow, Energoatomizdat, vol. 2, 1984, 160 p.

7. Shidlovskiy A. K., Zharkin A. F. *Vysshiye garmoniki v nizkovol'nykh elektricheskikh setyakh* [Higher harmonics in low-voltage electrical networks]. Kiev, Naukova dumka Publ., 2005, 211 p.

Информация об авторах

В. Ф. Белей – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой энергетики

Р. О. Брижак – аспирант кафедры энергетики

К. В. Коротких – магистр кафедры энергетики

Information about the authors

V. F. Beley – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Power Engineering Department

R. O. Brizhak – PhD student of the Power Engineering Department

K. V. Korotkikh – Master degree student of the Power Engineering Department

Статья поступила в редакцию 14.07.2022; одобрена после рецензирования 18.07.2022; принята к публикации 19.07.2022

The article was submitted 14.07.2022; approved after reviewing 18.07.2022; accept for publication 19.07.2022