

УДК 621.316.1

Повышение эффективности системы электроснабжения судостроительного завода

В. Ф. Белей, К. В. Коротких*

*Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;
e-mail: kirill.korotkikh@klgtu.ru

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
18.10.2024;
получена
после доработки
25.11.2024;
принята
к публикации
27.11.2024

Ключевые слова:

судостроительный
завод,
система
электроснабжения,
гармонические
составляющие, ток,
напряжение, нагрузка

Развитие судостроительной отрасли предполагает рост уровня конкурентоспособности выпускаемой продукции, замену устаревшего электротехнического оборудования, повышение эффективности систем электроснабжения. Внедрение новейших технологий обеспечивает снижение массогабаритных показателей оборудования, расширяет их функциональные возможности, но эти технологии основаны на базе нелинейных и несимметричных электроприемников, что обуславливает негативное влияние на питающую сеть. Система электроснабжения Прибалтийского судостроительного завода "Янтарь" отличается значительной долей нелинейных, несимметричных нагрузок, зачастую однофазного исполнения. Комплексный подход при анализе системы электроснабжения завода включал экспериментальные исследования нелинейных электроприемников, в ходе которых установлен высокий уровень высших гармоник тока (3-, 5- и 7-го порядков). Одним из эффективных методов снижения несимметрии напряжений по нулевой последовательности является замена трансформатора со схемой соединений обмоток Y/Y_0 на трансформатор со схемой Δ/Y_0 . Схемные, технологические решения (выделение нелинейных нагрузок на отдельную систему шин; повышение фазности полупроводниковых преобразователей; подключение нелинейной нагрузки к системе с большей мощностью короткого замыкания) и фильтрующие устройства (узкополосные фильтры, фильтросимметрирующие устройства и активные фильтры) используются для повышения эффективности системы электроснабжения при ее работе в условиях роста искажающих нагрузок.

Для цитирования

Белей В. Ф. и др. Повышение эффективности системы электроснабжения судостроительного завода. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 4. С. 598–610. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-598-610>.

Efficiency increasing of a shipyard power supply system

Valeriy F. Beley, Kirill V. Korotkikh*

*Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia;
e-mail: kirill.korotkikh@klgtu.ru

Article info

Received
18.10.2024;
received
in revised
25.11.2024;
accepted
27.11.2024

Key words:

shipyard,
power supply system,
harmonic components,
current,
voltage, load

Abstract

The development of the shipbuilding industry involves increasing the competitiveness of manufactured products, replacing obsolete electrical equipment, and increasing the efficiency of power supply systems. The introduction of the latest technologies reduces the weight and size of equipment, expands their functionality, but these technologies are based on nonlinear and asymmetrical power consumers, which causes a negative impact on the power grid. The power supply system of the Baltic Shipyard "Yantar" is characterized by a significant share of nonlinear, asymmetrical loads, often single-phase. An integrated approach to the analysis of the plant's power supply system included experimental studies of nonlinear power consumers, during which a high level of higher current harmonics (3rd, 5th and 7th orders) was established. One of the effective methods for reducing zero-sequence voltage asymmetry is to replace a transformer with a Y/Y_0 winding connection diagram with a Δ/Y_0 diagram. Circuit and technological solutions (separation of nonlinear loads to a separate bus system; increasing the phase of semiconductor converters; connecting a nonlinear load to a system with greater short-circuit power) and filtering devices (narrow-band filters, filter-balancing devices and active filters) are used to increase the efficiency of the power supply system when it operates under conditions of increasing distorting loads.

For citation

Beley, V. F. et al. 2024. Efficiency increasing of a shipyard power supply system. *Vestnik of MSTU*, 27(4), pp. 598–610. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-598-610>.

Введение

Государственная программа "Развитие судостроения и техники для освоения шельфовых месторождений на 2013–2030 гг."¹ предусматривает повышение уровня конкурентоспособности продукции российского судостроения на отечественном и мировом рынках. Технология реализации такого подхода включает замену устаревшего электротехнического оборудования, рост эффективности систем электроснабжения, снижение потерь электрической энергии; повышение надежности и безопасности оперативного обслуживания.

Широкое внедрение новейших технологий обеспечивает снижение массогабаритных показателей оборудования, расширяет их функциональные возможности, однако эти технологии основаны на базе нелинейных и несимметричных электроприемников, что обуславливает негативное влияние на питающую сеть. В связи с ростом нелинейных нагрузок в системах электроснабжения становится очевидной необходимость нормирования уровня высших гармоник (ВГ) тока. Нормирование определяет требования к производителям электрооборудования по уровню эмиссии высших гармоник тока в питающую сеть и способствует реализации мер по снижению уровня эмиссии гармоник тока на судостроительных предприятиях.

Система электроснабжения Прибалтийского судостроительного завода "Янтарь" (г. Калининград) отличается значительной долей нелинейных, несимметричных нагрузок. В результате экспериментальных исследований нелинейных электроприемников завода установлен высокий уровень высших гармоник тока (преимущественно 3-, 5- и 7-го порядков). Одним из эффективных методов снижения несимметрии напряжений по нулевой последовательности является замена трансформатора со схемой соединений обмоток Y/Y_0 на трансформатор со схемой Δ/Y_0 . В ходе исследования показаны схемные, технологические решения и фильтрующие устройства, используемые для повышения эффективности системы электроснабжения при ее работе в условиях роста искажающих нагрузок.

Материалы и методы

В работе предложен комплексный подход при проведении исследований системы электроснабжения Прибалтийского судостроительного завода (ПСЗ) "Янтарь", отличительной особенностью которой является значительная доля нелинейных, несимметричных нагрузок, зачастую однофазного исполнения. При решении задачи повышения уровня конкурентоспособности продукции российского судостроения на ПСЗ "Янтарь" намечена замена используемых трансформаторов (ввиду значительного превышения ими нормативных сроков эксплуатации) на современные энергоэффективные трансформаторы.

Для обоснования методов повышения эффективности системы электроснабжения судостроительного завода использованы результаты эмпирического и теоретического исследования. Измерение показателей качества электрической энергии, снятие оцифрованных кривых тока и напряжения осуществлялись с помощью анализатора Fluke-434.

Результаты и обсуждение

Система электроснабжения судостроительного завода "Янтарь" выполнена по двухуровневой схеме, предполагающей распределение электроэнергии от четырех секций шин 6 кВ к четырем головным подстанциям (ПС): ЦРТП № 1 – центральная распределительная подстанция; ПС № 7; ПС № 47; ПС № 27 (рис. 1).

В составе системы электроснабжения завода эксплуатируется значительная доля нелинейных электроприемников (ЭП) трех- и однофазного исполнения (табл. 1).

Таблица 1. Доля нелинейных электроприемников
Table 1. Share of nonlinear electrical receivers

Тип электрооборудования и приборов	% от установленной мощности всех электроприемников завода
Сварочные аппараты	19
Электротермические установки и гальванические ванны	12
Светодиодные лампы	3
Линейные и компактные люминесцентные лампы	2
Офисные электроприемники	Более 6

¹ Государственная программа РФ "Развитие судостроения и техники для освоения шельфовых месторождений на 2013–2030 годы". Утверждена постановлением Правительства РФ № 304 от 15 апреля 2014 г. (с изменениями от 19 августа 2022 г.). URL: https://www.sudprom2030.ru/files/public/PP_1454.pdf.

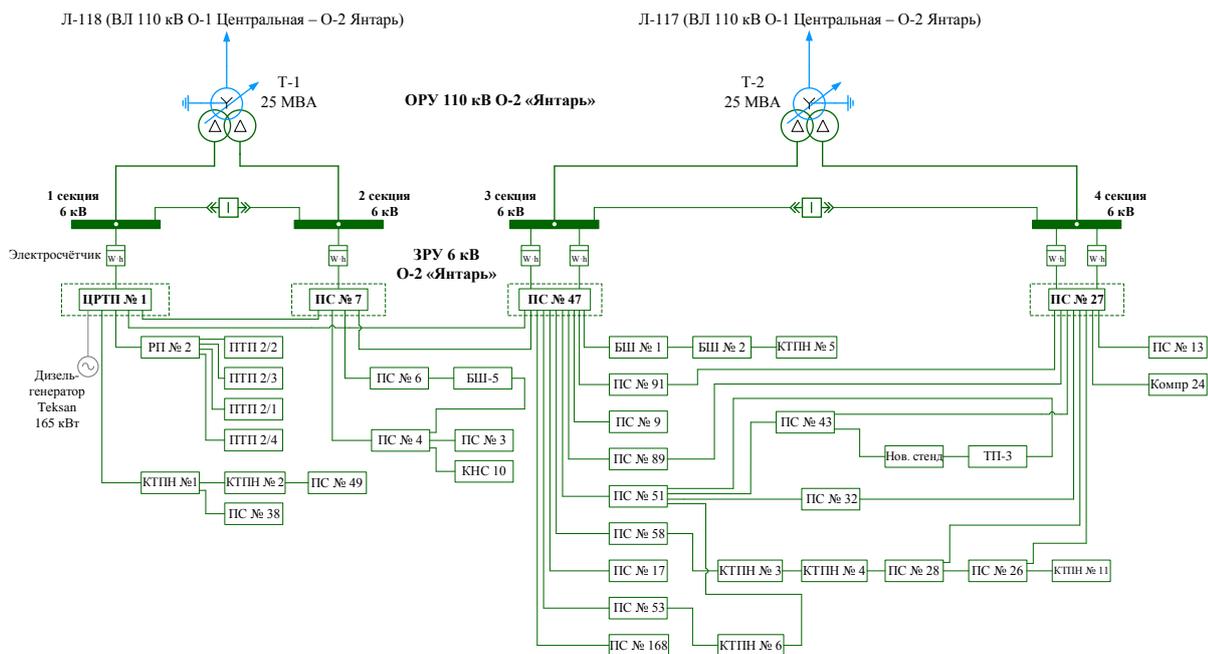


Рис. 1. Структурная схема системы электроснабжения ПСЗ "Янтарь"
 Fig. 1. Block diagram of the BS "Yantar" power supply system

Электроприемники офисного назначения

Более 30 % работников на судостроительном заводе заняты офисной деятельностью, что характеризует высокую долю электроприемников офисного назначения. В связи с этим были проведены экспериментальные исследования гармонических составляющих и энергетических характеристик оборудования офисного назначения с помощью анализатора качества электроэнергии Fluke-434 (табл. 2):

- 1) компьютера: процессор Intel(R) Celeron(R) CPU N1620 @ 2,70 GHz, ОЗУ 4 Гб, 64-разрядная операционная система;
- 2) ноутбука: HP Laptop 15-ra0xx, процессор Intel(R) Celeron(R) CPU N3060 @ 1,60 GHz, ОЗУ 4 Гб, 64-разрядная операционная система.

Таблица 2. Результаты экспериментальных исследований гармонических составляющих и энергетических характеристик офисных электроприемников
 Table 2. Results of experimental studies of harmonic components and energy characteristics of office electrical receivers

Приемник	Параметр											
	U, В	P, Вт	Q, вар	S, ВА	K _i , %	% высших гармоник тока фазы A от основной гармоники						
						3	5	7	9	11	13	15
Компьютер	224	68,7	81,4	106,5	116	81,5	64,5	40,5	19,4	6,0	6,7	11,2
Ноутбук	224	37,2	69,5	78,8	175	87,6	73,9	55,4	44,4	39,7	41,9	43,0
Роутер	234	9	0,4	10	137	86,4	81,7	72,1	62,0	42,5	27,6	19,8

Измерения проводились с учетом большого количества включенных программ на ноутбуке и компьютере (рис. 2).

Результаты исследований (табл. 2) свидетельствуют об эмиссии нелинейными офисными электроприемниками в низковольтную электрическую сеть завода всего спектра высших гармонических составляющих тока, преобладающими из которых являются гармоники 3-, 5- и 7-го порядков, а также о преобладании потребляемой реактивной мощности над активной у персональной вычислительной техники. Как известно, гармоника 3-го порядка и кратные ей гармоники замыкаются по путям нулевой последовательности. Таким образом, по нулевому проводу протекают ток частотой 50 Гц, обусловленный несимметричной нагрузкой, и ток третьей гармоники частотой 150 Гц, что приводит к нагреву нулевого провода, падению напряжения (Жежеленко, 1984; Белей и др., 2024).

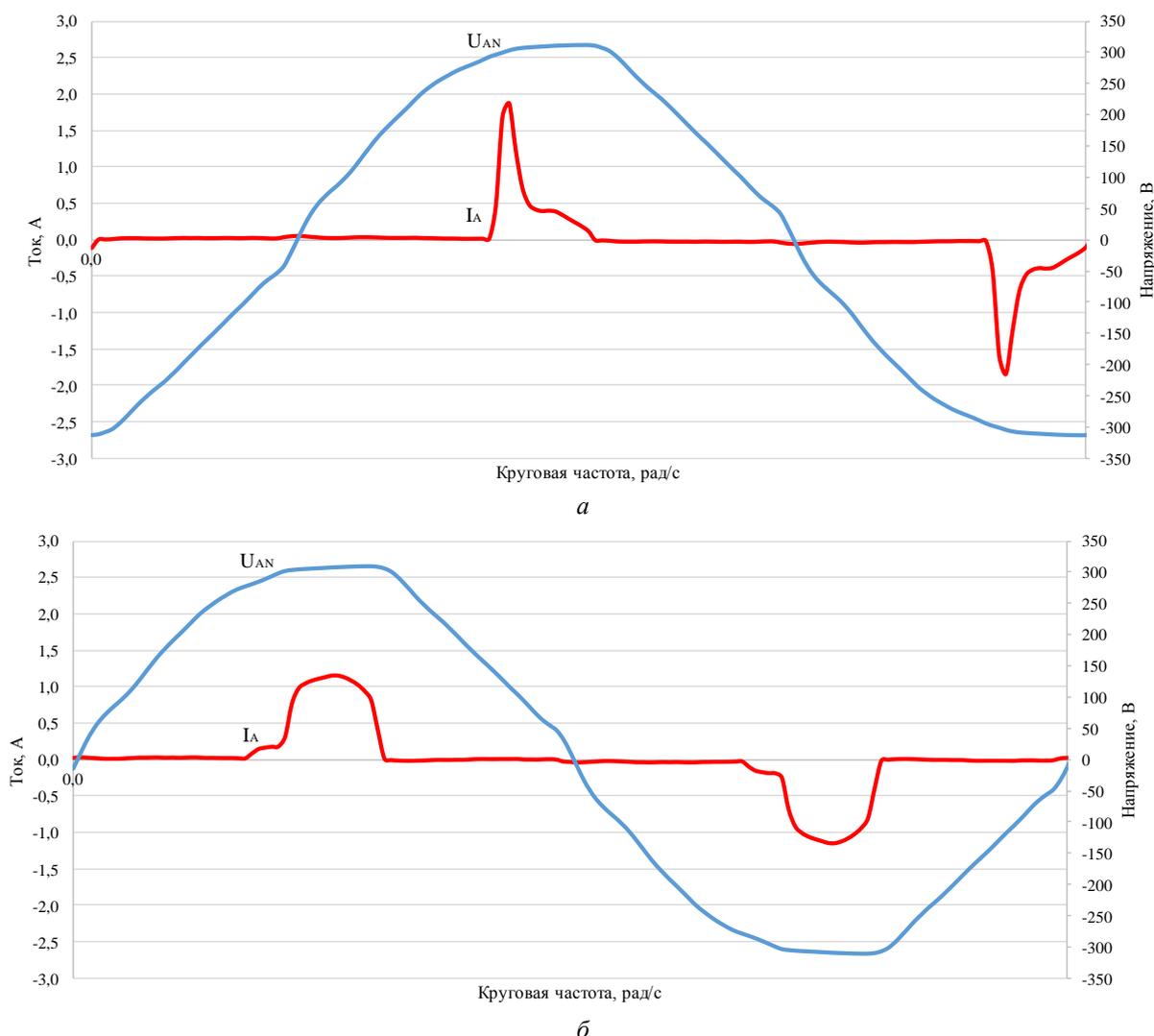


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения: *a* – ноутбука при 100%-м заряде аккумулятора и с подключенным зарядным устройством к сети; *б* – подключенного к сети компьютера
 Fig. 2. Current and voltage oscillograms: *a* – laptop with 100% battery charge and with charger connected to the network; *b* – computer connected to the network

Светодиодные и люминесцентные лампы

Доля светодиодных (СЛ) и люминесцентных (ЛЛ) ламп на судостроительном заводе составляет соответственно 24 и 30 % от общего числа осветительных приборов. Оставшаяся часть осветительной нагрузки приходится на лампы накаливания, дуговые ртутьсодержащие и газоразрядные натриевые лампы. В ходе экспериментального исследования светодиодных и люминесцентных ламп рассмотрены их гармонические составляющие и энергетические характеристики (табл. 3, рис. 3).

Таблица 3. Результаты экспериментальных исследований гармонических составляющих и энергетических характеристик светодиодных и люминесцентных ламп

Table 3. Results of experimental studies of harmonic components and energy characteristics of LED and fluorescent lamps

ЭП	Параметр							% высших гармоник тока от фундаментальной гармоники					
	I , мА	P , Вт	Q , вар	$\cos\varphi_{\text{пасп}}$	$\cos\varphi_{\text{факт}}$	K_i , %							
СЛ № 1	37	5,9	5,7	0,81	0,72	50	42,3	22	2,2	7,8	0,7	9,3	7,3
СЛ № 2	86	11,8	14,8	0,90	0,63	98	70,9	42,8	34,4	30,5	18,1	8,67	13,0
СЛ № 3	52	9,4	6,5	0,90	0,82	33	23,5	18,2	5,9	7,8	1,4	7,2	4,7
ЛЛ № 1	500	24,2	17,7	0,99	0,85	43	34,5	18,4	10,8	7,2	4,8	3,4	2,6

На рис. 4 приведены энергетические характеристики двух светодиодных ламп с наихудшими (рис. 4, а) и наилучшими (рис. 4, б) показателями (Белей и др., 2016).

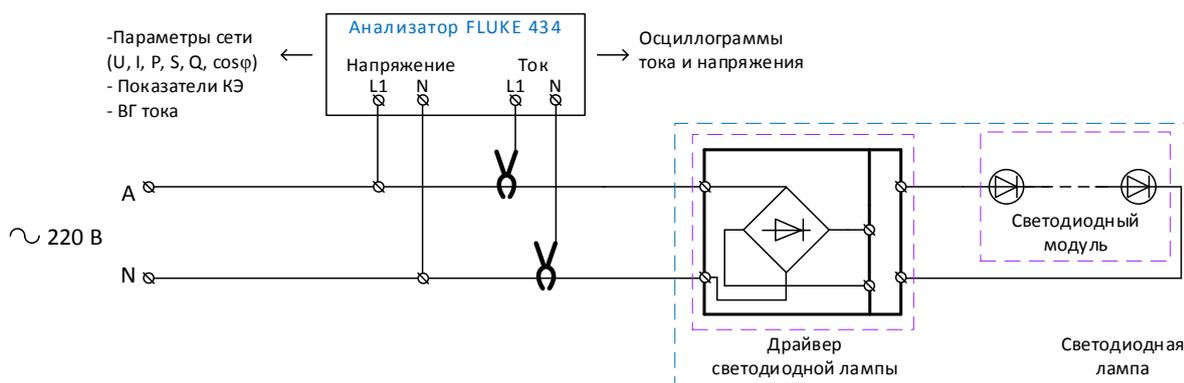


Рис. 3. Электрическая функциональная схема исследования светодиодной лампы
Fig. 3. Electrical functional diagram of the LED lamp research

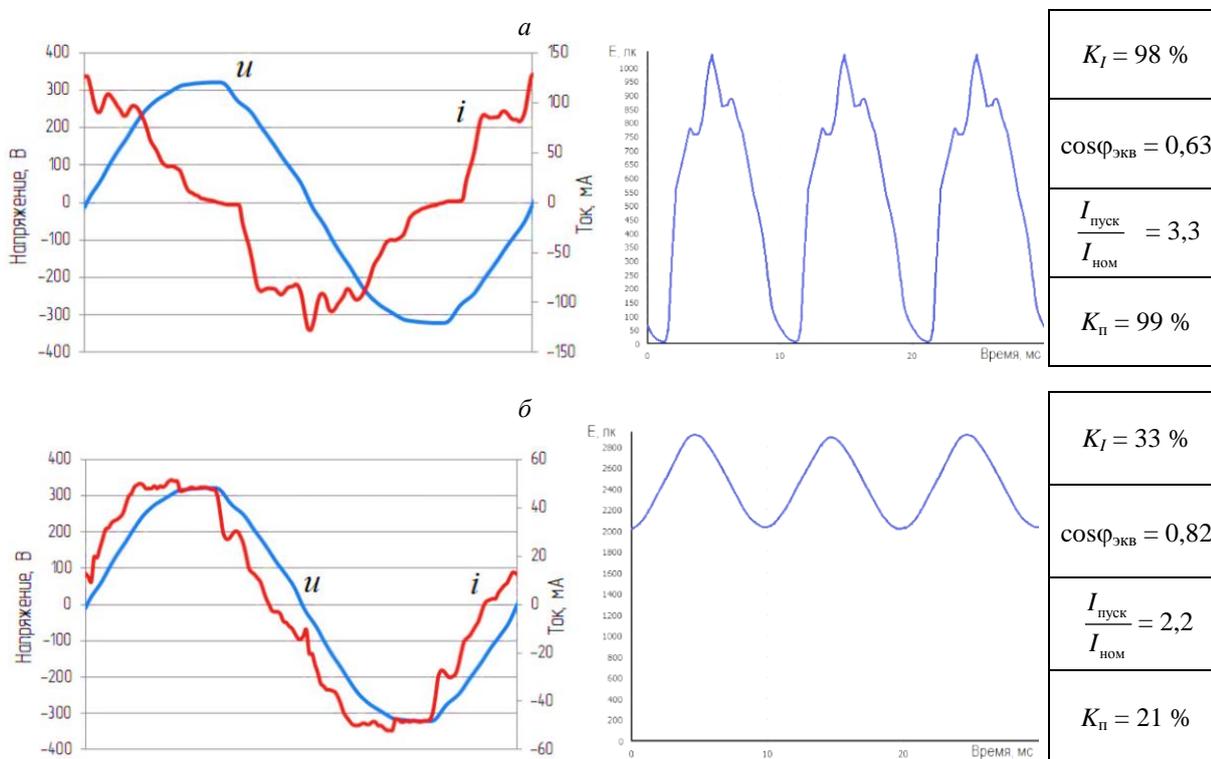


Рис. 4. Осциллограммы токов, напряжений и коэффициента пульсации освещенности. Данные по гармоническим составляющим и энергетическим характеристикам исследуемых светодиодных ламп
Fig. 4. Oscillograms of currents, voltages and pulsation coefficient of illumination. Data on harmonic components and energy characteristics of the LED lamps under study

Сварочные установки

В цехах судостроительного завода эксплуатируются сварочные установки ВДМ-1601, ВКСМ-1000, PL 100, TETRIX 451, ARISTOTIG DTG 405, Elotor 502, характеризующиеся резкопеременными набросами и провалами активной и реактивной мощности. Они оказывают воздействие на величину светового потока ламп; оценка этого воздействия осуществляется через кратковременную и длительную дозы фликера (рис. 5) и рассчитывается (Белей и др., 2016; 2017) по выражению

$$\Psi = \frac{1}{T} \int_{t=0}^t dt \int_0^{25} G_f^2 S(f, t) df,$$

где G_f – коэффициент приведения размахов колебания напряжения к эквивалентным; T – интервал времени усреднения; $S(f, t)$ – частотный спектр процесса колебания напряжения.

Превышение значения длительной дозы фликера до уровня 2,22 о. е. наблюдается на подстанции № 168 и до уровня 2,73 – на подстанции № 13 (рис. 5) (нормативное значение равно 1,0 согласно ГОСТ 32144-2013² в течение 100 % времени интервала в одну неделю).

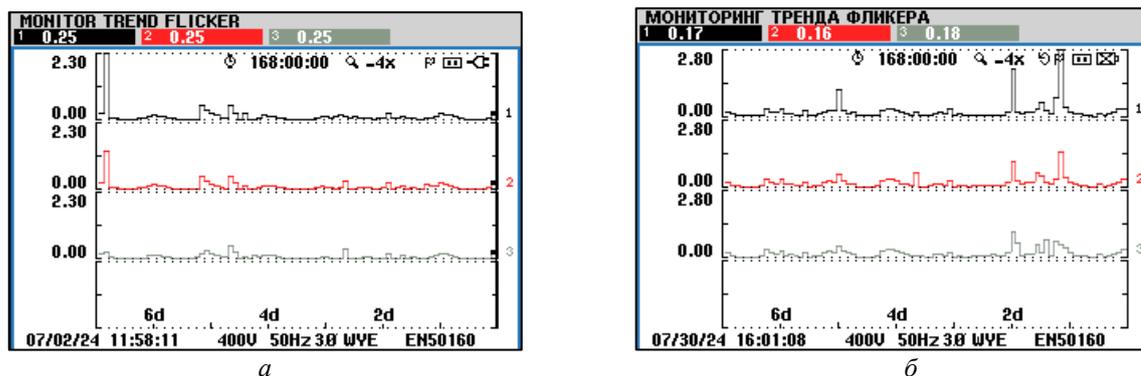
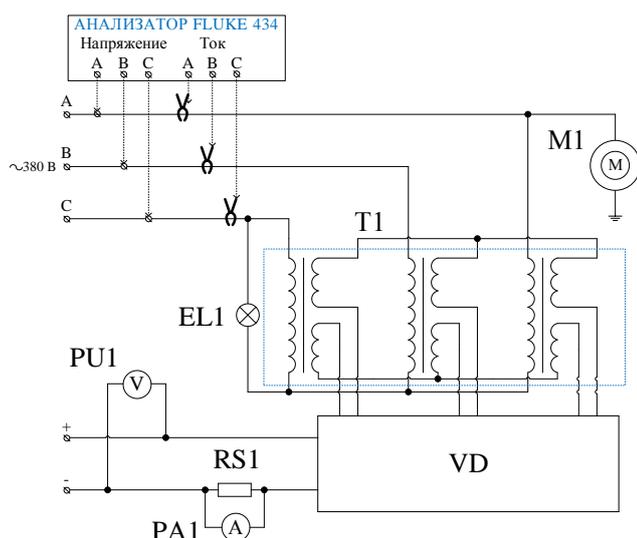


Рис. 5. Измерение длительной дозы фликера на подстанциях № 168 (а) и № 13 (б)
Fig. 5. Measurement of long-term flicker dose at substations N 168 (a) and N 13 (b)

Токи гармоник, поступающие от сварочного выпрямителя, различны в следующих режимах: прерывистые токи при малых нагрузках; трехвентильная коммутация при средних и максимальных нагрузках (Жежеленко, 1984). Результаты проведенных экспериментальных исследований сварочного аппарата ВДМ-1600 (рис. 6) на ПС № 3 завода представлены в табл. 4.



Тип	ВДМ-1600
$U_{\text{сети}}, \text{В}$	380
$S_{\text{ном}}, \text{кВА}$	125
$U_{\text{ном. раб}}, \text{В}$	60
$I_{\text{ном. выпрям}}, \text{А}$	1600
$I_{\text{ном. 1-го поста}}, \text{А}$	315
Число сварочных постов	Не более 10
$\eta, \%$	85

Рис. 6. Электрическая функциональная схема исследования сварочного аппарата и его технические характеристики
Fig. 6. Electrical functional diagram of the welding machine research and its technical characteristics

Таблица 4. Результаты экспериментальных исследований гармонических составляющих и энергетических характеристик сварочного аппарата
Table 4. Results of experimental studies of harmonic components and energy characteristics of a welding machine

Фаза	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$P, \text{кВт}$	$Q, \text{квар}$	$\cos\varphi_{\text{факт}}$	$K_i, \%$	% высших гармоник тока от основной гармоники						
							3	5	7	9	11	13	15
A	392,4	19,9	0,5	4,47	0,12	31	28	11	0,8	0,6	0,5	0,4	0,2
B	406,7	24,5	1,41	5,61	0,26	11	2	10	0,7	0,1	0,5	0,4	0,1
C	402,6	16,0	2,12	3,03	0,59	28	26	10	0,5	0,7	0,5	0,4	0,2

² ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. Москва : Стандартинформ. 2014. 19 с.

Батареи статических конденсаторов в низковольтной электрической сети

На судостроительном заводе активно реализуются мероприятия по внедрению систем компенсации реактивной мощности, в частности батарей статических конденсаторов в низковольтной электрической сети (табл. 5).

Таблица 5. Результаты, характеризующие неэффективность использования батарей статических конденсаторов в низковольтной электрической сети³
 Table 5. Results characterizing the inefficiency of using static capacitor banks in a low-voltage electrical network

Год реализации мероприятия	Выделено средств, тыс. руб.	Экономия электроэнергии в 2022–2024 гг., (тыс. кВт·ч)/год	Экономия денежных средств в 2022–2024 гг., тыс. руб./год
2022	727,0	0,00	0,00

Неэффективность использования системы компенсации определяется двумя факторами. Первый фактор – повышение напряжения, в частности, результаты мониторинга показателей качества электроэнергии на низшей стороне ПС № 168 (рис. 7) показали отклонение напряжения выше допустимой (согласно ГОСТ 32144-2013) отметки на 10 %.

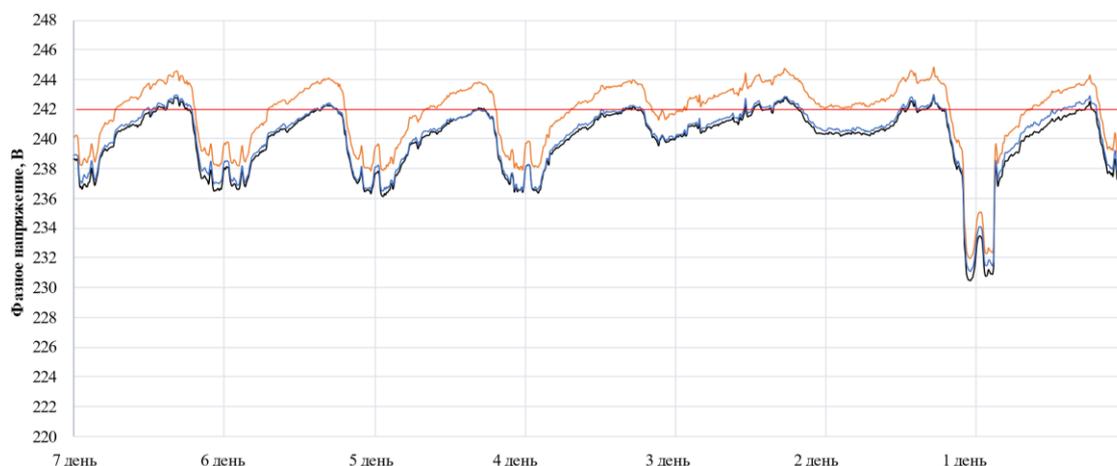


Рис. 7. Результаты измерения отклонений напряжения на подстанции № 168
 Fig. 7. Results of voltage deviation measurements at substation N 168

Второй фактор – нагрев выше допустимого значения конденсаторных установок. Нелинейный элемент в составе сети потребляет меньшую часть передаваемой от источника мощности, затем преобразует ее в гармоническую мощность, которая возвращается в сеть и рассеивается на активных сопротивлениях ее элементов (рис. 8), тем самым вызывая нагрев конденсаторных установок токами высших гармонических и способствуя появлению резонансных условий (Аррилага и др., 1990).

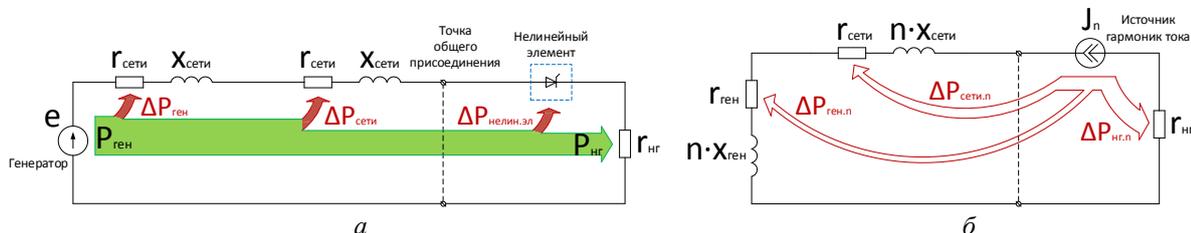


Рис. 8. Поток мощности на основной (а) и гармонической (б) частоте
 Fig. 8. Power flow at fundamental (a) and harmonic (b) frequencies

На подстанциях завода доля распределительных трансформаторов напряжением 6/0,4 кВ со схемой соединения обмоток Y/Y_0 составляет более 70 %, остальные имеют схему Δ/Y_0 . Многие трансформаторы

³Годовой отчет АО «ПСЗ "Янтарь"» за 2023 г. URL: <https://shipyard-yantar.ru/raskrytie-informacii-2/godovye-otchety/>.

(около 70 %) эксплуатируются более 40 лет (Белей и др., 2022), поэтому целесообразно заменить их на более эффективные с группой соединения обмоток Δ/Y_0 .

Таблица 6. Технические параметры трансформаторов ТМ-630/6/0,4 и ТМГвэ-630/6/0,4 со схемой соединения обмоток Δ/Y_0

Table 6. Technical parameters of transformers ТМ-630/6/0.4 and ТМГвэ-630/6/0.4 with winding connection diagram Δ/Y_0

Тип	Параметр							Класс энергоэффективности
	$S_{\text{НОМ}}$, кВА	$U_{1\text{НОМ}}$, кВ	$U_{2\text{НОМ}}$, кВ	u_k , %	ΔP_x , кВт	ΔP_k , кВт	I_x , %	
ТМ-630/6/0,4	630	6	0,4	5,5	1,31	7,6	2,0	Отсутствует
ТМГвэ-630/6/0,4	630	6	0,4	5,5	0,73	5,6	2,0	ХЗКЗ

Исследование трансформаторов проведено на наиболее загруженной головной подстанции ПС № 27. Измерения (рис. 9, табл. 7) проводились с помощью анализатора Fluke-434 в соответствии с ГОСТ 32144-2013 и ГОСТ 30804.4.30-2013⁴ на низшей стороне подстанции.

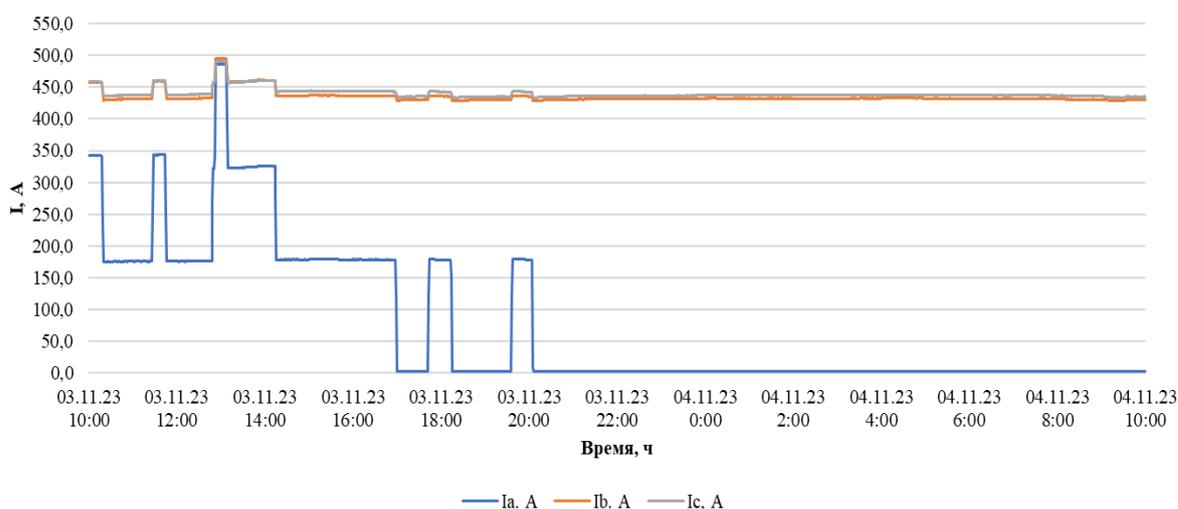


Рис. 9. Графики отклонений токов на низшей стороне подстанции № 27
Fig. 9. Graphs of currents deviations on the low-side of substation N 27

Таблица 7. Результаты измерений коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности на подстанции № 27
Table 7. Results of measurements of the zero-sequence voltage unbalance coefficient at substation N 27

Параметр	Результат измерений, %	Нормативное значение в течение 100 % времени интервала в одну неделю, %
K_{0U}	16,34	4,00

При наличии в обмотках трансформатора токов нулевой последовательности (Копылов, 2000)

$$\dot{U}_A = \dot{I}_{A\phi} z_1 = -\dot{E}_A - \dot{E}_0, \quad \dot{U}_B = \dot{I}_{B\phi} z_1 = -\dot{E}_B - \dot{E}_0, \quad \dot{U}_C = \dot{I}_{C\phi} z_1 = -\dot{E}_C - \dot{E}_0,$$

где E_A, E_B, E_C – ЭДС, наводимые трехфазным магнитным полем; E_0 – ЭДС, наводимая полем нулевой последовательности.

При соединении обмоток трансформатора по схеме Y/Y_0

$$\dot{I}_{A\phi} + \dot{I}_{B\phi} + \dot{I}_{C\phi} = \dot{I}_0, \quad \dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0.$$

Отсюда

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = -3\dot{E}_0 = 3\dot{I}_0 z_0, \quad \dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0,$$

где $z_0 = r_0 + jx_0$ – полное сопротивление нулевой последовательности (табл. 8).

⁴ГОСТ 30804.4.30-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. Введ. 2014-01-01. Москва : Стандартинформ. 2014. 58 с.

Таблица 8. Сопротивления трансформатора ТМ-630/6/0,4 при различных схемах соединения обмоток
 Table 8. Resistances of the ТМ-630/6/0.4 transformer with different winding connection schemes

$S_{\text{ном}}$, кВА	Схема соединения	Значение сопротивления трансформатора			
		По прямой последовательности		По нулевой последовательности	
		r_1	x_1	r_0	x_0
630	Y/Y ₀	3,1	13,6	30,2	95,8
	Δ/Y ₀	3,4	13,5	3,4	13,5

Рекомендации по снижению несимметрии напряжений

В результате проведенных экспериментов определены следующие предложения по снижению несимметрии напряжений:

1. Одним из самых эффективных методов снижения несимметрии напряжений по нулевой последовательности является замена трансформатора со схемой соединений обмоток Y/Y₀ на трансформатор со схемой Δ/Y₀. При использовании трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y₀ коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности K_{0U} составляет 16,3 %, при соединении по схеме Δ/Y₀ – 2,3 % (рис. 10), тем самым не превышая допустимого в течение 100 % времени интервала в одну неделю нормативного значения 4 % согласно ГОСТ-32144-2013.

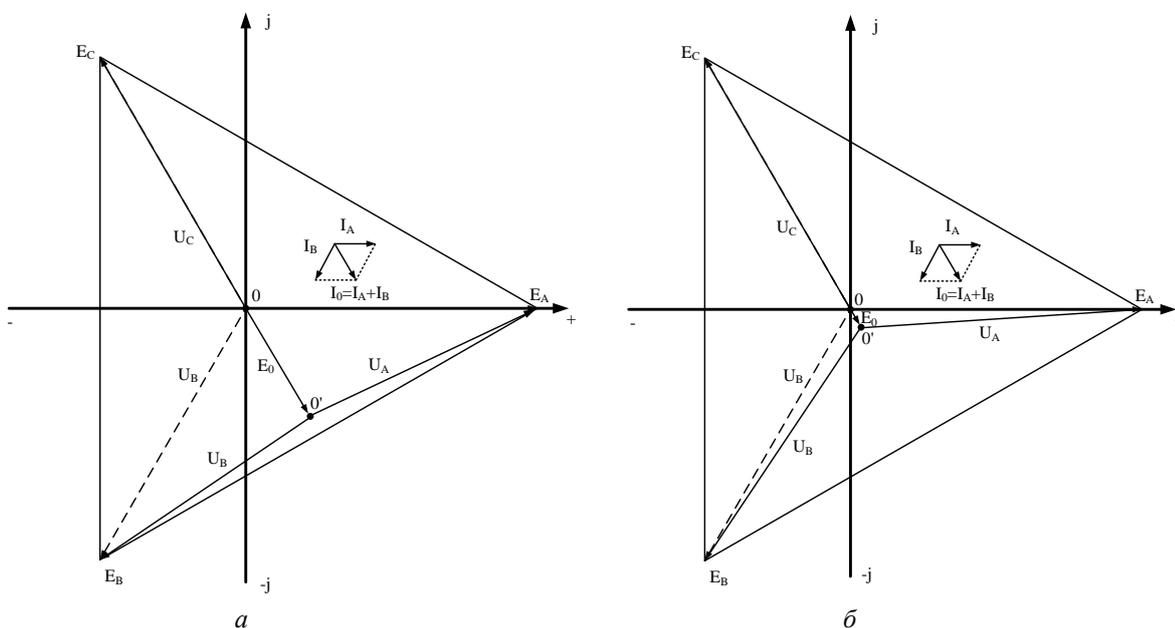


Рис. 10. Векторные диаграммы фазных и линейных напряжений трансформатора при наличии поля нулевой последовательности, собранного по схемам Y/Y₀ (а) и Δ/Y₀ (б)

Fig. 10. Vector diagrams of phase and line voltages of a transformer in the presence of the zero-sequence field assembled according to the Y/Y₀ (a) and Δ/Y₀ (b) schemes

Диаграммы (рис. 10) построены с учетом следующего условия: по двум фазам протекают номинальные токи, а в третьей фазе ток отсутствует. При соединении обмоток трансформатора по схеме Δ/Y₀ в первичной обмотке также имеет место ток нулевой последовательности, который создает встречное поле нулевой последовательности, и результирующее поле нулевой последовательности значительно уменьшается, что приводит к значительному снижению полного сопротивления нулевой последовательности z_0 , ЭДС нулевой последовательности E_0 и снижению коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} (Копылов, 2000).

2. Использование светодиодных осветительных приборов, характеризующихся коэффициентом мощности, близким к 1, позволяет повысить их энергоэффективность за счет снижения суммарного коэффициента гармонических составляющих тока K_I и коэффициента пульсаций освещенности $K_{\text{п}}$.

Программа энергосбережения и повышения энергетической эффективности, реализуемая на судостроительном заводе согласно "Стратегии развития объединенной судостроительной компании на период до 2030 г.", предусматривает модернизацию внутрицеховой и наружной систем освещения. Так, замена в цехе № 3 люминесцентных ламп и ламп накаливания (табл. 9) на светодиодные позволила добиться снижения потерь активной мощности и экономии затрат на электроэнергию (табл. 10) в низковольтной электрической сети.

Таблица 9. Предшествующая модернизации структура системы освещения цеха № 3
Table 9. Pre-modernization structure of the lighting system of workshop N 3

Тип лампы	Число ламп, шт	Коэффициент, учитывающий потери в пускорегулирующих устройствах	$T_{\text{ср}}^*$, ч/год	$W_{\text{год}}$ (тыс. кВт·ч)/год
ЛЛ-18	344	1,1	2250	15,33
ЛЛ-36	100	1,1	2250	8,91
ЛЛ-40	84	1,1	2250	8,32
ЛЛ-80	52	1,1	2250	10,30
ЛН-1000	2	1,0	200	0,40
ЛН-300	10	1,0	200	0,60
ЛН-75	21	1,0	200	0,32
Итого	613	–	–	44,16

Примечание. * $T_{\text{ср}}$ – средняя продолжительность работы в год, ч/год.

Таблица 10. Результаты, характеризующие эффективность модернизации системы освещения цеха № 3⁵
Table 10. Results characterizing the effectiveness of modernization of the lighting system of workshop N 3

Выделено средств, тыс. руб.	Экономия электроэнергии в 2023 г., тыс. кВт·ч/год	Экономия денежных средств, за 2023 г., тыс. руб./год	Планируемый срок окупаемости
1 074,7	2,27	260,9	4,12 года

3. Применение систем компенсации реактивной мощности в сети 6 кВ и подключение их к узловой точке с большей мощностью короткого замыкания способствуют снижению несимметрии напряжений.

4. Способы снижения уровня гармоник можно разделить на две группы:

а) схемные и технологические решения:

– выделение нелинейных нагрузок на отдельную систему шин;

– повышение фазности полупроводниковых преобразователей. В настоящее время в основном применяются шестифазные преобразователи, генерирующие высокий уровень ВГ тока. Повышение фазности преобразователей до 12, а в ряде случаев до 24 и 48 резко снижает уровни высших гармоник тока;

– подключение нелинейной нагрузки к системе с большей мощностью короткого замыкания $S_{\text{кз}}$;

б) использование фильтрующих устройств: узкополосных фильтров; филтросимметрирующих устройств; статических тиристорных компенсаторов; активных фильтров, которым в последнее время уделяется все большее внимание. Включенный в сеть активный фильтр вырабатывает ВГ тока такой величины и фазы, при которых обеспечивается полная компенсация ВГ тока нелинейного электроприемника (*Вендель и др., 2018*). Для снижения в нулевом проводе уровня высших гармоник тока прямой (7, 13 и т. д.), обратной (5, 11 и т. д.) последовательностей, обусловленных однофазными электроприемниками, целесообразно их симметрирование. При симметричной нагрузке эти гармоники отсутствуют в нулевом проводе (рис. 11, табл. 11). Токи гармоники 3-го порядка и кратных ей гармоник всегда замыкаются по путям нулевой последовательности (*Belej, 2002*). Один из способов их снижения – применение фильтрокомпенсирующего устройства для трехфазных систем электроснабжения с нелинейными нагрузками (*Фильтрокомпенсирующее устройство..., 2016*).

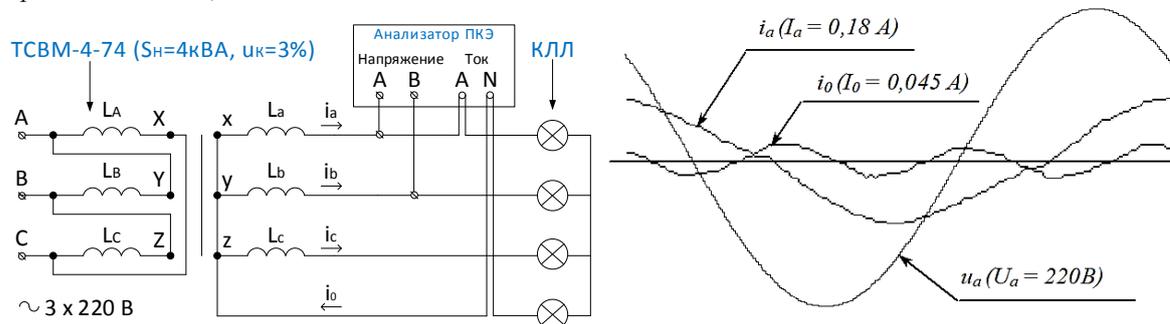


Рис. 11. Лабораторная установка, осциллограммы напряжения и токов компактной люминесцентной лампы ($P = 21$ Вт, $U = 220$ В) (*Belej, 2002*)

Fig. 11. Laboratory setup, voltage and current oscillograms of a compact fluorescent lamp ($P = 21$ W, $U = 220$ V) (*Belej, 2002*)

⁵ См.: Годовой отчет АО "ПСЗ "Янтарь" за 2023 год. URL: <https://shipyard-yantar.ru/raskrytie-informacii-2/godovye-otchety/>. ; Годовой отчет АО "ПСЗ "Янтарь" за 2024 год. URL: <https://shipyard-yantar.ru/raskrytie-informacii-2/godovye-otchety/>.

Таблица 11. Результаты измерений и обработки данных по энергетическим характеристикам и гармоническим составляющим компактной люминесцентной лампы (Belej, 2002)
Table 11. Results of measurements and data processing on energy characteristics and harmonic components of a compact fluorescent lamp (Belej, 2002)

Параметр	Значение параметра при напряжении U , В		
	198	220	242
I , А	0,132	0,18	0,23
P , Вт	17	21	26
Q , вар	20	34	49
K_U , %	2,58	2,18	2,3
K_i , %, в том числе	10,83	9,16	10,48
K_3 , %	10,5	9,05	10,21
K_5 , %	2,32	0,86	0,86
K_7 , %	1,55	1,55	1,82
K_9 , %	0,86	0,52	0,41

Для решения задачи снижения несимметрии напряжений необходимо также нормирование уровня высших гармоник тока в системах электроснабжения.

Меры по нормированию высших гармоник тока в системах электроснабжения

Стандарты многих стран, в том числе и нормативные документы РФ, устанавливают допустимые значения только для гармоник напряжения. Уровень гармоник тока нормируется в Англии и в ряде других стран согласно IEEE⁶ (табл. 12).

В связи с ростом нелинейных нагрузок в системах электроснабжения становится очевидной необходимость в нормировании уровня высших гармоник тока в системах электроснабжения РФ, что приведет к повышению требований к производителям электрооборудования, касающихся уровня эмиссии высших гармоник тока в питающую сеть, и будет способствовать принятию мер по снижению уровня эмиссии гармоник тока на предприятиях РФ.

Таблица 12. Пределы искажения по току для сетей различного класса напряжения согласно IEEE
Table 12. IEEE current distortion limits for different voltage class networks

$\frac{I_{кз}^*}{I_{нр}^{**}}$, о. е.	Максимальные гармонические искажения по току, % от тока нагрузки					TDD ^{***} , %
	Порядковые номера нечетных гармоник					
	$3 \leq n \leq 11$	$11 \leq n \leq 17$	$17 \leq n \leq 23$	$23 \leq n \leq 35$	$35 \leq n \leq 50$	
Сети напряжением 0,12–69 кВ						
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < 1 000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1 000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0
Сети напряжением 69–161 кВ						
<20	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20 < 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50 < 100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100 < 1 000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
>1 000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0
Сети напряжением выше 161 кВ						
<20	1,0	0,5	0,38	0,15	0,1	1,5
20 < 50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
>50	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Примечания: * $I_{кз}$ – максимальный ток короткого замыкания в точке общего присоединения;

** $I_{нр}$ – максимальный потребляемый ток нагрузки нормального режима в точке общего присоединения;

*** TDD – суммарный коэффициент искажения с учетом максимального потребляемого тока.

⁶ Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems. IEEE Standard 519-1992. 2014. 112 p.

Заключение

Система электроснабжения Прибалтийского судостроительного завода "Янтарь" включает значительную долю нелинейных, несимметричных нагрузок, зачастую однофазного исполнения. Комплексный подход при проведении исследований такой системы электроснабжения заключается в проведении измерения показателей качества электроэнергии (ПКЭ) и выявлении взаимосвязей между ПКЭ, реактивной мощностью и потерями электроэнергии.

В результате экспериментальных исследований нелинейных электроприемников установлен высокий уровень высших гармоник тока, эмитируемых в питающую сеть, преимущественно 3-, 5-, 7-го порядков. Гармоника 3-го порядка и кратные ей гармоники тока замыкаются по путям нулевой последовательности. Таким образом, по нулевому проводу протекают ток частотой 50 Гц, обусловленный несимметричной нагрузкой, и ток третьей гармоники частотой 150 Гц, что приводит к нагреву нулевого провода, падению напряжения.

В ходе исследования показана эффективность использования светодиодных осветительных приборов с улучшенными энергетическими характеристиками для систем освещения завода.

Одним из методов снижения несимметрии напряжений по нулевой последовательности является замена трансформатора со схемой соединений обмоток Y/Y_0 на трансформатор со схемой Δ/Y_0 . На судостроительном заводе "Янтарь" намечена замена используемых трансформаторов (ввиду значительного превышения ими нормативных сроков эксплуатации) на энергоэффективные.

Схемные, технологические решения (выделение нелинейных нагрузок на отдельную систему шин; повышение фазности полупроводниковых преобразователей; подключение нелинейной нагрузки к системе с большей мощностью короткого замыкания) и фильтрующие устройства (узкополосные фильтры, фильтросимметрирующие устройства и активные фильтры) используются для повышения эффективности системы электроснабжения при ее работе в условиях роста искажающих нагрузок.

В связи с ростом нелинейных нагрузок в системах электроснабжения становится очевидной необходимость нормирования уровня высших гармоник тока в системах электроснабжения РФ, что приведет к повышению требований к производителям электрооборудования, касающихся уровня эмиссии высших гармоник тока в питающую сеть, и будет способствовать принятию мер по снижению уровня эмиссии гармоник тока на предприятиях РФ.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы НИОКР № 122030900054-0 "Повышение безопасности и эффективности электроэнергетических систем объектов морской индустрии". Авторы благодарят кандидата технических наук, доцента М. С. Харитонову за предоставление результатов проведенных экспериментальных исследований гармонических составляющих и энергетических характеристик светодиодных ламп.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Ариллага Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах. М. : Энергоатомиздат, 1990. 319 с.
- Белей В. Ф., Коротких К. В. О необходимости контроля и нормирования гармоник тока // *Электроснабжение. Передача и распределение*. 2024. № 6(87). С. 36–42. EDN: LUJZFP.
- Белей В. Ф., Коротких К. В. Рекомендации по повышению эффективности трансформаторного парка системы электроснабжения судостроительного завода // *Морские интеллектуальные технологии*. 2022. № 4–3(58). С. 65–71. DOI: <https://doi.org/10.37220/mit.2022.58.4.064>. EDN: QKATAC.
- Белей В. Ф., Харитонов М. С. Оценка фликера в системах электроснабжения при использовании светодиодных источников света // *Промышленная энергетика*. 2017. № 9. С. 56–59. EDN: ZHJSZZ.
- Белей В. Ф., Харитонов М. С. Светодиодные лампы в системах судового освещения: вопросы электромагнитной совместимости // *Вестник МГТУ*. 2016. Т. 19, № 4. С. 687–696. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2016-4-687-696>. EDN: XHMWNR.
- Вендин С. В., Килин С. В., Соловьев С. В. Оценка эффективности мероприятий по снижению несимметрии и несинусоидальности в распределительных сетях 0,4–10 кВ // *Инновации в АПК: проблемы и перспективы*. 2018. № 2(18). С. 3–19. EDN: XTHALB.
- Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения предприятий. М. : Энергоатомиздат, 1984. 160 с.
- Копылов И. П. Электрические машины. М. : Логос, 2000. 607 с.
- Фильтрокомпенсирующее устройство для трехфазных систем электроснабжения с нелинейными нагрузками : № 2015117043/07 : полезная модель к пат. № 158871 МПК H02J 3/01 / В. Ф. Белей, М. С. Харитонов ; заявл. 05.05.2015 ; опубл. 20.01.2016. Бюл. № 2.
- Belej V. F. Compact luminescent lamps: Electrical characteristics, EMC problems // *Электротехника*. 2002. № 7. С. 48–51. EDN: MPNPLX.

References

- Arrillaga, J., Bradley, B., Bodger, P. 1990. Harmonics in electrical systems, Moscow. (In Russ.)
- Beley, V. F., Korotkikh, K. V. 2024. About the necessity of control and standarding of current harmonics. *Electric Power. Transmission and Distribution*, 6(87), pp. 36–42. EDN: LUJZFP. (In Russ.)
- Beley, V. F., Korotkikh, K. V. 2022. Recommendations for improving the efficiency of the transformer park of a shipyard power supply system. *Marine Intellectual Technologies*, 4–3(58), pp. 65–71. DOI: <https://doi.org/10.37220/mit.2022.58.4.064>. EDN: QKATAC. (In Russ.)
- Beley, V. F., Kharitonov, M. S. 2017. Assessment of flicker in power supply systems at using LED light sources. *Industrial Power Engineering*, 9, pp. 56–59. EDN: ZHJSZZ. (In Russ.)
- Beley, V. F., Kharitonov, M. S. 2016. LED lamps in ship lighting systems: Aspects of electromagnetic compatibility. *Vestnik of MSTU*, 19(4), pp. 687–696. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2016-4-687-696>. EDN: XHMWNR. (In Russ.)
- Vendin, S. V., Kilin, S. V., Soloviev, S. V. 2018. Evaluation of the effectiveness of measures to reduce asymmetry and non-sinusoidality in 0.4–10 kV distribution networks. *Innovations in Agricultural Complex: Problems and Perspectives*, 2(18), pp. 3–19. EDN: XTHALB. (In Russ.)
- Zhezhelenko, I. V. 1984. Higher harmonics in power supply systems of enterprises. Moscow. (In Russ.)
- Kopylov, I. P. 2000. Electrical machines. Moscow. (In Russ.)
- Beley, V. F., Kharitonov M. S. Kaliningrad State Technical University. 2016. Filter-compensating device for three-phase power supply systems with nonlinear loads, Russian Federation, Pat. 158871. (In Russ.)
- Belej, V. F. 2002. Compact fluorescent lamps: Electrical characteristics, problems of electromagnetic compatibility. *Elektrotehnika*, 7, pp. 48–51. EDN: MPNPLX.

Сведения об авторах

Белей Валерий Феодосиевич – пр. Советский, 1, г. Калининград, Россия, 236022;
Калининградский государственный технический университет, д-р техн. наук, профессор;
e-mail: vbeley@klgtu.ru

Valeriy F. Beley – 1, Sovetsky Ave., Kaliningrad, Russia, 236022;
Kaliningrad State Technical University, Dr Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: vbeley@klgtu.ru

Коротких Кирилл Викторович – пр. Советский, 1, г. Калининград, Россия, 236022;
Калининградский государственный технический университет, аспирант, преподаватель;
e-mail: kirill.korotkikh@klgtu.ru

Kirill V. Korotkikh – 1, Sovetsky Ave., Kaliningrad, Russia, 236022;
Kaliningrad State Technical University, PhD Student, Lecturer;
e-mail: kirill.korotkikh@klgtu.ru