

Научная статья

УДК 629.5.064.5

DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-105-116

Оценка влияния частотно-регулируемых асинхронных электроприводов на функционирование судовых энергетических установок и их элементов

Валерий Феодосиевич Белей¹, Кирилл Викторович Коротких²

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

¹vbeley@klgtu.ru

²kirill-korotkikh@bk.ru

Аннотация. Показано, что использование в судовых энергетических установках энергосберегающих частотно-регулируемых асинхронных электроприводов вместо традиционных (контактор-асинхронный двигатель) позволяет снизить потребление электроэнергии в долевых режимах в разы, значительно расширить функциональные возможности оборудования. Однако при работе частотно-регулируемого электропривода имеет место эмиссия в питающую сеть высших гармоник тока, а к асинхронному электродвигателю наряду с основной гармоникой подаются гармоники напряжения. Гармоники тока, распространяясь по системе электроснабжения, приводят к снижению эффективности работы элементов судовых энергетических установок, в состав которых они входят. Установлено, что во всех режимах работы электропривода имеют место высокие значения потребляемой реактивной мощности. При большом числе частотно-регулируемых асинхронных электроприводов на судне будет невозможна полная загрузка дизель-генераторов по активной мощности. При работе частотно-регулируемого электропривода эмитируются в питающую сеть гармоники тока, кратные трем. Эти гармоники являются токами нулевой последовательности. Так как судовая сеть не имеет нулевого провода, то ток третьей гармоники от одной фазы замыкается по проводам двух других фаз. Этот ток создает в электрических машинах поле нулевой последовательности с вытекающими последствиями. Наибольший интерес вызывают результаты экспериментальных исследований спектра вибраций при 10 %-й нагрузке на валу асинхронного двигателя: на частоте, близкой к 20 Гц, что может свидетельствовать о несимметрии полюсов исследуемого асинхронного двигателя; на частоте 300 Гц от взаимодействия моментов пятой (обратной последовательности) и седьмой (прямой последовательности) гармоник; на частоте 50 Гц, обусловленной воздействием основной гармоники.

Ключевые слова: судовые энергетические установки, судовая электроэнергетическая сеть, частотно-регулируемый электропривод, гармоники, ток, напряжение, момент, вибрация.

Для цитирования: Белей В. Ф., Коротких К. В. Оценка влияния частотно-регулируемых асинхронных электроприводов на функционирование судовых энергетических установок и их элементов // Известия КГТУ. 2023. № 71. С. 105-116. DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-105-116

Original article

Assessing the influence of frequency-controlled asynchronous electric drives on the operation of ship power plants and their elements

Valeriy F. Beley¹, Kirill V. Korotkikh²

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

¹vbeley@klgtu.ru

²kirill-korotkikh@bk.ru

Abstract. The paper shows that the use of energy-saving frequency-controlled asynchronous electric drives in ship power plants instead of traditional ones (contactor-induction motor) makes it possible to reduce electricity consumption in fractional modes several times and significantly expand the functionality of the equipment. However, during the operation of a frequency-controlled electric drive, higher current harmonics are emitted into the supply network, and voltage harmonics are supplied to the asynchronous electric motor along with the main harmonic. Current harmonics, propagating through the power supply system, lead to a decrease in the efficiency of the elements of ship power plants in which they are part of. It has been found that in all modes of operation of the electric drive, there are large values of the consumed reactive power. With a large number of frequency-controlled asynchronous electric drives on a ship, diesel generators will not be able to fully load them in terms of active power. During the operation of a frequency-controlled electric drive, current harmonics that are multiples of three are emitted into the supply network. These harmonics are zero sequence currents. Since the ship's network does not have a neutral wire, the third harmonic current from one phase is closed through the wires of the other two phases. This current creates a zero-sequence field in electrical machines with the ensuing consequences. Of greatest interest are the results of experimental studies of the vibration spectrum at 10% load on the shaft of an asynchronous motor: at a frequency close to 20 Hz, which may indicate asymmetry of the poles of the asynchronous motor under study, at a frequency of 300 Hz from the interaction of moments of the fifth (reverse sequence) and seventh (positive sequence) harmonics, at a frequency of 50 Hz, due to the influence of the main harmonic.

Keywords: ship power plants, ship electric power network, frequency-controlled electric drive, harmonics, current, voltage, torque, vibration.

For citation: Beley V. F., Korotkikh K. V. Assessing the influence of frequency-controlled asynchronous electric drives on the operation of ship power plants and their elements // *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2023; (71):105-116. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-105-116

ВВЕДЕНИЕ

Основными потребителями электроэнергии в судовых электроэнергетических системах являются асинхронные электроприводы, обеспечивающие функционирование значительной части судовых энергетических установок и их элементов. При появлении на рынке статических полупроводниковых преобразователей частоты на базе IGBT-транзисторов были разработаны и получили широкое распространение частотно-регулируемые электроприводы. Структура частотно-регулируемого электропривода выполняется на основе преобразователя частоты с промежуточным звеном постоянного тока, что обеспечивает регулирование скоростью вращения асинхронных двигателей. Использование энергосберегающих частотно-регулируемых асинхронных электроприводов позволяет снизить потребление электроэнергии в разы, значительно расширить функциональные возможности энергоустановок [1–4]. Однако при работе частотно-регулируемого электропривода имеет место эмиссия в питающую сеть высших гармоник тока, а к асинхронному двигателю наряду с основной гармоникой подаются гармоники напряжения. Токи высших гармоник, распространяясь по системе, вызывают снижение эффективности генерации судовых дизель-генераторов, передачи и использования электрической энергии; старение изоляции электрооборудования; вибрацию асинхронных электроприводов и элементов судовых энергетических установок, в состав которых они входят, и прочее. Анализ работ по данному направлению показал, что комплекс проблем, имеющих место, изучен недостаточно и проведение теоретических и экспериментальных исследований высших гармонических составляющих при эксплуатации частотно-регулируемых асинхронных электроприводов актуально.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

При частотном управлении асинхронным электродвигателем (АД) (рис. 1) величина электромагнитного момента АД зависит от частоты и напряжения источника переменного тока [5], где УУПЧ – устройство управления преобразователем частоты; В – выпрямитель с индуктивно-емкостным фильтром постоянного напряжения (ФПН); АИН – автономный инвертор напряжения, построенный на силовых транзисторах типа IGBT и формирующий основную гармонику выходного напряжения методом широтно-импульсной модуляции.

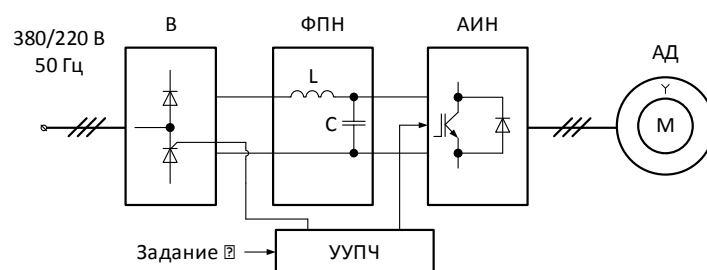


Рис. 1. Функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода

Fig. 1. Functional diagram of a frequency-controlled asynchronous electric drive

Наличие двух независимых каналов управления дает возможность реализовать в системах «преобразователь частоты – АД» различные законы регулирования скорости. Если должна сохраняться постоянной перегрузочная способность двигателя, то в первом приближении частотный закон управления имеет вид:

$$\frac{U}{U_c} \approx \frac{f}{f_c} \cdot \sqrt{\frac{M_d}{M_{дн}}}, \quad (1)$$

где U_c, f_c – номинальные напряжение и частота сети; U, f – напряжение и частота на выходе АИН; $M_d, M_{дн}$ – текущее и номинальные значения момента АД.

Управление двигателем в соответствии с соотношением (1) при ненасыщенной магнитной системе позволяет сохранять практически неизменным коэффициент мощности и абсолютное скольжение электропривода, при этом его коэффициент полезного действия не зависит от скорости. В зависимости от видов нагрузки закон управления напряжением и частотой имеет различные формы. Например, при постоянном моменте нагрузки ($M_c = \text{const}$) соотношение (рис. 2а) приобретает вид $U/f = \text{const}$; при постоянной мощности ($M_c = k\omega^{-1}$) – $U^2/f = \text{const}$ (рис. 2б); при «вентиляторной» нагрузке ($M_c = k\omega^2$) – $U/f^2 = \text{const}$ (рис. 2в) [5].

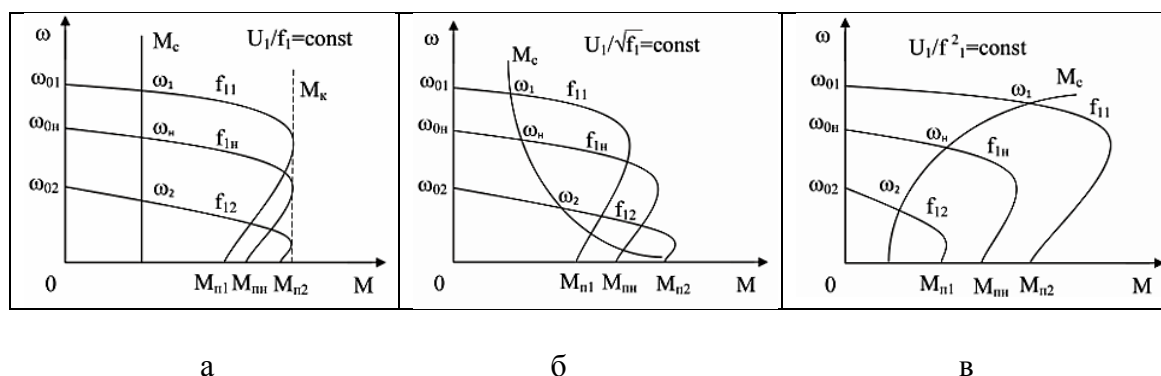


Рис. 2. Механические характеристики частотно-регулируемого асинхронного электропривода

Fig. 2. Mechanical characteristics of a frequency-controlled asynchronous electric drive

Использование в силовой схеме частотно-регулируемого асинхронного электропривода полупроводниковых элементов (рис. 1) приводит к эмиссии в питающую сеть высших гармоник тока, а к обмотке статора асинхронного электродвигателя наряду с основной гармоникой подаются гармоники напряжения.

Экспериментальные исследования энергетических характеристик, высших гармонических, имеющих место при эксплуатации частотно-регулируемого асинхронного электропривода, были проведены на лабораторном стенде частотно-регулируемого асинхронного электропривода (табл. 1, рис. 3).

Таблица 1. Технические параметры АД типа 4АА63В4, схожего с АИР63В4 [6]
Table 1. Technical parameters of AM type 4AA63V4, similar to AIR63V4 [6]

Тип	$P_{\text{ном}},$ кВт	$U_{\text{ном}},$ В	$I_{\text{ном}},$ А	$\cos\varphi_{\text{ном}}$	$n_{\text{синх}},$ об/мин	$S_{\text{ном}},$ %	$I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}}$	$M_{\text{тах}}/M_{\text{ном}}$	$M_{\text{ном}},$ Н·м	$\Delta P_{\text{мех}},$ Вт
4АА63В4	0,37	380	1,2	0,7	1500	9	5	2,2	1,4	11

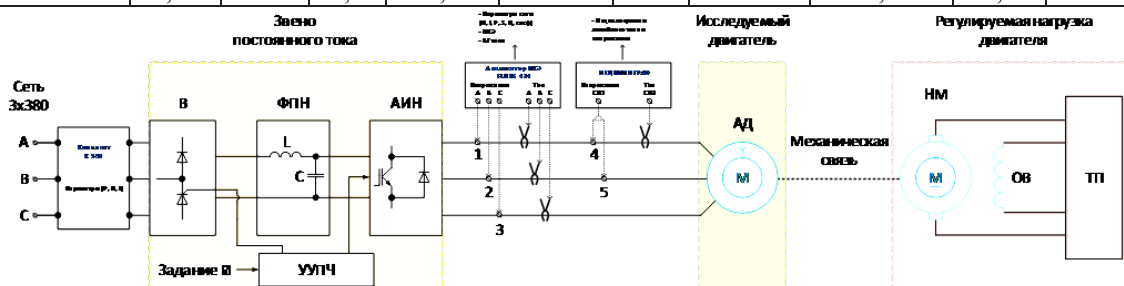


Рис. 3. Функциональная схема по исследованию частотного электропривода
Fig. 3. Functional diagram for the study of the frequency drive

Измерения электрических параметров на входе частотного электропривода проводились посредством измерительного комплекта K505 (рис. 3). Нагрузка на валу АД создавалась с помощью двигателя постоянного тока, работающего в режиме генератора.

Таблица 2. Электрические параметры на входе двигателя при различных уровнях нагрузки на валу АД
Table 2. Electrical parameters at the motor input at different levels of load on the AM shaft

$I_1, \text{А}$	$U_{\text{AB}}, \text{В}$	$U_{\text{AN}}, \text{В}$	$P_1, \text{Вт}$	$Q_1, \text{ВАр}$	$S_1, \text{ВА}$	$\cos\varphi_{\text{ЭКВ}}$
1,1	403,7	236	644	425	1414	0,46
0,8	402,9	235	556	401	1302	0,43
0,6	402,7	234	537	403	1288	0,40
0,4	402,8	235	403	314	1007	0,39
0,1	403,5	236	168	135	438	0,38

Так как ток, потребляемый АД, имеет несинусоидальный характер, квадрат полной мощности не равен сумме квадратов активной и реактивной мощностей (выражение 2) [7].

$$S^2 \neq P^2 + Q^2 \quad (2)$$

Следует отметить, что во всех режимах работы электропривода имеют место большие значения потребляемой реактивной мощности (табл. 2). Номинальное значение $\cos\varphi$ судовых дизель-генераторов обычно не превышает 0,8. При большом числе частотно-регулируемых асинхронных электроприводов на судне будет невозможна полная загрузка дизель-генераторов по активной мощности [8].

Значение суммарного коэффициента гармонических составляющих тока и отдельных гармоник определяется по выражениям [9]:

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

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

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

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U не превышает 1,3 %.

Таблица 3. Гармонический состав тока, эмиттируемый электроприводом в питающую сеть, при различных нагрузках на валу асинхронного двигателя

Table 3. Harmonic composition of the current emitted by the electric drive to the supply network, at various loads on the shaft of the asynchronous motor

Параметры Нагрузка, %	Фаза	THD _I , %	H3, %	H5, %	H7, %	H9, %	H11, %	H13, %	H15, %
100	A	218,5	16,0	96,6	91,4	12,1	86,8	77,4	6,5
	B	196,8	1,9	93,8	91,2	2,4	79,0	75,2	3,5
	C	217,6	16,3	95,7	94,2	12,1	83,9	79,9	4,4
75	A	224,1	23,4	96,5	92,5	18,6	87,1	79,5	11,1
	B	204,1	7,4	95,0	91,0	7,0	82,4	76,0	5,5
	C	227,6	15,2	95,6	95,6	12,3	85,0	84,0	6,7
50	A	228,9	29,8	95,9	92,8	24,6	86,7	80,6	16,3
	B	204,5	12,5	95,0	88,9	13,2	83,6	73,6	11,8
	C	229,4	15,7	94,6	96,3	13,4	83,6	85,6	8,8
25	A	234,2	28,0	97,4	91,7	23,9	90,1	78,9	17,2
	B	207,5	10,0	93,8	90,7	10,5	92,1	77,3	9,1
	C	235,0	16,0	94,9	96,9	14,1	84,5	87,1	9,9
10	A	247,8	45,1	96,5	91,0	39,8	89,7	78,6	31,8
	B	214,7	6,0	92,7	91,7	7,9	80,7	79,7	8,7
	C	243,5	38,3	96,2	95,8	33,6	85,6	84,9	24,0

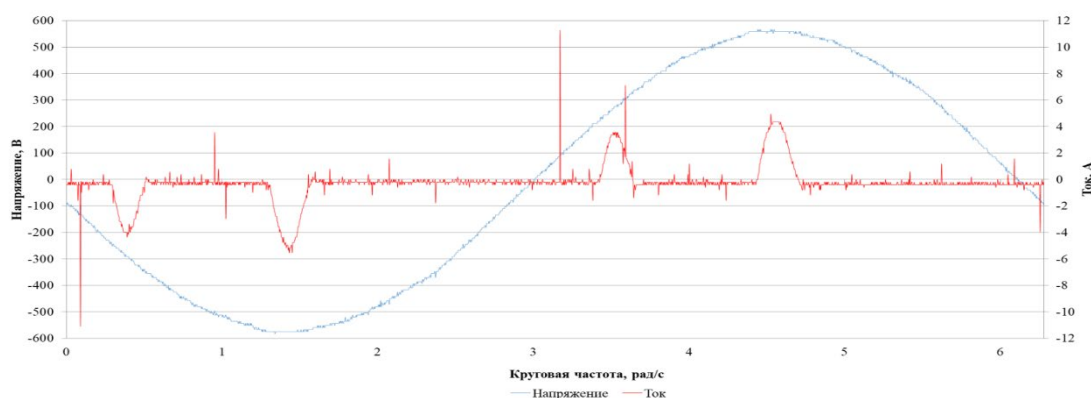


Рис. 4. Осциллограммы сетевого тока и напряжения при мощности на валу асинхронного двигателя, равной $0,5P_{\text{ном}}$

Fig. 4. Oscillograms of the network current and voltage at a power on the shaft of an asynchronous motor equal to $0,5P_{\text{ном}}$

Наибольшие по величине эмиттируемые в сеть гармоники тока – $n = 5, 7, 11, 13$, что обусловлено использованием шестифазного выпрямителя (рис. 1):

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

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

Величины этих гармоник незначительно зависят от нагрузки на валу АД. Распространяясь по элементам судовой электроэнергетической системы, они приводят к дополнительным потерям в кабелях, обмотках электрических машин и аппаратах [10]. Кроме того, 7-я и 13-я гармоники тока образуют прямую последовательность и создают вращающиеся моменты в электрических машинах, совпадающие с направлением вращения ротора, а 5-я и 11-я гармоники образуют обратную последовательность и создают вращающиеся моменты в электрических машинах в обратном направлении. Как результат – появление тормозных моментов и вибраций на валу электрических машин на частотах 300 Гц и 600 Гц, а также увеличение мощности, потребляемой из сети за счет затрат мощности на компенсацию тормозных моментов, обусловленных токами 5-й и 7-й гармоник [11–13].

Представляет интерес наличие третьих гармоник тока, эмитируемых в питающую сеть. Эти гармоники являются токами нулевой последовательности. Так как судовая сеть не имеет нулевого провода (как и лабораторная установка), то ток 3-й гармоники от одной фазы замыкается по проводам двух других фаз. Этот ток создает в электрических машинах поле нулевой последовательности с вытекающими последствиями [12].

В табл. 4 и 5 приведены результаты обработки гармонического состава тока и напряжения на входе АД при различных уровнях нагрузки на валу АД.

Таблица 4. Гармонический состав тока на входе двигателя при различных уровнях нагрузки на валу

Table 4. Harmonic composition of the current at the motor input at various levels of load on the shaft

Параметры Нагрузка, %	Фаза	THD _r , %	H3, %	H5, %	H7, %	H9, %	H11, %	H13, %	H15, %
100	A	29,5	0,2	22,9	10,9	0,3	9,0	6,0	0,1
	B	29,2	0,6	22,4	11,2	0,6	8,8	6,3	0,1
	C	29,6	0,5	23,2	10,6	0,4	9,3	5,9	0,6
75	A	30,3	0,3	22,9	11,1	0,5	9,0	6,2	0,2
	B	30,3	2,3	22,7	11,2	1,8	9,2	6,4	0,2
	C	31,0	0,5	23,2	10,8	0,4	9,4	6,2	0,9
50	A	30,9	0,4	22,7	11,2	0,6	9,0	6,2	0,3
	B	30,3	3,9	22,7	10,9	3,3	9,3	6,2	0,3
	C	31,2	0,5	22,9	10,8	0,4	9,3	6,3	1,2
25	A	31,6	0,4	23,1	11,0	0,6	9,3	6,1	0,3
	B	30,8	3,2	22,4	11,1	2,6	10,3	6,5	0,3
	C	32,0	0,5	23,0	10,9	0,5	9,4	6,4	1,4
10	A	33,5	0,6	22,9	11,0	1,0	9,3	6,1	0,5
	B	31,9	1,9	22,1	11,3	2,0	9,0	6,7	0,2
	C	33,1	1,2	23,3	10,8	1,1	9,5	6,3	3,3

Таблица 5. Гармонический состав напряжения на входе двигателя при различных уровнях нагрузки на валу

Table 5. Harmonic composition of the voltage at the motor input at various levels of load on the shaft

Параметры Нагрузка, %	Фазы	THD _U , %	H3, %	H5, %	H7, %	H9, %	H11, %	H13, %	H15, %
100	AB	3,1	0,7	1,5	2,2	0,6	1,1	0,5	0,3
75	AB	3,4	0,8	1,9	1,8	0,6	1,1	0,5	0,3
50	AB	3,7	0,8	1,7	2,6	0,3	1,1	0,4	0,3
25	AB	3,8	0,8	1,9	2,6	0,3	1,1	0,4	0,3
10	AB	4,0	0,8	1,9	2,6	0,3	1,2	0,4	0,3

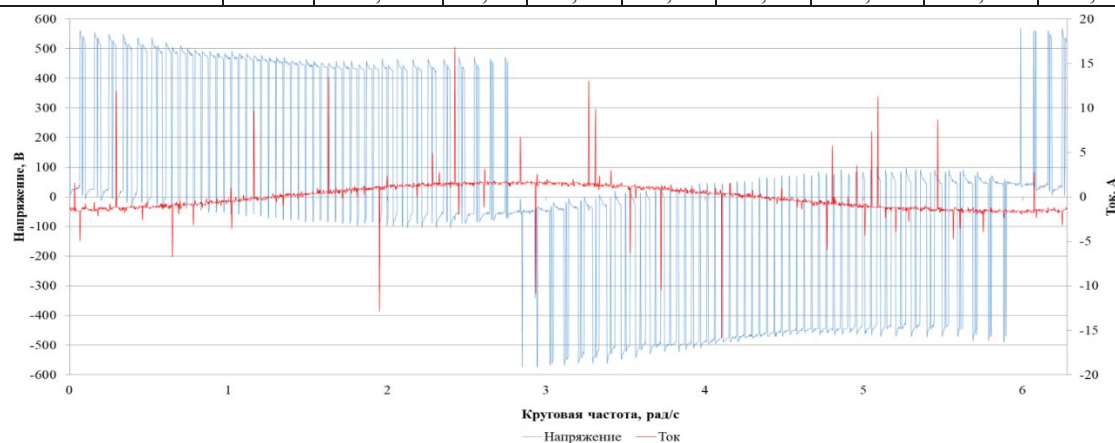


Рис. 5. Осциллограммы тока и напряжения на входе асинхронного двигателя при мощности на валу двигателя, равной $0,5P_{ном}$

Fig. 5. Oscillograms of current and voltage at the input of an asynchronous motor with a power on the motor shaft equal to $0.5P_{nom}$

Измерение частотного спектра сигналов осевых вибраций АД (f_x , f_y , f_z) посредством акселерометра показано на рис. 6.

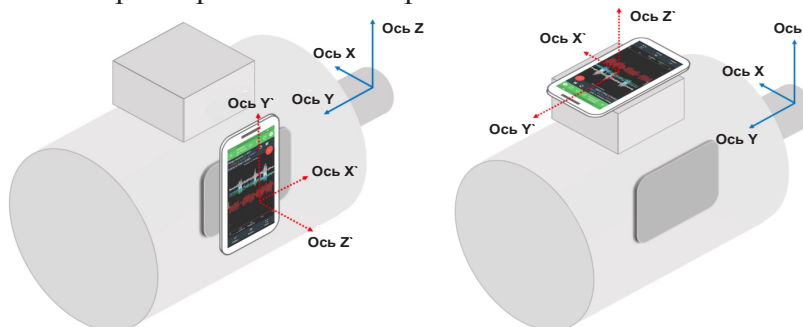


Рис. 6. Схема экспериментальной установки для измерения частотного спектра сигналов осевых вибраций асинхронного электродвигателя

Fig. 6. Scheme of the experimental setup for measuring the frequency spectrum of signals of axial vibrations of an asynchronous electric motor

Основными параметрами вибрации для оценки технического состояния динамических машин в соответствии с ГОСТ ИСО 10816-1 [14] являются виброскорость, виброперемещение и виброускорение.

Согласно исследованиям, проведенным в работах [13, 15, 16], данные о вибрации АД содержат существенную аналитическую информацию о внутренних электрических проблемах двигателя (состояние обмотки и сердечника статора и ротора, степень эксцентриситета воздушного зазора) и внешних электрических проблемах (несимметрия тока/напряжения, искажения формы волны напряжения в системе электроснабжения).

Нами были проведены экспериментальные исследования спектра вибраций при различных нагрузках на валу АД. Наибольший интерес вызывает спектр вибраций при нагрузке на валу АД = 0,1 $P_{ном.}$ (рис. 7).



Рис. 7. Спектр вибраций исследуемого двигателя от 0 до 50 Гц и от 250 до 300 Гц при 10 %-й нагрузке на валу

Fig. 7. Vibration spectrum of the studied motor from 0 to 50 Hz and from 250 to 300 Hz at 10 % load on the shaft

Анализ спектра показывает, что имеют место три спектра вибраций: на частоте, близкой к 20 Гц, что может свидетельствовать о несимметрии полюсов исследуемого асинхронного двигателя [11]; на частоте 300 Гц от взаимодействия моментов 5-й (обратной последовательности) и 7-й (прямой последовательности) гармоник и на частоте 50 Гц, обусловленной воздействием основной гармоники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании экспериментальных исследований выявлен высокий уровень высших гармоник тока (3, 5, 7, 9, 11, 13), эмитируемых частотно-регулируемым электроприводом в питающую сеть до $K_I = 229\%$. Как результат – создание тормозных моментов и появление вибраций на валу электрических машин и элементов судовых энергетических установок, в состав которых они входят на частотах 300 Гц и 600 Гц, а также увеличение мощности, потребляемой из сети за счет затрат мощности на компенсацию тормозных моментов, обусловленных токами 5 и 7, 11 и 13-й гармоник.

2. Во всех режимах работы электропривода имеют место высокие значения потребляемой реактивной мощности. При большом числе частотно-регулируемых асинхронных электроприводов на судне будет невозможна полная загрузка дизель-генераторов по активной мощности.

3. При работе частотно-регулируемого электропривода эмитируются в питающую сеть гармоники тока, кратные трем. Эти гармоники являются токами нулевой последовательности. Так как судовая сеть не имеет нулевого провода, то ток третьей гармоники от одной фазы замыкается по проводам двух других фаз.

Этот ток создает в электрических машинах поле нулевой последовательности с вытекающими последствиями.

4. Наибольший интерес вызывают результаты экспериментальных исследований спектра вибраций при нагрузке на валу АД = 0,1 $P_{ном}$: на частоте, близкой к 20 Гц, что может свидетельствовать о несимметрии полюсов исследуемого асинхронного двигателя; на частоте 300 Гц от взаимодействия моментов 5-й (обратной последовательности) и 7-й (прямой последовательности) гармоник; на частоте 50 Гц, обусловленной воздействием основной гармоники.

Список источников

1. Романенко Н. Г., Головкин С. В., Жуманазаров М. П. Исследование свойств преобразователя частоты в качестве источника питания судового электрооборудования // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Морская техника и технология. 2017. № 1. С. 76–81.
2. Qin J., Liu Y., Grosvenor R. A framework of energy consumption modelling for additive manufacturing using internet of things // Proc. CIRP. 2017. V. 63. P. 307–312.
3. Batouta K., Aouhassi S., Mansouri K. Energy efficiency in the manufacturing industry – a tertiary review and a conceptual knowledge-based framework // Energy Reports. 2023. V. 9. P. 4635–4653.
4. Achieving energy efficiency with medium voltage variable speed drives for ventilation-on-demand in South African mines / Andries J. H. Nel, Deon C. Arndt, Jan C. Vosloo, Marc J. Mathews // Journal of Cleaner Production. 2019. V. 232. P. 379–390.
5. Шабалин Л. Д., Чушанков Д. Ю. Обоснование модернизации судовых электроприводов грузоподъемных устройств на системы с использованием преобразователей // Известия Калининградского государственного технического университета. 2016. № 42. С. 213–222.
6. Кравчик А. Э., Шлаф М. М., Афонин В. И. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник. Москва: Энергоатомиздат, 1982. 380 с.
7. Поливанов К. М. Теоретические основы электротехники: учеб. для вузов. Москва: Энергия, 1972. 240 с.
8. Белей В. Ф., Коротких К. В. Оценка режимов работы дизель-генераторов на основе диаграммы располагаемых мощностей // Известия Калининградского государственного технического университета. 2021. № 62. С. 135–145.
9. 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.
10. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. Москва: Энергоатомиздат, 1984. 160 с.
11. Арриллага Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
12. Копылов И. П. Электрические машины: учеб. пособие для вузов. Москва: Логос, 2000. 607 с.
13. Tsypkin M. Induction Motor Condition Monitoring: Vibration Analysis Technique – Diagnosis of Electromagnetic Anomalies // Schaumburg, IL, USA. 2017.

URL:

https://www.academia.edu/36681354/Induction_Motor_Condition_Monitoring_Vibration_Analysis_Technique_a_Practical_Implementation (дата обращения: 1.07.2023).

14. ГОСТ ИСО 10816-1-97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования. Введ. 1999-08-01. Москва: Стандартинформ, 2014, 18 с.

15. Tsyppkin M. Vibration of Induction Motors Operating with Variable Frequency Drives - a Practical Experience // IEEE 28-th Convention of Electrical and Electronics Engineers. 2014. Eilat, Israel. URL: https://www.academia.edu/35527361/Vibration_of_Induction_Motors_Operating_with_Variable_Frequency_Drives_a_Practical_Experience (дата обращения: 2.07.2023).

16. Романовский А. И. Исследование вибродиагностических признаков несимметрии тока асинхронного двигателя. Иркутск. 2009. С. 185–191. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vibrodiagnosticheskikh-priznakov-nesimmetrii-toka-asinhronnogo-dvigatelya> (дата обращения: 3.07.2023).

References

1. Romanenko N. G., Golovko S. V., Zhumanazarov M. P. Issledovaniye kharakteristik preobrazovaniya chastoty v kachestve istochnika pitaniya sudovogo elektrooborudovaniya [Study of the properties of the frequency converter as the power supply of the ship electric equipment]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2017, no. 1, pp. 76–81.

2. Qin J., Liu Y., Grosvenor R. A framework of energy consumption modelling for additive manufacturing using internet of things. *Proc. CIRP*. 2017, vol. 63, pp. 307–312.

3. Batouta K., Aouhassi S., Mansouri K. Energy efficiency in the manufacturing industry – a tertiary review and a conceptual knowledge-based framework. *Energy Reports*. 2023, vol. 9, pp. 4635–4653.

4. Andries J. H. Nel, Deon C. Arndt, Jan C. Vosloo, Marc J. Mathews. Achieving energy efficiency with medium voltage variable speed drives for ventilation-on-demand in South African mines. *Journal of Cleaner Production*. 2019, vol. 232, pp. 379–390.

5. Shabalin L. D., Chushankov D. Yu. Obosnovaniye modernizatsii sudovykh elektroprivodov gruzopod'yemnykh ustroystv na sistemy s ispol'zovaniyem preobrazovateley [Justification of modernization of ship electric drives of lifting devices for systems using converters]. *Izvestiya KGTU*, 2016, no. 42, pp. 213–222.

6. Kravchik A. E., Shlaf M. M., Afonin V. I. *Asinkhronnyye dvigateli serii 4A: spravochnik* [4A Series Induction Motors: handbook]. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1982. 380 p.

7. Polivanov K. M. *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki: ucheb. dlya vuzov* [Theoretical foundations of electrical engineering: textbook for universities]. Moscow. Energy Publ., 1972. 240 p.

8. Beley V. F., Korotkikh K. V. Otsenka rezhimov raboty dizel'-generatorov na osnove diagrammy raspolagayemykh moshchnostey [Assessment of the operating mod-

es of a ship service diesel generator based on capability diagram]. *Izvestiya KGTU*, 2021, no. 62, pp. 135–144.

9. 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.).

10. Zhezhelenko I. V. *Vysshiyе garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatiy* [Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises]. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1984. 160 p.

11. Arryllaga J., Bradley D., Bodger P. *Garmoniki v elektricheskikh sistemakh* [Power system harmonics]. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1990. 320 p.

12. Kopylov I. P. *Elektricheskiye mashiny: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Electric machines: textbook for universities]. Moscow. Logos Publ., 2000, 607 p.

13. Tsypkin M. Induction Motor Condition Monitoring: Vibration Analysis Technique – Diagnosis of Electromagnetic Anomalies. Schaumburg, IL, USA. 2017.: Available at: https://www.academia.edu/36681354/Induction_Motor_Condition_Monitoring_Vibration_Analysis_Technique_a_Practical_Implementation (Accessed 1 July 2023).

14. State Standard ISO 10816-1-97. Vibration. Monitoring the condition of machines based on the results of vibration measurements on non-rotating parts. Part 1. General requirements. Moscow. Standartinform Publ., 2014. 18 p. (In Russian).

15. Tsypkin M. Vibration of Induction Motors Operating with Variable Frequency Drives – a Practical Experience. IEEE 28-th Convention of Electrical and Electronics Engineers. 2014. Eilat, Israel.: Available at: https://www.academia.edu/35527361/Vibration_of_Induction_Motors_Operating_with_Variable_Frequency_Drives_a_Practical_Experience (Accessed 2 July 2023).

16. Romanovskiy A. I. *Issledovaniye vibrodiagnosticheskikh priznakov nesimmetrii toka asinkhronnogo dvigatelya* [Investigation of vibrodiagnostic signs of asymmetry of the current of an asynchronous motor]. Irkutsk. 2009. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vibrodiagnosticheskikh-priznakov-nesimmetrii-toka-asinhronnogo-dvigatelya> (Accessed 3 July 2023).

Информация об авторах

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

К. В. Коротких – аспирант кафедры энергетики

Information about the authors

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

K. V. Korotkikh – PhD student of the Department of Power Engineering

Статья поступила в редакцию 05.07.2023; одобрена после рецензирования 28.07.2023; принята к публикации 05.09.2023.

The article was submitted 05.07.2023; approved after reviewing 28.07.2023; accept for publication 05.09.2023.