DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-395-132-140
УДК 629.5.03-83

И.М. Калинин
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ГРЕБНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ТРЕМЯ ОБМОТКАМИ НА СТАТОРЕ

Объект и цель научной работы. Объектом научной работы является система электродвижения ледокола лидера. Цель работы – создание математической и компьютерной модели гребного электропривода с асинхронным электродвигателем с тремя обмотками на статоре для исследования установившихся, переходных, несимметричных и аварийных режимов в электроэнергетической системе и системе электродвижения ледокола лидера.
Материалы и методы. Используются средства и методы компьютерного моделирования сложных технических объектов.
Основные результаты. Разработана математическая модель трехобмоточного асинхронного двигателя в фазных координатах. Выполнены расчетные исследования прямого пуска гребного электродвигателя мощностью 15 МВт, а также установившихся и переходных режимов судовой электроэнергетической системы, состоящей из синхронного генератора мощностью 36 МВт, двухобмоточных трансформаторов и гребного электропривода с асинхронным электродвигателем мощностью 15 МВт в фазных координатах с тремя обмотками на статоре и трехуровневым преобразователем частоты. Расчетным путем определен коэффициент несинусоидальности кривой напряжения на шинах главного распределительного щита при работе гребного электродвигателя 15 МВт от синхронного генератора мощностью 36 МВт.
Заключение. Разработанную математическую модель асинхронного двигателя можно применять для расчета установившихся и переходных режимов в судовых электроэнергетических системах с частотно-регулируемым трехобмоточным асинхронным двигателем, и, кроме того, для расчета электромеханических и электромагнитных процессов и отладки алгоритмов частотного управления. Это особенно актуально связи с тем, что асинхронные электрические машины, входящие в состав электромашинных агрегатов гребных электродвигателей ледокола лидера, имеют по три трехфазных обмотки, уложенных на статоре, и опыт создания судовых электроприводов мощностью 15 МВт в настоящее время отсутствует.
Ключевые слова: система электродвижения, асинхронный двигатель, гребной электропривод, компьютерная модель.
Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-395-132-140
UDC 629.5.03-83

I. Kalinin
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

COMPUTER-BASED MODEL OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC PROPULSION DRIVE WITH THREE STATOR WINDINGS

Object and purpose of research. This paper discusses electric propulsion system of leader icebreaker. Its purpose was to develop mathematical and computer-based model of electric propulsion drive powered by asynchronous motor with three stator windings for further investigation of steady, transitional, asymmetric and emergency operation scenarios of electric power and propulsion system for the leader icebreaker.
Materials and methods. Hardware and methods for computer-based simulation of complex engineering structures.

Для цитирования: Калинин И.М. Компьютерная модель асинхронного гребного электропривода с тремя обмотками на статоре. Труды Крыловского государственного научного центра. 2021; 1(395): 132–140.
For citations: Kalinin I. Computer-based model of asynchronous electric propulsion drive with three stator windings. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2021; 1(395): 132–140 (in Russian).

Main results. Development of the mathematical model representing asynchronous motor with three windings in phase coordinates. Computational studies on direct startup of 15 MW propulsion motor, as well as on steady and transitional operational conditions of ship electric power system consisting of 36 MW synchronous genset, two-winding transformers and electric propulsion drive with 15 MW asynchronous motor in phase coordinates with three stator windings and three-level frequency converter. Calculation of voltage non-sinusoidality ratio for MSB buses with operation of 15 MW propulsion motor driven by 36 MW synchronous genset.

Conclusion. Mathematical model of asynchronous motor suggested in this paper could be used to calculate steady and transitional operation scenarios of marine power systems with frequency-controlled three-winding asynchronous motor, as well as to calculate electromechanical and electromagnetic processes and refine frequency control algorithms. This is especially relevant because each of the asynchronous electric machines used in the electromechanical assemblies of leader icebreaker propulsion motors has three stator windings, and this icebreaker is the first experience of applying a 15 MW marine electric drive.

Keywords: electric propulsion system, asynchronous motor, electric propulsion drive, computer-based model.
The author declares no conflicts of interest.

В интересах повышения скорости транспортировки грузов по Северному морскому пути [1] принято решение о строительстве атомного ледокола лидера (пр. 10510) с системой электродвижения (СЭД) и суммарной мощностью на винтах 120 МВт. Планируемая скорость движения данного ледокола во льдах толщиной 2 м составит 10–12 уз.

Упрощенная схема силовой части единой электроэнергетической системы (ЕЭЭС) ледокола лидера имеет вид, приведенный на рис. 1.

Электроэнергия в ЕЭЭС вырабатывается 4 главными турбогенераторами ГТГ1–ГТГ4 и подается на главные распределительные устройства ГРУ1–ГРУ4.

СЭД ледокола состоит из 4 гребных электроприводов (ГЭП) с 8 гребными электродвигателями (ГЭД) асинхронного типа с 3 трехфазными обмотками статора мощностью по 15 МВт, попарно соединенными в тандем. Управление ГЭД осуществляется преобразователями частоты ПЧ1–ПЧ12.

Для обеспечения электромагнитной совместимости СЭД с судовой сетью применяются трехобмоточные сетевые трансформаторы (ТР1–ТР24) с вторичными обмотками, соединенными в «звезду» и в «треугольник». Первичные обмотки трансформаторов каждого ГЭП также имеют соединения различного типа: обмотка одного – тип «звезда», двух других – тип «зигзаг».

В условиях современного высокого уровня развития информационных технологий и методов автоматизированного расчета компьютерное моделирование является важным инструментом для расчетных исследований на всех этапах жизненного цикла судового электрооборудования и средств автоматизации, позволяющим повысить качество их проектирования и эксплуатации. Применение компьютерного моделирования ЕЭЭС и СЭД обеспечивает:

- расчет электромагнитных и электромеханических процессов при переходных процессах и в аварийных режимах;
- исследование качества электроэнергии в электротехнических системах;
- расчет статических и динамических характеристик электроприводов;

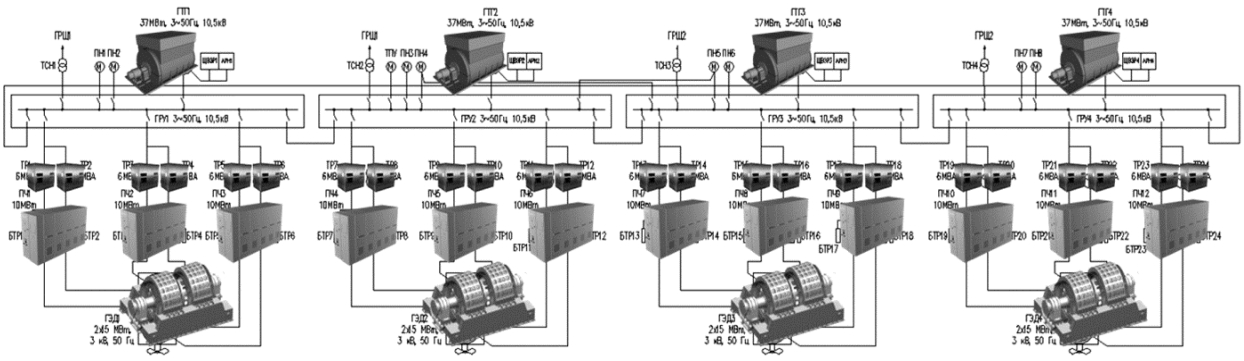


Рис. 1. Упрощенная схема единой электроэнергетической системы ледокола лидера
Fig. 1. Simplified layout of integrated electric propulsion system for leader icebreaker

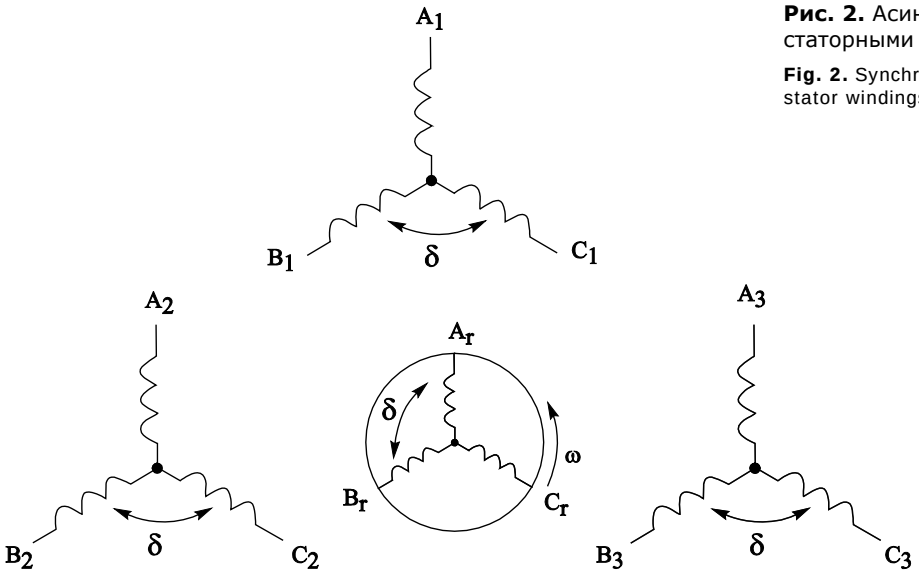


Рис. 2. Асинхронный двигатель с тремя статорными обмотками

Fig. 2. Synchronous motor with three stator windings

- разработку и отладку алгоритмов управления элементами ЕЭЭС, СЭД и систем в целом;
- пуско-наладку систем автоматики ЕЭЭС и СЭД.

Математические модели трехфазных асинхронных двигателей (АД) хорошо известны [2–5]. Также известны математические модели многофазных электрических машин [3, 5] в преобразованных координатах, в т.ч. асинхронных, в комбинированной системе координат [6].

В отраслевом стандарте судостроительной промышленности рекомендована система дифференциальных уравнений в преобразованной системе координат (оси *d*-*q*) [7].

Принцип создания математических моделей АД чаще всего заключается в записи уравнений в фазных координатах с дальнейшим переходом к преобразованным координатам [7, 8]. В преобразованных координатах АД представляется как двухфазная машина с перпендикулярно расположенными обмотками по вращающимся или неподвижным осям. Одним из допущений для такой модели является полная симметрия машины.

Применение моделей электрических машин в фазных координатах позволяет исследовать электромагнитные процессы при несимметрии питающего напряжения и неравенстве параметров обмоток.

Математическая модель АД с тремя обмотками на статоре в фазных координатах (рис. 2) разработана по аналогии с моделью АД с двумя обмотками [5, 9] и описывается следующим образом:

$$\left.\begin{aligned}
&[U_{s1}] = [R_s][I_{s1}] + p[\Psi_{s1}]\\
&[U_{s2}] = [R_s][I_{s2}] + p[\Psi_{s2}]\\
&[U_{s3}] = [R_s][I_{s3}] + p[\Psi_{s3}]\\
&[0] = [R_r][I_r] + p[\Psi_r]\\
&[\Psi_{s1}] = [L_s][I_{s1}] + [L_{vm}][I_{s2}] + [L_{vm}][I_{s3}] + [L_m][I_r]\\
&[\Psi_{s2}] = [L_s][I_{s2}] + [L_{vm}][I_{s1}] + [L_{vm}][I_{s3}] + [L_m][I_r]\\
&[\Psi_{s3}] = [L_s][I_{s3}] + [L_{vm}][I_{s1}] + [L_{vm}][I_{s2}] + [L_m][I_r]\\
&[\Psi_r] = [L_r][I_r] + [L_m]^T[I_{s1}] + [L_m]^T[I_{s2}] + [L_m]^T[I_{s3}]
\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

где

$$[U_{s1}] = \begin{bmatrix} U_{A1} \\ U_{B1} \\ U_{C1} \end{bmatrix};\ [I_{s1}] = \begin{bmatrix} I_{A1} \\ I_{B1} \\ I_{C1} \end{bmatrix};\ [\Psi_{s1}] = \begin{bmatrix} \Psi_{A1} \\ \Psi_{B1} \\ \Psi_{C1} \end{bmatrix};$$

$$[U_{s2}] = \begin{bmatrix} U_{A2} \\ U_{B2} \\ U_{C2} \end{bmatrix};\ [I_{s2}] = \begin{bmatrix} I_{A2} \\ I_{B2} \\ I_{C2} \end{bmatrix};\ [\Psi_{s2}] = \begin{bmatrix} \Psi_{A2} \\ \Psi_{B2} \\ \Psi_{C2} \end{bmatrix};$$

$$[U_{s3}] = \begin{bmatrix} U_{A3} \\ U_{B3} \\ U_{C3} \end{bmatrix};\ [I_{s3}] = \begin{bmatrix} I_{A3} \\ I_{B3} \\ I_{C3} \end{bmatrix};\ [\Psi_{s3}] = \begin{bmatrix} \Psi_{A3} \\ \Psi_{B3} \\ \Psi_{C3} \end{bmatrix};$$

$$[R_s]=\begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix};$$

$$[I_r]=\begin{bmatrix} I_{Ar} \\ I_{Br} \\ I_{Cr} \end{bmatrix};\ [\Psi_r]=\begin{bmatrix} \Psi_{Ar} \\ \Psi_{Br} \\ \Psi_{Cr} \end{bmatrix};\ [R_r]=\begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix};$$

$$[L_s]=\begin{bmatrix} L & -\frac{L_{vm}}{2} & -\frac{L_{vm}}{2} \\ -\frac{L_{vm}}{2} & L & -\frac{L_{vm}}{2} \\ -\frac{L_{vm}}{2} & -\frac{L_{vm}}{2} & L \end{bmatrix};$$

$$[L_r]=\begin{bmatrix} L_r & -\frac{L_{gm}}{2} & -\frac{L_{gm}}{2} \\ -\frac{L_{gm}}{2} & L_r & -\frac{L_{gm}}{2} \\ -\frac{L_{gm}}{2} & -\frac{L_{gm}}{2} & L_r \end{bmatrix};$$

$$[L_{vm}]=\begin{bmatrix} L_{vm1} & L_{vm2} & L_{vm3} \\ L_{vm3} & L_{vm1} & L_{vm2} \\ L_{vm2} & L_{vm3} & L_{vm1} \end{bmatrix};$$

$$[L_m]=\begin{bmatrix} L_{m1} & L_{m2} & L_{m3} \\ L_{m3} & L_{m1} & L_{m2} \\ L_{m2} & L_{m3} & L_{m1} \end{bmatrix};$$

$$L_{m1}=L_{gm}\cdot\cos(\gamma);\ \ L_{m2}=L_{gm}\cdot\cos(\gamma+\delta);$$

$$L_{m3}=L_{gm}\cdot\cos(\gamma-\delta);$$

U_s, I_s, Ψ_s, U_r, I_r, Ψ_r –напряжение, ток и потокосцепление обмоток статора и ротора соответственно;

L_s, R_s –индуктивность рассеяния и активное сопротивление обмоток статора соответственно;

L_r, R_r – индуктивность рассеяния и активное сопротивление обмотки ротора соответственно;

L_m – индуктивность намагничивания;

L_{vm} – взаимная индуктивность обмоток статора;

L_{gm} – индуктивность обмоток статора от главного магнитного поля;

$p = d/dt$ – оператор дифференцирования;

γ – угол поворота ротора;

δ – угол сдвига между обмотками фаз.

Электромагнитный момент рассчитывается по формуле

$$M=\frac{z_p}{\sqrt{3}}\begin{bmatrix} I_{A_r}(\Psi_{B_r}-\Psi_{C_r})+I_{B_r}(\Psi_{C_r}-\Psi_{A_r})+ \\ +I_{C_r}(\Psi_{A_r}-\Psi_{B_r}) \end{bmatrix}, \qquad (2)$$

где z_p – количество пар полюсов.

Для исследования соответствия математической модели трехобмоточного АД в фазных координатах теоретическим и практическим знаниям в области рассматриваемого типа электродвигателя проведен вычислительный эксперимент в программе MicroCap [10, 11] прямого пуска АД с 3 обмотками на статоре, не имеющими друг с другом пространственного сдвига.

Параметры эквивалентного трехфазного АД (2 АД по 15 МВт, соединенные в тандем) по данным завода-изготовителя приведены в табл. 1.

Таблица 1. Расчетные параметры эквивалентного трехфазного асинхронного двигателя
Table 1. Calculation parameters of equivalent three-phase asynchronous motor

Наименование параметра	Значение
Мощность, МВт	30
Ток фазы, А	1103
Номинальное линейное напряжение $U_{ном}$, В	1734
Частота вращения, об/мин	100
Момент, Нм	800 000
Момент инерции, кг·м^2	130 000
Индуктивное сопротивление рассеяния статора x_1 (при 50 Гц), Ом	0,162
Индуктивное сопротивление рассеяния ротора x_2 (при 50 Гц), Ом	0,0578
Сопротивление намагничивания x_m (при 50 Гц), Ом	2,35
Активное сопротивление статора r_s, Ом	0,0255
Активное сопротивление ротора r_r, Ом	0,0075

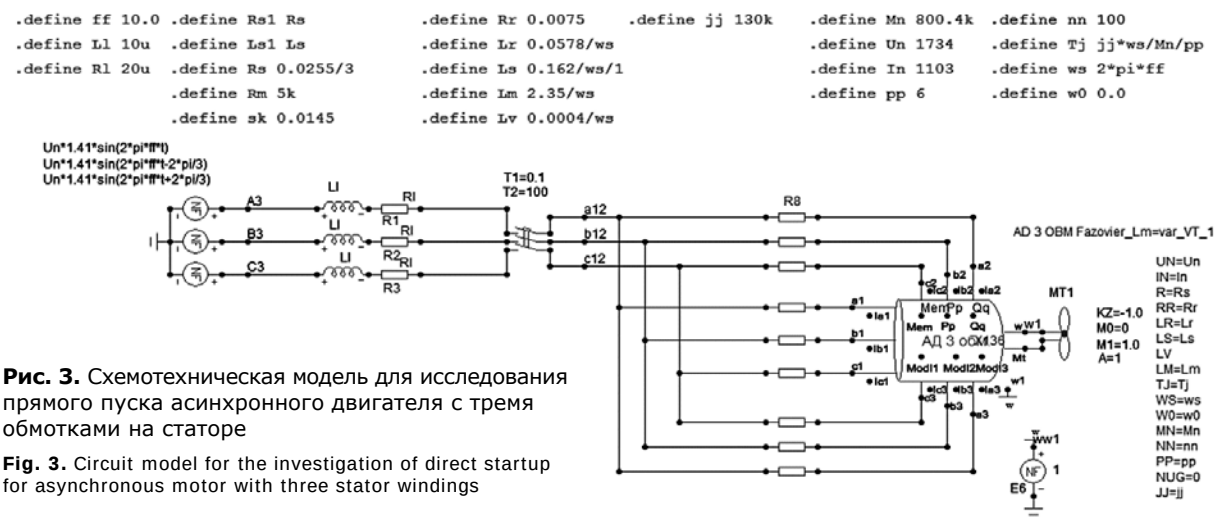


Рис. 3. Схемотехническая модель для исследования прямого пуска асинхронного двигателя с тремя обмотками на статоре

Fig. 3. Circuit model for the investigation of direct startup for asynchronous motor with three stator windings

Вычислительный эксперимент выполнен с помощью схемотехнической модели, изображенной на рис. 3.

Осциллограммы и результаты расчетов прямого пуска АД представлены на рис. 4 (см. вклейку).

Расчетные исследования прямого пуска АД подтвердили качественное соответствие изменений токов, электромагнитного момента и частоты вращения теоретическим и практическим знаниям в области электрических машин. Поскольку на практике не предполагается применения прямого пуска АД мощностью 15 МВт, то окончательная проверка адекватности представленной модели возможна только после создания реального частотно-управляемого электропривода. Тем не менее, автор считает, что модель целесообразно использовать в исследовательском проектировании и для отладки алгоритмов управления при создании частотно-управляемого электропривода с трехобмоточным АД.

Искажения синусоидальности напряжения и тока в ЕЭЭС, вносимые в первую очередь статическими преобразователями электроэнергии (СПЭ), являются основными источниками снижения электромагнитной совместимости (ЭМС) электрооборудования.

В ГОСТ 30372-95 [12] ЭМС определена как способность технического средства функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам.

Ухудшение ЭМС ЕЭЭС происходит в последовательности, приведенной на рис. 5 [9].

Источник электроэнергии вырабатывает напряжение

$$\dot{U} = \dot{E} - \dot{I}z_{\text{вн}} = \dot{E} - \Delta\dot{U}, \quad (3)$$

где $\dot{E}$ – электродвижущая сила (ЭДС) источника; $\dot{I}$ – ток источника; $z_{\text{вн}}$ – комплексное полное внутреннее сопротивление источника; $\Delta\dot{U}$ – падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника.

Ток источника складывается из токов статических СПЭ $\dot{I}_{\text{СПЭ}}$ и токов других потребителей электроэнергии $\dot{I}_{\text{П}}$:

$$\dot{I} = \dot{I}_{\text{СПЭ}} + \dot{I}_{\text{П}}. \quad (4)$$

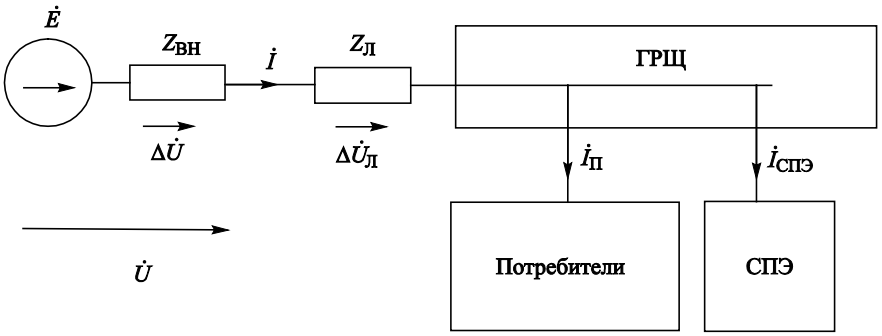


Рис. 5. Структура единой электроэнергетической системы

Fig. 5. Structure of integrated electric propulsion system

Следовательно, падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника будет включать несинусоидальное падение напряжения, вызванное несинусоидальным током СПЭ:

$$\Delta\dot{U} = \dot{I}_{\text{СПЭ}} z_{\text{вн}} + \dot{I}_{\text{П}} z_{\text{вн}}. \quad (5)$$

Таким образом, в соответствии с (3) напряжение источника электроэнергии будет несинусоидальным даже при формировании самим источником синусоидальной ЭДС (рис. 6, см. вклейку). Искаженное напряжение поступает на шины главного распределительного щита (ГРЩ) и подается потребителям.

Ток потребителей также становится несинусоидальным, что еще больше ухудшает ЭМС электрооборудования.

Снижение качества напряжения усугубляется падением напряжения в кабельных трассах (линиях электропередачи): $\Delta\dot{U}_{\text{Л}} = \dot{I}_{\text{Л}} z_{\text{Л}}$ (рис. 6).

Таким образом, напряжение на шинах ГРЩ определяется выражением

$$\dot{U}_{\text{ГРЩ}} = \dot{E} - \dot{I}_{\text{СПЭ}}(z_{\text{вн}} + z_{\text{Л}}) - \dot{I}_{\text{П}}(z_{\text{вн}} + z_{\text{Л}}). \quad (6)$$

Ухудшение ЭМС проявляется в следующем:

1. Ухудшаются виброшумовые характеристики: повышается акустический шум электромагнитного оборудования из-за электродинамических сил, создаваемых высшими гармониками тока; увеличивается вибрация электрических машин вследствие возникновения гармонических пульсаций электромагнитных моментов.
2. Снижаются КПД и коэффициент мощности электрических машин и трансформаторов вследствие увеличения потерь, вызванных скин-эффектом (переменный ток по сечению проводника распределяется не равномерно, а преимущественно в поверхностном слое), вихревыми токами и гистерезисом. Кроме того, появляются дополнительные потери из-за разности частот вращения магнитных полей токов высших гармоник и частоты вращения ротора.
3. Снижается полезная мощность на валах электродвигателей.
4. Увеличиваются потери в кабельных трассах.

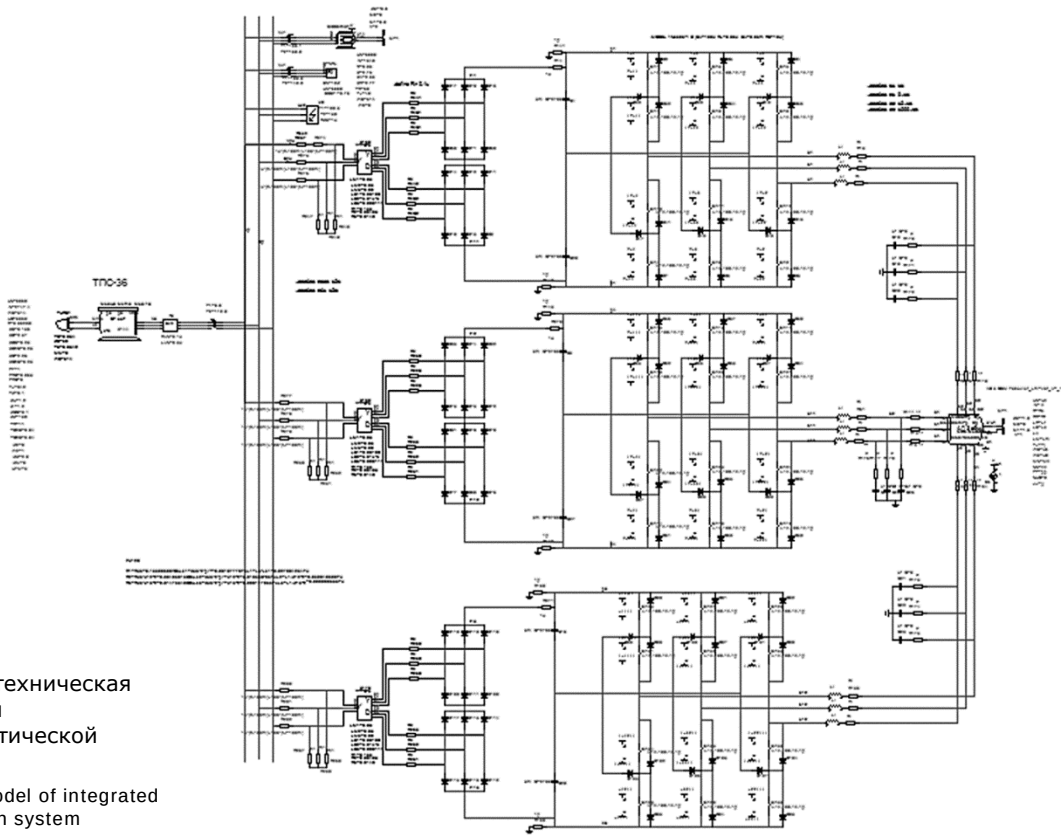


Рис. 7. Схемотехническая модель единой электроэнергетической системы

Fig. 7. Circuit model of integrated electric propulsion system

5. Создаются помехи радиоприему, наводки в системах управления и защиты.
6. Возникают резонансы токов и напряжений на частотах высших гармоник.

Для исследования трехобмоточного АД в фазных координатах с помощью математической модели был проведен вычислительный эксперимент частотного запуска АД с 3 обмотками на статоре, не имеющими друг с другом пространственного сдвига.

Схемотехническая модель ЕЭЭС для исследования работы СЭД с АД в фазных координатах мощностью 15 МВт с тремя обмотками на статоре и трехуровневым ПЧ при питании от главного турбогенератора ТПС-36 представлена на рис. 7.

Исходные данные для главного турбогенератора ТПС-36-2М2 М5 и согласующего трансформатора ТРСЗП-6000_10-ОМ4 приведены в табл. 2 и 3 соответственно.

Наиболее важными параметрами являются коэффициенты несинусоидальности (КНС) кривых напряжения $K_{нс}$, которые рассчитываются по формуле

$$K_{нс} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1}, \quad (7)$$

где U_n – амплитудные (действующие) значения высших гармонических составляющих периодиче-

Таблица 2. Исходные данные для главного турбогенератора ТПС-36-2М2 М5

Table 2. Input data for main turbogenset TPS-36-2M2 M5

Наименование параметра	Обозначение	Значение
Номинальная мощность, кВт	$P_{нг}$	36 000
Номинальное напряжение, В	$U_н$	10 500
Номинальный ток, А	$I_{нг}$	2477
Номинальная частота, Гц	f	50
Активное сопротивление обмотки статора генератора при 75°С, мОм/о.е. (ориентировочно)	$R_г$	5,12/0,00209
Сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси, о.е.	X''_d	0,181
Переходное индуктивное сопротивление по продольной оси, о.е.	X'_d	0,249
Сверхпереходная постоянная времени по продольной оси, с	T''_d	0,026
Базисное сопротивление, мОм	$Z_б$	2450

Таблица 3. Основные технические характеристики согласующего трансформатора ТРСЗП-6000_10-ОМ4

Table 3. Main technical parameters for tuning transformer TRSZP-6000_10-OM4

Наименование параметра	Значение
Номинальное значение мощности, МВ·А	6
Число фаз	3
Частота, Гц	50
Номинальное значение линейного напряжения первичной обмотки, кВ	10
Номинальное значение тока первичной обмотки, А	347
Номинальное значение линейного напряжения вентильной обмотки 1, кВ	2
Номинальное значение тока вентильной обмотки 1, А	875
Номинальное значение линейного напряжения вентильной обмотки 2, кВ	2
Номинальное значение тока вентильной обмотки 2, А	875
КПД, не менее	0,99
Напряжение короткого замыкания, %	7

ской кривой; n – номер гармонической составляющей; U_1 – амплитудное (действующее) значение основной гармонической составляющей.

По требованию Российского морского регистра судоходства [13] в полностью укомплектованной судовой электроэнергетической системе коэффициент несинусоидальности кривой напряжения не должен превышать 10 %.

В программах схемотехнического моделирования аналогичный смысл имеет суммарный коэффициент искажений THD (Total Harmonic Distortion) [9–11], поэтому он используется в исследованиях гармонического состава при вычислительном эксперименте.

Результаты вычислительных экспериментов представлены на рис. 8–13 (см. вклейку).

Таким образом, расчетным путем определен КНС кривых напряжения на шинах ГРЩ при работе в установившемся режиме ГЭД 15 МВт от синхронного генератора мощностью 36 МВт, равный 7,8 %, и подтверждено соответствие требованиям Российского морского регистра судоходства для исследуемого режима.

Выводы

Conclusion

В статье представлена математическая модель трехобмоточного АД в фазных координатах, позволяющая выполнять широкий круг теоретических и расчетных исследований, включая несимметричные режимы работы данного АД.

Наиболее актуальными являются расчетные исследования:

- функционирования трехобмоточных АД в составе судовых (корабельных) частотно-управляемых электроприводов различного назначения;
- возможности применения трехобмоточных АД в составе судовых (корабельных) систем электродвижения
- исследования влияния такого электропривода на качество электроэнергии в судовой электрической сети.

Расчетные исследования прямого пуска ГЭД мощностью 15 МВт подтвердили качественную работоспособность схемотехнической модели и соответствие математической модели теории электрических машин.

Разработанную математическую модель АД можно применять для расчета установившихся и переходных режимов в судовых электроэнергетических системах с частотно-регулируемым трехобмоточным АД, а также для расчета электромеханических и электромагнитных процессов при работе данного двигателя и отладки алгоритмов частотного управления.

В связи с тем, что асинхронные электрические машины, входящие в состав электромашинных агрегатов гребных электродвигателей ледокола лидера, имеют по 3 трехфазных обмотки, уложенные на статоре, а опыт создания судовых электроприводов мощностью 15 МВт в настоящее время отсутствует, при проектировании такого электропривода целесообразно использовать математическое моделирование.

Выполнены исследования установившихся и переходных режимов в электроэнергетической системе схемотехнической модели, состоящей из синхронного генератора мощностью 36 МВт, двухобмоточных трансформаторов и гребного электропривода с АД мощностью 15 МВт с тремя обмотками на статоре и трехуровневым ПЧ.

Расчетным путем определен КНС кривой напряжения на шинах ГРЩ при работе ГЭД 15 МВт от синхронного генератора мощностью 36 МВт, равный 7,8 %. Для исследуемого режима подтверждено соответствие требованиям Российского морского регистра судоходства.

Список использованной литературы

1. *Калинин И.М., Загородников М.А.* Методологический подход к оценке эффективности перевозок по северному морскому пути // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2016. № 6(256). С. 86–96. DOI: 10.5862/JE.256.8.
2. *Герман-Галкин С.Г.* Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0. Санкт-Петербург: Корона принт, 2001. 320 с.
3. *Сипайлов Г.А., Лоос А.В.* Математическое моделирование электрических машин. Москва: Высшая школа, 1980. 174, [2] с.
4. *Шрейнер Р.Т.* Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 653 с.
5. Математическое моделирование асинхронных двигателей с двумя обмотками на статоре. Часть 1 / *Калинин И.М.* [и др.] // Электроника и электрооборудование транспорта. 2012. № 4. С. 21–26. Начало. Окончание: № 5–6, 2012.
6. Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчет, применение) /

М.В. Пронин [и др.]; под ред. Е.А. Крутякова. Санкт-Петербург: Силовые машины: Электросила, 2004. 252 с.

7. ОСТ 5Р.6181–81. Судовые электроэнергетические системы. Методы расчета переходных процессов. [Б.м.], 1982. 596 с.
8. *Дмитриев Б.Ф., Черевко А.И., Гаврилов Д.А.* К вопросу о построении универсальной математической модели обобщённой электрической машины в программной среде MatLab-Simulink // Электротехника. 2005. № 7. С. 3–8.
9. *Калинин И.М.* Развитие теории и методов расчета режимов судовых единых электроэнергетических систем: дис. … д-ра техн. наук: 05.09.03 / И.М. Калинин [Место защиты: Санкт-Петербургский гос. морской технический ун-т]. Санкт-Петербург, 2015. 440 с.
10. *Амелина М.А., Амелин С.А.* Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. Москва: Горячая линия-Телеком, 2007. 464 с.
11. *Разевиг В.Д.* Система схемотехнического моделирования Micro–Cap V. Москва: Солон, 1997. 273 с.
12. ГОСТ 30372-2017 (IEC 60050-161:1990) Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. Москва: Стандартинформ, 2018. V, 58 с.
13. Правила классификации и постройки морских судов (НД № 2-020101-124). Ч. II: Корпус. Санкт-Петербург: Рос. морской регистр судоходства, 2020. 297 с.

References

1. *I.M. Kalinin, M.A. Zagorodnikov*. Methodological approach to efficiency assessment of NSR shipping // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics. 2016. No. 6(256). P. 86–96. DOI: 10.5862/JE.256.8 (*in Russian*).
2. *S.G. German-Galkin.* Computer-based simulation of semiconductor systems in MATLAB. St. Petersburg: Korona-print, 2001. 320 p. (*in Russian*).
3. *G.A. Sipailov, A.V. Loos.* Mathematical modeling of electric machines. Moscow: Higher School, 1980. 174, [2] p. (*in Russian*).
4. *R.T. Schreiner*. Mathematical modeling of AC drives with semiconductor frequency converters. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2000. 653 p. (*in Russian*).
5. Mathematical modeling of asynchronous motors with two windings on the stator. Part 1 / *Kalinin I.M.* [et al.] // Electronics and electrical equipment of transport. 2012. No. 4. P. 21–26. Beginning. End: No. 5–6, 2012 (*in Russian*).
6. Electric drives and systems with electric machines and semiconductor converters (modeling, calculation, application) / *M.V. Pronin* [et al.]; ed. by *E.A. Krutyakov*. St. Petersburg: Power Machines: Electrosila, 2004. 252 p. (*in Russian*).
7. Industrial standard OST 5P. 6181-81. Marine electric power systems. Methods for calculating transient processes. [B.M.], 1982. 596 p. (*in Russian*).
8. *B.F. Dmitriev, A.I. Cherevko, D.A. Gavrilov.* On the construction of universal mathematical model of generalized electric machine in the MatLab-Simulink software environment // Electrical engineering. 2005. No. 7. P. 3–8 (*in Russian*).
9. *I.M. Kalinin.* Development of the theory and methods for calculating the modes of integrated electric power systems for ships: D.Sc. Theses: 05.09.03 / *I.M. Kalinin* [Defended at: Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping]. St. Petersburg, 2015. 440 p. (*in Russian*).
10. *M.A. Amelina, S.A. Amelin.* Circuit simulation program “Micro-Cap 8”. Moscow: Hotline-Telecom, 2007. 464 p. (*in Russian*).
11. *V.D. Razevig*. Circuit simulation system “Micro-Cap V”. Moscow: Solon, 1997. 273 p. (*in Russian*).
12. GOST 30372-2017 (IEC 60050-161: 1990) Electromagnetic compatibility of technical equipment. Terms and Definitions. Moscow: Standartinform, 2018. V, 58 p. (*in Russian*).
13. Rules for Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part 2 Hull. St. Petersburg, Russian Maritime Register of Shipping, 2020. 297 p. (*in Russian*).

Сведения об авторе

Калинин Игорь Михайлович, д.т.н., начальник отдела перспективного развития и инновационных разработок ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (911) 935-03-11. E-mail: kaigmi@mail.ru. https://orcid.org/0000-0003-1532-4449.

About the author

Igor M. Kalinin, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Prospective Development and Innovative Developments Department, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (911) 935-03-11. E-mail: kaigmi@mail.ru. https://orcid.org/0000-0003-1532-4449.

Поступила / Received: 31.08.20
Принята в печать / Accepted: 03.03.21
© Калинин И.М., 2021

Рис. 4. Результаты расчетов прямого пуска асинхронного двигателя

Fig. 4. Calculation results for direct startup of asynchronous motor

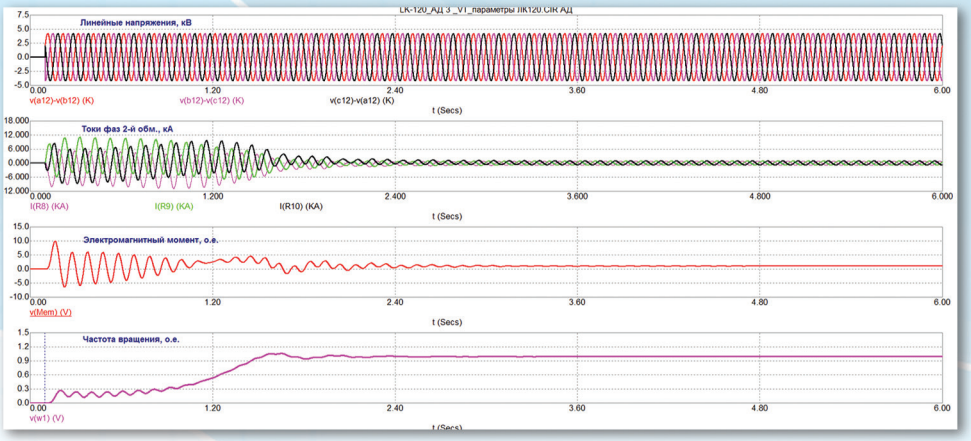


Рис. 6. Влияние синусоидальности тока на искажение синусоидальности напряжения источника электроэнергии

Fig. 6. Sinusoidality of current versus sinusoidality distortions of power supply voltage

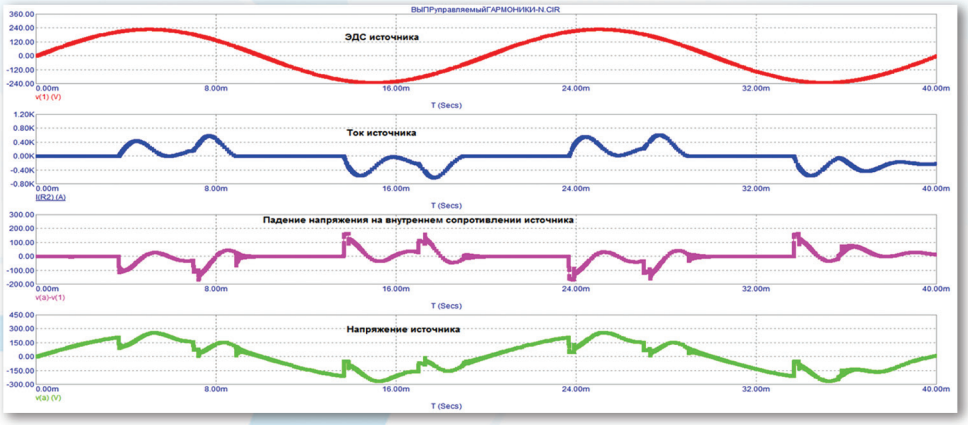


Рис. 8. Результаты расчета линейных напряжений токов и коэффициента несинусоидальности на выходе преобразователя частоты

Fig. 8. Calculation results for linear voltages and non-sinusoidality ratio at the output of frequency converter

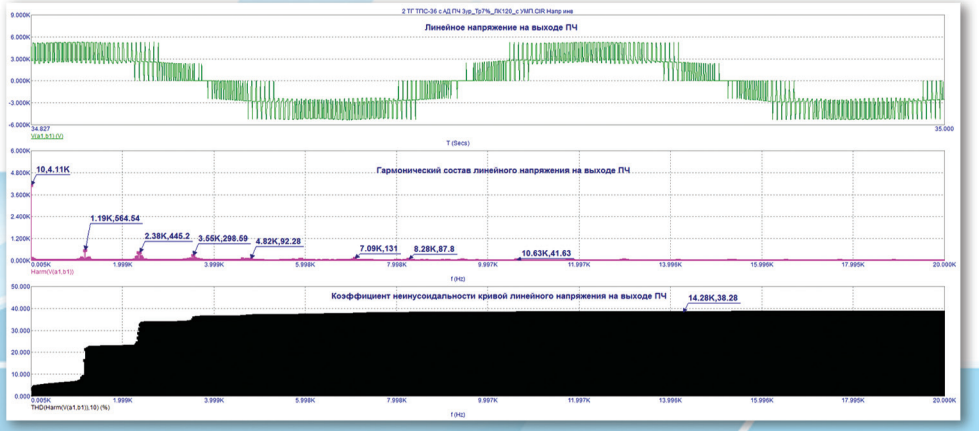
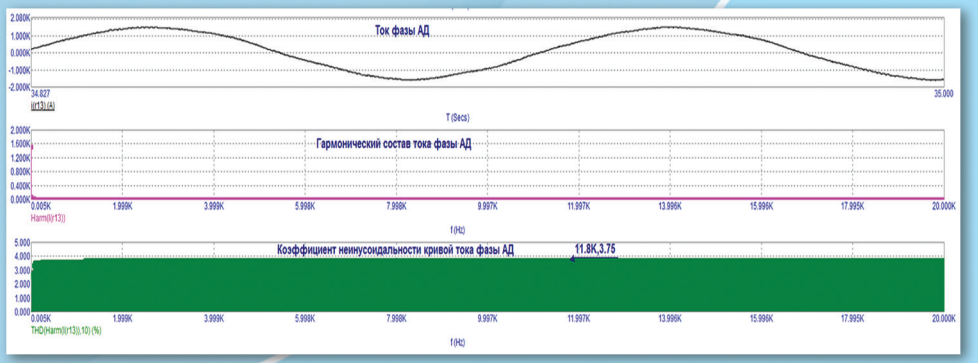


Рис. 9. Результаты расчета тока, гармонического состава и коэффициента несинусоидальности тока одной фазы асинхронного двигателя в установившемся режиме при работе от преобразователя частоты

Fig. 9. Calculation results for current, harmonic composition and current non-sinusoidality ratio for one phase of asynchronous motor operating steadily and driven by frequency converter



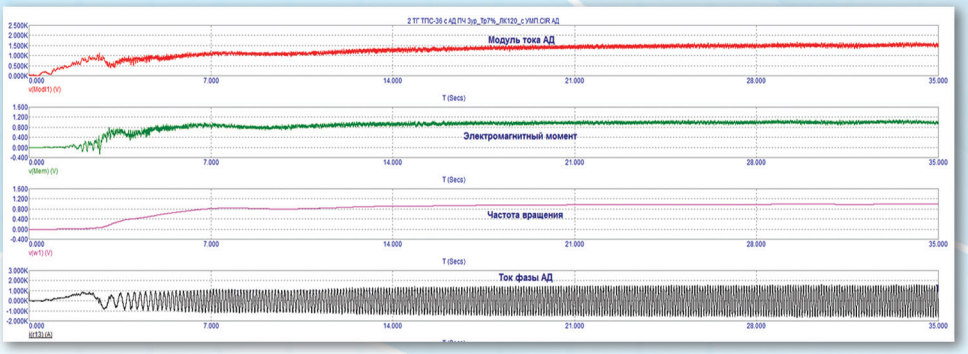


Рис. 10. Результаты расчета токов, электромагнитного момента и частоты вращения асинхронного двигателя в установившемся режиме при работе от преобразователя частоты

Fig. 10. Calculation results for currents, electromagnetic torque and rotation speed of asynchronous motor operating steadily and driven by frequency converter

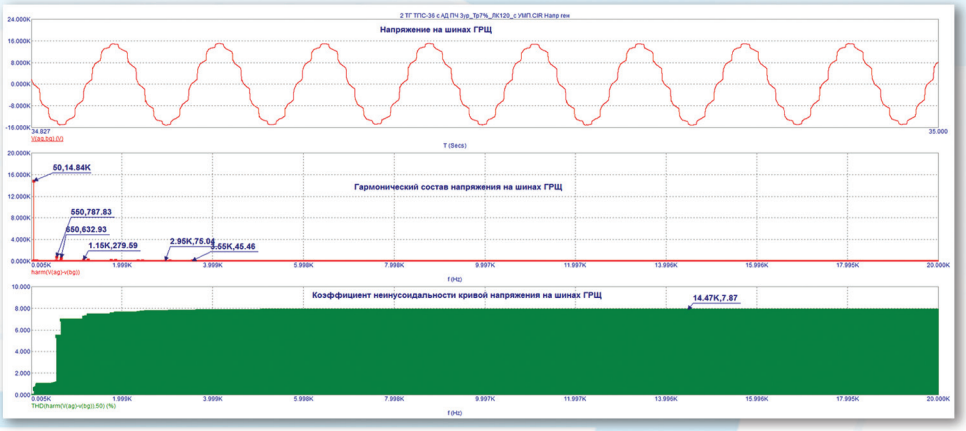


Рис. 11. Результаты расчета линейных напряжений и коэффициента несинусоидальности напряжения на шинах главного распределительного щита при установившемся режиме работы асинхронного двигателя от преобразователя частоты

Fig. 11. Calculation results for linear voltages and non-sinusoidality ratio at MSB buses with asynchronous motor operating steadily and driven by frequency converter

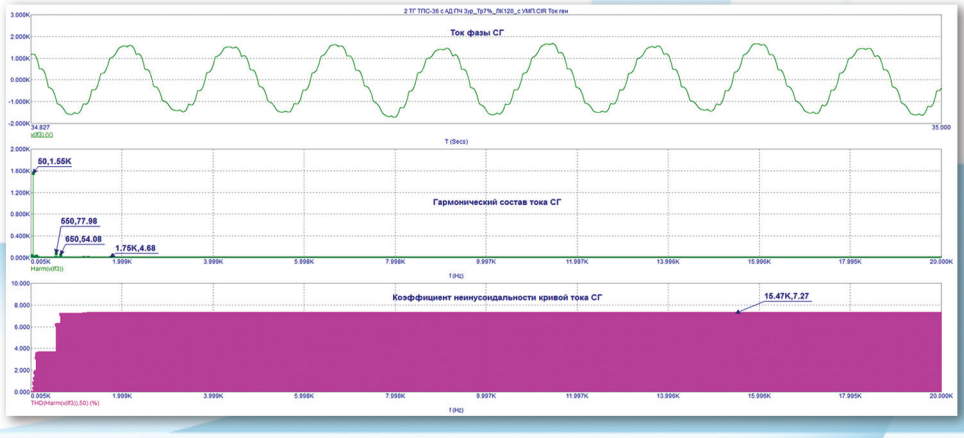


Рис. 12. Результаты расчета тока, гармонического состава и коэффициента несинусоидальности тока фазы синхронного генератора при установившемся режиме работы асинхронного двигателя от преобразователя частоты

Fig. 12. Calculation results for current, harmonic composition and current non-sinusoidality ratio for one phase of synchronous genset with asynchronous motor operating steadily and driven by frequency converter

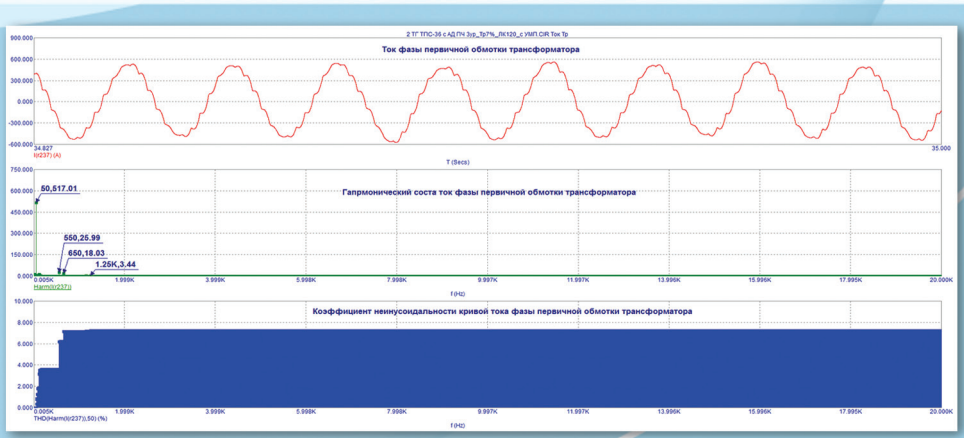


Рис. 13. Результаты расчета тока, гармонического состава и коэффициента несинусоидальности тока фазы трансформатора при установившемся режиме работы асинхронного двигателя от преобразователя частоты

Fig. 13. Calculation results for current, harmonic composition and current non-sinusoidality ratio for one phase of transformer current with asynchronous motor operating steadily and driven by frequency converter