

В.И. Вершинин, С.В. Махонин, В.А. Паршиков, В.А. Хомяк

Филиал «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ГРЕБНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА УНИВЕРСАЛЬНОГО АТОМНОГО ЛЕДОКОЛА ПРОЕКТА 22220

Объект и цель научной работы. Объектом работы является гребной электропривод, входящий в состав системы электродвижения универсального атомного ледокола проекта 22220, находящегося в стадии строительства. Цель работы заключается в создании компьютерной модели гребного электропривода ледокола, представляющего собой частотно-регулируемый электропривод с алгоритмом векторного управления. Модель предназначена как для анализа электромеханических процессов, протекающих в каналах электропривода, так и для синтеза его системы управления.

Материалы и методы. Исходными материалами являются научно-техническая информация, представленная в трудах, посвященных теории электропривода, а также личные наработки и многолетний опыт, накопленный авторами в ходе проведения НИР и ОКР по разработке судовых систем электродвижения. Решение поставленной задачи базируется на возможности моделирования электромеханических устройств и систем различного назначения средствами прикладной компьютерной программы Simulink и библиотеки блоков Sim Power Systems пакета MatLab.

Основные результаты. Создана компьютерная модель гребного электропривода универсального атомного ледокола проекта 22220, которая позволяет производить исследование электромеханических процессов, протекающих в различных режимах его работы. Получены виртуальные осциллограммы (токов, напряжений, частоты вращения, мощности, электромагнитного момента и пр.), характеризующие работу электропривода в режимах регулирования частоты вращения, регулирования мощности, изменения направления вращения, прокрутки вала, фрезерования льда, заклинивания винта, сбросе и набросе статического момента нагрузки. Разработанная компьютерная модель может также использоваться в процессах корректировки программного продукта, закладываемого в микропроцессорную систему управления гребным электроприводом (необходимость такой корректировки возникает при проведении пусконаладочных работ перед сдачей судна в эксплуатацию).

Заключение. Модель гребного электропривода ледокола проекта 22220 является инженерным инструментом, позволяющим уже на ранних стадиях технического проектирования производить исследование и анализ электромеханических процессов, результаты которых необходимы для проведения корректного выбора оборудования, входящего в состав электропривода. Разработанная модель после соответствующей корректировки может быть использована при техническом проектировании гребных электроприводов систем электродвижения ледокольных судов других проектов.

Ключевые слова: система электродвижения, гребной электропривод, асинхронный двигатель, векторное управление, преобразование координат, компьютерная модель, пакет прикладных программ Simulink MatLab, блок вычисления ненаблюдаемых координат, блок вычисления напряжения, диаграммы электромеханических процессов.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Вершинин В.И., Махонин С.В., Паршиков В.А., Хомяк В.А. Компьютерная модель гребного электропривода универсального атомного ледокола проекта 22220. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 1(383): 89–100.

УДК 629.5.035-83:681.3.066+629.565.1

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-383-89-100

V. Vershinin, S. Makhonin, V. Parshikov, V. Khomyak

TSNII SET branch of KSRC, St. Petersburg, Russia

COMPUTER-BASED MODEL OF ELECTRIC PROPULSION DRIVE FOR PROJECT 22220 MULTI-PURPOSE NUCLEAR ICEBREAKER

Object and purpose of research. The object of this study is electric propulsion drive of the electric propulsion system aboard Project 22220 multi-purpose nuclear icebreaker now under construction. The purpose of the study is to develop

computer-based model of electric propulsion drive for this icebreaker. The drive is frequency-regulated and has vector control algorithm. The model is intended to both analyse electromechanical processes taking place in the channels of the electric drive and to synthesize its control system.

Materials and methods. The study was based on scientific & technical information available in literature on electric drive theory, as well as on personal findings of the authors and on their profound experience accumulated over many years of R&D in the sphere of marine electric propulsion systems. Solution to this problem is based on the possibility to simulate various electromechanical equipment and systems by means of Simulink application software and Sim Power Systems block library of MatLab package.

Main results. The computer-based model developed under this work and representing electric propulsion drive of Project 22220 multi-purpose nuclear icebreaker makes it possible to investigate electromechanical processes taking place in different operational conditions of this drive. Virtual oscillograms were obtained for currents, voltages, RPM, power, electromagnetic moment, etc. These oscillograms characterize operation of the electric drive in the conditions of RPM regulation, power regulation, change of rotation direction, shaft cranking, ice milling, propeller jamming, decrease and increase of static load moment. The model can also be used to update the software governing microchip-based control system of the electric drive (this update becomes necessary during pre-commissioning set-to-work activities).

Conclusion. The model of electric propulsion drive for Project 22220 icebreaker is an engineering tool that enables, already at early design stages, investigation and analysis of electromechanical processes: these data are necessary for proper selection of electric drive equipment. After corresponding update, this model can be used in detailed design of electric propulsion plants for ice-breaking ships of other designs.

Key words: electric propulsion system, electric propulsion drive, asynchronous motor, vector control, conversion of coordinates, computer-based model, Simulink MatLab application software package, calculation unit for non-observable coordinates, calculation unit for voltage, diagrams of electromechanical processes.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Vershinin V., Makhonin S., Parshikov V., Khomyak V. Computer-based model of electric propulsion drive for Project 22220 multi-purpose nuclear icebreaker. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 1(383): 89–100 (in Russian).

УДК 629.5.035-83:681.3.066+629.565.1

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-383-89-100

Одним из основных условий успешного освоения арктических территорий РФ и создания транспортных коммуникаций, обеспечивающих поставку углеводородов, а также цветных и редких металлов на рынки Азиатского, Тихоокеанского регионов и Западной Европы является наличие мощных ледоколов, обеспечивающих круглогодичное сопровождение судов по Северному морскому пути. В настоящее время в ООО «Балтийский завод – Судостроение» производится строительство серии универсальных атомных ледоколов проекта 22220. Ледоколы этой серии предназначены для проводки крупнотоннажных транспортных судов во льдах толщиной до 2,9 м. Эксплуатация ледоколов предполагается в западном и восточном районах Арктики.

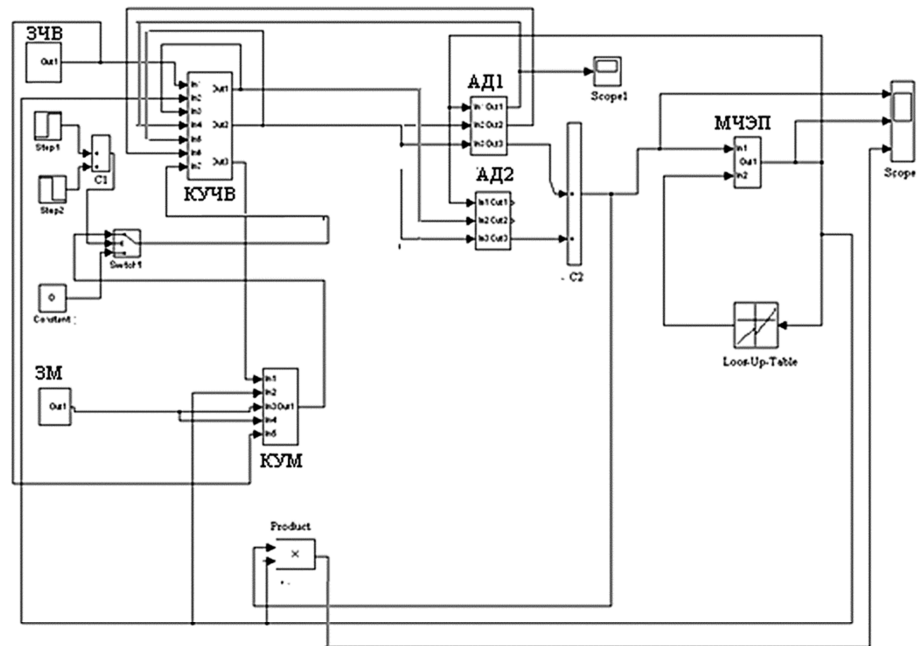
Система электродвижения ледоколов (СЭД) этого проекта содержит три электропривода (ЭП) гребных винтов с распределением мощности 1:1:1. Суммарная пропульсивная мощность на валах СЭД составляет 60 МВт. Сведения о функциональной схеме СЭД, режимах работы, оборудовании, входящем в ее состав, подробно изложены в [1]. Здесь же следует отметить, что функционально каждый из трех гребных ЭП представляет собой замкнутую систему автоматического регулирования, синтези-

рованную на основе частотно-регулируемого асинхронного гребного электродвигателя (ГЭД) и статического преобразователя частоты (СПЧ). Одной из основных особенностей ЭП является то, что в качестве ГЭД в нем используется электромеханический агрегат, состоящий из двух асинхронных машин с короткозамкнутыми роторами, причем асинхронные машины имеют общий корпус, и на статоре каждой из них размещены по две трехфазных обмотки. ГЭД получает питание от двух СПЧ, содержащих по два преобразовательных канала, каждый из которых нагружен на одну из четырех трехфазных обмоток, уложенных на статорах ГЭД. В процессе работы гребного ЭП на выходе каждого преобразовательного канала СПЧ формируется трехфазное переменное напряжение, параметры которого (действующее значение и частота) регулируются в соответствии с алгоритмом векторного управления, заложенным в систему управления гребного ЭП.

В ходе проведения работ по проектированию и изготовлению поставочных образцов ЭП авторами статьи была разработана их компьютерная модель, которая представляет собой инструмент, позволяющий уже на ранних стадиях технического

Рис. 1. Схема компьютерной модели гребного электропривода ледокола

Fig. 1. Layout of the computer-based model representing electric propulsion drive of icebreaker



проектирования производить исследование и анализ электромеханических процессов, протекающих в гребных ЭП СЭД ледокола в различных режимах их работы (регулирование частоты вращения гребных винтов, регулирование мощности на гребных валах, режимы реверса, режимы фрезерования льда и заклинивания винта). Созданная модель может также использоваться для окончательной настройки регуляторов и корректировки программного продукта, закладываемого в микропроцессорную систему управления гребными ЭП, которые будут производиться в процессе пусконаладочных работ на строящемся заказе, предшествующих проведению швартовых и ходовых испытаний ледокола.

Ценность разработанной модели заключается в том, что после соответствующей корректировки она может быть использована в ходе проектирования СЭД ледоколов других новых и перспективных проектов, в частности ледокола проекта «Лидер».

Вышеуказанная компьютерная модель гребного ЭП создана средствами пакета прикладных программ Simulink MATLAB, ее схема приведена на рис. 1.

Модель содержит следующие subsystemы, созданные из библиотечных блоков пакета:

- subsystemы АД1, АД2, имитирующие асинхронные машины ГЭД;

- subsystemа МЧЭП, воспроизводящая механическую часть гребного ЭП;
- subsystemы ЗЧВ и ЗМ, отождествляющие датчик частоты вращения и датчик мощности на валу ГЭД;
- subsystemы КУЧВ, КУМ, имитирующие каналы системы управления ЭП (первая – частотой вращения ГЭД, вторая – мощностью на его валу).

Кроме перечисленных subsystem в модели гребного ЭП используются блоки, непосредственно входящие в состав библиотеки пакета Simulink MatLab, а именно: сумматоры C1, C2, ключи Switch 1, Switch 2, формирователь постоянной величины Constant1, виртуальные осциллографы Scope1, Scope 2, формирователь табличной функции Look-Up-Table.

Создание subsystem АД1, АД2, имитирующих асинхронные машины ГЭД, базируется на математическом описании процесса преобразования электрической энергии в механическую, протекающего в обобщенной электрической машине, которое содержит пять дифференциальных уравнений [2]. Четыре уравнения – это уравнения электрического равновесия напряжений в ее обмотках, и пятое уравнение описывает электромагнитный момент как функцию электрических и механических координат. Вышеуказанные уравнения, записанные в двухфазной системе координат α , β ,

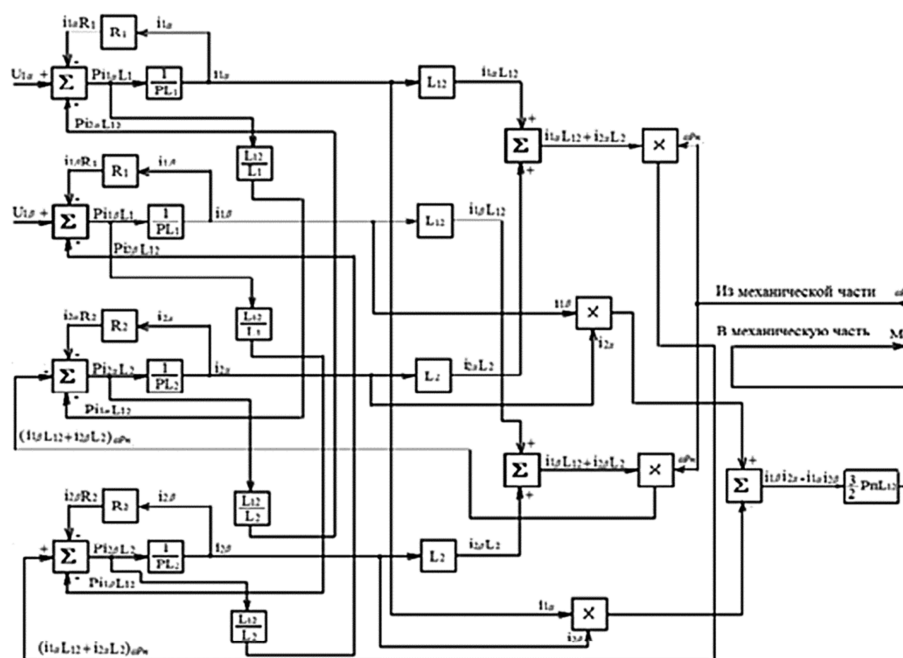


Рис. 2. Структурная схема процесса электромеханического преобразования энергии

Fig. 2. Flow chart for the process of electromechanical energy conversion

неподвижной относительно статора, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} U_{1\alpha} &= (R_1 + pL_1)i_{1\alpha} + pL_{12}i_{2\alpha}; \\ U_{1\beta} &= (R_1 + pL_1)i_{1\beta} + pL_{12}i_{2\beta}; \\ 0 &= (R_2 + pL_2)i_{2\alpha} + pL_{12}i_{1\alpha} + L_{12}\omega_{\text{э}}i_{1\beta} + L_2\omega_{\text{э}}i_{2\beta}; \\ 0 &= (R_2 + pL_2)i_{2\beta} + pL_{12}i_{1\beta} - L_{12}\omega_{\text{э}}i_{1\alpha} - L_2\omega_{\text{э}}i_{2\alpha}; \\ M_{\text{э}} &= \frac{3}{2}P_{\text{п}}L_{12}(i_{1\beta}i_{2\alpha} - i_{1\alpha}i_{2\beta}). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь R_1 и R_2 – активные сопротивления фазных обмоток статора и ротора обобщенной электрической

машины; L_1 и L_2 – индуктивности фазных обмоток статора и ротора обобщенной электрической машины; L_{12} – взаимная индуктивность между фазными обмотками, уложенными на статоре и роторе, когда в процессе вращения ротора магнитные оси обмоток совпадают; $U_{1\alpha}$ и $U_{1\beta}$ – напряжения, прикладываемые к обмоткам статора, уложенным вдоль координатных осей α и β ; $i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$ – токи, протекающие в обмотках статора, уложенных вдоль координатных осей α и β ; $M_{\text{э}}$ – электромагнитный момент, развиваемый обобщенной электрической машиной; $\omega_{\text{э}}$ – частота вращения ротора, умноженная на число пар полюсов; $P_{\text{п}}$ – число пар полюсов обобщенной электрической машины; p – оператор Лапласа. Структурная схема процесса электромеханического преобразования энергии, соответствующая системе уравнений (1), показана на рис. 2.

Поскольку ГЭД, как уже упоминалось выше, представляет собой электромеханический агрегат, состоящий из двух асинхронных машин, нагруженных на единый вал, то его компьютерная модель должна содержать две подсистемы, каждая из которых должна имитировать процесс преобразования электрической энергии в механическую, протекающий в этих машинах. Схема компьютерной модели ГЭД, соответствующая этому положению, приведена на рис. 3.

На входы $ln1$, $ln2$, $ln3$ этих подсистем поступают фазные напряжения $U_{1\alpha}$ и $U_{1\beta}$, и частота вращения

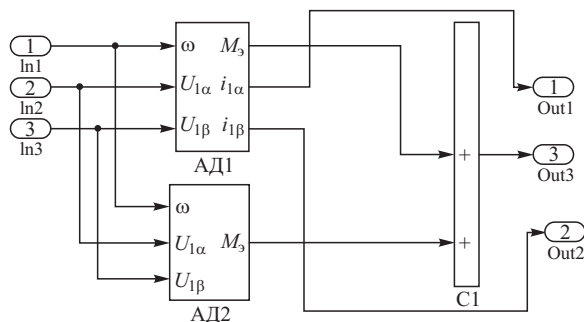
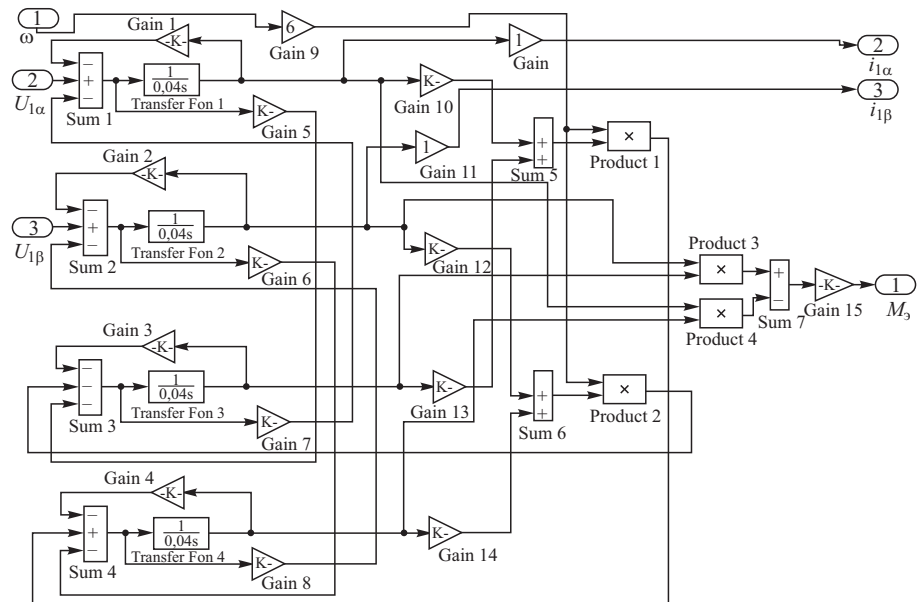


Рис. 3. Схема компьютерной модели гребного электродвигателя

Fig. 3. Layout of the computer-based model representing propulsion motor

Рис. 4. Схема субсистем АД1, АД2 модели гребного электродвигателя

Fig. 4. Layout of AD1, AD2 subsystems of propulsion motor



ния ω соответственно. Электромагнитный момент, развиваемый ГЭД, является суммой электромагнитных моментов асинхронных машин АД1 и АД2 и снимается с выхода $ln3$.

Субсистемы АД1, АД2 являются идентичными и имеют схему, приведенную на рис. 4.

В состав субсистем входят библиотечные блоки пакета Simulink MATLAB (Gain, Sum, Transfer Fcn, Product), входы и выходы которых соединены в соответствии с структурной схемой процесса преобразования энергии, приведенной на рис. 2. В окнах настройки этих блоков устанавливаются

численные значения параметров элементов структурной схемы, которые рассчитываются по формулам [2]:

$$L_1 = \frac{X_1 + X_m}{6,28f_H}; \quad L_2 = \frac{X_2 + X_m}{6,28f_H}; \quad L_{12} = \frac{X_m}{6,28f_H}, \quad (2)$$

где X_1 – индуктивное сопротивление фазы статора, Ом; X_2 – индуктивное сопротивление фазы ротора, приведенное к статору, Ом; X_m – индуктивное контура намагничивания, Ом; f_H – номинальная частота напряжения статора, Гц.

Таблица. Параметры схемы замещения двигателя ГЭД 2х10000-3-16505

Table. Parameters of substitution layout for propulsion motor GED 2x10000-3-16505

Обозначение параметра	Наименование параметра	Величина параметра
P_H	Номинальная мощность, МВт	20
U_{1H}	Номинальное действующее значение линейного напряжения статора, В	3000
I_{1H}	Номинальное действующее значение тока статора, А	4×1100
f_H	Номинальная частота напряжения статора, Гц	12–16,5
P_{Π}	Число пар полюсов	6
R_1	Активное сопротивление фазы обмотки статора, Ом	0,0188
R_2	Активное сопротивление фазы ротора, приведенное к статору, Ом	0,011
X_1	Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора, Ом	0,145
X_2	Индуктивное сопротивление фазы ротора, приведенное к статору, Ом	0,0855
X_m	Индуктивное сопротивление контура намагничивания, Ом	2,93

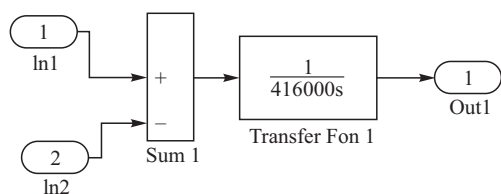


Рис. 5. Схема подсистемы МЧЭЛ

Fig. 5. Layout of MChEL subsystem

Наличие на статоре каждой асинхронной машины двух трехфазных обмоток в субмоделях АД1, АД2 учитывается посредством удвоения величины параметра, устанавливаемой в окне настройки блока Cain 15.

В СЭД ледокола проекта 22220 в качестве ГЭД используется двигатель типа ГЭД 2х10000-3-16505. Номинальные параметры последнего и численные значения параметров активных и индуктивных сопротивлений схемы его замещения приведены в табл.

Субсистема МЧЭП компьютерной модели, имитирующая механическую часть гребного ЭП, построена в соответствии со схемой, приведенной на рис. 5. В основе построения схемы лежит уравнение равновесия моментов, действующих на вал ГЭД:

$$M_{\text{э}} - M_{\text{с}} = Jp\omega, \quad (3)$$

где $M_{\text{э}}$ – электромагнитный момент, развиваемый ГЭД, Нм; $M_{\text{с}}$ – статический момент нагрузки, приведенный к валу ГЭД, Нм; J – суммарный момент инерции ротора ГЭД, валопровода и гребного винта с присоединенными массами воды, кгм²; ω – частота вращения ротора ГЭД, 1/с; p – оператор Лапласа.

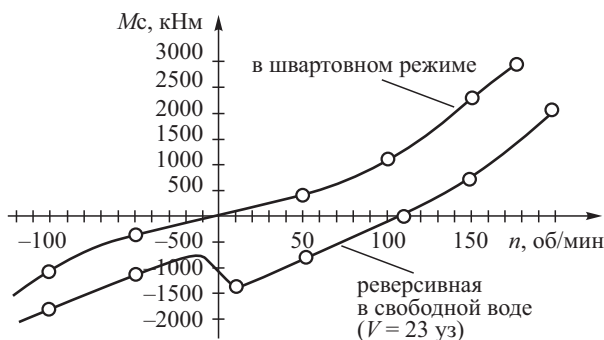


Рис. 6. Механические характеристики гребного винта

Fig. 6. Mechanical parameters of propeller

Вышеуказанная подсистема собрана из библиотечных блоков пакета Simulink MatLab (Sum и Transfer FSN). В окне настройки блока Transfer Fcn1 устанавливается суммарное значение величин момента инерции ротора ГЭД, валопровода и гребного винта с присоединенной массой воды. Для гребного ЭП ледокола проекта 22220 это значение составляет 415000 кгм². На входы $ln1$, $ln2$ подсистемы поступают значения электромагнитного момента $M_{\text{э}}$ и статического момента нагрузки $M_{\text{с}}$ соответственно. С выхода подсистемы Qut1 снимается значение частоты вращения ω ротора ГЭД.

Величина статического момента нагрузки $M_{\text{с}}$, действующего на вал ГЭД, зависит от частоты вращения гребного винта и определяется механическими характеристиками последнего. Для ледокола проекта 22220 механические характеристики гребного винта, снятые в швартовном режиме и в режиме хода в свободной воде со скоростью 23 уз, имеют вид, приведенный на рис. 6.

Формирование механических характеристик гребного винта как нелинейных функций, связывающих величину статического момента нагрузки, действующий на винт, с частотой его вращения, в рассматриваемой компьютерной модели реализуется посредством библиотечного блока Look-Up-Table пакета Simulink MatLab. В окне настройки этого блока устанавливаются значения частот вращения гребного винта и значения статического момента нагрузки, берущиеся в соответствии с механическими характеристиками гребного винта.

Как было показано в [1], система управления гребным ЭП ледокола проекта 22220 содержит две подсистемы:

- подсистема, посредством которой происходит регулирования частоты вращения ГЭД;
- подсистема, которая, действуя совместно с первой подсистемой, обеспечивает регулирование мощности на валу ГЭД.

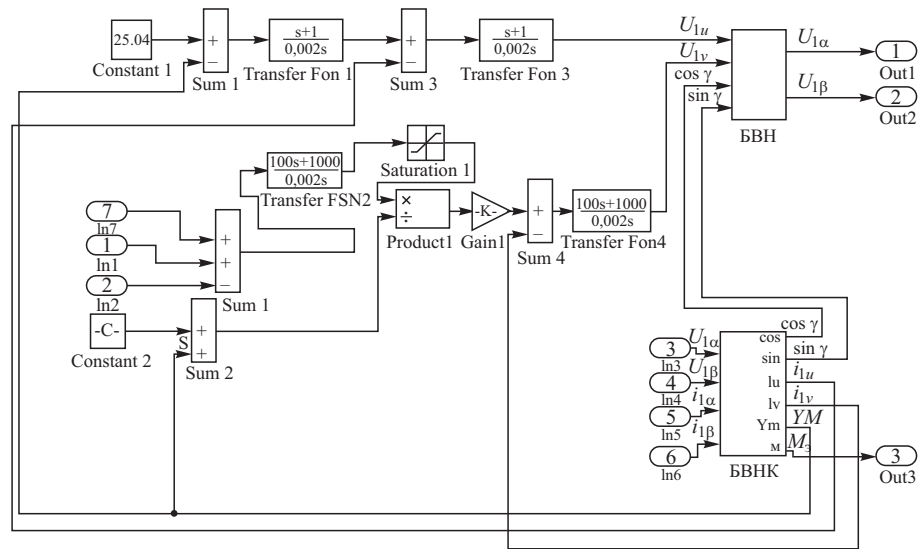
При этом первая подсистема, построенная в соответствии с алгоритмом векторного управления, содержит два канала:

- поддержания постоянства потокосцепления ротора;
- регулирования частоты вращения.

Каждый из перечисленных каналов включает в себя два замкнутых контура (внешний и внутренний), синтезированных по принципу последовательной коррекции.

Функциональные схемы, состав и принцип действия обеих подсистем, образующих систему управления гребным ЭП, подробно изложены в [1].

Рис. 7. Схема
субсистемы КУЧВ
Fig. 7. Layout
of KUChV subsystem



Здесь же приводится описание компьютерных моделей этих подсистем.

Схема подсистемы КУЧВ (имитирует подсистему регулирования частоты вращения) компьютерной модели ЭП приведена на рис. 7. В соответствии со схемой подсистема УЧВ содержит набор библиотечных блоков пакета Simulink MatLab (Const, Sum, Saturation, Product, Transfer Fsn), а также два синтезированных блока:

- вычисления напряжений (БВН);
- вычисления ненаблюдаемых координат (БВНК).

В окнах настройки блоков Transfer Fcn 1 и Transfer Fcn 3 устанавливаются параметры ПИ-регуляторов, входящих в состав контуров канала поддержания постоянства потокоцепления ротора ГЭД, а в окнах задания блоков Transfer Fsn 2

и Transfer Fsn 4 –параметры ПИ-регуляторов контуров канала регулирования частоты вращения ГЭД. В окне задания блока Saturation 1 устанавливается значение, ограничивающее величину электромагнитного момента, развиваемого ГЭД в режиме заклинивания винта и стоянки под током. На входы *ln1*, *ln2* поступают сигнал задания частоты вращения и сигнал обратной связи по частоте вращения. На вход *ln7* приходит сигнал, корректирующий величину частоты вращения в режиме регулирования мощности на валу ГЭД. На выходных зажимах Out1, Out2 подсистемы УЧВ формируются фазные напряжения $U_{1\alpha}$, $U_{1\beta}$, поступающие на старторные обмотки ГЭД (субмодели АД1, АД2).

Схема модели блока БВН приведена на рис. 8. Она собрана из библиотечных блоков Sum

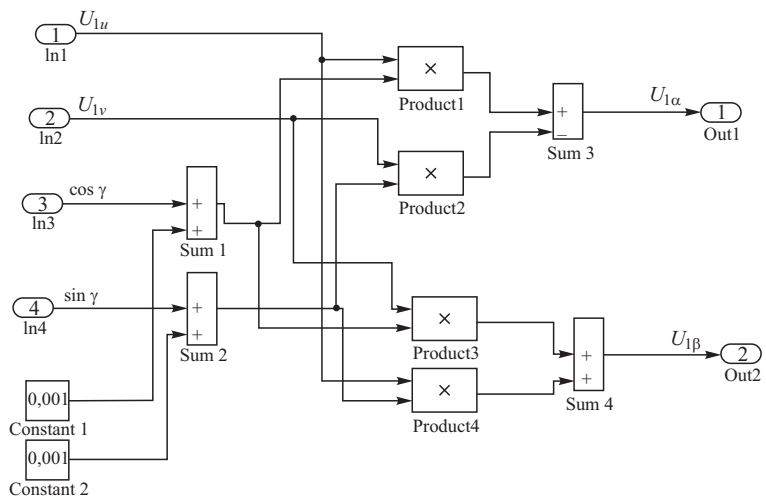


Рис. 8. Схема модели блока БВН
Fig. 8. Layout of BVN block model

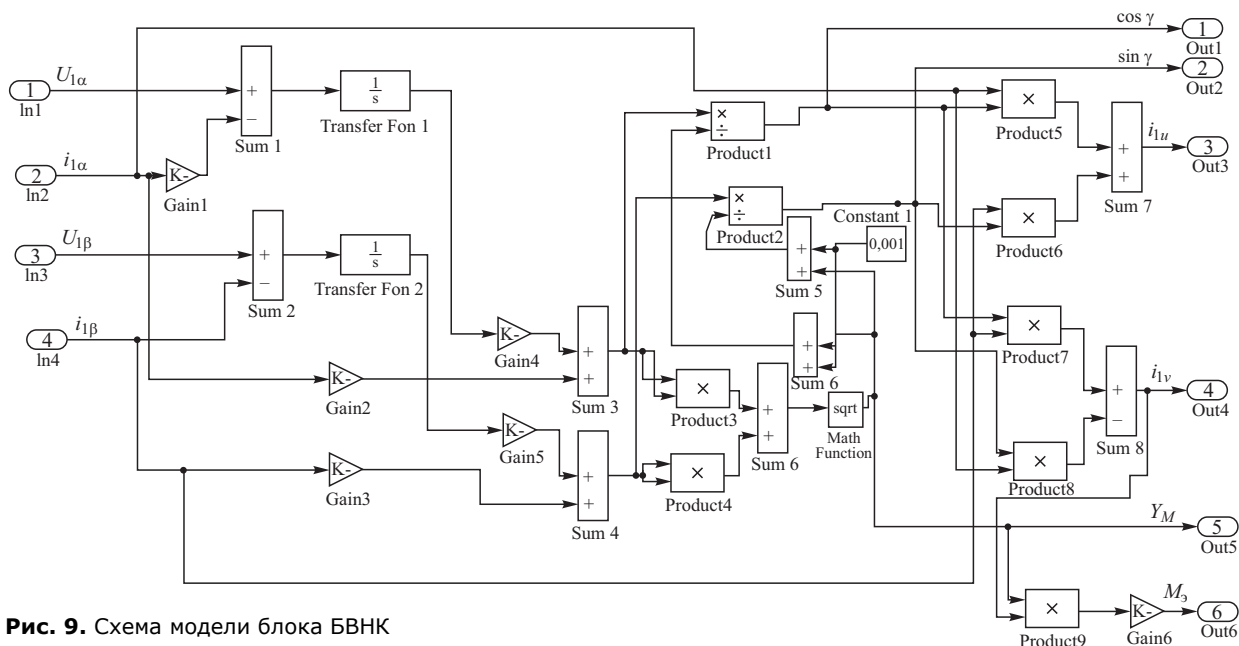


Рис. 9. Схема модели блока БВНК

Fig. 9. Layout of BVNK block model

и Product, посредством которых производится пересчет фазных напряжений, U_{1u} , U_{1v} , записанных в вращающейся системе координат U , V (ось U ориентирована по вектору потокоцепления ротора) в фазные напряжения, $U_{1\alpha}$, $U_{1\beta}$, записанные в неподвижной относительно статора системе координат.

Перерасчет величин фазных напряжений производится в соответствии с выражениями

$$\begin{aligned} U_{1\alpha} &= U_{1U} \cos \gamma - U_{1V} \sin \gamma; \\ U_{1\beta} &= U_{1U} \sin \gamma + U_{1V} \cos \gamma. \end{aligned} \quad (4)$$

В модели блока БВНК производятся вычисления следующих значений:

- косинуса и синуса угла поворота вращающейся системы координат U , V относительно неподвижной системы координат α , β ;

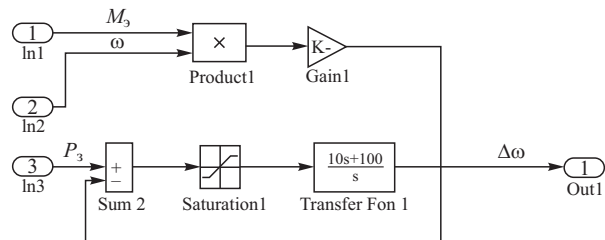


Рис. 10. Схема подсистемы УМ компьютерной модели гребного ЭП

Fig. 10. Layout of UM subsystem in computer model of electric propulsion drive

- фазных токов в статорных обмотках асинхронных машин АД1, АД2, записанных во вращающейся системе координат U , V ;
 - модуля вектора потокоцепления ротора;
 - электромагнитного момента, развиваемого ГЭД.
- Схема модели блока БВНК приведена на рис. 9. Модель блока собирается из библиотечных блоков Sum, Product, Transfer FSN пакета Simulink MatLab.

Схема подсистемы КУМ (имитирует подсистему управления мощностью на валу ГЭД) компьютерной модели гребного ЭП показана на рис. 10.

На входные клеммы $ln1$, $ln2$, $ln3$ подсистемы приходит информация о значениях электромагнитного момента (M_3), частоты вращения (ω), раз-

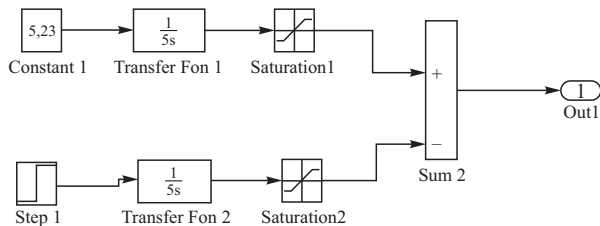


Рис. 11. Схема подсистем ЗЧВ и ЗМ

Fig. 11. Layout of ZChV and ZM subsystems

вимаемых ГЭД, а также информация о задаваемом значении мощности (P_3) на валу ГЭД. С выхода Qut1 subsystem снимается информация о необходимом изменении частоты вращения ($\Delta\omega$), обеспечивающем требуемую мощность, и поступающая на вход In7 subsystemы УЧВ. В окне настройки блока Transfer Fsn 1 устанавливаются значения параметров ПИ – регулятора, включенного в замкнутом контуре подсистемы регулирования мощности [1], а в окне настройки блока Saturation 1 – значение, ограничивающее величину мощности на валу ГЭД [1].

Субсистемы ЗЧВ и ЗМ компьютерной модели ЭП, отождествляющие задатчик частоты вращения и задатчик мощности на валу ГЭД, выполнены по идентичной схеме, показанной на рис. 11.

В этих subsystems непосредственное задание частоты вращения или мощности устанавливаются в окнах настройки блоков Constant 1, Step 1, а интенсивность изменения сигналов задания определяется параметрами, устанавливаемыми в окнах настройки блоков Transfer Fcn 1, Transfer Fcn 2, Saturation 1 и Saturation 2.

На рис. 12–18 приводятся диаграммы электро-механических процессов, протекающих в различных режимах работы гребного ЭП и воспроизводимых в ходе компьютерного моделирования.

Так, на рис. 12–13 приведены диаграммы изменения электромагнитного момента, частоты вращения и мощности на валу ГЭД, снятые в режиме регулирования частоты вращения в диапазоне от 50 до –50 об/мин, что в реальных условиях на заказе обеспечивается перемещением рукоятки управления с чередованием десяти положений в зоне «Регулирование скорости». В ходе моделирования частота вращения ГЭД изменялась строго по линейному закону, формируемому subsystemой УЧВ.

На рис. 14 приведены диаграммы изменения электромагнитного момента и частоты вращения ГЭД, снятые при скачкообразном изменении величины статического момента нагрузки. Величина скачка статического момента составляет 320 кНм, что соответствует 20 % от номинального значения. Анализ диаграмм показывает, что ЭП обеспечивает требуемую точность поддержания постоянства частоты вращения гребного винта (динамическое отклонение ее не превышает 0,3 % при длительности переходного процесса 4 с, а статическая ошибка практически равна нулю).

На рис. 15 представлены диаграммы изменения электромагнитного момента, частоты вращения и фазного тока ГЭД, снятые в режимах фрезе-

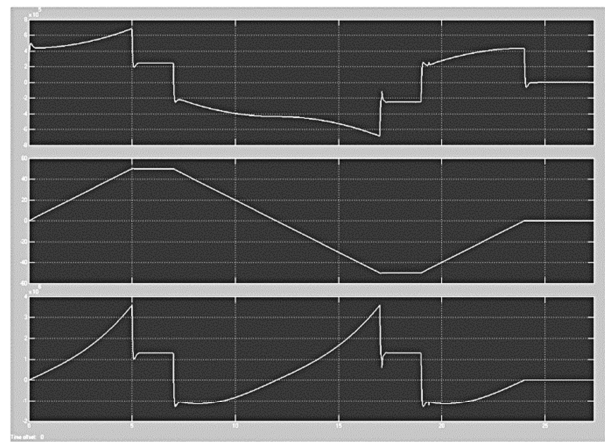


Рис. 12. Диаграммы изменения электромагнитного момента, частоты вращения и мощности на валу ГЭД в процессе регулирования частоты вращения в диапазоне от 0 до 50 об/мин и реверса в швартовном режиме

Fig. 12. Diagrams of electromagnetic moment, RPM and shaft power of propulsion motor during RPM variation within the range of 0–50 and during crash-stop at bollard pull

рования льда и заклинивания гребного винта. В режиме фрезерования льда статический момент нагрузки в 1,6 раза превышает номинальное значение и равен 2550 кНм, при этом ЭП поддержи-

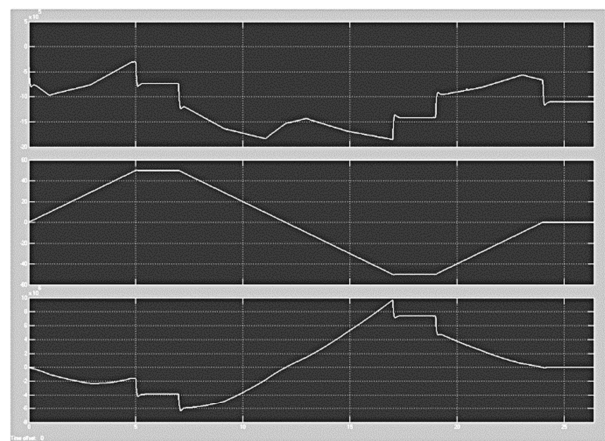


Рис. 13. Диаграммы изменения электромагнитного момента, частоты вращения и мощности на валу ГЭД в процессе регулирования частоты вращения в диапазоне от 0 до 50 об/мин и реверса в режиме свободного хода с скоростью 23 уз

Fig. 13. Diagrams of electromagnetic moment, RPM and shaft power of propulsion motor during RPM variation within the range of 0–50 and during crash-stop at free running with the speed of 23 knots

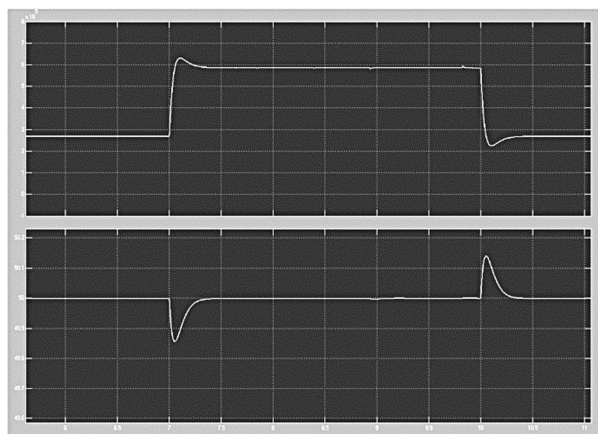


Рис. 14. Диаграммы изменения электромагнитного момента и частоты вращения гребного электродвигателя в процессе наброса и сброса статического момента нагрузки в швартовном режиме

Fig. 14. Diagrams of electromagnetic moment and RPM for propulsion motor during increase and decrease of static load moment at bollard pull

вает частоту вращения ГЭД на постоянном уровне 50 об/мин, а действующее значение фазного тока двигателя составляет 2100 А, что в 1,9 раза превышает номинальное значение. В режиме заклинивания гребного винта и стоянки под током ЭП автоматически ограничивает величину электромагнитного момента, развиваемого ГЭД, на уровне

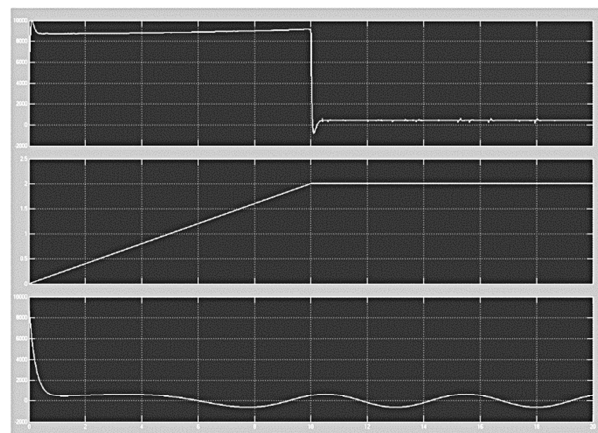


Рис. 16. Диаграммы изменения электромагнитного момента, частоты вращения и тока статора гребного электродвигателя в режиме прокручивания вала в швартовном режиме

Fig. 16. Diagrams of electromagnetic moment, RPM and current in the stator of propulsion motor during shaft cranking at bollard pull

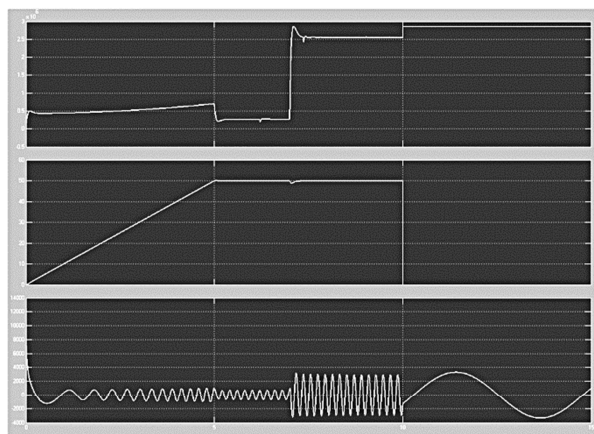


Рис. 15. Диаграммы изменения электромагнитного момента, частоты вращения и тока статора гребного электродвигателя в режимах фрезерования льда и заклинивания гребного винта

Fig. 15. Diagrams of electromagnetic moment, RPM and current in the stator of propulsion motor in ice-milling and propeller jamming conditions

2880 кНм, что в 1,8 раза превышает номинальное значение. При этом действующее значение фазного тока ГЭД составляет 2350 А, что в 2,1 раза превышает номинальное значение.

На рис. 16 приведены диаграммы изменения электромагнитного момента, частоты вращения и фазного тока ГЭД, полученные при технологиче-

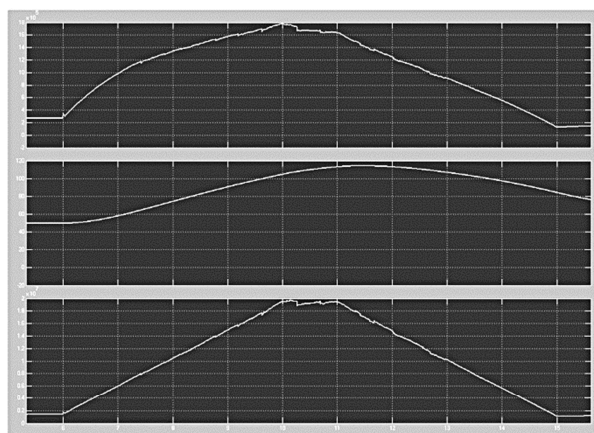


Рис. 17. Диаграммы изменения электромагнитного момента, частоты вращения, снятые в режиме регулирования мощности на валу гребного электродвигателя

Fig. 17. Diagrams of electromagnetic moment and RPM recorded during shaft power regulation of the propulsion motor

ской прокрутке гребного вала в швартовном режиме. В этом режиме ЭП производит разгон ГЭД по линейному закону до уровня 2 об/мин и обеспечивает поддержание ее постоянства на заданном уровне.

На рис. 17 показаны диаграммы изменения электромагнитного момента, частоты вращения и мощности на валу ГЭД, снятые в режимах регулирования мощности в диапазоне от 1,4 до 20 МВт и от 20 до 1,4 МВт, что соответствует перемещению рукоятки управления с чередованием десяти положений в зоне «Регулирование мощности». В ходе моделирования сигнал задания мощности формировался подсистемой ЗМ и изменялся по линейному закону, при этом мощность на валу ГЭД также изменялась строго по линейному закону в соответствии с сигналом задания. Характерной особенностью ЭП является то, что в процессе уменьшения мощности на валу и, соответственно, частоты вращения ГЭД электромагнитный момент, развиваемый двигателем, не изменяет своего знака, т.е. двигатель не переходит в режим генераторного торможения.

Функционируя в режиме регулирования мощности на валу двигателя, гребной ЭП обеспечивает поддержание ее постоянства на заданном уровне. Это положение подтверждается диаграммами, приведенными на рис. 18. Скачкообразное изменение статического момента нагрузки, действующего на вал ГЭД величиной ± 960000 Нм, что соответствует 60 % его номинального значения, сопровождается изменениями величин электромагнитного момента и частоты вращения ГЭД таким образом, что механическая мощность, развиваемая двигателем, не изменяясь, практически остается на заданном уровне.

Заключение

Conclusion

В статье приводится описание компьютерной модели гребного ЭП, входящего в состав СЭД универсального атомного ледокола проекта 22220. Модель представляет собой инженерный инструмент, пользуясь которым можно уже на ранних стадиях технического проектирования производить исследование и анализ электромеханических процессов, протекающих в разрабатываемом ЭП, и на основании этого анализа осуществлять необходимую корректировку принимаемых технических решений.

В статье также представлены диаграммы электромеханических процессов, протекающих в греб-

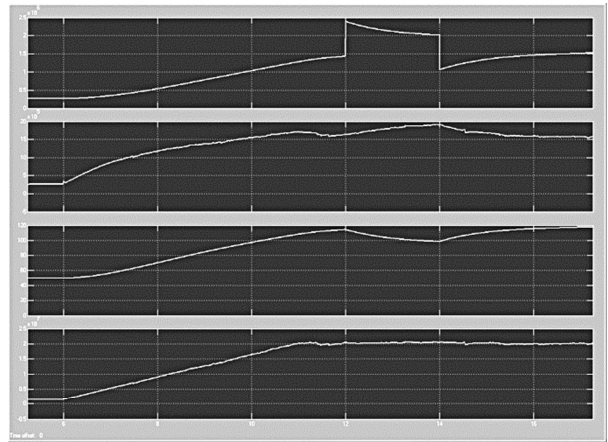


Рис. 18. Диаграммы изменения электромагнитного момента, частоты вращения и мощности на валу гребного электродвигателя, снятые при скачкообразном изменении статического момента нагрузки в режиме регулирования мощности

Fig. 18. Diagrams of electromagnetic moment and RPM recorded in the conditions of static load moment "jumps" during power regulation

ном ЭП в различных режимах его работы и воспроизводимых посредством описываемой модели, что позволяет оценить ее возможности.

Библиографический список

References

1. Вершинин В.И., Махонин С.В., Паршиков В.А., Хомьяк В.А. Алгоритм управления гребным электроприводом универсального атомного ледокола проекта 22220 // Труды Крыловского государственного центра. 2017. Вып. 4(382). С. 95–102. [V. Vershinin, S. Makhonin, V. Parshikov, V. Khomyak. Control algorithm for electric propulsion drive of Project 22220 multi-purpose nuclear icebreaker // KSRC Transactions. 2017; 4(382): 95–102. (in Russian)].
2. Рудаков В.В., Столяров И.М., Дартма В.А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением // Л.: Энергоатомиздат, 1987. [V. Rudakov, I. Stolyarov, V. Dartau. Asynchronous electric drives with vector control. Leningrad: Energoatomizdat, 1987. (in Russian)].

Сведения об авторах

Вершинин Виктор Иванович, инженер 1 категории НИО-12 филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Рос-

сия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 6. Телефон: 8 (812) 748-52-38; e-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Махонин Сергей Васильевич, начальник сектора – заместитель начальника отдела НИО-12 филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 6. Телефон: 8 (812) 748-52-44; e-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Паршиков Владимир Алексеевич, начальник отдела НИО-12 филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 6. Телефон: 8 (812) 748-52-43; e-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Хомяк Валентин Алексеевич, начальник отдела – главный конструктор ЕЭЭС и ГЕУ филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 6. Телефон: 8 (812) 748-52-30; e-mail: krylov@krylov.spb.ru.

About the authors

Vershinin, Viktor I., 1st Category Engineer, TSNII SET branch of KSRC. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128, tel. 8 (812) 748-52-38; e-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Makhonin, Sergey V., Head of Sector – Deputy Head of Department, TSNII SET branch of KSRC. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128, tel.: 8 (812) 748-52-44; e-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Parshikov, Vladimir A., Head of Department, TSNII SET branch of KSRC. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128, tel.: 8 (812) 748-52-43; e-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Khomyak, Valentin A., Head of Department – Chief Designer of IEPS and Electric Propulsion Plants, TSNII SET branch of KSRC. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128, tel. 8 (812) 748-52-30; e-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Поступила / Received: 06.02.18
Принята в печать / Accepted: 05.03.18
© Коллектив авторов, 2018