

Варианты систем электродвижения ледоколов мощностью 60 и 120 МВт

А. Г. Воронцов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), НПЦ «СЭС», Санкт-Петербург, Россия
ag.voroncov@gmail.com

Аннотация. Рассмотрены варианты систем электродвижения (СЭД) мощных ледоколов с использованием транзисторных преобразователей частоты (ПЧ) или тиристорных преобразователей частоты с непосредственной связью (НПЧ). Гребные двигатели – синхронные или асинхронные. При транзисторных ПЧ полупроводниковая элементная база в основном зарубежная, при тиристорных НПЧ – в основном отечественная. НПЧ работают с потреблением реактивной мощности, и для ее генерации необходимо применение дополнительных устройств, например пассивных фильтров или СТАТКОМов. При реверсах гребных винтов ледоколов СЭД переменного тока энергия гребных винтов рекуперирована. В СЭД с транзисторными ПЧ для поглощения рекуперированной энергии используются резисторы и чопперы. В СЭД с НПЧ возможна рекуперация энергии в электросеть и это позволяет уменьшить мощность резисторов. Резисторы включаются в состав СТАТКОМов, расширяя их функции (генерация реактивной мощности, фильтрация напряжений, поглощение энергии).

Ключевые слова: система электродвижения, ледокол, транзисторный преобразователь частоты, преобразователь частоты с непосредственной связью, реверс гребного винта, рекуперация энергии

Для цитирования: Воронцов А. Г. Варианты систем электродвижения ледоколов мощностью 60 и 120 МВт // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 8. С. 83–89. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-8-83-89.

Original article

Electric Propulsion Options Icebreakers with Power of 60 and 120 MW

A. G. Vorontsov

Saint Petersburg Electrotechnical University, SPC «SES», Saint Petersburg, Russia
ag.voroncov@gmail.com

Abstract. Variants of electric propulsion systems for powerful icebreakers with the use of transistor frequency converters or thyristor frequency converters with direct coupling (DFC) are considered. Rowing motors synchronous or asynchronous. With transistor converters, the semiconductor element base is mainly imported, with thyristor FCs, it is mainly domestic. But DFCs work with reactive power consumption, and its generation requires the use of additional devices, such as passive filters or STATCOMs. When the propellers of icebreakers are reversed, the energy of the propellers is recuperated. In electric propulsion system with transistorized FCs, resistors and choppers are used to absorb the regenerated energy. In electric propulsion system with DFC, it is possible to recuperate energy into the mains, and this allows you to reduce the power of the resistors. Resistors are included in STATCOMs, expanding their functions (reactive power generation, voltage filtering, energy absorption).

Keywords: electric propulsion system, icebreaker, transistor frequency converters, thyristor cyclo-converter, reverse of propellers, energy recuperation

For citation: Vorontsov A. G. Electric Propulsion Options Icebreakers with Power of 60 and 120 mw // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 8. P. 83–89. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-8-83-89.

Введение. Освоение Северного морского пути (СМП) позволяет существенно сократить длину транспортного морского коридора между Европейской частью России и Дальним Востоком, уменьшить длительность и снизить стоимость грузоперевозок. В настоящее время на СМП используются ледоколы мощностью до 60 МВт. Навигация по всему СМП осуществляется не круглый год. Для круглогодичного использования СМП, намеченного к 2030 г., требуется построить всю серию атомных ледоколов мощностью 60 МВт (5 шт.) и необходимы атомные ледоколы мощностью 120 МВт, которые могут работать с более толстыми льдами (3 м и более) и прокладывать более широкие транспортные коридоры во льдах. На предприятиях России работы по проектированию ледоколов выполняются, однако в

приводится в движение сдвоенным асинхронным гребным электродвигателем (ГЭД) мощностью 30 МВт. Мощность одного асинхронного двигателя (АД) 15 МВт. На статоре каждого АД размещены три трехфазные обмотки. Питание каждой трехфазной обмотки осуществляется от сети напряжением 10.5 кВ, имеющей частоту 50 Гц. Для преобразования параметров сети в напряжения питания ГЭД используются транзисторные преобразователи частоты (ПЧ) с диодными 12-пульсными выпрямителями (ДВ) и трехуровневыми транзисторными автономными инверторами напряжения (АИН) мощностью по 5 МВт. При реверсах ГВ кинетическая энергия ГВ, присоединенных масс воды и ГЭД рекуперируется в цепи выпрямленного напряжения ПЧ и далее передается в тормозные резисторы через чопперы, вхо-

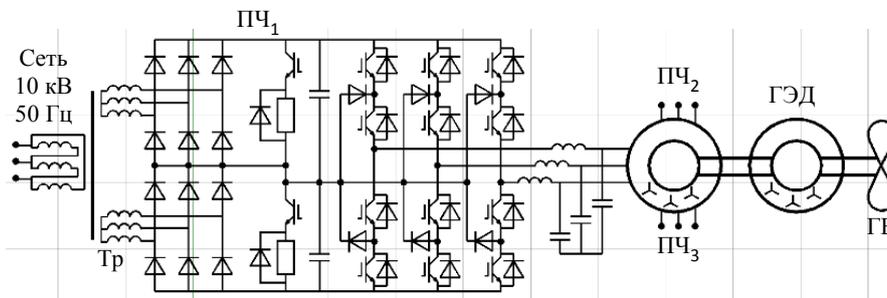


Рис. 1. Схема привода гребного винта ледокола-лидера
Fig. 1. Scheme of the propeller drive of the icebreaker-leader

настоящее время в связи с некоторыми изменениями связей между государствами – поставщиками оборудования и потребителями – технические и организационные решения целесообразно уточнить и, может быть, пересмотреть. В том числе это относится к электрооборудованию ледоколов, в частности к системам электродвижения (СЭД). В современных СЭД мощных ледоколов используются преобразователи частоты (ПЧ), построенные на мощных высоковольтных транзисторах и конденсаторах, в производстве которых участвуют многие предприятия и государства. Необходима оценка возможностей импортозамещения силовых полупроводниковых элементов (ПЭ), драйверов и конденсаторов. Эти вопросы рассматриваются в статье с точки зрения реализуемости одних или других технических решений. Анализ выполняется при использовании компьютерных моделей, выполненных на языке С++ [1]–[6] в среде собственной разработки ComSim [7].

СЭД с транзисторными преобразователями частоты со звеном постоянного напряжения в цепях главного тока. СЭД проектируемого атомного ледокола-лидера мощностью 120 МВт имеет 4 гребных винта (ГВ), каждый из которых

двигается в состав ПЧ. Схема питания одной трехфазной обмотки сдвоенного ГЭД от сети 10.5 кВ на ледоколе-лидере представлена на рис. 1.

На рис. 2 представлена реверсивная механическая характеристика ГВ ледокола-лидера при реверсе из режима полного хода судна в чистой воде (зависимость момента сопротивления M от частоты вращения n).

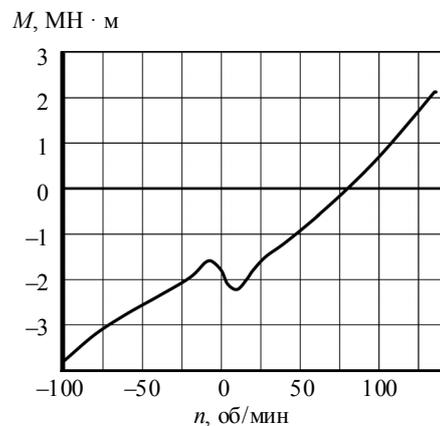


Рис. 2. Реверсивная характеристика
Fig. 2. Reversing characteristic

СЭД ледоколов мощностью 60 МВт имеет 3 гребных винта. Питание ГВ осуществляется от трех сдвоенных асинхронных ГЭД мощностью по 20 МВт. Статор каждого АД мощностью 10 МВт имеет две трехфазные обмотки. Каждая обмотка АД получает питание от сети 10.5 кВ через транзисторный ПЧ мощностью 5 МВт, как и в ледоколе-лидере.

При проектировании СЭД ледокола-лидера одна из задач расчета режимов работы заключается в анализе процессов реверса ГВ и оценке энергии, рекуперированной в тормозные сопротивления. При реверсе часть кинетической энергии ГЭД, ГВ и присоединенных масс воды расходуется в воде, часть – на потери в ГЭД и АИН. В зависимости от условий часть энергии передается через чопперы в резисторы, указанные на рис. 1. Для анализа процессов реверса ГВ разработана модель СЭД при векторном управлении ГЭД. Модель разработана по методологии моделирования электромеханотронных систем по взаимосвязанным подсистемам [1]–[3] в среде собственной разработки ComSim [7]. Для расчетов процессов реверса ГВ использована реверсивная характеристика рис. 2. Результаты расчета процесса реверса представлены на рис. 3, а именно – фрагмент процесса длительностью 12 с.

В начале процесса АД работает с максимальной скоростью вращения 142 % от номинальной величины. В соответствии с режимом поддержания постоянства мощности ГЭД магнитный поток в зазоре АД ослаблен до 62 %, момент на валу

около 70 %. В ПЧ суммарное выпрямленное напряжение 5000 В (по 2500 В на каждый выпрямительный мост). Реверс начинается посредством уменьшения заданной частоты вращения АД. Система управления соответственно уменьшает электромагнитный момент АД и затем уменьшается частота вращения ГЭД. Переход частоты вращения АД через ноль происходит через 4.75 с (длительность реверса). За время реверса в тормозных резисторах тратится энергия 41 МДж (при кинетической энергии, запасенной во вращающихся массах до начала реверса 49 МДж). Работоспособность описанного алгоритма работы СЭД с трехуровневыми ПЧ подтверждена экспериментально – на действующем ледоколе «Арктика».

СЭД с синхронным двигателем, НПЧ, пассивным трехфазным фильтром и СТАТКОМом с функцией поглощения энергии. В цепях главного тока СЭД замена транзисторных ПЧ тиристорными преобразователями частоты с непосредственной связью (НПЧ) позволяет исключить значительную часть импортных комплектующих элементов – мощных транзисторов, рассчитанных на повышенные частоты переключения, драйверов, а также конденсаторов, предназначенных для работы с токами повышенной частоты. Однако при указанной замене возникает ряд задач, требующих решения.

Один из вопросов касается изменения коэффициента мощности сети 10.5 кВ, питающей СЭД. Диодные выпрямители в схеме рис. 1 потребляют из сети электроэнергию с коэффициен-

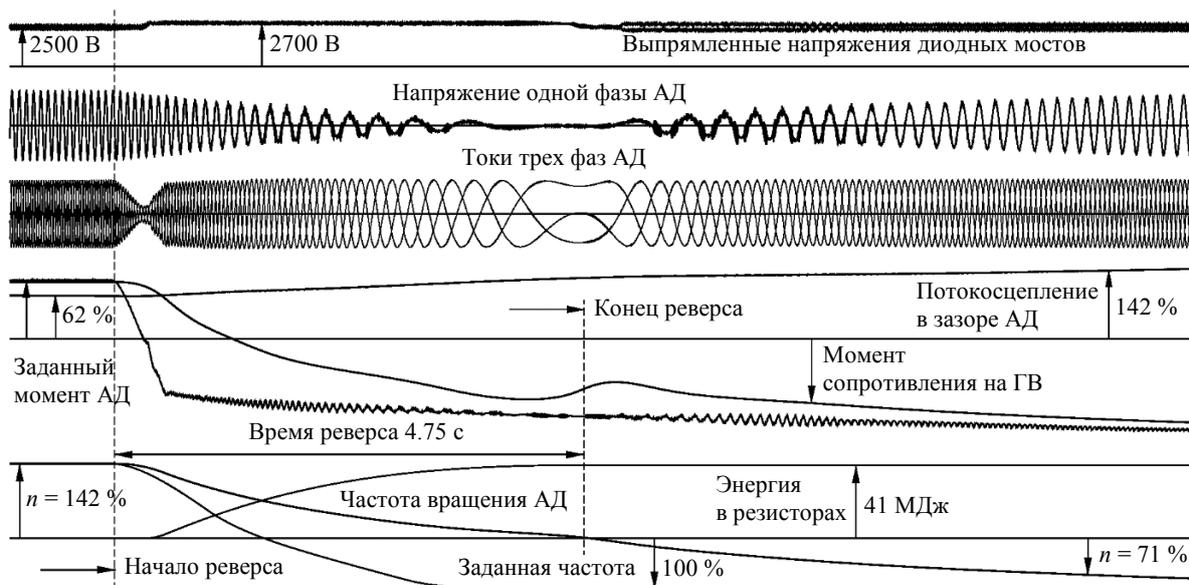


Рис. 3. Реверс гребного винта ледокола-лидера в режиме полного хода
 Fig. 3. Reversing the propeller of the icebreaker-leader in full speed mode

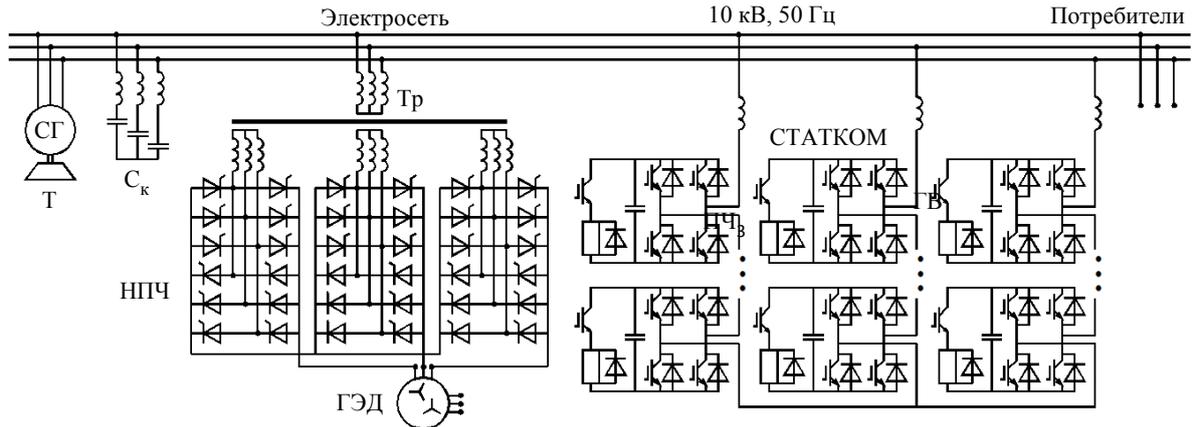


Рис. 4. Схема питания трехфазной обмотки ГЭД через НПЧ
Fig. 4. The power supply of the three-phase winding of propeller motor through the thyristor cyclo-converter

том мощности ориентировочно 0.96. НПЧ имеют существенно меньший коэффициент мощности, и он определяется характером нагрузки, силовой схемой СЭД и алгоритмом управления. При использовании в нагрузке синхронного двигателя (СД) с отдельным питанием фаз максимально достижимый коэффициент мощности электроэнергии на входе НПЧ равен 0.7 (примеры – СЭД ледоколов «Таймыр» и «Вайгач»). Если фазы СД соединены в звезду, то при использовании в напряжениях управления НПЧ, составляющих нулевой последовательности, максимальный коэффициент мощности потребляемой НПЧ электроэнергии может быть увеличен до 0.8. Если в качестве ГЭД используется АД, то коэффициент мощности потребляемой электроэнергии уменьшается во столько же раз, во сколько увеличивается полная мощность ГЭД. Улучшение рассматриваемого показателя возможно при использовании дополнительных устройств компенсации реактивной мощности (пример – ГАЭС «Голдисталь», в которой при мощности НПЧ 100 МВ · А используются фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ) мощностью 66 МВ · А) [8].

Другая особенность НПЧ – значительные искажения токов и напряжений на входе и выходе НПЧ [9]–[11]. Искажения уменьшаются в системах, в которых отношение частоты напряжения на выходе НПЧ к частоте на входе меньше. Для улучшения гармонического состава токов и напряжений используются многопульсные схемы НПЧ. Для 6-пульсных схем рекомендуемые отношения частот напряжения на входе и выходе НПЧ более 4–5. Для 12-пульсных схем это соотношение должно быть более 2.5–3. Но чем больше соотношение частот, тем лучшее качество напряжений и токов может быть обеспечено.

Еще одна особенность НПЧ в СЭД заключается в том, что при реверсах ГЭД необходимо решить вопрос поглощения рекуперированной в сеть электроэнергии. Часть энергии растрчивается в воде и в оборудовании СЭД, другая часть может рекуперироваться через НПЧ в сеть 10.5 кВ. Рекуперированная энергия может быть передана судовым потребителям, и в этом состоит преимущество НПЧ. Однако использование судовых потребителей для поглощения рекуперированной энергии может оказаться недостаточным, и в этом случае необходимы дополнительные поглотители энергии.

Комплексное решение указанных задач возможно при построении СЭД по схеме рис. 4.

В схеме с НПЧ принято синхронное исполнение ГЭД для снижения реактивной мощности, потребляемой НПЧ из сети. Номинальное напряжение обмоток статора ГЭД увеличено до 6 кВ. Соответственно увеличению напряжения статора уменьшаются токи, и это позволяет уменьшить количество трехфазных обмоток до двух при их взаимном сдвиге на 30 эл. град. К сети 10.5 кВ подключен СТАТКОМ, который выполняет несколько функций: генерирует реактивную мощность, фильтрует токи и напряжения сети, поглощает энергию при реверсах ГЭД. Модели СТАТКОМов без функции поглощения энергии описаны в публикациях [3], [5]. В схеме на рис. 4 функция поглощения энергии СТАТКОМом обеспечивается всеми низковольтными транзисторно-конденсаторными блоками. В каждом блоке параллельно конденсатору включен чоппер с резистором. Все чопперы работают в многотактном режиме, обеспечивая равномерную передачу энергии во все резисторы по команде системы регулирования.

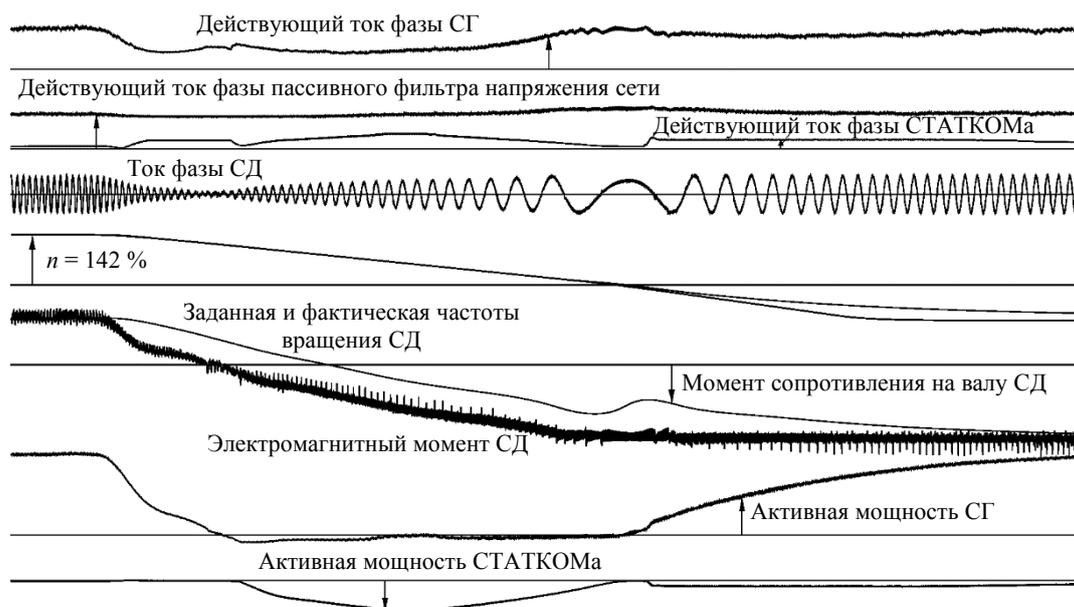


Рис. 5. Реверс гребного винта ледокола при использовании НПЧ, пассивного фильтра и СТАТКОМа
 Fig. 5. Icebreaker propeller reverse when using thyristor cyclo-converter, passive filter and STATCOM

Для уменьшения стоимости транзисторов, драйверов и конденсаторов СТАТКОМа к сети 10.5 кВ подключено также пассивное фильтрокомпенсирующее устройство C_K , которое выполняется на отечественной элементной базе.

Для анализа режимов работы СЭД на рис. 4 разработана компьютерная модель системы в среде ComSim [7]. Результаты одного из расчетов представлены на рис. 5. В частности, на рисунке отображен фрагмент процесса реверса ГВ длительностью 11 с.

На рис. 5 представлены следующие кривые: действующие токи фаз СГ, емкостного фильтра напряжения сети и СТАТКОМа, ток фазы СД, заданная и фактическая частоты вращения СД, электромагнитный момент СД и момент сопротивления на валу, активные мощности СГ и СТАТКОМа.

В начале процесса (рис. 5) СЭД работает в номинальном режиме, СГ имеет напряжение 10.5 кВ, частоту 50 Гц, ток, близкий к номинальному. СД имеет номинальную частоту вращения ($n = 100\%$). НПЧ потребляет из сети номинальную активную мощность при коэффициенте мощности около 0.8. Реактивная мощность сети компенсируется пассивным трехфазным ФКУ. Активная мощность СТАТКОМа близка к нулю.

При поступлении команды на реверс СД электромагнитный момент СД начинает плавно уменьшаться. Соответственно уменьшается частота вращения СД. Уменьшается также активная

мощность, потребляемая от СГ. Энергия, рекуперированная в сеть СД через НПЧ, частично поглощается резисторами СТАТКОМа. Включение в СТАТКОМе функции поглощения энергии позволяет устранить рекуперацию активной мощности в СГ, что видно из рис. 5.

Реализация схемы (рис. 4) в СЭД позволяет существенно уменьшить мощность транзисторных ПП в цепях главного тока СЭД за счет применения пассивных фильтров отечественного производства и сравнительно маломощных СТАТКОМов с функцией поглощения рекуперированной энергии.

Выводы.

1. СЭД мощных ледоколов могут быть выполнены с транзисторными и тиристорными преобразователями частоты. При транзисторных ПЧ гребные двигатели могут быть синхронными или асинхронными. При тиристорных ПЧ целесообразно применение синхронных двигателей.

2. СЭД ледоколов с тиристорными НПЧ могут быть построены в основном на отечественной элементной базе. Однако при этом необходимо решение ряда задач – компенсация реактивной мощности сети, минимизация искажений напряжений сети, поглощение рекуперированной в сеть энергии при реверсах гребных винтов.

3. Указанные в п. 2 задачи могут решаться при использовании пассивных фильтрокомпенсирующих устройств, а также модульных многоуровневых СТАТКОМов с функцией поглощения энергии при реверсах гребных винтов.

Список литературы

1. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет). СПб.: ОАО «Электросила», 2003. 172 с.
2. Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчет, применение) / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов, П. Н. Калачиков, А. П. Емельянов // СПб.: ОАО «Электросила», 2004. 252 с.
3. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Электромеханотронные комплексы и их моделирование на ЭВМ по взаимосвязанным подсистемам. СПб.: Ладога, 2020. 336 с.
4. Воронцов А. Г., Пронин М. В. Расчет систем с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями на быстродействующих сдвоенных моделях // Электротехника. 2021. № 1. С. 20–25.
5. Модели модульного многоуровневого попечного СТАКМа / А. Г. Воронцов, М. В. Пронин, А. С. Адалев, В. Ю. Шелюх, И. А. Дикун // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2021. № 9. С. 72–79.
6. Воронцов А. Г. Развитие методологии моделирования ЭМТС по взаимосвязанным подсистемам и комплекс моделей в ComSim // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 3. С. 57–65.
7. Воронцов А. Г. Программа для ЭВМ ComSim1_5 / свид. регистрации 2019661058. Дата регистрации в Федеральной службе по интеллектуальной собственности РФ 19.08.2019.
8. Bocquel A., Janning J. Analysis of a 300 MW variable speed drive for pump-storage plant applications // 11th European Conf. on Power Electronics and Applications (EPE'2005). IEEE, 2005. P.1–10. URL: https://www.researchgate.net/publication/224642877_Analysis_of_a_300_MW_variable_speed_drive_for_pump-storage_plant_applications (дата обращения 29.06.2022). doi: 10.1109/EPE.2005.219434.
9. Patin N. Power Electronics Applied to Industrial Systems and Transport. Vol. 2: Power Converters and their Control. ISTE Press-Elsevier, 2015. 321 s. doi: 10.1016/C2014-0-04690-4.
10. Blaabjerg F. Control of Power Electronic Converter and Systems. London, UK: Academic Press-Elsevier, 2018. 392 s. doi: 10.1016/C2015-0-02427-3.
11. Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives. Oxford: Newnes Elsevier, 2013. 436 p. doi: 10.1016/C2011-0-07555-5.

Информация об авторе

Воронцов Алексей Геннадьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: ag.voroncov@gmail.com

References

1. Pronin M. V., Voroncov A. G. Silovye polnost'yu upravlyaemye poluprovodnikovye preobrazovateli (modelirovanie i raschet). SPb.: OAO «Elektrosila», 2003. 172 s. (In Russ.).
2. Elektroprivody i sistemy s elektricheskimi mashinami i poluprovodnikovymi preobrazovatelyami (modelirovanie, raschet, primeneniye) / M. V. Pronin, A. G. Voroncov, P. N. Kalachikov, A. P. Emel'yanov // SPb.: OAO «Elektrosila», 2004. 252 s. (In Russ.).
3. Pronin M. V., Voroncov A. G. Elektromekhanotronnye komplekсы i ih modelirovanie na EVM po vzaimosvyazannym podsistemam. SPb.: Ladoga, 2020. 336 s. (In Russ.).
4. Voroncov A. G., Pronin M. V. Raschet sistem s elektricheskimi mashinami i poluprovodnikovymi preobrazovatelyami na bystrodejstvuyushchih sdoennyh modelyah // Elektrotekhnika. 2021. № 1. S. 20–25. (In Russ.).
5. Modeli modul'nogo mnogourovnevnogo poperechnogo STATKMa / A. G. Voroncov, M. V. Pronin, A. S. Adalev, V. YU. SHelyuh, I. A. Dikun // Izv. SPbGETU «LETI». 2021. № 9. S. 72–79 (In Russ.).
6. Voroncov A. G. Razvitie metodologii modelirovaniya EMTS po vzaimosvyazannym podsistemam i kompleks modelej v ComSim // Izv. SPbGETU «LETI». 2022. T. 15, № 3. S. 57–65. (In Russ.).
7. Voroncov A. G. Programma dlya EVM ComSim1_5 / svid. registracii 2019661058. Data registracii v Federal'noj sluzhbe po intellektual'noj sobstvennosti RF 19.08.2019.
8. Bocquel A., Janning J. Analysis of a 300 MW Variable Speed Drive for Pump-Storage Plant Applications // 11th European Conf. on Power Electronics and Applications (EPE'2005). IEEE, 2005. P.1–10. URL: https://www.researchgate.net/publication/224642877_Analysis_of_a_300_MW_variable_speed_drive_for_pump-storage_plant_applications (data obracheniya 29.06.2022). doi: 10.1109/EPE.2005.219434.
9. Patin N. Power Electronics Applied to Industrial Systems and Transport. Vol. 2: Power Converters and their Control. ISTE Press-Elsevier, 2015. 321 s. doi: 10.1016/C2014-0-04690-4.
10. Blaabjerg F. Control of Power Electronic Converter and Systems. London, UK: Academic Press-Elsevier, 2018. 392 s. doi: 10.1016/C2015-0-02427-3.
11. Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives. Oxford: Newnes Elsevier, 2013. 436 s. doi: 10.1016/C2011-0-07555-5.

Information about the author

Aleksey G. Vorontsov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Robotics and Automation of Production Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: ag.vorontsov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 17.05.2022; принята к публикации после рецензирования 23.05.2022; опубликована онлайн 21.10.2022.

Submitted 17.05.2022; accepted 23.05.2022; published online 21.10.2022.
