

## Подхват асинхронного двигателя после потери питания транзисторного электропривода

А. Г. Воронцов

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

**Аннотация.** Рассмотрено решение задачи подключения асинхронной машины с короткозамкнутым ротором к транзисторному преобразователю после их разъединения при отсутствии датчика частоты вращения ротора. Указанная задача может возникнуть в приводах насосов, вентиляторов, в ветроэлектрических установках и в других системах при необходимости экстренного торможения механизма или при обеспечении бесперебойности его работы. В статье предлагается решение задачи применительно к системе электродвижения судна. При потере питания привода торможение гребного винта и ротора машины сначала происходит сравнительно быстро – до частоты вращения, соответствующей скорости движения судна. Затем торможение замедляется в связи с большой инерционностью судна. Значительная длительность процесса позволяет использовать алгоритм определения частоты вращения ротора, основанный на тестировании машины посредством питания статора асинхронного двигателя от инвертора малыми напряжениями с частотой, которая изменяется в заданных пределах. Построены математическая и компьютерная модели системы, выполнены численные эксперименты, подтверждающие эффективность рассмотренного решения.

**Ключевые слова:** транзисторный преобразователь, асинхронная машина, частота вращения, перерыв питания, подхват, моделирование, расчет

**Для цитирования:** Воронцов А. Г. Подхват асинхронного двигателя после потери питания транзисторного электропривода // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 1. С. 94–100. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-1-94-100.

Original article

## Catching an Induction Motor After a Loss Power Supply of the Transistor Electricdrive

A. G. Vorontsov

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

**Abstract.** The solution of the problem of connecting an asynchronous machine with a squirrel-cage rotor to a transistor converter after their disconnection in the absence of a rotor speed sensor is considered. This problem may arise in the drives of pumps, fans, in wind power plants and in other systems, if it is necessary to urgently breaking the mechanism or to ensure its uninterrupted operation. In the article, the problem is solved in relation to the ship's electric propulsion system. When the drive power is lost, the propeller and the rotor of the machine are first slowed down relatively quickly to a speed corresponding to the speed of the vessel. Then braking slows down due to the large inertia of the vessel. The significant duration of the process allows the use of an algorithm for determining the rotor speed, based on testing the machine by feeding the stator of an asynchronous motor from an inverter with low voltages with a frequency that varies within the specified limits. Mathematical and computer models of the system are constructed, numerical experiments are performed confirming the effectiveness of the considered solution.

**Keywords:** transistor frequency converters, induction motor, power loss, catching, simulation

**For citation:** Vorontsov A. G. Catching an Induction Motor After a Loss Power Supply of the Transistor Electricdrive // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 1. P. 94–100. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-1-94-100.

**Введение.** В системах электродвижения судов (СЭД), в самосвалах большой грузоподъемности, в железнодорожном транспорте, в приводах насосов и во многих технических объектах другого назначения применяются частотно-регулируемые приводы с асинхронными короткозамкнутыми двигателями (АД) и транзисторными преобразователями частоты (ПЧ) с автономными инверторами напряжения (АИН). Во многих случаях такие системы строятся без датчиков частоты вращения АД. При перерывах питания приводов существует задача последующего безударного включения оборудования в работу при вращающемся АД, которая может разделяться на безударное подключение к сети ПЧ и последующее безударное подключение к АИН двигателя. При кратковременных перерывах питания (единицы миллисекунд) возможно сравнительно простое решение – увеличение емкостей конденсаторных батарей на входе АИН. При более длительных перерывах питания, если нагрузка инерционна, можно использовать запас кинетической энергии нагрузки для поддержания входного напряжения АИН (при некотором усложнении алгоритмов управления). Если указанная возможность не используется и АД при исчезновении питания размагничивается, то необходима реализация алгоритма ввода АД в работу, основанного на определении его частоты вращения с применением тестовых воздействий. Возможности решения указанной задачи рассмотрены в данной статье.

**Схема СЭД, характер нагрузки и задача подхвата АД.** Рассматривается типичная СЭД судна, упрощенная схема которой представлена на рис. 1. СЭД содержит ПЧ с диодным выпрямителем (ДВ), подключенного к сети через фазные дроссели с индуктивностью  $L_{dr}$  и АИН. На выходе диодного выпрямителя для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения используется сглаживающий дроссель с индуктивностью  $L_d$ . ПЧ питается от электросети с напряжениями фаз  $u_{sn}$  ( $n = 1, 2, 3$ ). От ПЧ питается асинхронный короткозамкнутый АД, который приводит во вращение гребной винт. В длительных режимах работы СЭД энергия сети передается через ДВ и АИН к АД и далее поступает на гребной винт. В режимах реверса винта его энергия передается через АД и АИН в цепь выпрямленного напряжения  $u_C$  ПЧ – в конденсатор  $C$ . При увеличении напряжения конденсатора рекуперированная энергия тратится в защитном резисторе  $R_z$ , работа

которого регулируется чоппером  $k_z$ . Импульсы управления (ИУ) для чоппера и транзисторов моста формируются системой управления (СУ). Датчика частоты вращения АД нет. В схеме рис. 1 на выходе инвертора формируются напряжения  $u_n$  и токи  $i_n$ .

Если при исчезновении напряжения сети или вследствие какой-либо неисправности работа ПЧ прекращается, то в АД при отсутствии питания обмотки статора магнитный поток сравнительно быстро затухает. Частота вращения ротора АД изменяется и изменяется момент сопротивления, создаваемый на винте потоком воды, что зависит от предшествующих условий, например от скорости движения судна. Некоторые особенности этого процесса можно пояснить с помощью рис. 2, где кривой 0ЕСА изображена винтовая механическая характеристика нагрузки СЭД (зависимость момента сопротивления на валу от частоты вращения в относительных единицах  $M_c = \omega^2$ ) [1]; кривыми АВ, CD и EF обозначено множество механических реверсивных характеристик гребного винта. Каждой точке винтовой характеристики соответствует установившийся режим работы системы, в котором скорость вращения винта и скорость движения судна равны друг другу в относительных единицах. Если реверс винта осуществляется из номинального режима работы СЭД (точка А на рис. 2,  $\omega = 1$ ,  $M_c = 1$ ), то частота вращения винта и момент сопротивления воды изменяются по кривой АВ до точки В, в которой момент сопротивления на винте равен 0 (при пренебрежении потерями). Длительность процесса перехода из точки А в точку В зависит от суммарного момента инерции АД и винта.

В точке В частота вращения винта в рассматриваемом случае равна 0.7 о. е. Далее скорость вращения винта соответствует скорости движения судна и дальнейшее торможение винта определяется инерционностью судна. Длительность этого процесса (движение из точки В в точку 0) может быть весьма большой. Если начальная скорость вращения винта, при которой АД теряет питание, иная (например, точки С или Е на рис. 2), то торможение начинается при изменении скорости по другим реверсивным характеристикам, которые указаны на рис. 2. При восстановлении напряжения питания СЭД выпрямитель подключается к сети при ограничении тока заряда конденсаторов ПЧ резисторами (на рис. 1 не указаны). После заряда конденсаторов ПЧ восстанавливается нормальная работа АИН. При этом воз-

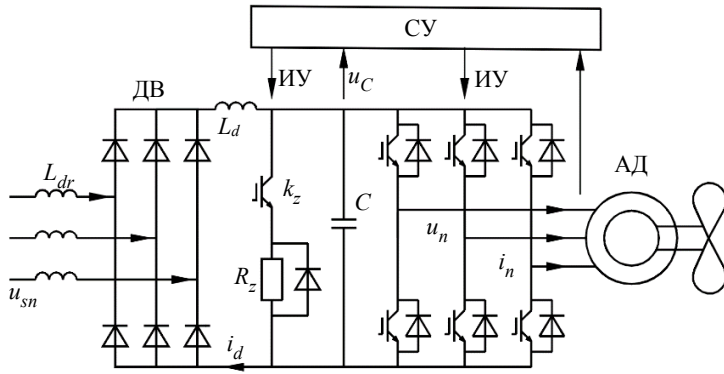


Рис. 1. Схема асинхронного электропривода гребного винта  
Fig. 1. Scheme of an asynchronous propeller drive

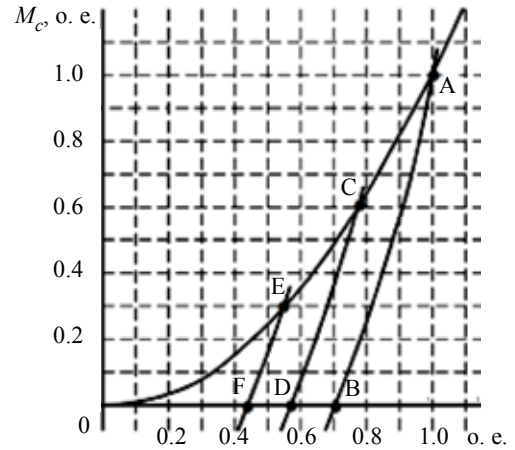


Рис. 2. Характеристики нагрузки СЭД  
Fig. 2. Load characteristics of propulsion system

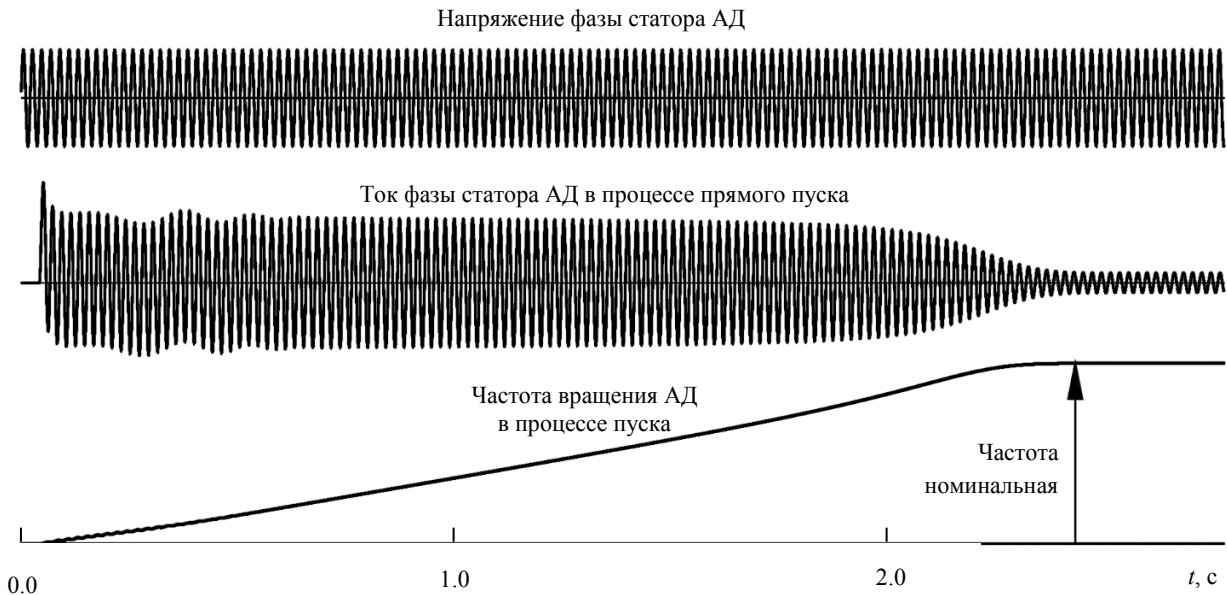


Рис. 3. Диаграмма прямого пуска ТАД41  
Fig. 3. Diagram of direct start TAD41

никает задача подключения АД к АИН при условии, что частота вращения ротора и момент сопротивления на валу неизвестны.

Частота вращения ротора АД может быть определена, исходя из следующих особенностей машины.

При прямом пуске неподвижного АД от сети с неизменными напряжением и частотой пусковой ток держится практически неизменным в течение всего процесса разгона ротора, вплоть до зоны малых скольжений. Диаграмма напряжения и тока обмотки статора, а также частоты вращения ротора в процессе пуска АД под нагрузкой представлена на рис. 3 для тягового двигателя ТАД41 производства завода «Электросила» [2]. В конце пуска АД выходит на номинальный режим работы. В процессе разгона АД ток статора в

несколько раз превышает номинальный уровень. Практически постоянная амплитуда пускового тока почти во всем диапазоне пуска означает практически неизменное полное сопротивление обмотки статора, кроме зоны малых скольжений. При малых скольжениях приведенные к статору активные сопротивления обмотки ротора, деленные на малое скольжение, увеличиваются и ограничивают токи фаз статора до сравнительно небольшого уровня. Математическое описание АД с анализом режимов работы представлено в технической литературе по электрическим машинам [3], [4].

Указанное обстоятельство позволяет построить следующий алгоритм определения частоты вращения АД после его отключения и затухания магнитного потока. В АИН формируется трехфазная симметричная система напряжений с ма-

лой амплитудой. Частота напряжений управления изменяется в заданных пределах, например от 0 до номинальной частоты. Сформированным напряжениям управления АИН соответствуют силовые напряжения, которые подаются на обмотку статора АД. Под действием этих напряжений в фазах АД протекают токи. В зоне малых скольжений сопротивления контуров ротора увеличиваются вплоть до разрыва цепей, при этом токи фаз статора существенно уменьшаются. Минимум токов означает, что частота вращения ротора АД найдена. Если указанный алгоритм поиска частоты вращения АД реализуется в зоне соответствия скорости движения судна частоте вращения гребного винта (момент сопротивления на валу близок к 0), то обеспечивается безударное включение электропривода в режим нормальной работы. Последующий разгон АД осуществляется по соответствующей реверсивной характеристике до характеристики винтовой. Если указанный аварийный перерыв в работе устраняется за короткое время, то восстанавливается установившийся режим работы всей системы, в котором частота вращения АД соответствует скорости движения судна.

**Моделирование СЭД.** При моделировании СЭД использованы математические модели электрических машин, полупроводниковых преобразователей, систем управления, описанные в ряде публикаций [2], [5]–[7]. Моделирование выполнено по методологии расчета сложных систем по взаимосвязанным подсистемам, что позволило существенно сократить затраты машинного времени на расчеты и исследования. Используются итерационные методы решения систем алгебраических уравнений, а также явный метод Эйлера для интегрирования дифференциальных уравнений. Для описания винтовых и реверсивных характеристик нагрузки СЭД использована сплайн-аппроксимация кривых [8]. Компьютерные модели выполнены на языке программирования C++ в среде собственной разработки ComSim1\_5 [9].

При исследованиях на ЭВМ параметры установки, а также параметры расчета задаются в файлах исходных данных. Результаты расчетов выводятся на дисплей, а также в файлы результатов. Предусмотрены возможности графической обработки результатов расчетов, возможности анализа кривых разложением в ряды Фурье и др.

**Номинальный режим СЭД, исчезновение питания и подхват АД.** Исследования нормальных, а также аварийных режимов работы СЭД,

связанных с перерывами питания, выполнены для установки по схеме рис. 1, в которой АД имеет номинальную мощность 300 кВт. Другие номинальные параметры АД: напряжение обмотки статора 380 В; частота 50 Гц; коэффициент мощности 0.896; скольжение 0.012 о. е.; КПД 0.968; момент инерции ротора (с учетом присоединенной массы гребного винта)  $4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ; потери механические и добавочные 1.558 кВт. Потери в стали статора учитываются в схеме замещения активными сопротивлениями 345 о. е. В схеме замещения АД индуктивность рассеяния фаз статора 0.10243 о. е., ротора – 0.0854 о. е.; насыщенное значение индуктивности намагничивания 3.394 о. е.; активное сопротивление фазы статора 0.0154 о. е., ротора – 0.0119 о. е. В АД учитывается вытеснение токов в роторе лестничными схемами замещения электрических контуров [10]. При учете вытеснения токов при переходе от одних ступеней лестницы к другим индуктивности и активные сопротивления изменяются по геометрической прогрессии с коэффициентом 1.5. Используемое математическое описание АД представлено в публикациях (например, [2]).

Напряжение питания СЭД 380 В, частота 50 Гц. Емкость конденсаторной батареи в цепи выпрямленного напряжения ПЧ 0.01 Ф. Частота широтно-импульсной модуляции в АИН 3000 Гц.

Результат одного из расчетов режимов работы СЭД представлен на рис. 4 на интервале времени около 10 с. На рисунке выведены кривые, которые характеризуют рассматриваемые процессы: напряжение фазы питающей СЭД сети, напряжение конденсаторной батареи (выпрямленное напряжение ПЧ), напряжение управления фазы АИН, ток фазы АИН (ток фазы АД), основной магнитный поток АД (поток в воздушном зазоре), электромагнитный момент и частота вращения АД. В нижней части рис. 4 указаны моменты времени ( $t_1-t_4$ ), в которые изменяется режим работы СЭД.

После пуска АД осуществляется разгон АД и к моменту времени  $t_1$ , СЭД выходит на номинальный режим работы, в котором СЭД получает питание от сети с номинальным напряжением и частотой, а АД имеет номинальные мощность, напряжение и частоту.

В момент времени  $t_1$  исчезает напряжение питающей сети (например, вследствие отключения коммутационным аппаратом). Система

управления ПЧ, контролируя напряжение питания, снижает задание по электромагнитному моменту АД до нуля. Соответственно уменьшаются токи фаз АИН и АД. При этом АД не отключается от АИН и токи в фазах уменьшаются до какого-то минимального уровня. Это приводит к тому, что батарея конденсаторов в ПЧ разряжается. К моменту времени  $t_2$  выпрямленное напряжение ПЧ минимально, магнитный поток АД уменьшается до 15–20 % номинального уровня, частота вращения гребного винта снижается приблизительно до 70 % номинальной частоты, момент сопротивления воды на винте близок к нулю (см. рис. 3).

В момент времени  $t_2$  восстанавливается напряжение питающей сети. В ПЧ через токоограничивающие резисторы происходит заряд конденсаторной батареи. При этом на входе АИН восстанавливается силовое напряжение, позволяющее выполнять работы по тестированию АД. Длительность исчезновения напряжения питания СЭД около 1.5 с.

Тестирование АД для определения частоты вращения ротора осуществляется в диапазоне времени от  $t_2$  до  $t_3$ . На этом интервале времени в АИН формируется трехфазная симметричная система напряжений управления с заданной неизменной амплитудой, которая в рассматриваемом случае равна 0.05 о. е. Частота указанной системы напряжений управления изменяется в заданном диапазоне – в данном случае от 0 до 50 Гц. Под действием силовых напряжений АИН в фа-

зах вращающегося АД протекают токи. Практически во всем указанном диапазоне времени токи фаз АД сравнительно велики, так как ограничиваются сравнительно небольшими сопротивлениями фаз при значительной разнице частоты вращения АД и частоты напряжений статора. В той части процесса, в которой разница указанных частот уменьшается (уменьшается скольжение АД), происходит значительное увеличение сопротивлений фаз и токи фаз резко уменьшаются. Это означает, что частота вращения АД определена. Длительность определения частоты вращения ротора АД немного более 1 с.

Вскоре после восстановления напряжения в сети и на входе ПЧ (момент времени  $t_3$ ) начинается разгон АД и восстановление нормального режима работы СЭД. Этот процесс длится до момента времени  $t_4$ . На этом интервале времени восстанавливается до номинального уровня магнитный поток АД. Разгон осуществляется по реверсивной характеристике нагрузки СЭД до винтовой характеристики (см. рис. 2). В момент времени  $t_4$  параметры СЭД принимают номинальные значения. Общая длительность аварийного процесса пропажи напряжения питания СЭД и восстановления номинального режима работы около 8 с. Разработанный алгоритм устранения аварии позволяет в приемлемый срок ее устранить. При этом в переходном процессе напряжения и токи не достигают аварийных значений.

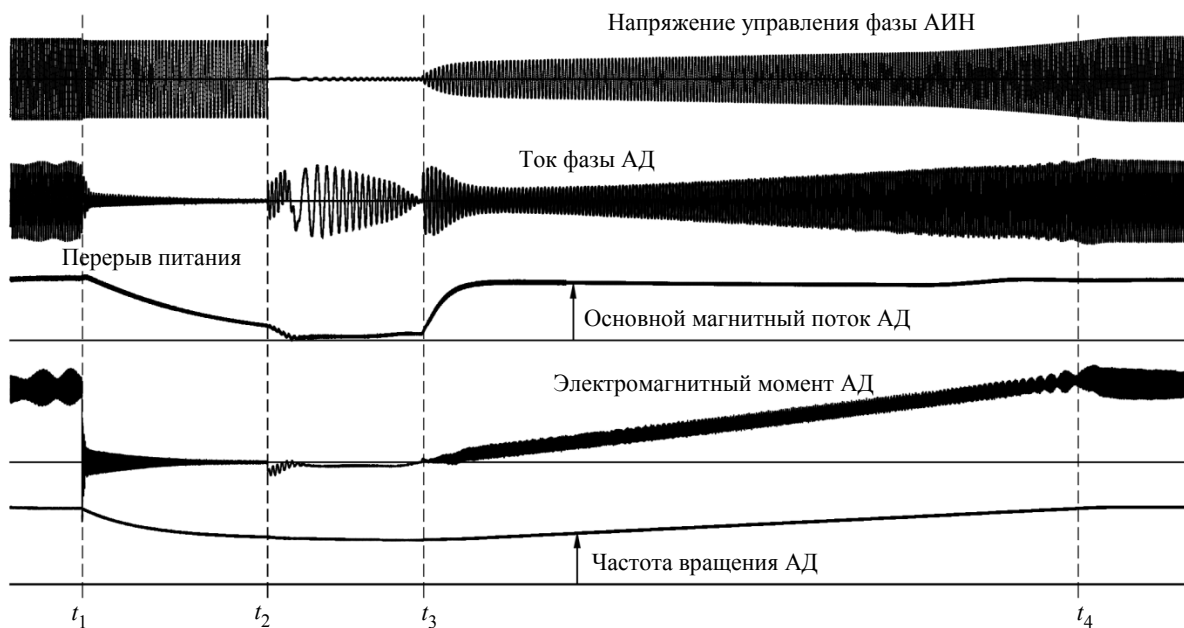


Рис. 4. СЭД в режиме потери питания и последующего восстановления работы  
Fig. 4. Propulsion system in the mode of power loss and subsequent restoration of operation

**Выводы.**

1. Разработан алгоритм подхвата асинхронного двигателя после потери питания в транзисторном частотно-регулируемом электроприводе гребного винта судна. Алгоритм содержит процедуру тестирования двигателя при помощи питания обмотки статора напряжениями с малой амплитудой и переменной частотой для определения частоты вращения ротора. Искомая частота определяется по минимальным значениям токов статора.

2. Разработана компьютерная модель системы электродвижения судна с транзисторным преобразователем частоты и асинхронным двигателем, в которой реализованы аварийный процесс потери питания преобразователя и последующий подхват асинхронного гребного двигателя.

3. На модели разработанной системы электродвижения судна выполнены расчеты и исследования, которые подтвердили эффективность применения предложенного алгоритма подхвата двигателя после потери питания.

**Список литературы**

1. Рукавишников С. Б. Автоматизированные гребные электрические установки. Учебник. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Судостроение, 1983. 240 с.
2. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Электромехатронные комплексы и их моделирование на ЭВМ по взаимосвязанным подсистемам. СПб.: Ладога, 2020. 336 с.
3. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины. М.: Энергия, 1980.
4. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины. Л.: Энергия, 1958. Ч. I. 464 с.; Ч. II. 646 с.
5. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет). СПб.: ОАО «Электросила», 2003. 172 с.
6. Воронцов А. Г., Пронин М. В. Расчет систем с электрическими машинами и полупроводниковыми

преобразователями на быстродействующих двояных моделях // Электротехника. 2021. № 1. С. 20–25.

7. 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.

8. Стечкин С. Б., Субботин Ю. Н. Сплаины в вычислительной математике. М.: Наука, 1976.

9. Свид. 2019661058. Программа для ЭВМ ComSim1\_5 / А. Г. Воронцов Дата регистрации в Федеральной службе по интеллектуальной собственности РФ 19.08.2019.

10. Проектирование электрических машин: в 2 кн. / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев; под ред. И. П. Копылова. М.: Энергия, 1980. Кн. 1. 464 с.; Кн. 2. 384 с.

**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. Rukavishnikov S. B. Avtomatizirovannye grebnye jelektricheskie ustanovki. Uchebnyk. 3-e izd., pererab. i dop. L.: Sudostroenie, 1983. 240 s. (In Russ.).
2. Pronin M. V., Voroncov A. G. Jelektromehano-tronnye komplekxy i ih modelirovanie na JeVM po vzaimosvjazannym podsistemam. SPb.: Ladoga, 2020. 336 s. (In Russ.).
3. Ivanov-Smolenskij A. V. Jelektricheskie mashiny. M.: Jenergija, 1980. (In Russ.).
4. Kostenko M. P., Piotrovskij L. M. Jelektricheskie mashiny. L.: Jenergija, 1958. Ch. I. 464 s.; Ch. II. 646 s. (In Russ.).
5. Pronin M. V., Voroncov A. G. Silovye polnost'ju upravljaemye poluprovodnikovye preobrazovateli (modelirovanie i raschet). SPb.: ОАО «Jelektrosila», 2003. 172 s. (In Russ.).
6. Voroncov A. G., Pronin M. V. Raschet sistem s jelektricheskimi mashinami i poluprovodnikovymi pre-

obrazovateljami na bystrodejstvujushih sdvoennyh modeljah // Jelektrotehnika. 2021. № 1. S. 20–25. (In Russ.).

7. Voroncov A. G. Razvitie metodologii modelirovanija JeMTS po vzaimosvjazannym podsistemam i kompleks modelej v ComSim // Izv. SPbGjeTU «LJeTI». 2022. T. 15, № 3. S. 57–65. (In Russ.).

8. Stechkin S. B., Subbotin Ju. N. Splajny v vychislitel'noj matematike. M.: Nauka, 1976. (In Russ.).

9. Svid. 2019661058. Programma dlja JeVM ComSim1\_5 / A. G. Voroncov. Data registracii v Federal'noj sluzhbe po intellektual'noj sobstvennosti RF 19.08.2019. (In Russ.).

10. Proektirovanie jelektricheskikh mashin: v 2 kn. / I. P. Kopylov, B. K. Klokov, V. P. Morozkin, B. F. Tokarev; pod red. I. P. Kopylova. M.: Jenergija, 1980. Kn. 1. 464 s.; Kn. 2. 384 s. (In Russ.).

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](mailto:ag.vorontsov@gmail.com)

Статья поступила в редакцию 17.11.2022; принята к публикации после рецензирования 03.12.2022; опубликована онлайн 30.01.2023.

Submitted 17.11.2022; accepted 03.12.2022; published online 30.01.2023.

---