

## Модели систем электродвижения ледоколов с асинхронными двигателями и трехуровневыми преобразователями

А. Г. Воронцов✉, М. В. Пронин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ [ag.voroncov@gmail.com](mailto:ag.voroncov@gmail.com)

**Аннотация.** Описаны математические модели систем электродвижения ледоколов с асинхронными двигателями и трехуровневыми преобразователями с учетом тепловых процессов в транзисторных модулях. С помощью этих моделей выполнены расчеты основных режимов работы ледокола – номинальный, работа с перегрузкой и при заклинивании гребного винта, при этом определено распределение температур в модулях инвертора. При снижении частоты выходного напряжения преобразователя увеличиваются колебания температуры в транзисторных модулях, приводящих к их разрушению. Для уменьшения максимальных значений температур модулей предложено увеличить значение основного потока гребного двигателя.

**Ключевые слова:** система электродвижения, ледокол, транзисторный трехуровневый преобразователь частоты, заклинивание гребного винта, распределение температур в трехуровневом преобразователе

**Для цитирования:** Воронцов А. Г., Пронин М. В. Модели систем электродвижения ледоколов с асинхронными двигателями и трехуровневыми преобразователями // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 9. С. 80–90. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-4-80-90.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

## Models of Icebreaker Electric Propulsion Systems with Asynchronous Motors and Three-Level Converters

A. G. Vorontsov✉, M. V. Pronin

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ [ag.voroncov@gmail.com](mailto:ag.voroncov@gmail.com)

**Abstract.** Describes mathematical models of electric propulsion systems for icebreakers with asynchronous motors and three-level converters, taking into account thermal processes in transistor modules. With the help of these models, calculations were made for the main operating modes of the icebreaker – nominal, operation with overload and when the propeller is jammed, while determining the temperature distribution in the inverter modules. With a decrease in the frequency of the output voltage of the converter, temperature fluctuations in transistor modules increase, leading to their destruction. In order to reduce the maximum temperatures of the modules, it is proposed to increase the value of the main flux of the propulsion motor.

**Keywords:** electric propulsion system, icebreaker, transistor 3-level frequency converters, propeller jamming, temperature distribution in a three-level converter

**For citation:** Vorontsov A. G., Pronin M. V. Models of Icebreaker Electric Propulsion Systems with Asynchronous Motors and Three-Level Converters // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 9. P. 80–90. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-9-80-90.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Введение.** В системах электродвижения судов (СЭД), в асинхронизированных электромашинных преобразователях частоты (АСЭМПЧ) и в других устройствах [1]–[7] применяются многоуровневые полупроводниковые преобразователи (ПП). Используются преобразователи различных типов, в том числе трехуровневые. ПП во многих случаях работают совместно с электрическими машинами (ЭМ) переменного тока, например с асинхронными или асинхронизированными машинами. Частоты фазных токов ЭМ и ПП могут изменяться в широких пределах. При этом могут возникать проблемы распределения нагрузок между элементами систем. В трехуровневом автономном инверторе напряжения (АИН) токи в последовательно включенных приборах различны из-за особенностей управления и наличия разделительных диодов. Потери энергии в приборах, подключенных непосредственно к фазам, могут отличаться от потерь в приборах, подключенных к положительной и отрицательной ветвям цепей выпрямленного напряжения. Различия в нагревах приборов увеличиваются при снижении частот токов фаз. Для учета указанных особенностей систем необходимы модели, позволяющие рассчитывать на ЭВМ электромагнитные и тепловые процессы в зависимости от режима работы установок в целом. В данной публикации решение этой задачи рассматривается применительно к СЭД атомных ледоколов типа «Арктика» мощностью 60 МВт и ледокола-лидера мощностью 120 МВт [2], [5].

**Структура и режимы работы СЭД ледоколов.** СЭД ледокола-лидера содержит 4 гребных винта мощностью по 30 МВт. Каждый винт приводится во вращение двоярным двигателем переменного тока. Каждая из машин двигателя имеет мощность 15 МВт. В основном варианте статор

каждой машины содержит 3 трехфазные обмотки мощностью по 5 МВт, каждая из которых получает питание от индивидуального ПП. Каждый ПП содержит трехуровневый АИН, который питается от сети 10.5 кВ, 50 Гц через трехобмоточный трансформатор и два трехфазных диодных выпрямителя. На рис. 1 представлена расчетная схема с эквивалентным асинхронным двигателем мощностью 30 МВт и ПЧ соответствующей мощности с тормозными резисторами. Параметры гребного двигателя (ГЭД) и его нагрузки пересчитаны и соответствуют мощности ПЧ. На рис. 1 цифрами 1–4 обозначены номера IGBT-модулей в фазе АИН.

Номинальная мощность трансформатора – 40 МВ · А, коэффициент трансформации – 5.55, напряжение короткого замыкания – 6 %; выпрямленное напряжение 12-пульсного диодного выпрямителя – 5400 В; мощность эквивалентного ГЭД – 30 МВт, КПД – 96.8 %, коэффициент мощности – 0.896, номинальное напряжение – 3300 В, номинальная частота напряжения – 9.62 Гц. Между АИН и ГЭД использован трехфазный LC-фильтр напряжений (в модели СЭД конденсаторы учитываются, но в расчетах могут быть исключены).

СЭД ледоколов «Арктика» аналогичны. Ледокол имеет 3 двоярных ГЭД. Статоры двигателей выполнены с двумя трехфазными обмотками. Для питания ГЭД используются ПП, аналогичные рис. 1. Каждый двоярный ГЭД имеет мощность 20 МВт.

При работе ледоколов в чистой воде и во льдах возможны значительные изменения нагрузки, что отражено в механических характеристиках ГЭД  $n(M)$ , представленных на рис. 2 в относительных единицах (о. е.). На рисунке показаны кривая нагрузки на валу  $M_c$  и семейство механических характеристик, соответствующих постоянству мощности  $P$  на разных уровнях, от 1.0 до 0.6.

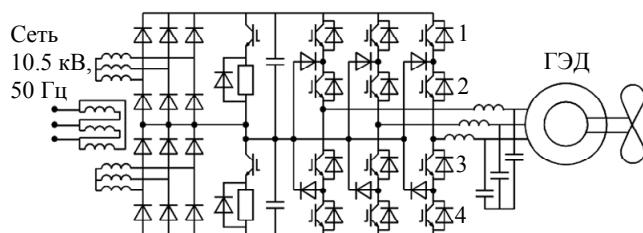


Рис. 1. Схема канала СЭД ледокола-лидера  
Fig. 1. Scheme of the channel of the electric propulsion system (EPS) of the icebreaker-leader

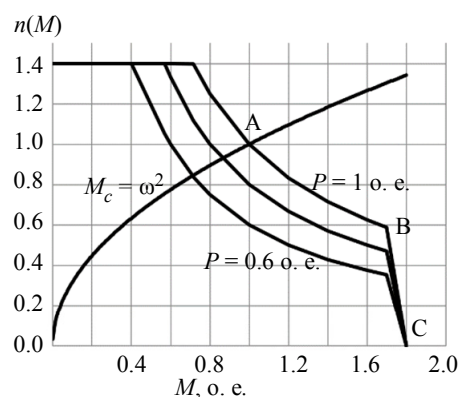


Рис. 2. Характеристики нагрузки СЭД  
Fig. 2. Load characteristics of EPS

За номинальный режим принята работа ледокола в битом льду с номинальной мощностью – точка А на рис. 2 (пересечение кривой постоянства мощности  $P = 1$  о. е. с вентиляторной механической характеристикой нагрузки  $M_c = \omega^2$ , что соответствует зависимости мощности  $P = \omega^3$ ).

При переходе ледокола к работе в чистой воде момент сопротивления на гребном винте уменьшается, а частота вращения винта увеличивается. При этом действует ограничение по скорости, которое в данном случае равно 1.4 о. е. Если начинается взаимодействие ледокола и винта с плотным льдом, то при номинальной мощности из точки А ледокол переходит в режимы работы с пониженной скоростью и повышенным моментом. Допускается увеличение момента винта до 1.7 о. е. – точка В. В этой точке момент, создаваемый ГЭД, ограничивается, а частота вращения винта снижается приблизительно до 0.6 о. е. (при номинальной мощности). Если момент сопротивления превышает ограничение, то снижение частоты вращения продолжается вплоть до заклинивания винта в точке С при моменте 1.8 о. е. В этом режиме допускается работа СЭД в течение 1 мин.

**Моделирование СЭД ледокола в целом.** Моделирование СЭД ледоколов выполнено для одного канала электропередачи энергии от генераторов к ГЭД (рис. 1). Математическое описание системы осуществляется по методологии расчета систем по взаимосвязанным подсистемам, которая описана в публикациях [6], [7].

Одна из операций по разделению расчетной схемы на взаимосвязанные подсистемы заключается в преобразовании трехфазного фильтра между АИН и ГЭД. При известных токах фаз в этом фильтре емкости  $C_i$  заменяются зависимыми источниками напряжения

$$u_{Cin} = \frac{1}{C_i} \int i_{Cin} dt.$$

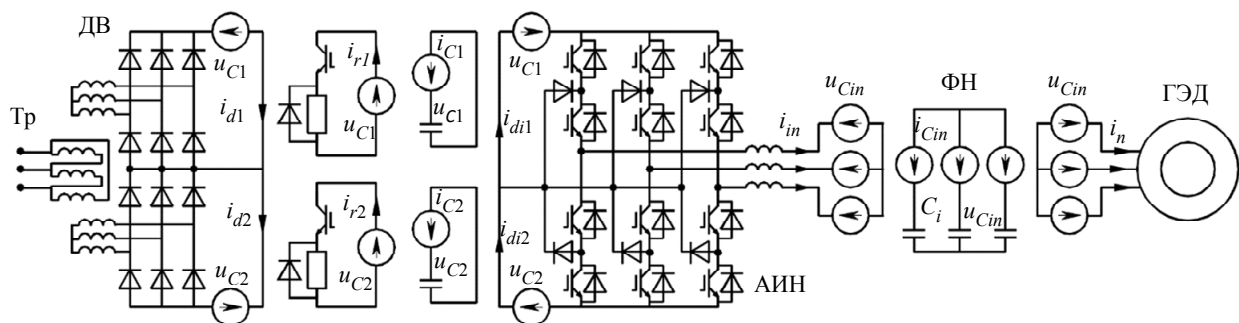


Рис. 3. Разделение канала СЭД ледокола на подсистемы  
Fig. 3. Separation of the icebreaker EPS channel into subcircuits

где  $i_{Cin}$  – токи в емкостях;  $n = 1, 2, 3$  – номер фазы фильтра.

Зависимые источники напряжения  $u_{Cin}$  из фаз фильтра переносятся в фазы АИН и ГЭД. В результате расчетная схема разделяется на подсистемы, изображенные на рис. 3 (АИН отделяется от ГЭД).

При расчетах полученных подсистем определяются токи фаз АИН  $i_{in}$  и токи фаз ГЭД  $i_n$ . Это позволяет определить токи в емкостях трехфазного фильтра

$$i_{Cin} = i_{in} - i_n.$$

Найденные токи в емкостях фильтра рассматриваются в качестве зависимых источников тока, на которые замыкаются емкости. Эти элементы образуют дополнительную подсистему фильтра напряжений ФН, изображенную на рис. 3.

Другое преобразование расчетной схемы заключается в замене емкостей в цепях выпрямленного напряжения преобразователя зависимыми источниками напряжения

$$u_{C1} = \frac{1}{C_1} \int i_{C1} dt, \quad u_{C2} = \frac{1}{C_2} \int i_{C2} dt.$$

Зависимые источники напряжения  $u_{C1}$  и  $u_{C2}$  переносятся в цепи выпрямленного тока диодного выпрямителя ДВ, в цепи защитных резисторов, и в цепи выпрямленного напряжения АИН, как изображено на рис. 3. В результате расчетная схема разделяется на подсистемы по цепям выпрямленного напряжения. Токи, найденные в полученных подсистемах, определяют токи фильтровых конденсаторов

$$i_{C1} = i_{d1} - i_{r1} - i_{di1}; \quad i_{C2} = i_{d2} - i_{r2} - i_{di2},$$

где  $i_{d1}, i_{d2}$  – выпрямленные токи диодных мостов;  $i_{r1}, i_{r2}$  – токи цепей с защитными резисторами;  $i_{di1}, i_{di2}$  – выпрямленные токи АИН (на входе трехуровневого моста).

Зависимые источники тока фильтровых конденсаторов замыкаются на соответствующие емкости и образуют дополнительные подсхемы, изображенные на рис. 3.

Подсхема АИН с IGBT-модулями и трехфазной нагрузкой разделяется на более простые части. Выделяется блок преобразования напряжений фильтровых конденсаторов  $u_{rC1}$  и  $u_{rC2}$  в напряжения фаз  $u_{in}$  на выходе АИН ( $n = 1, 2, 3$ ) и блок нагрузки АИН с токами фаз  $i_{in}$ . Эти подсхемы *a* и *б* изображены на рис. 4.

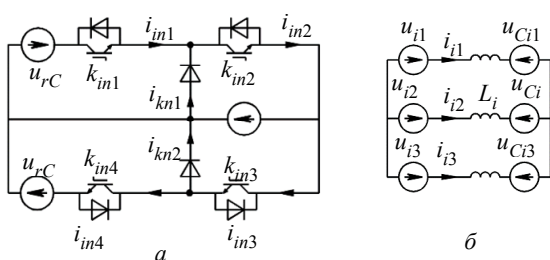


Рис. 4. Подсхемы формирования напряжения фазы:  
*a* – АИН; *б* – нагрузки

Fig. 4. Subcircuits for generating the voltage of the phase: *a* – VSI; *б* – the load

На рис. 4, *a* указаны обозначения ряда переменных АИН:  $k_{inm}$  – состояния IGBT-модуля (0 – закрыт, 1 – открыт,  $n$  – номер фазы,  $m$  – номер модуля в фазе, номера 1 и 4 соответствуют внешним модулям, номера 2 и 3 – внутренним, соединенным с фазами);  $i_{inm}$  – токи в IGBT-модулях,  $i_{knm}$  – токи в разделительных диодах;  $L_i$  – индуктивность в цепи нагрузки.

Выходные напряжения АИН, формируемые блоками рис. 4, *a*, содержат составляющие нулевой последовательности. Эти составляющие не участвуют в формировании токов фаз в подсхеме рис. 4, *б*, поэтому при расчетах они из напряжений удаляются.

Математическое описание подсхем с трансформатором  $Tr$  и диодным выпрямителем ДВ, подсхем АИН, а также описание подсхемы с асинхронным ГЭД позволяет определить токи, напряжения и другие параметры элементов системы. Эти описания подробно представлены в публикациях [6], [7].

Математическое описание подсхем СЭД и их взаимных связей через зависимые источники напряжения и тока сводится в единый алгоритм расчета, включающий в себя внутренний итерационный цикл расчета и внешний цикл интегрирования переменных. В итерационном цикле

определяются параметры зависимых источников напряжения и тока для текущего момента времени. В цикле интегрирования определяются параметры напряжений, токов и других переменных при изменении их во времени. Особенность математического описания системы и алгоритма – минимальные затраты машинного времени на расчет длительных процессов.

### Моделирование тепловых процессов в ПП.

Описанная ранее модель СЭД позволяет вычислять напряжения и токи в элементах системы со сравнительно малыми шагами по времени (например, 1 мкс) при расчете длительных установившихся и переходных режимов работы ледокола (пуск, работа с заданной мощностью, реверс и др.). Получаемая при этом информация по токам и напряжениям элементов системы позволяет одновременно рассчитывать потери энергии и тепловое состояние устройств, как описано в [6]. При выполнении этих расчетов обычно используются характеристики элементов, предоставляемые поставщиками оборудования. Например, в рассматриваемых СЭД ледоколов возможно применение в АИН транзисторных модулей TIM1200ASM45PSA011. В каждой секции ПЧ, питающей одну обмотку ГЭД используется до 4 IGBT-модулей, работающих параллельно. Основные характеристики модулей приведены на рис. 5.

На рис. 5:  $U_{ge}$  – напряжение затвор-эмиттер;  $U_{ce}$  – напряжение коллектор-эмиттер;  $I_c$  – ток коллектора;  $I_f$  – ток обратного диода;  $U_f$  – прямое падение напряжения на обратном диоде;  $E_{on}$  – потери энергии при включении;  $E_{off}$  – потери энергии на выключение;  $E_{rec}$  – потери энергии на восстановление запирающих свойств обратного диода;  $R_g$  – внешнее сопротивление в затворной цепи.

Представлены вольтамперные характеристики (ВАХ) транзисторов и обратных диодов при температурах 25 и 125 °С. Представлены также зависимости потерь энергии в IGBT-модуле в мДж при однократном переключении элементов. Указана зависимость потерь энергии в IGBT-модуле при его переключении от сопротивления резистора в цепи затвора. Указана зона безопасной работы IGBT-модуля. При расчетах теплового состояния полупроводниковых приборов используются также другие данные – тепловые сопротивления системы, температура охлаждающей воды или воздуха и др.

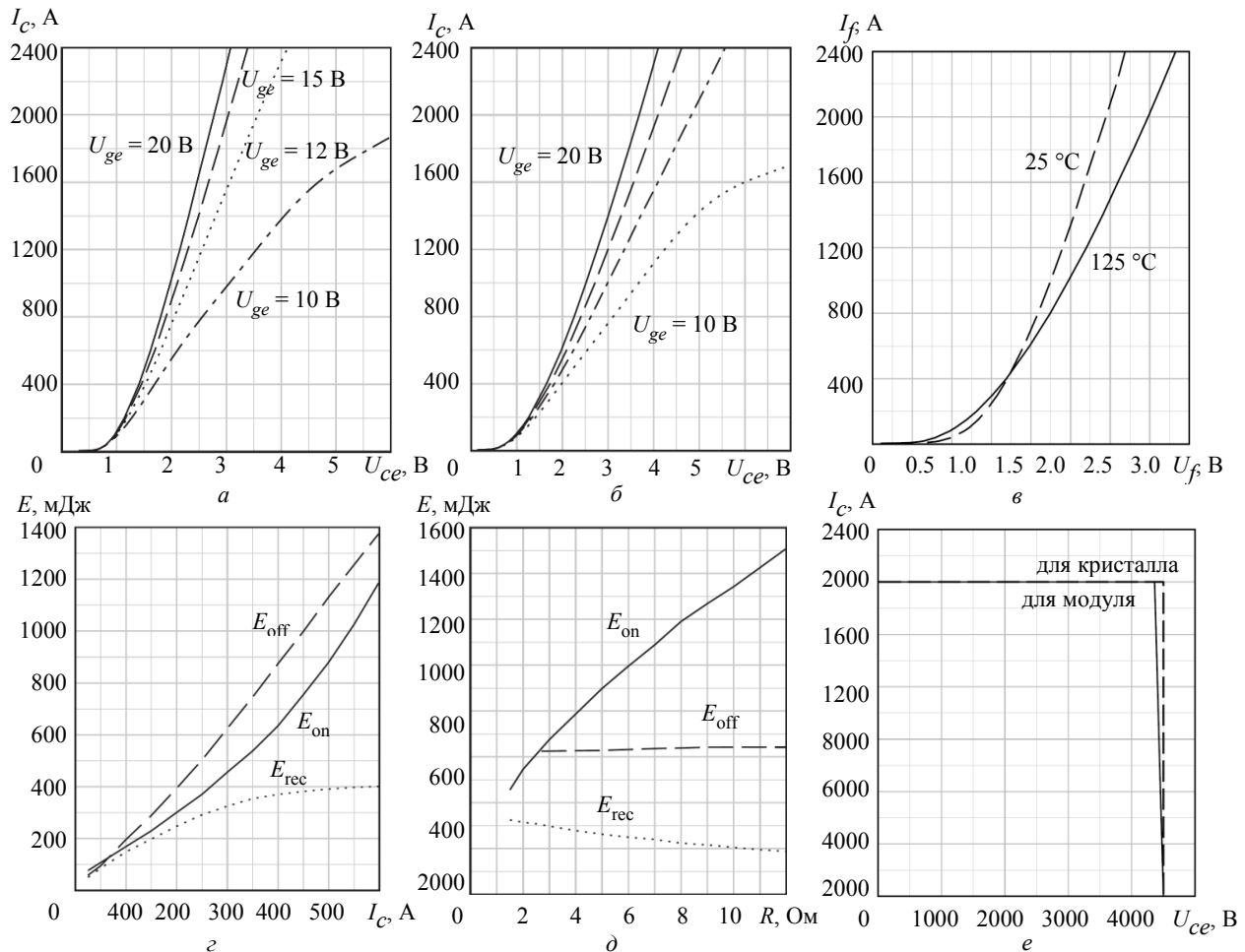


Рис. 5. Характеристики IGBT-модуля TIM1200ASM45PSA011 для расчета потерь энергии: а – ВАХ транзистора при 25 °С; б – ВАХ обратного диода; в – ВАХ транзистора при 125 °С; г – потери энергии при переключениях транзистора; д – потери при переключениях IGBT в зависимости от R цепи затвора; е – зона безопасной работы IGBT-модуля

Fig. 5. Characteristics of the TIM1200ASM45PSA011 IGBT module for energy loss calculation: а – output characteristics of the transistor at 25 degrees; б – output characteristics of the transistor at 125 degrees; в – diode forward characteristics; г – switching energy vs collector current; д – switching energy vs gate resistance; е – reverse bias safe operating area

В процессе расчета токов и напряжений системы при использовании сплайн-аппроксимации кривых определяются потери энергии в элементах и температуры полупроводниковых структур транзисторов и диодов для двух температур – для 25 и 125 °С. При известной температуре полупроводниковой структуры, определенной на предыдущем шаге расчета, перерасчитываются потери по условиям пропорциональности. Далее уточняется температура при использовании заданных тепловых сопротивлений и найденных потерь энергии. Указанный подход к оценке теплового состояния приборов осуществляется также для разделительных диодов и для других элементов СЭД.

Статические потери энергии в полупроводниковых элементах рассчитываются в соответствии с текущими значениями напряжений и токов, которые определяются в модели системы на каждом

шаге расчета, равно, например 1 мкс. Расчет динамических потерь энергии в полупроводниковых элементах осуществляется по другому алгоритму. В частности, на каждом периоде ШИМ  $T_{on}$  (рис. 6) определяется, находится ли напряжение управления  $u_{уп}$  в зоне размаха колебаний опорных напряжений от  $-1$  до  $+1$  о. е., как указано на рис. 6. Если напряжение управления выходит за указанные пределы, то на данном периоде ШИМ динамических потерь нет. Если напряжение управления находится в указанных пределах, то на данном периоде динамические потери есть, и они распределяются между приборами в зависимости от знака напряжения управления.

В соответствии с рис. 6, при положительной половине напряжения управления фазы АИН на одном периоде ШИМ происходит одно включение и одно выключение IGBT-модуля  $k_{in1}$ , а также

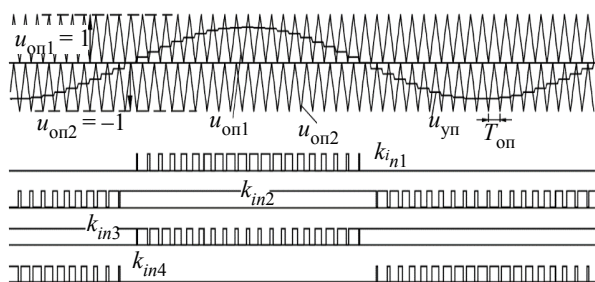


Рис. 6. Формирование импульсов управления транзисторами в 3-уровневом АИН  
 Fig. 6. Formation of control impulses transistors in a 3-level inverter

по одному выключению и включению IGBT-модуля  $k_{in3}$  (эти модули работают в противофазе). В зависимости от режима работы АИН через один из указанных модулей протекает ток, другой модуль работает без тока. Аналогично работает блок при отрицательной полуволне напряжения управления фазы АИН. При этом переключаются IGBT-модули  $k_{in2}$  и  $k_{in4}$  (эти модули также работают в противофазе).

Для учета потерь энергии в диодах от обратного тока, возникающего при включении транзисторов, можно рассмотреть изменения структуры схемы рис. 4, а при коммутациях. Эти изменения отражены на рис. 7 с указанием состояний IGBT-модулей.

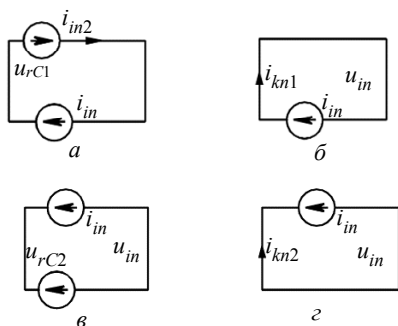


Рис. 7. Изменения схемы питания фазы нагрузки при переключениях IGBT-модулей в АИН:

- а –  $i_{kn1} = 1, k_{in2} = 1, k_{in3} = 0, k_{in4} = 0$ ;
- б –  $k_{kn1} = 0, k_{in2} = 1, k_{in3} = 1, k_{in4} = 0$ ;
- в –  $k_{kn1} = 0, k_{in2} = 0, k_{in3} = 1, k_{in4} = 1$ ;
- г –  $k_{kn1} = 0, k_{in2} = 1, k_{in3} = 1, k_{in4} = 0$

Fig. 7. Changes in the power supply scheme of the load phase when switching IGBT modules in inverter

- а –  $i_{kn1} = 1, k_{in2} = 1, k_{in3} = 0, k_{in4} = 0$ ;
- б –  $k_{kn1} = 0, k_{in2} = 1, k_{in3} = 1, k_{in4} = 0$ ;
- в –  $k_{kn1} = 0, k_{in2} = 0, k_{in3} = 1, k_{in4} = 1$ ;
- г –  $k_{kn1} = 0, k_{in2} = 1, k_{in3} = 1, k_{in4} = 0$

Если при положительной полуволне напряжения управления фазы  $n$  в АИН открыт модуль  $k_{in2}$ , а модуль  $k_{in1}$  закрыт, то справедлива схема работы фазы нагрузки рис. 7, а. В этом случае ток

нагрузки протекает через 1 разделительный диод. Если в этом состоянии системы открывается модуль  $k_{in1}$ , то на нагрузке напряжение питания увеличивается на значение напряжения 1-го конденсатора  $u_{C1}$ . Под действием указанного напряжения ток в разделительном диоде уменьшается и возникает обратный ток. Обратному току и восстанавливаемому напряжению на диоде соответствуют потери энергии в диоде, которые определяются в модели с учетом данных рис. 5, г и д.

**Модель асинхронного двигателя и векторное управление.** Эффективность рассматриваемой модели СЭД в значительной степени зависит от точности математического описания гребного асинхронного двигателя. Подробное описание машин переменного тока представлено в публикации [6]. Модель ГЭД построена в комбинированной системе координат – при описании статора в координатах фаз и ротора – во взаимно перпендикулярных координатах  $d$  и  $q$ . Учтены индуктивности рассеяния и взаимные индуктивности обмоток, а также их активные сопротивления. В роторе учтено вытеснение токов в проводниках в зависимости от частоты при использовании лестничных схем замещения [8]. Учтено насыщение стали основным магнитным потоком. Учтены потери в стали и механические потери.

В модели СЭД векторное управление ГЭД осуществляется при операциях с переменными фаз в неподвижной системе взаимно перпендикулярных координат статора  $\alpha$  и  $\beta$ , а также в ортогональной системе координат вращающегося ротора  $d$  и  $q$  [9]–[11]. При преобразованиях переменных используется найденная фаза потокосцепления ротора, которая определяется интегрированием частоты вращения его потокосцепления. Частота потокосцепления ротора определяется суммой частоты вращения ротора (сигнал датчика частоты) и частоты скольжения ЭДС ротора, которая определяется по потокосцеплению ротора и проекции тока статора на ось  $q$  (с учетом параметров цепей ротора).

Векторное управление осуществляется раздельно проекцией обобщающего вектора токов статора на продольную ось потокосцепления ротора и проекцией вектора токов на ортогональную ось. Раздельное регулирование указанных проекций позволяет осуществить взаимно независимое регулирование потока и момента ГЭД.

**Режимы работы СЭД при номинальной мощности.** Механические характеристики установившихся режимов работы СЭД при различных

нагрузках представлены на рис. 2. На рисунке указаны в том числе характерные режимы работы СЭД при номинальной мощности – точка А (номинальная частота ГЭД) и точка В (ограничение момента нагрузки). Расчеты режимов работы СЭД выполнены при следующих основных параметрах. Номинальное напряжение источника питания 10.5 кВ, частота 50 Гц. Мощность эквивалентного трансформатора 40 МВ · А, коэффициент трансформации 5.55, напряжение короткого за-

мыкания: сквозное – 6 %, частичное – 10 %. Мощность эквивалентного асинхронного двигателя – 30 МВт, напряжение – 3.3 кВ, частота – 9.62 Гц, коэффициент мощности – 0.896, КПД – 0.968, скольжение – 1.2 %, индуктивность намагничивания – 3.394 о. е., индуктивность рассеяния статора – 0.102 о. е., ротора – 0.085 о. е., активное сопротивление фазы статора – 0.0154 о. е., фазы ротора – 0.012 о. е. Температура охлаждающей воды – 34 °С. В АИН частота ШИМ – 500 Гц. При

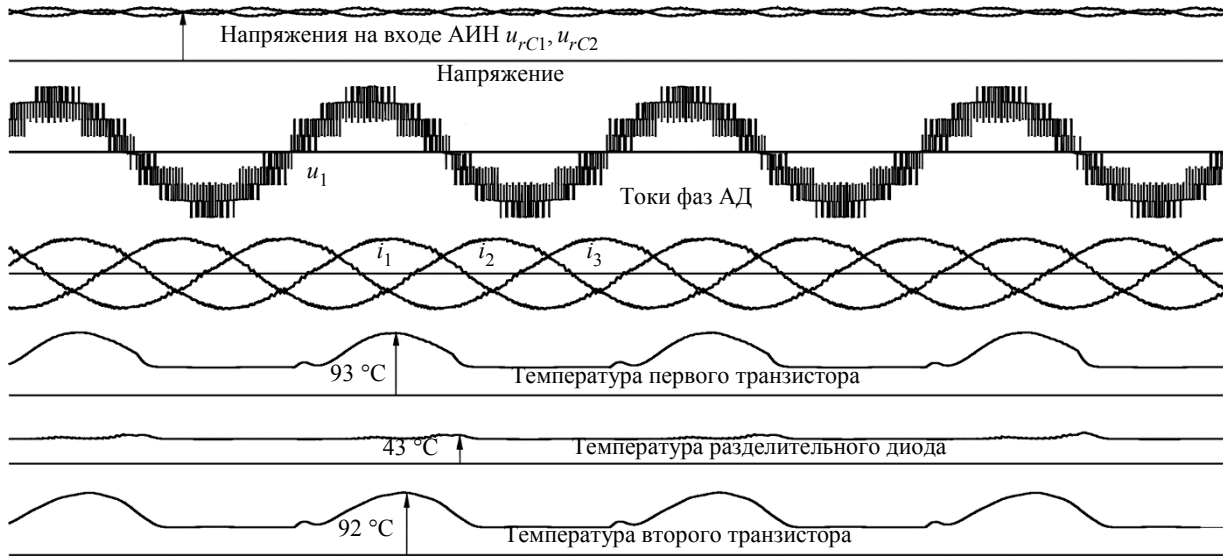


Рис. 8. Напряжения и токи СЭД, температуры полупроводников в номинальном режиме работы на интервале времени 0.4 с  
Fig. 8. EPS voltages and currents, semiconductor temperatures in the nominal operating mode for a time interval of 0.4 s

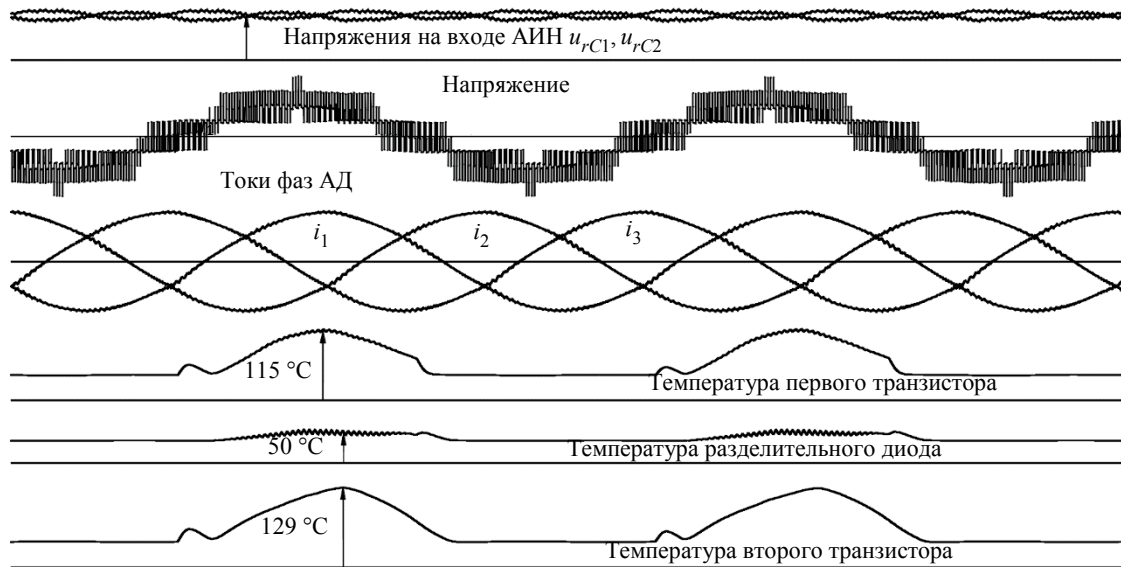


Рис. 9. Напряжения и токи СЭД, температуры полупроводников на интервале времени 0.4 с при номинальной мощности и ограничении момента ГЭД уровнем 1.7 о. е.  
Fig. 9. EPS voltages and currents, semiconductor temperatures in the time interval of 0.4 s at rated power and limiting the torque of the propulsion motor by the level of 1.7 p. u.

расчетах теплоемкость полупроводников и охладителей не учитывалась. Результат расчета номинального режима работы СЭД представлен на рис. 8, а результат расчета режима работы с номинальной мощностью при ограничении момента на валу ГЭД уровнем 1.7 о. е. – на рис. 9.

Из расчетов следует, что выпрямленные напряжения диодных выпрямителей около 5.4 кВ (приблизительно по 2.7 кВ на каждый конденсатор). Токи фаз АД симметричны и практически синусоидальны. Максимальные температуры 1-го и 2-го IGBT-модулей практически одинаковы (92 и 93 °С). Равномерный нагрев в данном случае обеспечен выбором частоты ШИМ 500 Гц (при более высоких частотах в 1-м модуле увеличиваются динамические потери энергии, и он нагревается до более высокой температуры).

Кривые температур полупроводниковых структур IGBT-модулей имеют значительные пульсации. При протекании тока температура увеличивается до указанного максимума, при исчезновении тока в плече моста – падает практически до температуры охлаждающей воды. Отчасти это вызвано пренебрежением теплоемкостью охладителя.

При работе ГЭД с перегрузкой по моменту и токам снижается частота вращения, увеличиваются интервалы, на которых происходит нагрев модулей, и максимальная температура 2-го модуля увеличивается до 129 °С. Поскольку для используемых IGBT-модулей допустима температура 150 °С, то ситуация с их нагревом приближается к критической.

**Режимы работы СЭД при заклинивании гребного винта.** Ситуация с нагревом транзисторных модулей еще более усложняется в режимах работы ГЭД с низкими частотами и при заклинивании гребного винта. На рис. 10 представлен результат расчета режима работы СЭД при переходе ГЭД в режим заклинивания винта с ограничением момента на валу уровнем 1.8 о. е.

Из рис. 10 видно, что при сохранении магнитного потока ГЭД на номинальном уровне торможение двигателя и его переход в режим заклинивания ротора приводят к увеличению максимальной температуры 2-го транзисторного модуля до критического значения 142 °С. С учетом того, что расчетные параметры имеют разброс, такой режим работы недопустим и необходимы мероприятия по снижению нагрузок.

Одним из мероприятий по снижению нагревов IGBT-модулей является увеличение основного магнитного потока ГЭД при снижении частоты вращения ротора. На рис. 11 представлен результат расчета режима работы СЭД при снижении частоты вращения гребного винта и переходе системы в режим заклинивания гребного винта при некоторой форсировке магнитного потока ГЭД.

В зоне заклинивания винта на интервале времени 6 с магнитный поток возрастает от 109 до 113 % с последующим ограничением на уровне 115 %. При этом максимальная температура 2-го транзисторного модуля достигает 128 °С.

**Замечания.** В асинхронных двигателях составляющие токов статора обеспечивают передачу ак-

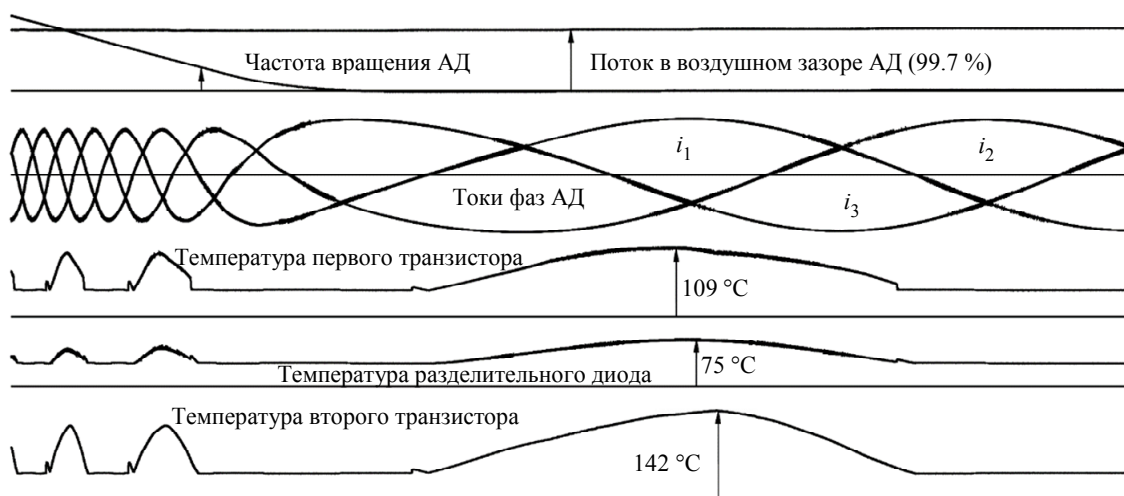


Рис. 10. Напряжения и токи СЭД, температуры полупроводников на интервале времени 6 с при торможении ГЭД и переходе в режим заклинивания винта при номинальном потоке  
 Fig. 10. EPS voltages and currents, semiconductor temperatures in a time interval of 6 s when braking the propulsion motor and switching to the propeller jamming mode at rated flux



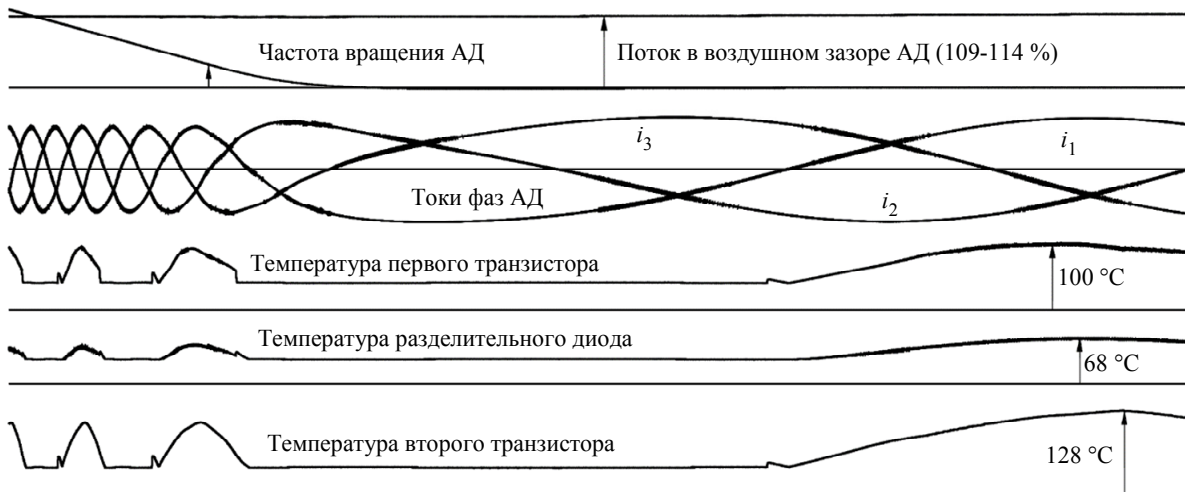


Рис. 11. Напряжения и токи СЭД, температуры полупроводников на интервале времени 6 с при торможении ГЭД и переходе в режим заклинивания винта при форсировке потока до 114 %

Fig. 11. EPS voltages and currents, semiconductor temperatures in a time interval of 6 s when braking the propulsion motor and switching to the propeller jamming mode when forcing the flux up to 114 %

тивной мощности и формирование магнитного потока. Изменения потерь энергии в полупроводниках инвертора посредством изменения реактивных составляющих токов связаны с изменениями активных составляющих. Поэтому результирующие изменения токов двигателя и температур инверторов целесообразно проверять на полных моделях систем.

Возможности увеличения магнитного потока ГЭД при снижении частоты вращения должны быть согласованы с другими параметрами устройств, например со степенью насыщения стали двигателя, с быстродействием регуляторов магнитного потока, с диапазоном частот вращения ГЭД, в котором форсируется магнитный поток.

Следует также отметить, что для моделирования СЭД ледоколов с асинхронными ГЭД и трехуровневыми преобразователями частоты использована методология расчета систем по взаимосвязанным подсистемам, которая позволяет на порядок сократить затраты машинного времени на расчеты на ЭВМ [6], [12], [13]. Это позволило существенно повысить качество и точность расчетов и исследований за счет включения в процедуру вычислений не только расчетов электро-механических и информационных процессов в сложной системе с большим количеством элементов, но и одновременно выполнять расчет потерь энергии в полупроводниках, расчет процессов теплопередачи, нагрева и охлаждения элементов. И даже при указанном усложнении модели СЭД

затраты машинного времени на расчеты оказались приемлемы для разработчиков систем.

Расчеты электро-механических и тепловых процессов в СЭД ледоколов выполняются в среде собственной разработки ComSim [13], [14].

#### Выводы.

1. Разработана модель системы электродвижения ледоколов с асинхронными двигателями и преобразователями частоты с трехуровневыми инверторами напряжения. Использована методология моделирования систем по взаимосвязанным подсистемам, что обеспечило быстродействие модели и позволило уточнить описание системы, включив в него кроме расчета электро-механики расчет потерь энергии и тепловых процессов.

2. В системах электродвижения ледоколов с трехуровневыми инверторами напряжения и асинхронными гребными двигателями снижение частоты вращения гребных винтов приводит к увеличению колебаний температур полупроводниковых элементов инверторов, что особенно проявляется при заклинивании гребных винтов.

3. В системах электродвижения ледоколов с трехуровневыми инверторами напряжения и асинхронными гребными двигателями для снижения нагрузок и температур полупроводниковых приборов в инверторах целесообразно увеличение магнитных потоков двигателей при снижении их частот вращения.

#### Список литературы

1. Su C. L., Lin K. L., Chen C. J. Power flow and generator-converter schemes studies in ship MVDC distribution systems // IEEE Transactions on Industry Applica-

tions. 2016. Vol. 52, no. 1. P. 50–59. doi: 10.1109/TIA.2015.2463795.

2. Создание систем электродвижения для судов различного назначения / В. И. Вершинин, С. В. Махонин, В. А. Паршиков, В. А. Хомяк // Тр. Крыловского гос. науч. центра. 2019. Т. 1, № 387. С. 107–122.

3. A new nested neutral point-clamped (NNPC) converter for medium-voltage (MV) power conversion / M. Narimani, B. Wu, Z. Cheng, N. R. Zargari // IEEE Trans. Power Electron. 2014. Vol. 29, no. 12. P. 6375–6382. doi: 10.1109/TPEL.2014.2306191.

4. Asynchronized electromechanical converter in the electrical supply system of powerful energy consumers / A. G. Vorontsov, M. V. Pronin, A. D. Stotckaia, V. V. Glushakov, P. V. Sokur // 22nd European Conf. on Power Electronics and Applications. Lyon, France, 2020. doi: 10.23919/EPE20ECCEurope43536.2020.9215841. URL: [https://www.researchgate.net/publication/347153427\\_A\\_synchronized\\_electromechanical\\_converter\\_in\\_the\\_electrical\\_supply\\_system\\_of\\_powerful\\_energy\\_consumers](https://www.researchgate.net/publication/347153427_A_synchronized_electromechanical_converter_in_the_electrical_supply_system_of_powerful_energy_consumers) (дата обращения 05.10.2022).

5. Воронцов А. Г. Варианты систем электродвижения ледоколов мощностью 60 и 120 МВт / Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 8. С. 83–89.

6. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Электромехатронные комплексы и их моделирование на ЭВМ по взаимосвязанным подсистемам. СПб.: Изд-во «Ладoga», 2020. 336 с.

7. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет). СПб.: ОАО «Электросила». 2003. 172 с.

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

9. Рудаков В. В., Столяров И. М., Дартау В. А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд., 1987. 136 с.

10. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: Ивановский гос. энергетический ун-т им. В. И. Ленина, 2008. 321 с.

11. Blaschke F. The principle field orientation as applied to the new transvector closed-loop control system for rotating field machines // Siemens Review. 1972. Vol. 34, no. 3. P. 217–220.

12. Воронцов А. Г. Развитие методологии моделирования ЭМТС по взаимосвязанным подсистемам и комплекс моделей в ComSim / Изв. СПбГЭТУ. 2022. Т. 15, № 3. С. 57–65.

13. Воронцов А. Г., Пронин М. В. Расчет систем с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями на быстродействующих двояных моделях // Электротехника. 2021. № 1. С. 20–25.

14. Воронцов А. Г. Программа для ЭВМ ComSim1\_5. № свид. 2019661058. Дата регистрации в Федеральной службе по интеллектуальной собственности РФ 19.08.2019. Заяв. 12.08.2019, опублик. 19.08.2019.

## Информация об авторах

**Воронцов Алексей Геннадьевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: [ag.voroncov@gmail.com](mailto:ag.voroncov@gmail.com)

**Пронин Михаил Васильевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: [mvpronin@gmail.com](mailto:mvpronin@gmail.com)

## References

1. Su C. L., Lin K. L., Chen C. J. Power flow and generator-converter schemes studies in ship MVDC distribution systems // IEEE Transactions on Industry Applications. 2016. Vol. 52, no. 1. P. 50–59. doi: 10.1109/TIA.2015.2463795.

2. Verшинin V. I., Mahonin S. V., Parshikov V. A., Homyak V. A. Sozdanie sistem elektrodvizheniya dlya sudov razlichnogo naznacheniya / Tr. Krylovskogo gos. nauchn. centra. 2019. T. 1, № 387. S. 107–122. (In Russ.).

3. Narimani M., Wu B., Cheng Z., Zargari N. R. A new nested neutral point-clamped (NNPC) converter for medium-voltage (MV) power conversion / IEEE Trans. Power Electron. 2014. Vol. 29, no. 12. P. 6375–6382. doi: 10.1109/TPEL.2014.2306191.

4. Asynchronized electromechanical converter in the electrical supply system of powerful energy consumers /

Vorontsov A. G., Pronin M. V., Stotckaia A. D., Glushakov V. V., Sokur P. V. // 22nd European Conf. on Power Electronics and Applications. Lyon, France, 2020 doi: 10.23919/EPE20ECCEurope43536.2020.9215841. URL: [https://www.researchgate.net/publication/347153427\\_A\\_synchronized\\_electromechanical\\_converter\\_in\\_the\\_electrical\\_supply\\_system\\_of\\_powerful\\_energy\\_consumers](https://www.researchgate.net/publication/347153427_A_synchronized_electromechanical_converter_in_the_electrical_supply_system_of_powerful_energy_consumers) (дата обращения 05.10.2022).

5. Voroncov A. G. Varianty sistem elektrodvizheniya ledokolov moshchnost'yu 60 i 120 MVt / Izv. SPbGETU «LE-TI». 2022. T. 15, № 8. S. 83–89. (In Russ.).

6. Pronin M. V., Voroncov A. G. Elektromekhanotronnye komplekxy i ih modelirovanie na EVM po vzaimosvyazannym podsistemam. Spb.: lzd-vo «Ladoga», 2020. 336 s. (In Russ.).

7. Pronin M. V., Voroncov A. G. Silovye polnost'yu upravlyaemye poluprovodnikovye preobrazovateli (modelirovanie i raschet). SPb.: OAO «Elektrosila». 2003. 172 s. (In Russ.).

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

9. Rudakov V. V. Stolyarov I. M., Dartau V. A. Asinhronnye elektroprivody s vektornym upravleniem. L.: Energoatomizdat, Leningr. otdel., 1987. 136 s. (In Russ.).

10. Vinogradov A. B. Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka. Ivanovo: Ivanovskij gos. energeticheskij un-t im. V. I. Lenina, 2008. 321 s. (In Russ.).

11. Blaschke F. The principle field orientation as applied to the new transvector closed-loop control system

for rotating field machines // Siemens Review. 1972. Vol. 34, no. 3. P. 217–220.

12. Voroncov A. G. Razvitie metodologii modelirovaniya EMTS po vzaimosvyazannym podsistemam i kompleks modelej v ComSim / Izv. SPbGETU. 2022. T. 15, № 3. S. 57–65. (In Russ.).

13. Voroncov A. G., Pronin M. V. Raschet sistem s elektricheskimi mashinami i poluprovodnikovymi preobrazovatelyami na bystrodejstvuyushchih sdvoennykh modelyah // Elektrotehnika. 2021. № 1. S. 20–25. (In Russ.).

14. Voroncov A. G. Programma dlya EVM ComSim1\_5. № svid. 2019661058. Data registracii v Fede-ral'noj sluzhbe po intellektual'noj sobstvennosti RF 19.08.2019. Zayav. 12.08.2019; opubl. 19.08.2019. (In Russ.).

---

#### Information about the authors

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

E-mail: ag.voroncov@gmail.com

**Mikhail V. Pronin** – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Robotics and Automation of Production Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: mvpronin@gmail.com

Статья поступила в редакцию 03.10.2022; принята к публикации после рецензирования 08.10.2022; опубликована онлайн 25.11.2022.

Submitted 03.10.2022; accepted 08.10.2022; published online 25.11.2022.

---