

УДК 531.3: 621.3

## Исследование работы мощного электропривода в автономном электротехническом комплексе

А.Е. Савенко, П.С. Савенко  
ФГБОУВО «Керченский государственный морской технологический университет»,  
г. Керчь, Республика Крым, Российская Федерация  
E-mail: savenko-70@mail.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Электрические приводы переменного тока с использованием асинхронных двигателей повсеместно используются при решении технологических задач в различных областях экономики и являются основными потребителями электрической энергии, в том числе и в автономных электротехнических комплексах. Организация эффективной работы электроприводов является важным вопросом для любого электротехнического комплекса, но особенно для морского судна при параллельной работе генераторов и соизмеримости мощностей источников и потребителей. Подруливающее устройство с винтом регулируемого шага, которое устанавливается на борту судов различного назначения, является одним из наиболее мощных электроприводов переменного тока с асинхронным двигателем. Характерной особенностью подруливающего устройства с винтом регулируемого шага является то, что для вращения винта можно использовать нерегулируемый по скорости электропривод, а регулировать подачу за счет поворота лопастей винта. В связи с повышающимися требованиями к энергоэффективности и безопасности необходимо проведение исследований всех режимов работы мощных электроприводов в автономных электротехнических комплексах в реальных условиях при выполнении ими конкретных производственных задач.

**Материалы и методы:** Используются результаты экспериментальных исследований, проведенных во всех основных режимах работы подруливающего устройства с винтом регулируемого шага с асинхронным двигателем мощностью 135 кВт. Для исследования применялся цифровой контрольно-измерительный комплекс, основой которого является цифровой запоминающий двухканальный осциллограф Owon и соединенный с ним персональный компьютер. Использовано только сертифицированное оборудование, прошедшее поверку, и лицензионное программное обеспечение.

**Результаты:** Получены осциллограммы токов и напряжений параллельно работающих генераторов в основных режимах работы подруливающего устройства с винтом регулируемого шага. Результаты экспериментальных исследований подтверждают существование обменных колебаний мощности при параллельной работе синхронных генераторов электротехнического комплекса. Полученные осциллограммы дают полную информацию о временных и амплитудных характеристиках электромеханических процессов, протекающих при работе мощного потребителя переменного тока в автономном электротехническом комплексе морского судна.

**Выводы:** Наличие обменных колебаний мощности во всех режимах работы говорит о необходимости внедрения методов и средств их устранения. Необходимо проведение экспериментальных исследований для определения временных и амплитудных значений токов в переходных и квазиустановившихся режимах работы мощных электроприводов в автономных электротехнических комплексах. Полученные результаты должны быть доведены до сведения обслуживающего персонала и использоваться в процессе эксплуатации таких комплексов.

**Ключевые слова:** генераторный агрегат, мощность генератора, обменные колебания мощности, параллельная работа, подруливающее устройство, синхронный генератор, ток генератора, экспериментальные исследования, автономный электротехнический комплекс.

## Research into powerful electric drives in the autonomous electrical power complex

A.E. Savenko, P.S. Savenko  
Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Republic of Crimea, Russian Federation  
E-mail: savenko-70@mail.ru

### Abstract

**Background:** Electric AC drives with asynchronous motors are widely used in solving technological problems in different areas of the economy and are the main consumers of electrical energy, including in the autonomous electrical complexes. Effective operation of actuators is an important issue for any electrical complex but especially for the marine vessel with parallel operation of generators and commensurable capacity of sources and consumers. The bow thruster with a controllable pitch propeller (CPP) is one of the most powerful electric AC induction motors installed on board the ships for various purposes. A characteristic feature of the bow thruster with a CPP is that it is possible to use an unregulated drive as the screw for the rotation speed and regulate the flow by rotation of the propeller blades. The increasing requirements for energy efficiency and security make it necessary to study all modes of powerful electric drives in the autonomous electrical complexes in real conditions when they solve specific production problems.

**Materials and methods:** We used the results of experimental studies conducted in all major modes of operation of the CPP bow thruster with the asynchronous motor power of 135 kW. For the study we employed a digital control and

measurement system. The basis of the complex is a two-channel digital storage oscilloscope «Owon» and a personal computer connected to it. We used only certified equipment that has passed verification, and licensed software.

**Results:** We have obtained waveforms of current and voltage generators operating in parallel in the main modes of operation of the CPP bow thruster. The experimental results confirm the existence of exchange fluctuations of power in parallel operation of synchronous generators of the electrical complex. The resulting waveforms provide full information about the time and amplitude characteristics of the electro-mechanical processes that occur during operation of an AC powerful consumer in the autonomous electrotechnical complex of a marine vessel.

**Conclusions:** The presence of exchange power fluctuations in all operating modes indicates the need for developing methods and means of their elimination. It is necessary to conduct experimental studies to determine the time and amplitude values of the currents in the quasi-steady and transient modes of powerful drives in autonomous electrical complexes. The staff should be informed about the obtained results that should be used in the operation of such systems.

**Key words:** generating set, generator power, exchange power fluctuations, parallel operation, thruster, synchronous generator, generator current, experimental research, autonomous electrotechnical complex.

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2017.4.044-049

**Введение.** Электрические приводы переменного тока с использованием асинхронных двигателей повсеместно используются при решении технологических задач в различных областях экономики и являются основными потребителями электрической энергии, в том числе и в автономных электротехнических комплексах [1]. Такие комплексы, имеющие в своем составе по несколько параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов, обеспечивают функционирование предприятий и учреждений в случае возникновения кратковременных перерывов электроснабжения, а также работу удаленных строительных площадок, экспедиций, военных объектов [2, 3]. Автономные электротехнические комплексы на борту военных и торговых морских и речных судов имеют особую значимость, так как от их надежной и бесперебойной работы зависит жизнь экипажа и сохранность груза.

Организация работы электроприводов при параллельной работе генераторов и соизмеримости мощностей источников и потребителей в составе автономного электротехнического комплекса в значительной степени определяет эффективность и безопасность эксплуатации морского судна. Поэтому необходимо проведение исследований всех режимов работы мощных электроприводов в автономных электротехнических комплексах в реальных условиях при выполнении ими конкретных производственных задач.

**Состояние вопроса.** Подруливающее устройство с винтом регулируемого шага (ВРШ), которое устанавливается на борту судов различного назначения, является одним из наиболее мощных электроприводов переменного тока с асинхронным двигателем [4]. Характерной особенностью подруливающего устройства с ВРШ является возможность использования электропривода с постоянной скоростью для вращения винта, при этом изменение скорости движения судна обеспечивается регулировкой угла разворота лопастей гребного винта.

Судостроители стараются оснастить подруливающими устройствами все большее количество судов, так как это позволяет улучшить маневренные качества судов в режимах швартовых операций, прохода узкими фарватерами и в каналах. Такие качества позволяют обойтись без буксиров сопровождения, что значительно сокращает затраты на эксплуатацию судна. Установка в носовой части нескольких подруливающих устройств не требует больших затрат при постройке судна. Однако благодаря таким устройствам судоводитель получает возможность разворачивать судно практически на месте за счет уменьшения радиуса циркуляции, при этом скорость изменения курса, особенно на малом ходу, возрастает в несколько раз, при отключенных ходовых движителях можно легко двигаться бортом. Таким образом, применение подруливающего устройства позволяет уменьшить площадь, необходимую для маневрирования судов в портах и узкостях, а также освободиться от вспомогательных буксиров, что в целом способствует повышению безопасности судоходства.

Рассмотрим конструкцию подруливающего устройства с ВРШ [5]. Наиболее распространено туннельное расположение подруливающего устройства в носовой части судна. Корпус устройства неподвижно фиксируется в туннеле при помощи нескольких кронштейнов. В качестве элементов, передающих вращение винта от электродвигателя М к гребному винту, используются редуктор, вертикальный вал и коническая зубчатая передача. Для более подробной детализации принципа работы механизма изменения шага винта обратимся к рис. 1, на котором изображена функциональная схема электропривода подруливающего устройства с ВРШ. Для перемещения поршня и штока 3 используется электрогидравлический преобразователь ЭГП, изменяющий направление действия давления масла, перенаправляя его между левой и правой полостями цилиндра сервомотора 2. Конец штока воздействует на ре-

дуктор 5, который соединен с системой передач, непосредственно изменяющих угол разворота лопастей винта. Для контроля положения поршня сервомотора образована отрицательная обратная связь (система рычагов 4 и 1). Движение штока сервомотора носит возвратно-поступательный характер, механически отслеживается линейным преобразователем шага ЛПШ и преобразовывается в пропорциональный электрический сигнал. Далее сигнал поступает в электронный пропорциональный регулятор шага РШ, усиливается и воздействует на электрогидравлический преобразователь. Последний, за счет движения распределительного золотника РЗ, непосредственно обеспечивает работу гидравлического сервомотора. Сервомотор посредством штока 3 изменяет угол разворота лопастей винта, и истинное значение угла разворота сообщается через рычаг 1 в ЛПШ. В систему также входит тяга датчика нулевого шага ДНШ, соединенная с конечным выключателем, который размыкается при отклонении лопастей винта от нулевого флюгерного положения. Судоводитель воздействует на рукоятку и задает соответствующий угол разворота гребного винта. Контроль положения лопастей осуществляется по свечению светодиодов на постах управления ПУ0-ПУ3 с кратностью 25 % от номинального значения угла разворота винта в обоих направлениях. Переключения между постами управления ППО-ППЗ производятся переключателем постов управления ПП. Распределительное устройство РУ координирует работу всей системы подруливающего устройства с ВРШ.

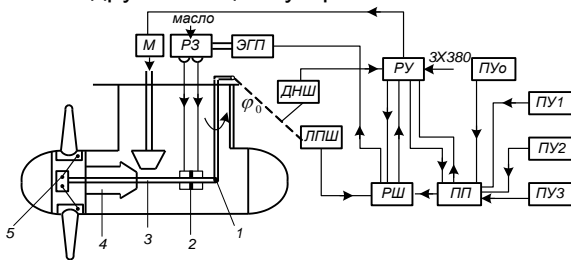


Рис. 1. Функциональная схема электропривода подруливающего устройства с ВРШ

**Материалы и методы.** Морской автономный паром «Ейск» филиала государственного унитарного предприятия Республики Крым «Крымские морские порты» «Керченская паромная переправа» выполняет регулярные рейсы между портами «Крым» и «Кавказ». Это судно имеет на своем борту автономный электротехнический комплекс [6], в составе которого несколько источников электроэнергии: три главных дизель-генератора 6VD26/20-AL-2 с генераторами S450MG 800кВА, 390В, 50Гц,  $\cos \varphi = 0,8$ , 1184А с возможностью параллельной работы и один вспомогательный дизель-генератор

S350SB 200кВА, 390В, 50Гц,  $\cos \varphi = 0,8$  для стоянки в порту. Паром оснащен гребной электрической установкой (ГЭУ) переменного тока. Судовая электроэнергетическая установка является единой для всего судна, электрические потребители получают питание от шин главного распределительного щита [6]. Для исследования работы мощных потребителей в различных режимах работы наиболее полную информацию можно получить из осциллограмм токов и напряжений параллельно работающих генераторов. Поэтому для проведения экспериментальных исследований в центральном посту управления (ЦПУ) судном установили цифровой запоминающий двухканальный осциллограф Owon и подключили его к соответствующим датчикам и приборам главного распределительного щита (ГРЩ). Полученная информация накапливалась и обрабатывалась в персональном компьютере, размещенном там же. Важная дополнительная информация также поступала со штатных вольтметров, амперметров, ваттметров, размещенных на секциях ГРЩ. Важно отметить, что при экспериментальных исследованиях все работы проводились на сертифицированном оборудовании, прошедшем поверку, а программное обеспечение имело лицензию. Таким образом, все результаты, полученные в процессе продолжительных экспериментальных исследований работы автономного электротехнического комплекса судна-парома «Ейск», являются абсолютно достоверными.

**Результаты.** Наибольшую мощность имеют два гребных электрических двигателя МП2-М-630-152-8М3, их мощность составляет по 710 кВт, но это двигатели постоянного тока и они получают питание через тиристорные преобразователи напряжения [6]. Для проведения исследований выберем наиболее мощный электропривод переменного тока, получающий питание непосредственно от ГРЩ. Таковым является электропривод подруливающего устройства с асинхронным двигателем АН 112-4-ОМ-5 мощностью 135 кВт. Основными эксплуатационными режимами выбранного электропривода являются его пуск в работу, работа на винт регулируемого шага с различными углами разворота его лопастей и остановка. Приведем и проанализируем осциллограммы токов и напряжений двух параллельно работающих главных дизель-генераторных агрегатов парома «Ейск» в этих режимах.

Пуск электропривода подруливающего устройства представляет особый интерес с точки зрения провала напряжения и бросков тока. На рис. 2–4 приведены осциллограммы токов и напряжений генераторов в этом режиме работы. Для представителей электро-механической службы судна оказались не-

ожиданными характеристики переходного процесса. Первая фаза пуска электропривода подруливающего устройства, в течение которой обмотки асинхронного двигателя соединены звездой для уменьшения пускового тока, составляет 1,5 с (рис. 2). Затем следует вторая фаза (рис. 3), где двигатель работает в квазиустановившемся режиме с обмотками, соединенными звездой, еще примерно 1,5 с.

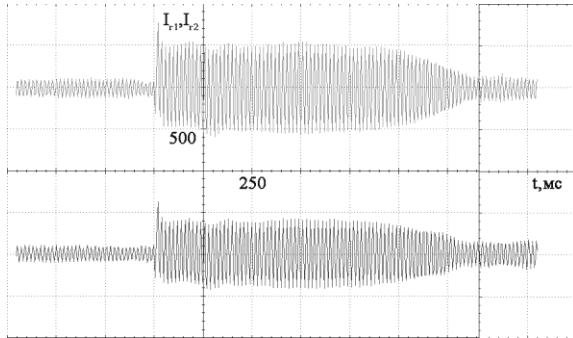


Рис. 2. Пуск электродвигателя подруливающего устройства (обмотки соединены звездой). Токи параллельно работающих генераторов

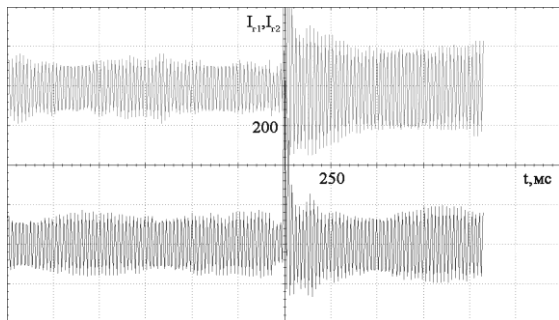


Рис. 3. Пуск электродвигателя подруливающего устройства (переключение обмоток со звезды на треугольник). Токи параллельно работающих генераторов

После этого начинается третья фаза пуска (рис. 3) – обмотки двигателя переключаются в треугольник и электропривод, находясь в режиме холостого хода, готов к работе. Еще одним несомненно важным результатом исследования режима пуска является наличие обменных колебаний мощности с амплитудой, достигающей 25 %, и периодом 800–1000 мс. Обменные колебания мощности существуют во всех трех фазах режима пуска электропривода подруливающего устройства.

На осциллограмме напряжения в первой фазе пуска (рис. 4) зафиксирован провал по амплитуде до 10 % и длительностью до 250 мс. Это говорит о том, что регуляторы напряжений параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов справились со своей задачей в исследуемом режиме и их работа удовлетворяет требованиям Регистра.

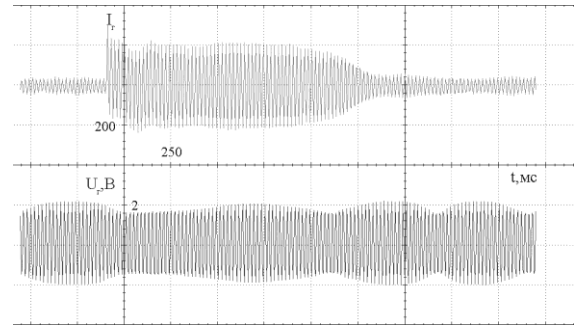


Рис. 4. Пуск электродвигателя подруливающего устройства. Ток и напряжение одного из параллельно работающих генераторов

Пулсации амплитуды на осциллограмме напряжения генератора (рис. 4) достигают 20 %, это еще одно подтверждение наличия обменных колебаний мощности, а значит, качество электроэнергии имеет существенные изъяны.

Судоводитель воздействует на орган управления на посту управления, и электропривод подруливающего устройства из режима холостого хода переходит в штатный режим работы. Изменение угла разворота лопастей ВРШ приводит к значительным повторно-переменным изменениям амплитуд токов на осциллограммах (рис. 5, 6). Выполняя необходимые операции в маневренном режиме при швартовке парома, судоводитель постоянно изменяет угол разворота лопастей винта, а значит, меняется и ток нагрузки электродвигателя подруливающего устройства. Однако анализ осциллограмм токов (рис. 5, 6) показывает, что на осциллограммах токов присутствуют периодические пульсирующие колебания, свойственные обменным колебаниям мощности. Кривые токов изменяются не плавно, огибающие токов имеют максимумы и минимумы в течение периодов изменения углов разворота лопастей ВРШ. Амплитуда обменных колебаний мощности увеличивается с ростом тока нагрузки электродвигателя, что крайне нежелательно для автономного электротехнического комплекса в этом режиме работы, так как может вывести электроэнергетическую систему из устойчивого состояния и обесточить судно. Также анализ осциллограмм (рис. 5, 6) показывает, что нагрузка между параллельно работающими генераторами при столь динамичном ее изменении не успевает распределяться пропорционально.

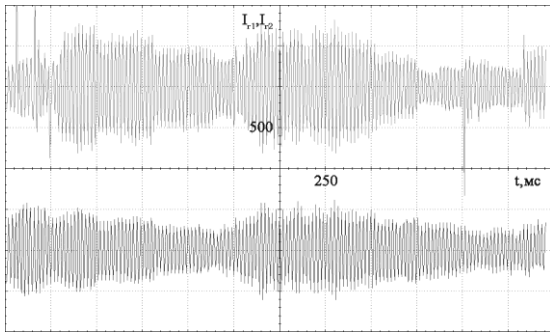


Рис. 5. Работа электропривода подруливающего устройства (разворот лопастей 1). Токи параллельно работающих генераторов

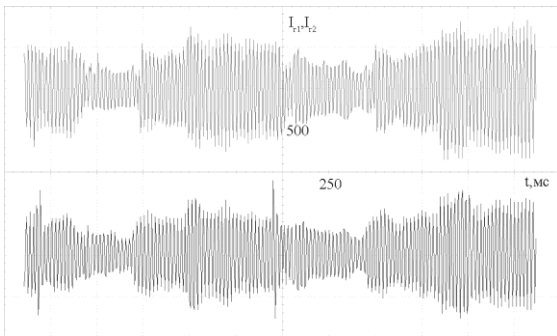


Рис. 6. Работа электропривода подруливающего устройства (разворот лопастей 2). Токи параллельно работающих генераторов

И наконец, на рис. 7 приведены осциллограммы токов при остановке двигателя подруливающего устройства.

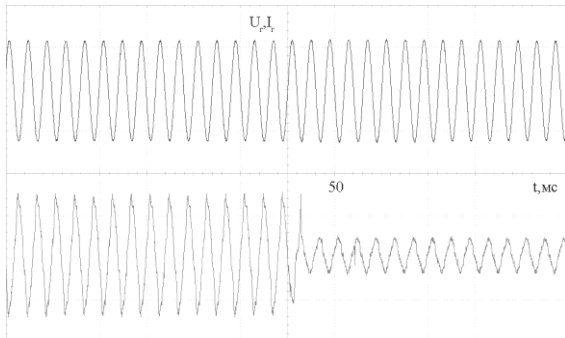


Рис. 7. Останов электродвигателя подруливающего устройства. Ток и напряжение одного из параллельно работающих генераторов

Лопасте винта предварительно переведены в нулевое флюгерное положение, поэтому отключение электродвигателя происходит плавно, можно отметить лишь существование обменных колебаний мощности.

**Выводы.** Работа электропривода подруливающего устройства с ВРШ имеет достаточно сложный характер и оказывает влияние на работу всего электротехнического комплекса морского судна. Наличие обменных колебаний мощности во всех режимах работы говорит о необходимости внедрения методов

и средств их устранения [6, 7, 8]. Даже для руководителей электромеханической службы парома «Ейск» оказались неожиданными временные и амплитудные значения токов в переходных и квазиустановившихся режимах работы подруливающего устройства при питании от параллельно работающих генераторов. Этот факт свидетельствует о необходимости проведения подобных экспериментальных исследований для автономных электротехнических комплексов, ознакомления с ними обслуживающего персонала и их использования в процессе эксплуатации комплексов. Такая информация поможет исключить совпадение переходных процессов при работе нескольких мощных электроприводов в одном электротехническом комплексе и, как следствие, привести к нарушению выполнения требований к качеству электрической энергии и обесточиванию, что является аварийной ситуацией.

#### Список литературы

1. Баранов А.П. Судовые автоматизированные электроэнергетические системы. – М.: Транспорт, 1988. – 328 с.
2. Хватов О.С., Дарьенков А.Б. Электростанция на базе дизель-генератора переменной частоты вращения // Электротехника. – 2014. – № 3. – С. 28–32.
3. Лежнюк П.Д., Нетребский В.В., Никиторович А.В. Оптимизация распределения нагрузки между рассредоточенными источниками энергии в локальной электрической системе // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 2. – С. 38–39.
4. Судовые бестрансформаторные гребные электрические установки / А.Н. Калмыков, В.И. Кузнецов, А.П. Сеньков, Л.Н. Токарев // Морской вестник. – 2013. – № 1. – С. 40–42.
5. Бабаев А.М., Ягодкин В.Я. Автоматизированные судовые электроприводы. – М.: Транспорт, 1986. – 448 с.
6. Савенко А.Е., Голубев А.Н. Обменные колебания мощности в судовых электротехнических комплексах / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2016. – 172 с.
7. Тютиков В.В., Воронин А.И. Методика синтеза регуляторов для независимого формирования статических и динамических показателей нелинейных объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 3(164). – С. 154–164.
8. Голубев А.Н., Мартынов В.А., Алейников А.В. Математическая модель для расчета электромагнитных сил в синхронном электроприводе с постоянными магнитами // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 1. – С. 10–13.

#### References

1. Baranov, A.P. *Sudovye avtomatizirovannye elektroenergeticheskie sistemy* [Ship automated electrotechnical systems]. Moscow, Transport, 1988. 328 p.
2. Khvatov, O.S., Daryenkov, A.B. Elektrostantsiya na baze dizel'-generatora peremennoy chastoty vrashcheniya [Variable-speed diesel generator power plant]. *Elektrotehnika*, 2014, no. 3, pp. 28–32.
3. Lezhnyuk, P.D., Netrebsky, V.V., Nikitorovich, A.V. Optimizatsiya raspredeleniya nagruzki mezhdru rassredotochennymi istochnikami energii v lokal'noy elektricheskoy sisteme [Optimization of load partition between the dispersed energy sources in the in-plant electric system]. *Tekhnichna elektrodinamika*, 2012, no. 2, pp. 38–39.
4. Senkov, A.P., Kalmykov, A.N., Kuznetsov, V.I., Tokarev, L.N. *Sudovye bestransformatornye grebnye elektricheskiye ustanoivki* / A.N. Kalmykov, V.I. Kuznetsov, A.P. Senkov, L.N. Tokarev // *Morskoy vestnik*. – 2013. – No. 1. – S. 40–42.

cheskie ustanovki [Ship transformerless rowing electrical installations]. *Morskoy vestnik*, 2013, no. 1, pp. 40–42.

5. Babayev, A.M., Yagodkin, V.Ya. *Avtomatizirovannye sudovye elektroprivody* [Automated electric drives for ships]. Moscow, Transport, 1986. 448 p.

6. Savenko, A.E., Golubev, A.N. *Obmennye kolebaniya moshchnosti v sudovykh elektrotekhnicheskikh kompleksakh* [Exchange power fluctuations in ship electrotechnical complexes]. Ivanovo, 2016. 172 p.

7. Tyutikov, V.V., Voronin, A.I. *Metodika sinteza regulyatorov dlya nezavisimogo formirovaniya staticheskikh i dinamicheskikh pokazateley nelineynykh ob"ektov* [A method

of controller synthesis for independent formation of static and dynamic parameters of nonlinear objects]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2015, issue 3(164), pp. 154–164.

8. Golubev, A.N., Martynov, V.A., Aleinikov, A.V. *Matematicheskaya model' dlya rascheta elektromagnitnykh sil v sinkhronnom elektroprivode s postoyannymi magnitami* [Mathematical model for simulation of electromagnetic forces in permanent magnet synchronous drives]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 1, pp. 10–13.

*Савенко Александр Евгеньевич,*

ФГБОУВО «Керченский государственный морской технологический университет»,

доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства,

e-mail: savenko-70@mail.ru

*Savenko Aleksandr Yevgenyevich,*

Kerch State Maritime Technological University,

Associate Professor of the Department of Ship Electric Equipment and Production Automation,

e-mail: savenko-70@mail.ru

*Савенко Павел Станиславович,*

ФГБОУВО «Керченский государственный морской технологический университет»,

курсант морского факультета

e-mail: savenko-70@mail.ru

*Savenko Pavel Stanislavovich,*

Kerch State Maritime Technological University,

Cadet of the Maritime Faculty,

e-mail: savenko-70@mail.ru