

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.313

ВЛИЯНИЕ ЛЮФТА НА АМПЛИТУДУ ОБМЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ МОЩНОСТИ В АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

А.Е. Савенко, П.С. Савенко

Керченский государственный морской технологический университет,
г. Керчь, Республика Крым, Россия
Savenko-70@mail.ru

Резюме: Рассмотрено применение автономных электротехнических комплексов, имеющих в своем составе параллельно работающие дизель-генераторные агрегаты на основе синхронных генераторов. Описана проблема существования обменных колебаний мощности в таких технических системах. Разработана математическая модель, позволяющая проводить исследования автономного электротехнического комплекса. Получена методика построения карт зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от зазоров люфта в контурах регулировки частоты вращения дизель-генераторов. Использование таких карт позволяет ввести рекомендации по ограничению амплитуды обменных колебаний в нормативные документы как общего характера, так и конкретно для определенных типов оборудования. Также карты дают возможность определять существующие в контуре регулирования частоты зазоры люфта по измененным амплитудам обменных колебаний мощности.

Ключевые слова: обменные колебания мощности, параллельная работа, автономный электротехнический комплекс, генераторный агрегат, экспериментальные исследования.

DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-46-54

INFLUENCE OF BACKLASH ON AMPLITUDE OF EXCHANGE POWER FLUCTUATIONS IN AUTONOMOUS ELECTRIC POWER EQUIPMENT

A.E. Savenko, P.S. Savenko

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Republic of Crimea Russia
Savenko-70@mail.ru

Abstract: The application of autonomous electric power equipment having in their composition parallel operating diesel-generator sets on the basis of synchronous generators is considered. The problem of existence of exchange power fluctuations in such technical systems is described. A mathematical model has been developed that makes it possible to carry out investigations of an autonomous electric power equipment. The technique for constructing maps of the amplitude of the exchange power fluctuations, from the backlash gaps in the speed control circuits of diesel generators is obtained. The use of such cards makes it possible to introduce recommendations on limiting the amplitude of exchange power fluctuations to normative documents, both of a general nature, and specifically for certain types of equipment. In the same

way, the cards make it possible to determine the gap gaps existing in the frequency control loop from the measured amplitudes of the exchange power fluctuations.

Keywords: *exchange power fluctuations, parallel operation, autonomous electric power equipment, generating set, experimental research.*

Введение

Автономные электротехнические комплексы с использованием параллельной работы дизель-генераторных агрегатов находят широкое применение в различных сферах экономики и повседневной жизни Российской Федерации [1; 2].

Применение электрогенераторных установок в медицинских учреждениях является обязательным и устанавливается законодательством. Еще одной сферой применения автономных электростанций являются промышленные предприятия. Особенно это касается производств, где используются холодильные установки или скоропортящаяся продукция. Базовые станции телекоммуникационных центров, обеспечивающие сигнал для мобильных устройств, также должны быть полностью защищены от перебоев электричества. Удаленные строительные площадки требуют электропитания для функционирования техники и инструмента, а качество и скорость строительства объектов находится в очевидной зависимости от наличия и качества электроэнергии [3]. Дизельные электростанции незаменимы при полевых работах геологов и археологов. Передвижные дизельные автоматизированные электростанции широко используются в сельском и лесном хозяйстве, а также в экспедициях, связанных с геолого-разведочными работами. В этих условиях электростанции могут быть использованы в качестве источника электроэнергии для запуска механизмов, освещения, как резервные источники питания [4; 5].

В армии дизельные генераторы выступают в роли надежного и стабильного альтернативного источника питания, который обеспечивает выполнение поставленных задач, комфортное проживание военнослужащих, установление связи и безопасность временных военно-полевых баз. В случае крупных энергетических аварий или техногенных катастроф дизельные электростанции военного образца могут быть быстро переброшены в любую точку, быстро и эффективно участвовать в спасательных работах и наладить аварийное энергоснабжение пострадавших районов.

Автономные электротехнические комплексы на борту военных и торговых морских и речных судов имеют в своем составе дизель-генераторные электростанции [6; 7].

Экспериментальные исследования, проведенные в автономных электротехнических комплексах, выявили существование обменных колебаний мощности при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов на основе синхронных генераторов переменного тока [8]. Именно такие генераторы чаще всего используются для производства электрической энергии [9; 10], качество которой значительно ухудшается из-за обменных колебаний мощности. Низкое качество производимой электроэнергии приводит к повышенному расходу топлива, появлению дополнительных расходов, связанных с ремонтом оборудования, нарушают устойчивость работы энергосистемы [11].

Исследования доказали, что основной причиной возникновения обменных колебаний мощности между генераторами является люфт в контурах регулирования скорости дизель-генераторных агрегатов [8]. Разработаны методы и средства, направленные на устранение обменных колебаний [12; 13]. Однако в документах, регламентирующих работу автономных электротехнических комплексов, не содержится норм и требований касательно обменных колебаний мощности. Поэтому актуальным является проведение исследований, направленных на построение карт зависимости амплитуды обменных колебаний от значений зазоров люфтов параллельно работающих генераторных агрегатов. Это позволит оценить допустимые значения люфтов с точки зрения устойчивости работы автономного электротехнического комплекса и определит границы применения методов и средств по устранению обменных колебаний мощности.

Методы исследования

Для исследования работы электростанции автономного электротехнического комплекса используется математическая модель [14; 15], позволяющая построить графики мгновенных значений основных параметров параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов.

Синхронные генераторы моделируются уравнениями Парка-Горева, которые описывают происходящие переходные электромагнитные и электромеханические процессы в d и q координатах, неподвижных относительно ротора:

$$\begin{aligned}\frac{d\psi_{sd}}{d\tau} &= \psi_{sq}\omega_r - r_s i_{sd} - u_{sd}, \\ \frac{d\psi_{sq}}{d\tau} &= -\psi_{sd}\omega_r - r_s i_{sq} - u_{sq}, \\ \frac{d\psi_f}{d\tau} &= u_f - r_f i_f,\end{aligned}$$

где ψ_{sd} , ψ_{sq} – проекции векторов потокосцеплений статора на оси d , q ; u_{sd} , u_{sq} – проекции вектора напряжения; r_s – сопротивление статорной обмотки; i_{sd} , i_{sq} – проекции вектора тока; ψ_f , i_f , u_f , r_f – потокосцепление, ток, напряжение и сопротивление обмотки возбуждения; τ – относительное время.

$$\psi_{sd} = (L_d + L_{sd})i_{sd} + L_d i_f,$$

$$\psi_{sq} = (L_q + L_{sq})i_{sq},$$

$$\psi_f = L_d i_{sd} + L_f i_f,$$

где L_{sd} , L_{sq} – индуктивности рассеяния статорной обмотки; L_d , L_q – индуктивности главного контура намагничивания по осям d , q ; L_f – индуктивность обмотки возбуждения.

Бесщеточный синхронный генератор имеет в своем составе возбудитель и пропорциональный регулятор напряжения, которые описаны следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{du_f}{dt} = [-u_f + K_f(U_0 - u_m)]/T_B,$$

где K_f – коэффициент передачи регулятора; $u_m = \sqrt{u_{sd}^2 + u_{sq}^2}$; U_0 – задание по напряжению.

В математической модели используется уравнение дизеля, который является приводным двигателем агрегата, в упрощенной форме:

$$\begin{aligned}J_m \frac{d\omega_r}{d\tau} &= M_d - M_g, \\ M_d &= K_m h, \quad M_g = \psi_{sq} i_{sd} - \psi_{sd} i_{sq},\end{aligned}$$

где J_m – приведенный момент инерции вала дизеля и ротора генератора; M_d – механический момент дизеля; M_g – электромагнитный момент сопротивления, развиваемый генератором; h – положение топливной рейки; K_m – коэффициент усиления дизеля по частоте вращения.

Отдельным уравнением описан регулятор частоты вращения дизеля, который представлен аperiодическим звеном первого порядка:

$$T_{\omega} \frac{dh}{dt} = K_{\omega} U_{\varepsilon} - h,$$

где T_{ω} – постоянная времени исполнительного механизма; K_{ω} – коэффициент усиления регулятора; U_{ε} – сигнал рассогласования между заданной ω_{r0} и действительной ω_r частотами вращения дизеля.

Основной задачей исследования является вопрос: как влияет явление люфта в контуре регулирования частоты вращения дизеля на параметры автономного электротехнического комплекса, поэтому принимаем за основную характеристику люфта его зазор D_n (рис. 1) и используем следующее математическое описание, позволяющее решить поставленную задачу:

$$U_{\varepsilon} = \left\{ \begin{array}{l} U_{\varepsilon} = \text{const для } |U_{\varepsilon} - k\varepsilon| \leq D_n \\ k \left(\varepsilon - D_n \text{sign} \left(\frac{dU_{\varepsilon}}{dt} \right) \right) \text{ для } \frac{dU_{\varepsilon}}{dt} \neq 0 \end{array} \right\},$$

где k – коэффициент передачи; D_n – зазор люфта; ε – рассогласование между заданной ω_{r0} и действительной ω_r частотами вращения дизеля.

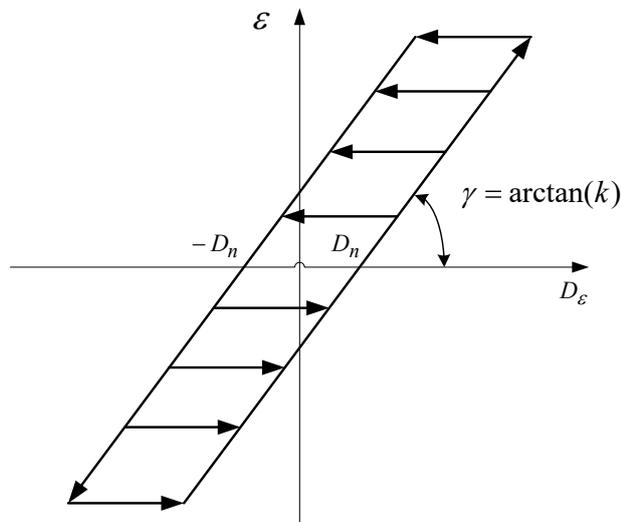


Рис. 1. Характеристика типа люфт

Математическая модель позволяет провести необходимые исследования для автономного электротехнического комплекса, в котором два параллельно включенных дизель-генераторных агрегата работают на общую активно-индуктивную нагрузку. Такая компоновка дает возможность анализа обменных колебаний мощности, возникающих при параллельной работе генераторов в квазиустановившихся режимах.

В систему уравнений также включены уравнения связи для преобразования токов статоров генераторных агрегатов в неподвижную систему координат (α, β) из вращающейся системы координат (d, q) , жестко связанной с ротором,

$$i_{\alpha} = i_{sd} \cos \omega_r t - i_{sq} \sin \omega_r t, \quad i_{\beta} = i_{sq} \cos \omega_r t + i_{sd} \sin \omega_r t.$$

На рис. 2 показаны графики U_{a1}, U_{a2} – напряжения; M_{g1}, M_{g2} – моменты; I_{a1}, I_{a2} – токи; ω_{21}, ω_{22} – частоты вращения роторов параллельно работающих генераторов для значений зазоров люфтов, соответственно $D_{n1}=0,002$ и $D_{n2}=0,01$. Результаты

моделирования подтверждают существование обменных колебаний мощности и позволяют определить их амплитуду. Для этой цели будем использовать токи I_{a1} , I_{a2} параллельно работающих генераторов.

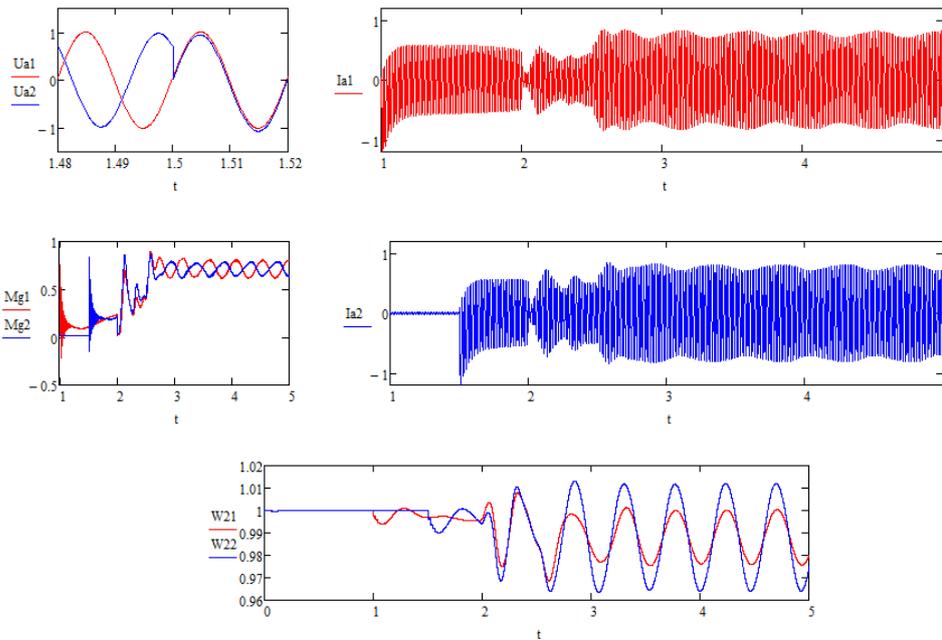


Рис.2. Результаты моделирования

Результаты

Для проведения исследований с использованием математической модели использованы данные автономного электротехнического комплекса парома «Ейск» (рис. 3) Керченской паромной переправы, осуществляющего регулярные грузопассажирские перевозки между портами «Крым» и порт «Кавказ». На этом же судне проводились экспериментальные исследования и выявлены обменные колебания мощности во всех режимах работы его электростанции [8].



Рис. 3. Паром Ейск

Результаты моделирования показали, что устойчивая работа судового электротехнического комплекса возможна при значениях зазоров люфта от 0 до 0,02. Поэтому, именно в этих диапазонах изменения зазоров люфта, с шагом 0,002 проведены вычисления и определены соответствующие амплитуды обменных колебаний мощности. Результаты представлены в таблице и на рис. 4.

Зависимость амплитуды обменных колебаний мощности от зазоров люфта

Dn1/Dn2	0	0,002	0,004	0,006	0,008	0,01	0,012	0,014	0,016	0,018	0,02
0	0	0,011	0,021	0,031	0,04	0,052	0,065	0,071	0,083	0,095	0,1
0,002	0,01	0,0015	0,011	0,021	0,033	0,045	0,056	0,068	0,076	0,09	0,1
0,004	0,02	0,01	0,002	0,012	0,021	0,035	0,045	0,056	0,068	0,076	0,09
0,006	0,028	0,018	0,007	0,003	0,013	0,024	0,034	0,048	0,057	0,07	0,081
0,008	0,04	0,03	0,02	0,0065	0,0025	0,0135	0,024	0,036	0,048	0,058	0,068
0,01	0,05	0,04	0,03	0,018	0,0075	0,0062	0,0145	0,024	0,039	0,048	0,058
0,012	0,065	0,051	0,038	0,028	0,0165	0,007	0,004	0,015	0,025	0,038	0,048
0,014	0,075	0,063	0,052	0,04	0,028	0,015	0,006	0,004	0,015	0,027	0,039
0,016	0,09	0,08	0,063	0,051	0,04	0,0255	0,015	0,0045	0,006	0,015	0,027
0,018	0,1	0,09	0,075	0,06	0,051	0,036	0,027	0,015	0,045	0,0075	0,015
0,02	0,117	0,1	0,086	0,075	0,062	0,05	0,04	0,027	0,015	0,006	0,0065

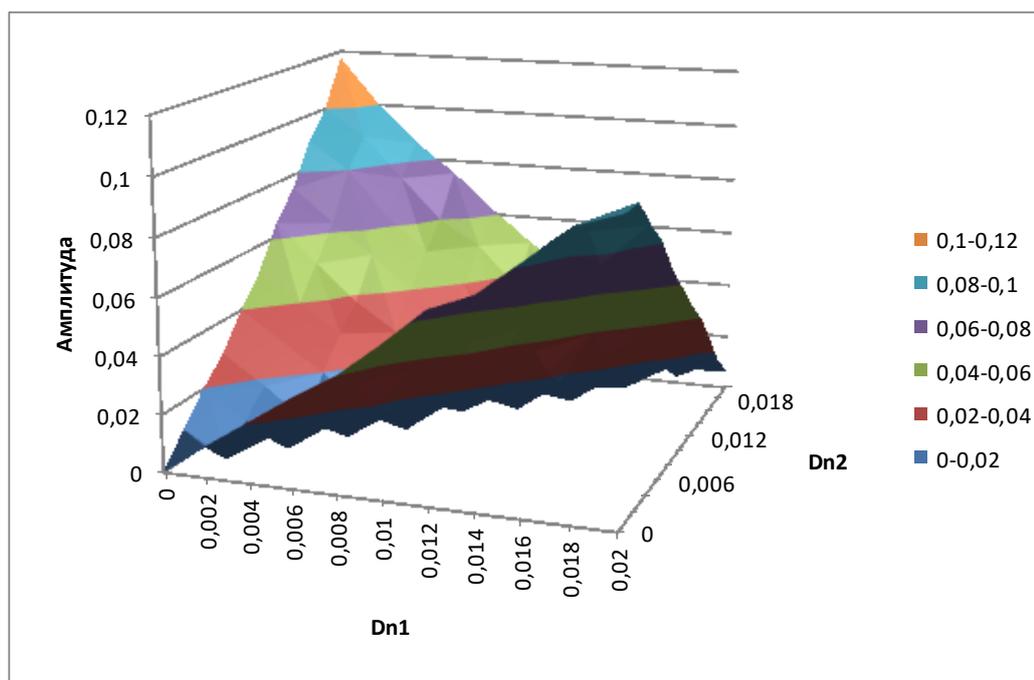


Рис. 4. Карта зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от зазоров люфта. Dn1 и Dn2 – зазоры люфта первого и второго параллельно работающего дизель-генератора соответственно

Графическое представление зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от зазоров люфта представляет собой карту настроек, которая может использоваться специалистами при наладке и эксплуатации регуляторов частоты вращения генераторных агрегатов. Кроме того, такая карта может быть применена в системах автоматики, ограничивающих обменные колебания мощности. Амплитуда обменных колебаний карты на рис. 4 достигает 11–12%, что является достаточно большой величиной и требует применения ограничивающих мер и средств. Наличие небольших зазоров люфта в контурах регулирования частоты параллельно работающих генераторных

агрегатов является технически необходимым условием для обеспечения их работоспособности. Поэтому и обменные колебания мощности могут иметь место. Однако ситуация, когда они достигают значительных значений, недопустима. В связи с тем, что предельные значения амплитуды обменных колебаний нигде не прописаны, возникают сложности при их ограничении. Исходя из полученной карты целесообразно было бы установить предельно допустимые нормы: 4–5%.

Обсуждение

Результаты проведенных исследований подтвердили, что амплитуда обменных колебаний мощности параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов зависит от значений зазоров люфта в контурах регулирования частот вращения. Из таблицы и рисунка видно, что в случае отсутствия люфта, когда зазоры равны нулю, амплитуда обменных колебаний также равна нулю, то есть колебания отсутствуют. При увеличении значений зазоров D_{n1} и D_{n2} растет и амплитуда обменных колебаний. Видно, что при равных значениях зазоров колебания меньше, однако это является очень частным случаем и на практике может встретиться крайне редко. С ростом разницы значений зазоров амплитуда значительно увеличивается. Полученная карта (рис. 4), кроме общей информации, детально описывает обменные колебания мощности для дизель-генераторов 6VD26/20-AL-2 с генераторами S450MG 800кВА и может быть полезна специалистам, которые эксплуатируют и настраивают такие агрегаты. Аналогичные исследования, направленные на построение карт зависимости амплитуд обменных колебаний мощности от значений зазоров люфтов, могут быть проведены для любых дизель-генераторов.

Заключение

Полученные в статье результаты являются логическим продолжением работы [8], посвященной исследованию обменных колебаний мощности при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов в составе автономных электротехнических комплексов. Они позволяют оптимизировать эксплуатацию таких технических систем. Получена методика построения карт зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от значений зазоров люфтов. На основе карт могут быть введены рекомендации по ограничению амплитуды обменных колебаний в нормативные документы как общего характера, так и конкретно для определенных типов оборудования. Также карты дают возможность определять существующие в контуре регулирования частоты зазоры люфта по измеренным амплитудам обменных колебаний.

Литература

1. Бурянина Н.С., Корольюк Ю.Ф. Качество электроэнергии и потери мощности в автономных системах республики Саха (Якутия) // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 2007. № 1. С. 56–59.
2. Федоров О.В., Сарваров А.С., Шевырев Ю.В. Ресурсное обеспечение новых технологических укладов в промышленности. М.: Кнорус, 2016. 142 с.
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. Грачева Е.И., Садыков Р.Р. Исследование вероятностных характеристик систем электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19, № 1–2. С. 95–101.
5. Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Владимиров О.В., Ваньков Ю.В. Измерительно-диагностический комплекс для диагностики энергетических установок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 3–4. С. 109–114.
6. Хватов О.С., Дарьенков А.Б. Электростанция на базе дизель-генератора переменной частоты вращения // Электротехника. 2014. № 3. С. 28–32.
7. Калмыков А.Н., Кузнецов В.И., Сеньков А.П., Токарев Л.Н. Судовые

- бестрансформаторные гребные электрические установки // *Морской вестник*. 2013. № 1. С. 40–42.
8. Савенко А.Е., Голубев А.Н. Обменные колебания мощности в судовых электротехнических комплексах // *Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина*. Иваново, 2016. 172 с.
9. Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen and Val'eria Hrabovcov'a. Design of Rotating Electrical Machines. Wiley & Sons, Ltd. 2008. 531 p.
10. Reimert D. Protective relaying for power generation systems. Taylor and Francis Group, LLC, 2006. 545 p.
11. Конкс Г.А., Лашко В.А. Мировое судовое дизелестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта. М.: Машиностроение, 2005. 512 с.
12. Савенко А.Е. Устранение обменных колебаний мощности в автономных электротехнических комплексах. Материалы II Международной научно-практической конференции «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли». Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт. 2017. Т. 3. С. 22–27.
13. 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.
14. Савенко А.Е. Математическая модель судового электротехнического комплекса // *Вестник ИГЭУ*. 2015. № 5. С. 54–59.
15. Голубев А.Н., Мартынов В.А., Алейников А.В. Математическая модель для расчета электромагнитных сил в синхронном электроприводе с постоянными магнитами // *Вестник ИГЭУ*. 2015. № 1. С. 10–13.

Авторы публикации

Савенко Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование судов и автоматизация производства» Керченского государственного морского технологического университета.

Савенко Павел Станиславович – курсант морского факультета Керченского государственного морского технологического университета.

References

1. Buryanina N.S., Korolyuk Yu.F. Kachestvo elektroenergii i poteri moschnosti v avtonomnykh sistemakh respubliki Sakha (Yakutiya). Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova. 2007. No. 1. p. 56–59.
2. Fedorov O.V., Sarvarov A.S., SHEvyrev Yu.V. Resursnoe obespechenie novykh tekhnologicheskikh ukladov v promyshlennosti. M.: Knorus, 2016. 142 p.
3. Lezhnyuk P.D., Netrebskiy V.V., Nikitorovich A.V. Optimizatsiya raspredeleniya nagruzki mezhdru rassredotochennymi istochnikami energii v lokal'noy elektricheskoy sisteme // *Tekhnichna elektrodinamika*. 2012. No. 2. P. 38–39.
4. Gracheva E.I., Sadykov R.R. Issledovanie veroyatnostnykh kharakteristik sistem elektrosnabzheniya // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. 2017. Vol. 19. No. 1–2. P. 95–101.
5. Nizamiev M.F., Ivshin I.V., Vladimirov O.V., Van'kov YU.V. Izmeritel'no-diagnosticheskiy kompleks dlya diagnostiki energeticheskikh ustanovok // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. 2014. No. 3–4. P. 109–114.
6. KHvatov O.S., Dar'enkov A.B. Elektrostantsiya na baze dizel'-generatora peremennoy chastoty vrascheniya // *Elektrotekhnika*. 2014. No. 3. P. 28–32.
7. Kalmykov A.N., Kuznetsov V.I., Sen'kov A.P., Tokarev L.N. Sudovye bestransformatornye grebnye elektricheskie ustanovki // *Morskoy vestnik*. 2013. No. 1. P. 40–42.
8. Savenko A.E., Golubev A.N. Obmennye kolebaniya moschnosti v sudovykh elektrotekhnicheskikh kompleksakh // *Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskii universitet imeni V.I.*

Lenina. Ivanovo, 2016. 172 p.

9. Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen and Val'eria Hrabovcov'a. Design of Rotating Electrical Machines. Wiley & Sons, Ltd. 2008. 531 p.

10. Reimert D. Protective relaying for power generation systems. Taylor and Francis Group, LLC, 2006. 545 p.

11. Konks G.A., Lashko V.A. Mirovoe sudovoe dizelestroenie. Kontseptsii konstruirovaniya, analiz mezhdunarodnogo opyta. M.: Mashinostroenie, 2005. 512 p.

12. Savenko A.E. Ustranenie obmennykh kolebaniy moschnosti v avtonomnykh elektrotekhnicheskikh kompleksakh. Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Dostizheniya, problemy i perspektivy razvitiya neftegazovoy otrasli». Al'met'evsk: Al'met'evskiy gosudarstvennyy neftyanoy institut. 2017. Vol. 3. P. 22–27.

13. Tyutikov V.V., Voronin A.I. Metodika sinteza regulyatorov dlya nezavisimogo formirovaniya staticheskikh i dinamicheskikh pokazateley nelineynykh ob"ektov // Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki. 2015. No. 3 (164). P. 154–164.

14. Savenko A.E. Matematicheskaya model' sudovogo elektrotekhnicheskogo kompleksa // Vestnik IGEU. 2015. No. 5. P. 54–59.

15. Golubev A.N., Martynov V.A., Aleynikov A.V. Matematicheskaya model' dlya rascheta elektromagnitnykh sil v sinkhronnom elektroprivode s postoyannymi magnitami // Vestnik IGEU. 2015. No. 1. P. 10–13.

Authors of the publication

Alexandr E. Savenko – cand. sci. (techn.), associate professor, Department «Electrical Equipment of Ships and Industrial Automation», Kerch State Maritime Technological University. E-mail: Savenko-70@mail.ru

Pavel S. Savenko – marine faculty cadet, Kerch State Maritime Technological University.

Поступила в редакцию

13 февраля 2018 г.