

15. Григорьев А. В. Результаты моделирования и испытания первой отечественной судовой единой электроэнергетической установки / А. В. Григорьев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2008. — № 2 (55). — С. 159–163.

16. Григорьев А. В. Опыт проектирования и результаты испытаний единой электроэнергетической установки судна «Вайгач» / А. В. Григорьев // Изв. вузов. Электромеханика. — 2008. — № 4. — С. 28–31.

17. Григорьев А. В. Единая электроэнергетическая установка малого гидрографического судна «Вайгач»: опыт проектирования и результаты испытаний / А. В. Григорьев // Российский морской регистр судоходства: науч.-техн. сб. — 2008. — Вып. 31. — С. 271–278.

УДК 621.311:629.12

С. Ю. Труднев,
ст. преп.

РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРНОГО АГРЕГАТА И ТРЕХФАЗНОГО БЕЗЫНЕРЦИОННОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

DEVELOPMENT OF COMPUTER MODEL OF PARALLEL OPERATION OF THE GENERATING UNIT AND THREE-PHASE NON-INERTIAL POWER SUPPLY

В статье рассмотрены структура транспортировки электроэнергии, определены недостатки основных узлов, предложено техническое решение по устранению недостатков. Исследована работа устройства, позволяющего улучшить качество электрической энергии. Разработана математическая модель параллельной работы дизель-генераторного агрегата и безынерционного трехфазного источника питания, работающего через инвертор. На основании математической модели разработана и исследована имитационная модель предлагаемого устройства в программе MATLAB. Рассмотрена работа генераторного агрегата при динамическом возмущении, исследованы характеристики зависимости напряжения от времени работы. Выявлен положительный эффект параллельной работы трехфазного инвертора и генераторного агрегата. Доказана целесообразность применения безынерционных источников питания в системах электроснабжения. Сопоставлены результаты экспериментальных данных и основные требования Российского морского регистра судоходства, предъявляемые к электроэнергетическим системам судов.

In this article structure of transportation of the electric power is considered, shortcomings of the main knots are defined, the technical solution on elimination of shortcomings is proposed. Operation of the device allowing to improve quality of electric energy is investigated. The mathematical model of parallel operation of the diesel-generator unit and non-inertial three-phase power supply working via the inverter is developed. On the basis of mathematical model the imitating model of the offered device in the MATLAB program is developed and investigated. Operation of the generating unit at dynamic indignation is considered, characteristics of dependence of tension on operating time are investigated. The positive effect of parallel operation of the three-phase inverter and generating unit is revealed. Expediency of use of not inertial power supplies in systems of power supply is proved. Results of experimental data and the main requirements of the Sea Register imposed to electrical power systems of courts are compared.

Ключевые слова: параллельная работа, трехфазная сеть, модель, динамический режим, напряжение, дизель-генераторный агрегат.

Key words: parallel work, three-phase network, model, dynamic mode, tension, diesel-generator unit.



РЫБОЛОВНЫЙ флот Российской Федерации в течение двух последних десятилетий сильно устарел. Для решения данной проблемы правительство РФ разработало федеральную целевую программу по ежегодному обновлению флота в количестве до 20 еди-

ниц и списанию 17 единиц. На практике все происходит с точностью до наоборот — коэффициент ежегодного списания судов в несколько раз превышает коэффициент обновления. Кроме того, появляются новые суда с установками, производительность которых намного выше, чем в установках существующих судов. В результате судовладелец находится перед выбором: либо производить покупку нового судна, либо производить модернизацию отдельных ее элементов, чтобы продлить срок эксплуатации судна и увеличить его производительность. Поскольку далеко не каждый судовладелец может позволить себе закупить новое судно, была использована глубокая модернизация всей судовой электроэнергетической системы (СЭС) путем замены оборудования на зарубежный аналог. При этом установленная зарубежная аппаратура после монтажа становится частью всей СЭС. На рис. 1 приведена структурная схема транспортировки электроэнергии СЭС.

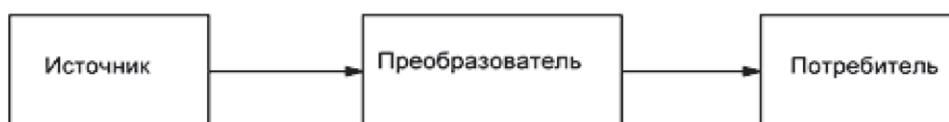


Рис. 1. Структурная схема транспортировки электроэнергии СЭС

По своей структуре СЭС состоит из трех основных блоков:

- источник (дизель-генераторный агрегат — ДТА);
- преобразователь;
- потребитель (приемник).

Модернизация СЭС в настоящее время осуществляется заменой одного из ранее указанных блоков, которая приводит к тому, что необходимо производить также замену либо источника, либо преобразователя. Замена источника является довольно дорогостоящей процедурой, поскольку чтобы добраться до машинно-котельного отделения, необходимо производить вырез нескольких палуб, на что уйдет много времени и средств. Так, например, в связи с тем, что вырез и сварка только одной палубы судна типа СРТМ обойдется судовладельцу порядка 200 тыс. руб., для него этот способ невыгоден. Поэтому из экономических соображений целесообразной становится модернизация элементов переработки электрической энергии (например, путем установки источника бесперебойного питания).

В условиях развития современного рыбопромыслового флота в СЭС начинают внедрять современные электронные источники энергии (ионисторы, ультраконденсаторы) и полупроводниковые приборы управления как слаботочной, так и силовой техникой. Силовая электроника относится к стремительно развивающейся технической отрасли. Наряду с ее развитием появились новые источники электрической энергии, преобразующие постоянную электрическую энергию в переменную при помощи различных полупроводниковых устройств (GTO, биполярные транзисторы с изолированной базой IGBT, мощные полевые транзисторы MOSFET). Появление в силовой электронике таких устройств привело к улучшению качества и увеличению спектра применения техники преобразования электрической энергии. Особенностью улучшения является значительное увеличение быстродействия полупроводниковых преобразователей, что позволило снизить показатели массы и габаритов, увеличить КПД, надежность, а также реализовать микропроцессорное управление и широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) [1].

Возможность использования полупроводниковых силовых преобразователей в СЭС и других отраслях дает большой экономический эффект, но оставляет за собой много неизученных вопросов, связанных с энергосбережением. В связи с ростом уровня индустриализации, большим количеством устаревших технологий и преобладанием природоемких отраслей данная проблема становится особо актуальной. Поэтому все большее внимание уделяется созданию и исследованию новых альтернативных источников питания [2], [3]. Для того, чтобы оценить результаты предлагаемой модернизации, необходимо разработать математическую и имитационную модель

параллельной работы источника бесперебойного питания и ДГА и проанализировать все преимущества и недостатки.

Уравнение дизель-генератора (ДГ) [4]:

$$J \frac{dw}{dt} = M_d - M_r, \quad (1)$$

где Jdw/dt — избыточный динамический момент; M_d — вращающий момент дизеля; M_r — тормозной момент, вызванный нагрузкой генератора; J — момент инерции вращающихся частей дизеля и генератора; w — угловая частота вращения; t — время работы.

Величина вращающегося момента дизеля M_d будет зависеть от положения топливной рейки топливного насоса и от угловой частоты вращения вала:

$$M_d = f(x, w), \quad (2)$$

где x — относительное перемещение заслонки.

Выполнив линеаризацию, получим:

$$\begin{aligned} M_d &= \frac{df}{dx} x + \frac{df}{dw} w; \\ M_d &= k_1 x + k_2 w. \end{aligned} \quad (3)$$

Величина M_r при постоянной частоте вращения пропорциональна нагрузке λ : $M_r = \alpha \lambda$.

Подставив значения M_r и M_d в уравнение (1) и учитывая, что $df/dw < 0$, получим:

$$\begin{aligned} Jpw &= k_1 x - k_2 w - \alpha \lambda; \\ \left(\frac{J}{k_2} p + 1 \right) w &= \frac{k_1}{k_2} x - \frac{\alpha}{k_2} \lambda. \end{aligned}$$

Тогда уравнение динамики ДГА примет вид:

$$\left(\frac{J}{k_2} p + 1 \right) w = \frac{k_1}{k_2} x - \frac{\alpha}{k_2} \lambda; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} w &= \frac{\frac{k_1}{k_2} x - \frac{\alpha}{k_2} \lambda}{\frac{J}{k_2} p + 1}; \\ w &= \frac{k_1 x - \alpha \lambda}{Jp + k_2}. \end{aligned} \quad (5)$$

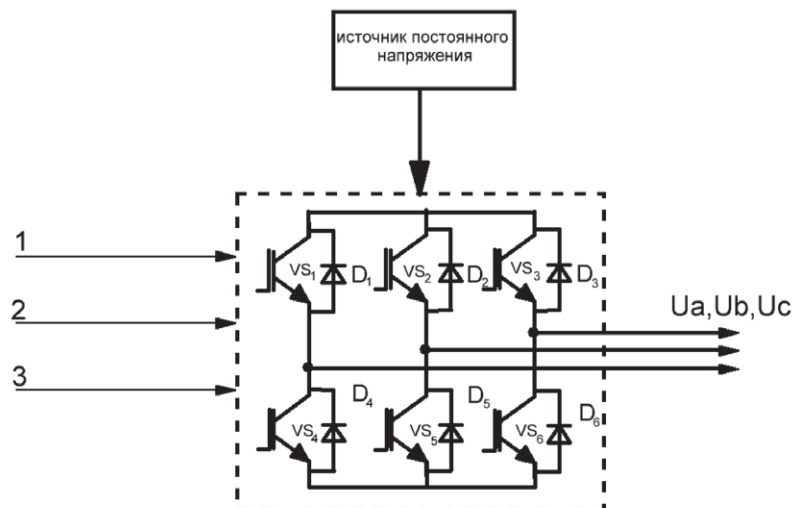


Рис. 2. ШИМ-инвертор

При реализации ШИМ-инвертора подаваемый на входы трехфазного ШИМ-модулятора (рис. 2) управляющий сигнал каждой фазы имеет вид:

$$u_{yA} = K_m U_m \sin(\theta); \quad (6)$$

$$u_{yB} = K_m U_m \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right); \quad (7)$$

$$u_{yC} = K_m U_m \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right), \quad (8)$$

где $\theta = 2\pi f_{\text{вых}} t$; U_m — максимально допустимая амплитуда управляющего сигнала, не вызывающего перемодуляцию.

При $\omega t = \theta$ будет наблюдаться фазовый сдвиг между напряжением ДГ и судовой трехфазной сетью, близкий к нулю. Исходя из этого, подаваемый на входы трехфазного ШИМ-модулятора управляющий сигнал каждой фазы будет иметь вид:

$$u_{yA} = K_m U_m \sin\left(\frac{k_1 x - \alpha \lambda}{Jp + k_2}\right);$$

$$u_{yB} = K_m U_m \sin\left(\frac{k_1 x - \alpha \lambda}{Jp + k_2} - \frac{2\pi}{3}\right);$$

$$u_{yC} = K_m U_m \sin\left(\frac{k_1 x - \alpha \lambda}{Jp + k_2} - \frac{4\pi}{3}\right).$$

По рассчитанной математической модели был построен блок в пакетах *Simulink* и *Simscape* (рис. 3 на с. 196). При параллельной работе трехфазного ШИМ-инвертора и судового синхронного генератора необходимо выполнение условий синхронизации. Включение в параллель даже неинерционного источника электрической энергии является сложным технологическим процессом, обеспечиваемым при выполнении ряда условий. В частности для безударного включения источника на параллельную работу (в данном случае даже инвертора) необходимо выполнение следующих условий синхронизации:

для трехфазной системы питания:

- напряжение U_c сети, к которой подключается источник, должно равняться ЭДС (Е) источника, т. е. $|U| = |E|$;
- значения частоты питающей сети f_c и частоты подключаемого источника f должны совпадать, т. е. $f_c = f$;
- совпадение по фазе одноименных векторов фазных напряжений подключаемого источника и сети, т. е. $\varphi = 0^\circ$;
- порядок чередования фаз подключаемого в параллель источника должен быть такой же, как и на шинах электрической сети [5].

При выполнении этих условий источник успешно войдет в синхронизм с сетью и не даст существенных отклонений по частоте питающей сети и напряжению, определенных Правилами Российского морского регистра судоходства (далее — Правила РМРС) в судовых электроэнергетических системах и требованиями межгосударственного стандарта [6], [7] в береговых электроэнергетических системах.

Разработка виртуальной модели позволит понять структуру объекта исследования, а также подробно изучить причинно-следственные связи [8]. Для исследования параметров качества электрической энергии в программе *Matlab* R2012a в пакетах *Simulink* и *Simscape* была исследована имитационная модель параллельной работы ДГА и трёхфазного управляемого инвертора, собранная по схеме устройства для определения и ликвидации предотказных состояний синхронной ма-

шины [2], [9]. Был произведен следующий эксперимент: на шины электрической сети, питающейся от одиночного ДГ мощностью $S = 2000$ кВ·А в момент времени $t = 3$ с была подключена активно-индуктивная нагрузка, соизмеримая с мощностью одного генератора, которая затем через одну секунду была отключена.

После восстановления при помощи систем автоматического регулирования напряжения и частоты в момент времени $t = 8$ с было выполнено повторное нагружение ДГА такой же активно-индуктивной мощностью, с той лишь разницей, что в этот же момент для подавления динамического возмущения был включен на параллельную работу трехфазный инвертор с учетом четырех условий синхронизации трехфазных источников электрической энергии переменного тока.

В ходе эксперимента на осциллографе были зафиксированы данные, приведенные на рис. 4. В момент динамического возмущения без дополнительного источника питания отклонение по напряжению составило 32 %, по частоте вращения — 6 % с максимальной продолжительностью 2 с по напряжению и 1,5 с по частоте вращения ДГА. В момент динамического возмущения при параллельной работе ДГА с трехфазным инвертором максимальное отклонение по напряжению составило 14 %, по частоте вращения — 3 % с максимальной продолжительностью 0,8 с по напряжению и по частоте вращения ДГА. Как видно из полученных данных, включение на параллельную работу дополнительного безынерционного источника трёхфазного питания с ДГА улучшит параметры качества электрической энергии при динамических возмущениях в два раза.

Отличительной особенностью и недостатком ДГ является его высокая инерционность, поэтому в различных модификациях такие агрегаты изготавливаются с турбиной для снижения реакции инерции дизеля на выходные параметры генератора. Турбина имеет высокую массу и габариты, поэтому в электроэнергетических системах транспортных судов турбины не используются.

Рассмотрим требования к качеству электрической энергии судовых электростанций, регламентируемые Правилами РМРС:

- максимальный допустимый провал напряжения $\pm \Delta U_{\max}$, %: от –15 % до +20 % при включении и отключении нагрузки, составляющий $60 \% \cdot I$ и с $\cos \varphi = 0,4$;
- при включении и отключении стопроцентной нагрузки изменение частоты вращения первичных двигателей не должно превышать ± 10 % от номинального значения, а частота вращения в статическом режиме не должна отличаться более чем на ± 5 % номинальной;
- время восстановления системы в установившемся режиме не более 1 с;
- размах частоты вращения ДГ при нагрузках от 25 % до 100 % номинальной должен находиться в пределах от –1 % до +1 % от номинальной;
- при резком отключении стопроцентной нагрузки генератора кратковременное отклонение частоты вращения ДГ не должно превышать 10 %;
- при резком включении или отключении до 50 %-й расчетной нагрузки ДГ кратковременное изменение частоты вращения первичного двигателя не должно превышать 10 %-ю расчетную частоту вращения;
- при любых нагрузках от 0 до 100 % установившаяся частота вращения ДГ не должна превышать расчетную частоту более чем на 5 %;
- установившаяся частота вращения не должна испытывать колебания более чем на ± 1 % частоты вращения, соответствующей установившейся нагрузке генератора [6].

Анализируя приведенные требования, а также полученные экспериментальные данные, можно судить о том, что системы автоматического регулирования не всегда способны обеспечить динамическую устойчивость при одиночной работе генератора на электрическую сеть. Кроме того, включение потребителей, мощность которых соизмерима с мощностью одного генератора в составе электростанций, может привести к увеличению отклонений параметров напряжения и частоты вращения, значения которых выходят за рамки установленных требований РМРС. Решением данной проблемы будет являться запуск второго ДГА, что является достаточно нецелесообразным с точки зрения энергоэффективности. Наиболее экономически выгодным и надежным будет подключение дополнительного безынерционного источника питания через управляемый трехфазный инвертор.

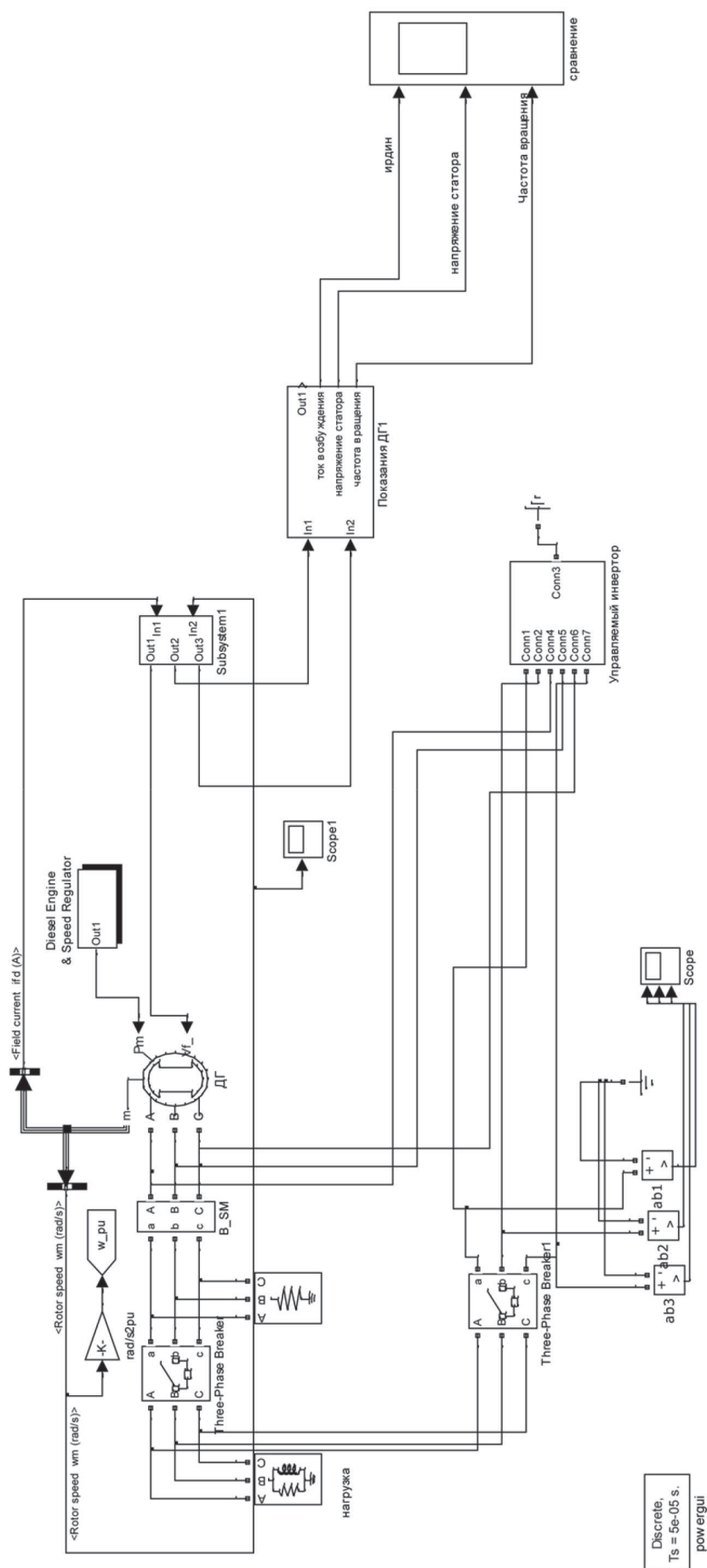


Рис. 3. Имитационная модель электроэнергетической системы

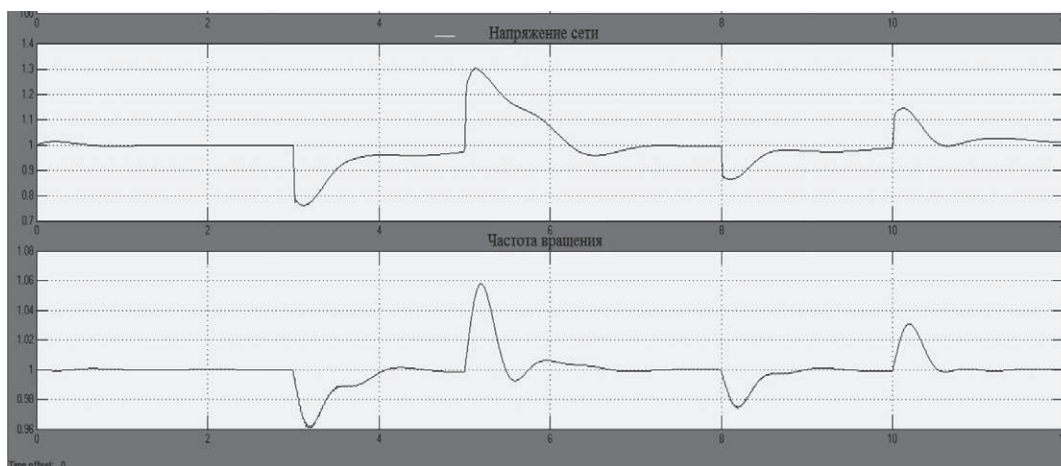


Рис.4. Зависимость напряжения и частоты вращения от времени имитационной модели ДГА

Таким образом, на основании представленных моделей можно сделать вывод о том, что включение на параллельную работу с ДГА трехфазного инвертора не только не приведет к снижению энергозатрат до 20 % [10], но и позволит улучшить параметры качества электрической энергии, что позволит при динамических возмущениях энергосистемы поддерживать работу электростанции в нормальном режиме. Кроме того, применение интегральных схем, повышающее качество электроэнергии, позволяет устранить помехи и снизить скачки напряжения.

Список литературы

1. Труднев С. Ю. Исследование параллельной работы ШИМ-инвертора и однофазной сети / С. Ю. Труднев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 60–67.
2. Труднев С. Ю. Разработка и исследование модели устройства активной защиты генераторного агрегата от кратковременных перегрузок / С. Ю. Труднев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (26). — С. 23–31.
3. Труднев С. Ю. Компьютерное моделирование режимов кратковременных перегрузок работы судовой электростанции / С. Ю. Труднев, Н. Н. Портнягин // 5-я межвуз. науч.-практ. конф. аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России» (14 мая 2014 г.). — СПб., 2014. — С. 154–161.
4. Краснов В. В. Основы теории расчета судовых электроэнергетических систем: Моделирование для исследования специальных режимов: учеб. пособие / В. В. Краснов, П. А. Мещанинов, А. П. Мещанинов. — Л.: Судостроение, 1989. — 328 с.
5. Сергиенко Л. И. Электроэнергетические системы морских судов / Л. И. Сергиенко, В. В. Миронов. — М.: Транспорт, 1991. — 368 с.
6. Правила классификации и постройки морских судов. — СПб.: Транспорт, 2010. — 280 с.
7. Межгосударственный стандарт ГОСТ 32144-2013. — М.: Стандартинформ, 2013. — 16 с.
8. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С. Г. Герман-Галкин. — М.: Корона-Век, 2008. — 368 с.
9. Труднев С. Ю. Патент RU 133364 U1 «Устройство для определения и ликвидации предотказных состояний синхронной машины» / С. Ю. Труднев, Н. Н. Портнягин. — Заявлено 07.11.2012; Опубл. 10.10.13 г. Бюл. 28.
10. Григорьев А. В. Повышение эффективности эксплуатации судовых дизельных электростанций / А. В. Григорьев, В. Ю. Колесниченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 39–43.