

техники в системе управления позволяет использовать сложные и эффективные алгоритмы численной обработки сигналов, значительно увеличив точность коррекции возмущений в электроэнергетической системе судна.

Список литературы

1. Агунов А. В. Управление качеством электроэнергии при несинусоидальных режимах: науч. изд. / А. В. Агунов. – СПб.: Изд. СПбГМТУ, 2009. – 133 с.
2. Романовский В. В. Перспективы модернизации гребных электрических установок ледоколов / В. В. Романовский, В. С. Иванов, А. И. Лебедев // Морской Вестник. – 2013. – № 2(11). – С. 56–59.
3. Пронин М. В. Активные фильтры высших гармоник направления развития / М. В. Пронин // Новости электротехники. – 2006. – № 2 (38).
4. Современные преобразователи частоты: методы управления и аппаратная реализация [Электронный ресурс] // Силовая электроника. – 2004. – № 1. – Режим доступа: http://www.power-e.ru/pdf/2004_01_50.pdf, свободный. – Загл. с экрана.
5. Движительная установка Azipod VI безопасная, эффективная и экологически чистая навигация в ледовых условиях [Электронный ресурс] // Сайт компании ABB. – Режим доступа: [http://www05.abb.com/global/scot/scot293.nsf/veritydisplay/56184f24de9dfa99c1257a0f002dc565/\\$file/ABB_Finland_Icebreaker_brochure_2012_ru_web.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot293.nsf/veritydisplay/56184f24de9dfa99c1257a0f002dc565/$file/ABB_Finland_Icebreaker_brochure_2012_ru_web.pdf), свободный. – Загл. с экрана.

УДК 621.311:629.12

С. Ю. Труднев,
ст. преподаватель,
ФГБОУ ВО «КамчатГТУ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ШИМ-ИНВЕРТОРА И ОДНОФАЗНОЙ СЕТИ

RESEARCH OF PARALLEL WORK OF PWM INVERTER AND SINGLE-PHASE NETWORK

В статье рассмотрена структура работы устройства, позволяющего улучшить качество электрической энергии. Разработана математическая модель однофазной сети и однофазного источника питания, работающего через инвертор. На основании математической модели разработана и исследована имитационная модель предлагаемого устройства в программе MATLAB. Рассмотрена параллельная работа инвертора и однофазной сети с нулевым фазовым сдвигом, исследованы характеристики зависимости напряжения от времени работы. Исследована параллельная работа преобразователя и однофазной сети с фазовым сдвигом, равным 60 градусов. Выявлен положительный эффект и определены недостатки при внедрении данного устройства.

In article are considered structure of operation of the device allowing to improve quality of electric energy. The mathematical model of a single-phase network and the single-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. Parallel operation of the inverter and a single-phase network with zero phase shift is

considered, characteristics of dependence of tension on operating time are investigated. Parallel operation of the converter and a single-phase network with phase shift in 60 degrees is investigated. The positive effect is revealed and shortcomings at introduction of this device are defined.

*Ключевые слова: параллельная работа, однофазная сеть, модель, динамический режим, напряжение.
Key words: parallel work, single-phase network, model, dynamic mode, tension.*

В УСЛОВИЯХ развития современного рыбопромыслового флота в судовые электроэнергетические системы (СЭС) начинают внедрять современные электронные источники энергии (ионисторы, ультраконденсаторы) и полупроводниковые приборы управления как слаботочной, так и силовой техникой (ШИМ-инверторы, ШИМ-преобразователи). В настоящее время силовая электроника относится к стремительно развивающейся технической отрасли, наряду с развитием которой 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 массогабаритные показатели, увеличить КПД, надежность, а также реализовать широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) и микропроцессорное управление.

Возможность использования силовых полупроводниковых преобразователей в СЭС и других устройствах дает большой экономический эффект, хотя оставляет много нерешенных вопросов, связанных с энергосбережением. Особую актуальность данная проблема приобретает в связи с ростом уровня индустриализации, преобладанием природоёмких отраслей и устаревших технологий. Поэтому все большее внимание уделяется созданию и исследованию новых альтернативных источников питания [1].

Интенсивное совершенствование современных накопителей электроэнергии высокой удельной мощности способствовало появлению так называемых *преобразователей электрической энергии* – инверторов, построенных на основе силовых полупроводниковых приборов. В силовых электрических сетях широкое применение получили трехфазный и однофазный инвертор с ШИМ в качестве аварийного источника электрической энергии. Все системы аварийного питания работают по общей структурной схеме. Преимуществом аварийных систем, питающихся от электрохимических источников электроэнергии через инвертор с ШИМ, в отличие от аварийных дизель-генераторов, является способность таких систем практически мгновенно взять на себя нагрузку при исчезновении питания основной сети.

Существует множество различных автономных СЭС, источником которых в основном является генераторный агрегат. Это нефтяные платформы, электроэнергетические системы морских судов и подводных лодок, различные аварийные системы питания и др. Основным недостатком этих систем является их ограниченность по мощности с учетом непрерывного постоянного увеличения производительности потребителей, роста потребляемой мощности, создания кратковременных перегрузок, которые приводят к ухудшению качества электрической энергии.

Большинство потребителей электроэнергии составляют электрические машины, которые при включении создают импульсную нагрузку на сеть. Согласно закону Ома, любая электрическая машина, работающая в режиме двигателя, при запуске обладает высоким пусковым моментом:

$$I = \frac{U_c - E}{\sum R}. \quad (1)$$

Поскольку при пуске $E = 0$, электродвигатель будет потреблять высокий пусковой ток. Длительность пускового тока, который потребляют электродвигатели, составляет обычно меньше одной секунды, а значит, запуск электродвигателя оказывает влияние на динамическую устойчивость СЭС [2]. В малонагруженных режимах для экономии топлива инженер-электромеханик промыслового судна зачастую использует в работе один дизель-генераторный агрегат для питания судовой системы. В результате этого для запуска энергоемкого потребителя приходится подключать в параллель второй дизель-генератор, т.е. держать его в «горячем резерве». Это приводит к дополнительным затратам топливных ресурсов. Выходом из сложившейся ситуации будет являться подключение дополнительного неинерционного источника переменного напряжения. На данном этапе развития технологий в области судовой автоматики все большее распространение получают вторичные источники бесперебойного питания с улучшенными показателями качества электрической энергии. Применение накопителей электрической энергии в таких системах способно значительно улучшить свойства существующих источников питания.

Включение в параллель даже неинерционного источника электрической энергии является сложным технологическим процессом, обусловленным рядом условий. Для безударного включения источника, в данном случае даже инвертора, на параллельную работу необходимо выполнить следующие условия синхронизации:

– для трехфазной системы питания:

- 1) равенство напряжения U_c сети и ЭДС E подключаемого источника, т.е. $|U| = |E|$;
- 2) равенство частот сети f_c и подключаемого источника f , т.е. $f_c = f$;
- 3) совпадение по фазе одноименных векторов фазных напряжений подключаемого источника и сети, а именно равенство нулю угла сдвига по фазе указанных векторов, т.е. $\varphi = 0^\circ$;

одинаковый порядок чередования фаз трехфазных генераторов, т.е. А-В-С и А-В-С. На практике это означает, что выводы А, В и С каждого генератора должны при включении на шины подключаться к шинам, соответственно, А, В и С ГРЩ [2];

– для однофазной системы питания:

- 1) равенство напряжения U_c сети и ЭДС E_r подключаемого источника, т.е. $|U_c| = |E|$;
- 2) равенство частот сети f_c и подключаемого источника f , т.е. $f_c = f$;
- 3) совпадение по фазе одноименных векторов фазных напряжений подключаемого источника и сети или, иначе, равенство нулю угла сдвига по фазе указанных векторов, т.е. $\varphi = 0^\circ$.

При выполнении этих условий источник успешно войдет в синхронизм с сетью и не создаст существенных отклонений по частоте питающей сети и напряжению, определенных требованиями Российского морского регистра судоходства в судовых электроэнергетических системах и межгосударственного стандарта [3] – [5].

Предлагается выполнить исследование возможного включения инвертора и питающей сети переменного напряжения на параллельную работу, а также влияния на параметры качества электрической энергии совместной работы инвертора на сеть при подключении нагрузки на примере однофазной системы питания при помощи компьютерной программы *Matlab R2012a*. Для создания виртуальной модели необходимо разработать функциональную схему и алгоритм математических расчетов и формул, на основании которых будет работать моделируемое устройство, функциональная схема подключения которого приведена на рис. 1.

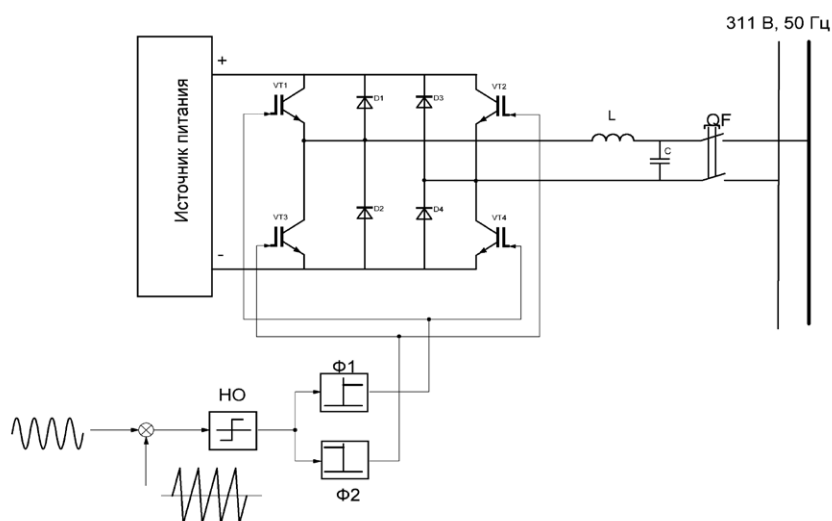


Рис. 1. Схема подключения однофазного инвертора к сети

Однофазный инвертор получает питание от источника постоянного напряжения. $VT1 - VT4$ электронные ключи, каждый из которых включает IGBT-транзистор, работающий в ключевом режиме, и диод обратного тока. Система управления транзисторными ключами содержит в своем составе ноль-орган (НО) и формирователи $\Phi 1$ и $\Phi 2$. На входе НО сравниваются задающий синусоидальный сигнал и пилообразное опорное напряжение, а их разность задает открытие пар транзисторов. При помощи управляющего сигнала на базе транзисторов можно регулировать амплитудное значение напряжения и частоты выходного сигнала, а также задавать фазовый сдвиг выходного напряжения на инверторе [6].

Для подтверждения предлагаемой схемы подключения в программе *Matlab R2012a* была разработана имитационная модель однофазного инвертора с возможностью ввода в параллель с однофазной сетью (рис. 2). В составе модели инвертор с ШИМ, представленный блоками *IGBT*, *Diode*, *Repeating Sequence* и источником постоянного напряжения $U = 300$ В, однофазный источник переменного напряжения $U_c = 300$ В, активно-индуктивная нагрузка, задатчик управляющих импульсов для управления работой двух пар IGBT-транзисторов [7], [8].

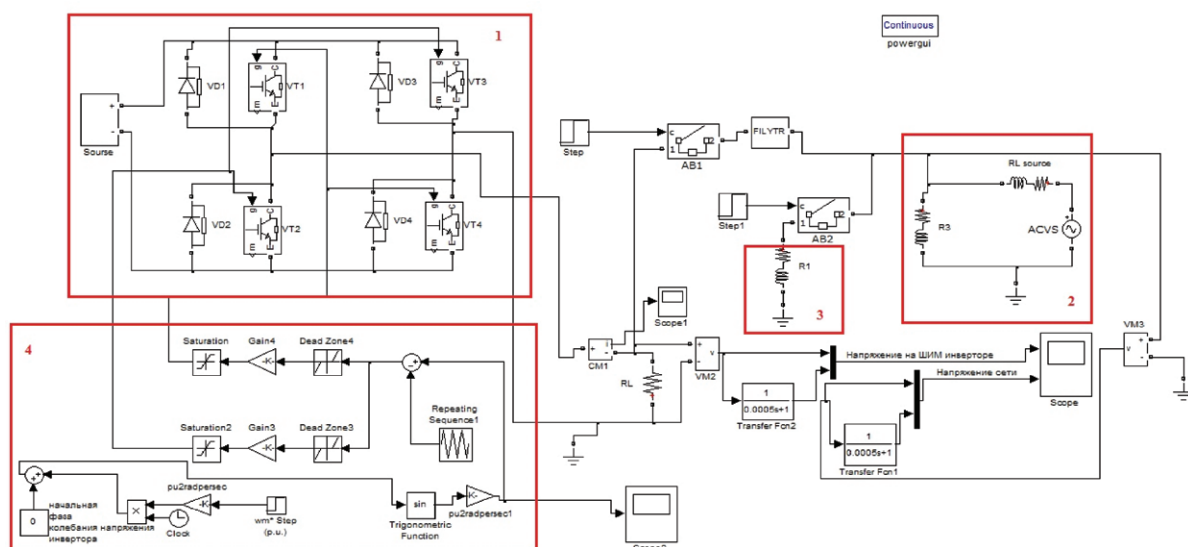


Рис. 2. Имитационная модель для исследования синхронизации инвертора и однофазной сети:

- 1 – инвертор на IGBT-транзисторах; 2 – однофазная сеть;
3 – активно-индуктивная нагрузка; 4 – модуль управления IGBT транзисторами

Управляющий сигнал складывается из разности задающего пилообразного сигнала высокой частоты и синусоидального сигнала, изменяющегося согласно закону

$$U_0 = \sin(\omega \cdot t + \varphi), \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота, задаваемая блоком *Gain* библиотеки *Simulink*; φ – начальная фаза колебания, представленная блоком *Const*, при помощи которого можно регулировать фазовый сдвиг выходного сигнала [9].

Для однофазной СЭС выполнение первых двух условий синхронизации обычно не составляет никаких трудностей, проблемой является обеспечение третьего условия синхронизма, так как действующее значение переменного напряжения постоянно изменяется, вследствие чего сдвиг синусоид напряжений сети и подключаемого источника будет иметь случайный характер и изменяться во времени. В настоящее время не существует таких систем, которые могли бы обеспечивать постоянный нулевой сдвиг по фазе колебания сети переменного тока и подключаемого источника.

Как известно, включение в электрическую цепь активно-индуктивной нагрузки вызывает высокое динамическое возмущение, которое сопровождается провалом напряжения и изменением частоты питающей сети. Постоянное включение такой нагрузки негативно сказывается на качестве параметров сети, и если в системах берегового электроснабжения есть отдельные узлы, которые компенсируют провал, не создав существенных изменений, то в различных элементах СЭС, ввиду высоких массогабаритных характеристик, таких узлов нет. Создание малогабаритных устройств, работающих через ШИМ-инвертор, позволит устранить такую проблему и улучшить параметры качества электрической энергии. Разработка компьютерной модели даст возможность исследовать особенности всех условий синхронизма и доказать возможность параллельной работы инвертора на сеть.

Исходя из ранее изложенного, предлагается исследовать параллельную работу однофазной сети и инвертора с ШИМ при динамических возмущениях, разработанную в программе *Matlab* (см. рис. 2). Был выполнен первый эксперимент: в момент времени $t = 0,05$ с к однофазной сети подключена активно-индуктивная нагрузка и в момент времени $t = 0,1$ в параллельную работу подключен инвертор с ШИМ. Результаты моделирования приведены на рис. 3.

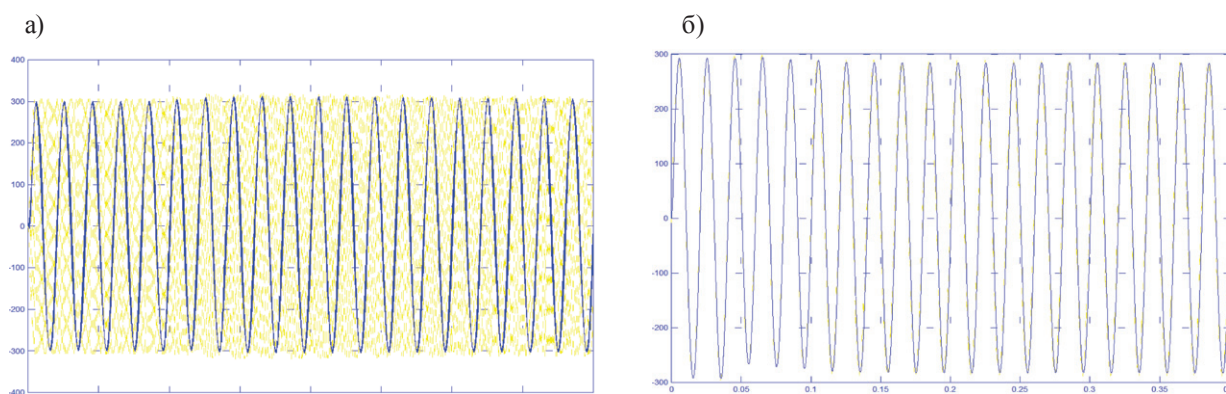


Рис. 3. Результаты моделирования первого эксперимента:
графики зависимости выходного напряжения на ШИМ инверторе от времени (а)
и выходного напряжения однофазной сети от времени (б)

Из графиков видно, что однофазный ШИМ-инвертор удачно вошел в синхронизм с сетью, взяв на себя часть нагрузки, при этом начальная фаза колебания была равна 0° .

Рассмотрим второй эксперимент с той же моделью, только взяв начальную фазу колебаний $\varphi = 60^\circ$ (рис. 4). В результате эксперимента по графикам можно судить о том, что ШИМ-инвертор не вошел в синхронизм с заданной однофазной сетью (рис. 5). Несоблюдение третьего условия синхронизма для однофазной сети привело к резкому скачку напряжения на инверторе и снижению общего питающего напряжения.

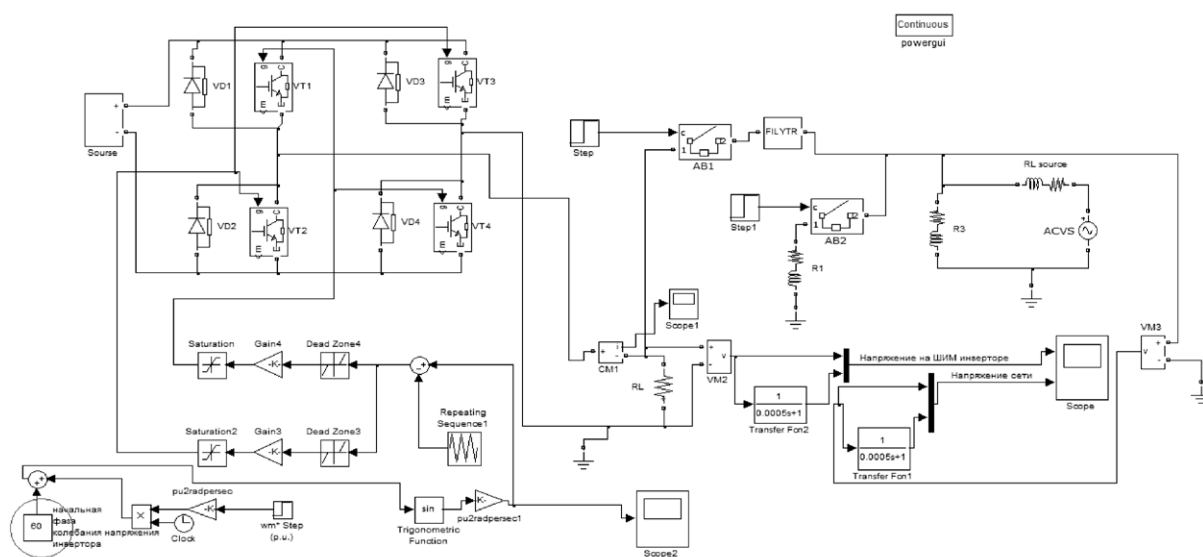


Рис. 4. Имитационная модель для исследования синхронизации инвертора и однофазной сети с фазовым сдвигом напряжения на ШИМ-инверторе $j = 60^\circ$

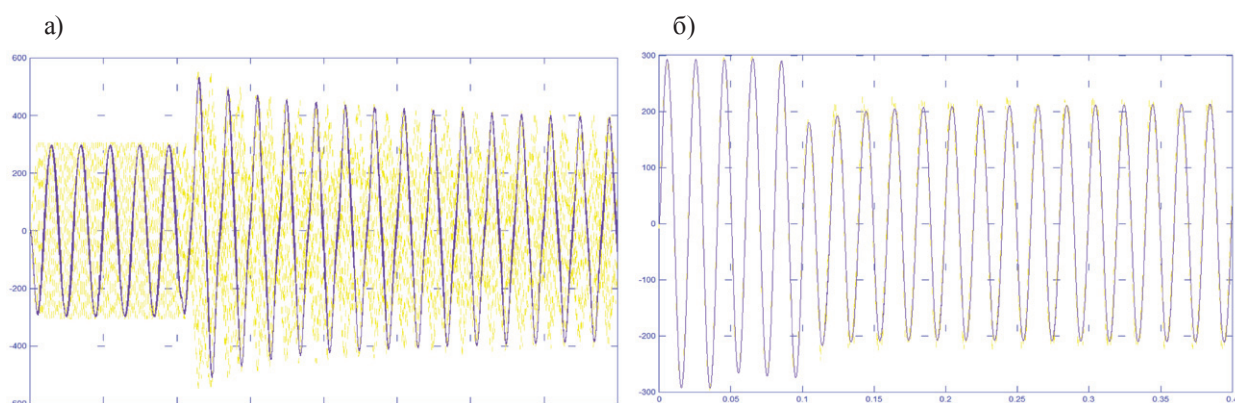


Рис. 5. Результаты моделирования второго эксперимента
графики зависимость выходного напряжения на ШИМ инверторе от времени (а);
зависимость выходного напряжения однофазной сети от времени (б)

В момент времени $t = 0,1$ с происходит включение в однофазную сеть активно-индуктивной нагрузки, одновременно с этим для компенсации провала напряжения включается на параллельную работу второй источник, работающий через ШИМ-инвертор. В момент включения дополнительного источника вместо компенсации в однофазной сети произошло недопустимое по требованиям как судового, так и берегового электроснабжения отклонение напряжения на 35 % (см. рис. 5 б), сопровождающееся скачком напряжения на ШИМ-инверторе до 40 % от номинального (см. рис. 5 а).

Таким образом, исследование модели доказывает, что предлагаемое неинерционное устройство, работающее через ШИМ-инвертор, способно практически мгновенно синхронизироваться с питающей сетью и компенсировать провалы напряжения при подключении различных видов нагрузок. В результате включения такого устройства в параллель с сетью минимизируется диапазон отклонения частоты и напряжения питающей сети, что, несомненно, приведет к улучшению параметров качества электроэнергии, вырабатываемой сетью даже при динамических возмущениях.

Предлагаемое техническое решение может быть реализовано на судах рыбопромыслового флота и электростанциях, эксплуатирующихся в режиме резкого изменения нагрузки со стороны

потребителя, как в большую, так и в меньшую сторону [10]. Исследование на примере работы ШИМ-инвертора на однофазную электрическую сеть выявило не только положительные стороны данного устройства, связанные с улучшением качества параметров электроэнергии, но и определило очень важный недостаток, связанный с проблемой синхронизации. Результаты исследования свидетельствуют о том, что применение дополнительного мощного источника в динамических режимах работы электрической сети позволит снизить провалы по напряжению и частоте, но необходимой остается разработка такого устройства, которое позволит держать источник высокой удельной мощности в «горячем» состоянии, постоянно сохраняя фазовый сдвиг напряжений с сетью равным нулю.

Список литературы

1. 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. – С. 23–31.
2. Труднев С. Ю. Компьютерное моделирование режимов кратковременных перегрузок работы судовой электростанции / С. Ю. Труднев, Н. Н. Портнягин // 5-я межвузов. науч.-практ. конф. асп., студ. и курс. на тему «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России» (14 мая 2014 г.). – СПб., 2014. – С. 154–161.
3. Правила классификации и постройки морских судов. – СПб.: Транспорт, 2010. – 280 с.
4. Межгосударственный стандарт ГОСТ 32144-2013. – М.: Стандартиформ, 2013. – 16 с.
5. Межгосударственный стандарт ГОСТ 29322-92. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 7 с.
- Сергиенко Л. И. Электроэнергетические системы морских судов / Л. И. Сергиенко, В. В. Миронов. – М.: Транспорт, 1991. – 368 с.
6. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г. Г. Соколовский. – М.: АCADEMA, 2006. – 265 с.
7. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB Sim Power Systems и Simulink / И. В. Черных. – СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
8. Труднев С. Ю. Разработка математической модели вторичного источника питания // Наука, образование, инновации: пути развития: материалы Четвертой Всерос. науч.-практ. конф. (23–25 апр. 2013 г.). – Петропавловск-Камчатский, 2013. – Ч. 1. – С. 143–145.
9. Пат. RU 133364 U1. Устройство для определения и ликвидации предотказных состояний синхронной машины / С. Ю. Труднев, Н. Н. Портнягин. Заявлено 10.10.2013. – Бюл. 28.