DOI 10.18454/PMI.2016.6.852

УДК 621.311.001.57

МОДЕЛИРОВАНИЕ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МАЛОГО ГИДРОГРАФИЧЕСКОГО СУДНА «ВАЙГАЧ»

И.А.ПАНЬКОВ[1], **В.Я.ФРОЛОВ**[2]
[1] *Спецстройпроект №3, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия*

При разработке перспективных электроэнергетических систем, в частности судовых электроэнергетических систем, все чаще прибегают к компьютерному моделированию. Оно дает понимание о переходных процессах, показателях качества электроэнергии в системе без построения ее физической модели, что позволяет значительно повысить производительность и качество физической модели.

В наше время для моделирования таких систем все чаще и чаще используют пакет MathLab с приложением Simulink.

В статье приведена модель судовой электроэнергетической системы малого гидрографического судна «Вайгач», построенной в среде MatLab. Выявлены слабые места системы и способы их устранения. Представлены изменения синусоиды до и после включения нелинейной нагрузки в сеть и решения по улучшению коэффициента нелинейных искажений. Разработанную модель судовой электроэнергетической системы можно использовать для моделирования различных судов.

Ключевые слова: «Вайгач», модель Simulink, судовая электроэнергетическая система, ЭМС, качество электрической энергии.

Как цитировать эту статью: Паньков И.А. Моделирование судовой электроэнергетической системы малого гидрографического судна «Вайгач» / И.А.Паньков, В.Я.Фролов // Записки Горного института. 2016. Т. 222. С. 852-857. DOI 10.18454/PMI.2016.6.852

Введение. Обеспечение качества электроэнергии в питающих сетях на сегодняшний день является актуальным направлением, об этом говорят повышенные требования к качеству электроэнергии, вступившие в силу с новым ГОСТ 32144-2013. Особенно это касается автономных электроэнергетических систем, к которым относятся судовые электроэнергетические системы (СЭЭС). Опыт их эксплуатации показывает, что задача поддержания надлежащего уровня напряжения и частоты на шинах главных распределительных щитов (ГРЩ) в различных режимах работы, а также величин коэффициентов несимметрии нагрузок, решается в современных СЭЭС без особых проблем. Это нельзя сказать о таком показателе качества, как коэффициент нелинейных искажений напряжения, который показывает, насколько фактическая форма напряжения отличается от синусоидальной. Искажение формы питающего напряжения связано с наличием в составе СЭЭС нелинейных потребителей, к которым относятся управляемые и неуправляемые выпрямители, преобразователи частоты, светотехническое оборудование и др. Преобразователи частоты на судах используются для питания и управления электродвигателями гребных электрических установок (ГЭУ), судовых электроприводов, технологических механизмов и оборудования и др. Потребление нелинейными приемниками несинусоидального тока приводит к генерации в сеть высших гармоник тока, которые искажают форму напряжения сети. Величина искажения напряжения СЭЭС определяется мощностью статических преобразователей, их схемой, индуктивным сопротивлением генератора и сети высшим гармоникам, глубиной регулирования напряжения и пр.

Наличие высших гармоник в напряжении судовой сети негативно сказывается на работе как источников, так и потребителей электроэнергии. В электрических машинах высшие гармоники вызывают дополнительные потери, что приводит к повышению общей температуры и местным нагревам, а также к повышенной вибрации. В кабельных линиях высшие гармоники приводят к ускорению процесса старения изоляции и дополнительным потерям в линиях. Под действием высших гармоник может быть нарушена нормальная работа систем защиты и автоматики, возникают ложные срабатывания, сбои в работе систем синхронизации и автоматического распределения нагрузок при параллельной работе генераторов и т. д. Негативно воздействуют высшие гармоники и на сами преобразователи, ухудшаются условия коммутации, возникают сбои в системе управления, что может увеличивать пульсации на стороне выпрямленного тока [1, 7, 8, 18, 19].

В связи с этим вводятся требования ограничения величины коэффициента нелинейных искажений допустимыми значениями по ГОСТ 32144-2013, а на судах требования Российского морского регистра судоходства и Российского речного регистра [15].

Цель данной работы – построение модели судовой электроэнергетической системы малого гидрографического судна «Вайгач». Задачей же является выявление проблем с качеством электрической энергии в системе и способы их устранения.

DOI 10.18454/PMI.2016.6.853

Метод исследования. При проектировании электроэнергетических систем в настоящее время все чаще прибегают к компьютерному математическому моделированию. Применение современных программных продуктов для математического моделирования позволяет существенно упростить задачу создания модели электроэнергетической системы. Некоторые современные программные продукты, среди которых лидирующую позицию занимает MathLab с приложением Simulink, имеют достаточно большую библиотеку стандартных устройств и виртуальных измерительных приборов, которые необходимы для проведения вычислительных экспериментов в системе. В качестве примера приведена математическая модель синхронного генератора в среде MathLab, который используется в составе СЭЭС в качестве основного источника электроэнергии [6, 13, 17].

Модель синхронного генератора базируется на системе уравнений Парка – Горева [4, 5, 11, 12]. При построении модели принимаются следующие допущения: зависимость активных сопротивлений от температуры и потери в стали не учитываются, обмотки статора симметричны. На рис.1 представлена схема замещения синхронной машины в системе координат, связанной с ротором (d-q-оси), все параметры и переменные которого приведены к статору.

На основании приведенных схем замещения синхронный явнополюсный генератор описывается следующей системой уравнений:

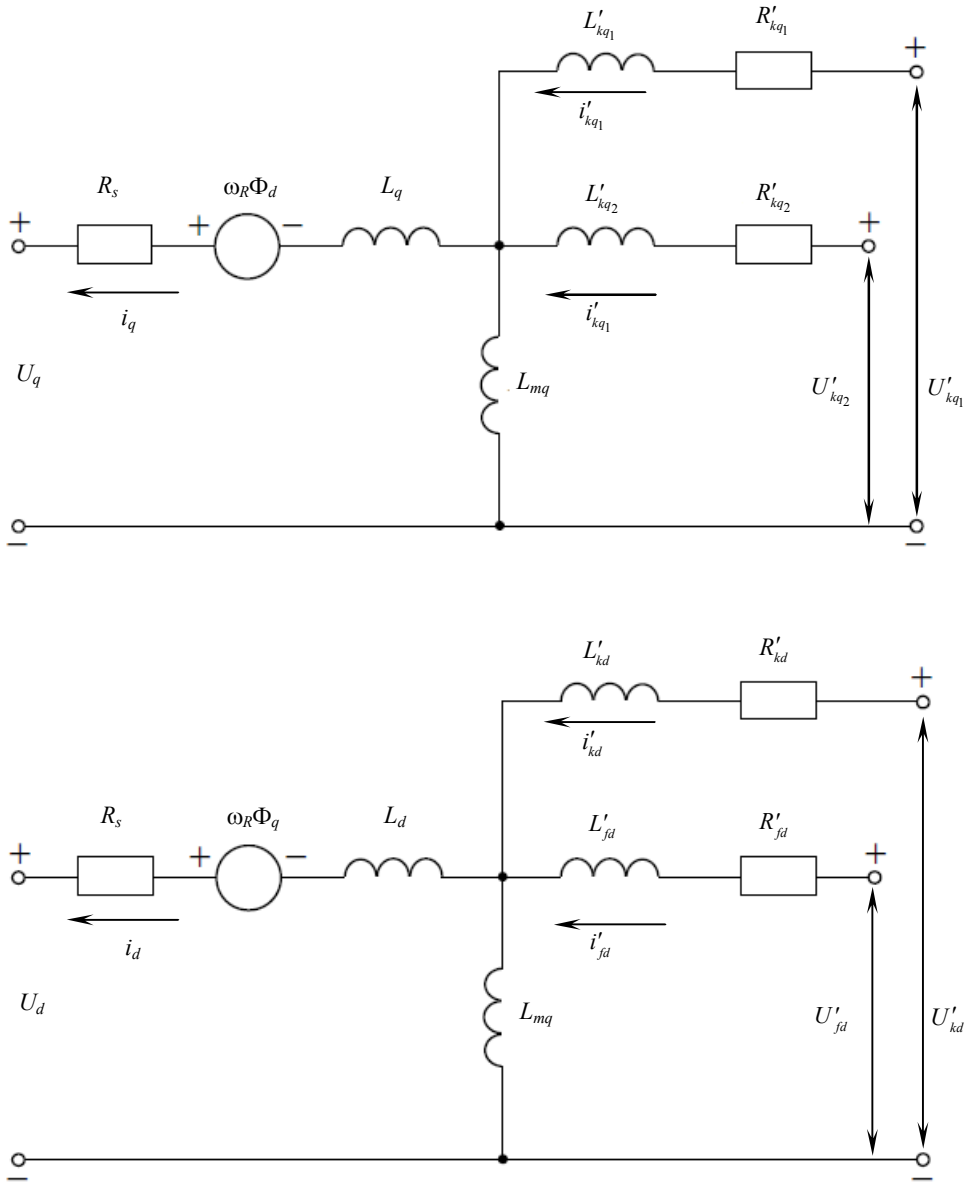


Рис.1. Схема замещения синхронной машины в системе координат, связанной с ротором (q-d-оси)

DOI 10.18454/PMI.2016.6.852

$$\begin{cases} U_d = R_s i_d + \dfrac{d\Phi_d}{dt} - \omega_r \Phi_q; \\ U_q = R_s i_d + \dfrac{d\Phi_d}{dt} - \omega_r \Phi_d; \\ U'_{fd} = R'_{fd} i'_{fd} + \dfrac{d\Phi'_{fd}}{dt}; \\ U'_{fd} = R'_{fd} i'_{fd} + \dfrac{d\Phi'_{fd}}{dt}; \\ U'_{kd} = R'_{kd} i'_{kd} + \dfrac{d\Phi'_{kd}}{dt}; \\ U'_{kq_1} = R'_{kq_1} i'_{kq_1} + \dfrac{d\Phi'_{kq_1}}{dt}; \\ U'_{kq_2} = R'_{kq_2} i'_{kq_2} + \dfrac{d\Phi'_{kq_2}}{dt}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Phi_d = L_d i_d + L_{md}(i'_{fd} + i'_{kd}); \\ \Phi_q = L_q i_q + L_{mq} i'_{kd}; \\ \Phi'_{fd} = L'_{fd} i'_{fd} + L_{md}(i_d + i'_{kd}); \\ \Phi'_{kd} = L'_{kd} i'_{kd} + L_{md}(i_d + i'_{fd}); \\ \Phi'_{kq_1} = L'_{kq_1} i'_{kq_1} + L_{mq} i_q; \\ \Phi'_{kq_2} = L'_{kq_2} i'_{kq_1} + L_{mq} i_q, \end{cases}$$

где U_d, U_q – напряжение якорной обмотки по продольной и поперечной осям; U'_{fd} – напряжение обмотки возбуждения; U'_{kd}, U'_{kq_1}, U'_{kq2} – напряжение демпферных обмоток; i_d, i_q – токи якорной обмотки по продольной и поперечной осям; i'_{kd_1}, i'_{kd_2}, i_{kd} – токи демпферных обмоток синхронной машины по продольной и поперечной осям; i'_{fd_1} – ток обмотки возбуждения; Φ_d, Φ_q – магнитный поток по продольной и поперечной осям синхронной машины; Φ'_{kd}, Φ'_{kq_1}, Φ'_{kq_2}, Φ'_{fd} – магнитный поток демпферных обмоток и обмотки возбуждения синхронной машины; ω_r – угловая скорость ротора; L_d, L_q – индуктивность якорной обмотки синхронной машины по продольной и поперечной осям; L'_{kq_1}, L'_{kq_2}, L'_{kd} – индуктивность демпферных обмоток синхронной машины по продольной и поперечной осям; L'_{fd_1} – индуктивность обмотки возбуждения синхронной машины; R'_{kq_1}, R'_{kq_2}, R'_{kd} – активное сопротивление синхронной машины по продольной и поперечной осям; R_s – активное сопротивление якорной обмотки; R'_{fd} – активное сопротивление обмотки возбуждения; L_{md}, L_{mq} – взаимные индуктивности между обмотками по продольной и поперечной осям.

Приведенному выше описанию соответствует модель синхронной машины «Synchronous Machine pu Standard», представленная в пакете Matlab с приложением Simulink [6].

Как правило, в составе судовой электростанции используются несколько дизель-генераторов, работающих на общую сеть. Их параметры в общем случае могут отличаться друг от друга. Поэтому для упрощения расчета параметров СЭЭС и ее моделирования целесообразна замена нескольких генераторов на один эквивалентный.

На рис.2 представлена структурная схема судовой энергетической системы. В состав главной дизель-электрической энергетической установки судна входят: два главных дизель-генераторных агрегата мощностью 1000 кВт (ГДГ1, 2), два гребных электродвигателя асинхронного типа мощностью 550 кВт (ГЭД1, 2), два полупроводниковых преобразователя частоты питающей сети частотой 50 Гц (ППЧ1, 2) мощностью 700 кВА, два трехобмоточных повышающих трансформатора мощностью 800 кВА (ТР1, 2), главный распределительный щит (ГРЩ), две винторулевые колонки (ВРК1, 2). В носовой части судна размещено подруливающее устройство (ПУ). На судне предусмотрен аварийный дизель-генератор (АДГ) мощностью 100 кВт с аварийным распределительным щитом (АРЩ) для подачи электропитания на наиболее ответственные потребители в аварийных ситуациях.

DOI 10.18454/PMI.2016.6.853

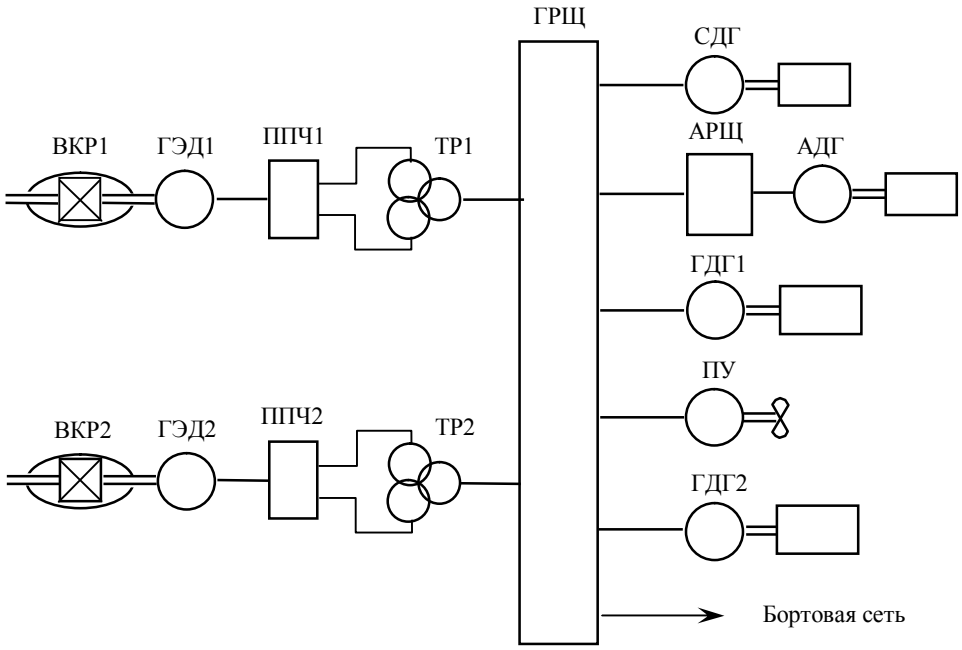


Рис.2. Структурная схема судовой электроэнергетической системы

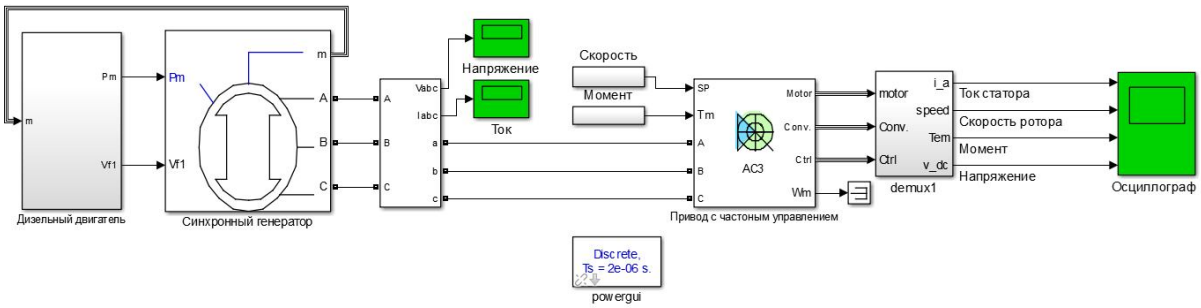


Рис.3. Схема судовой электроэнергетической системы

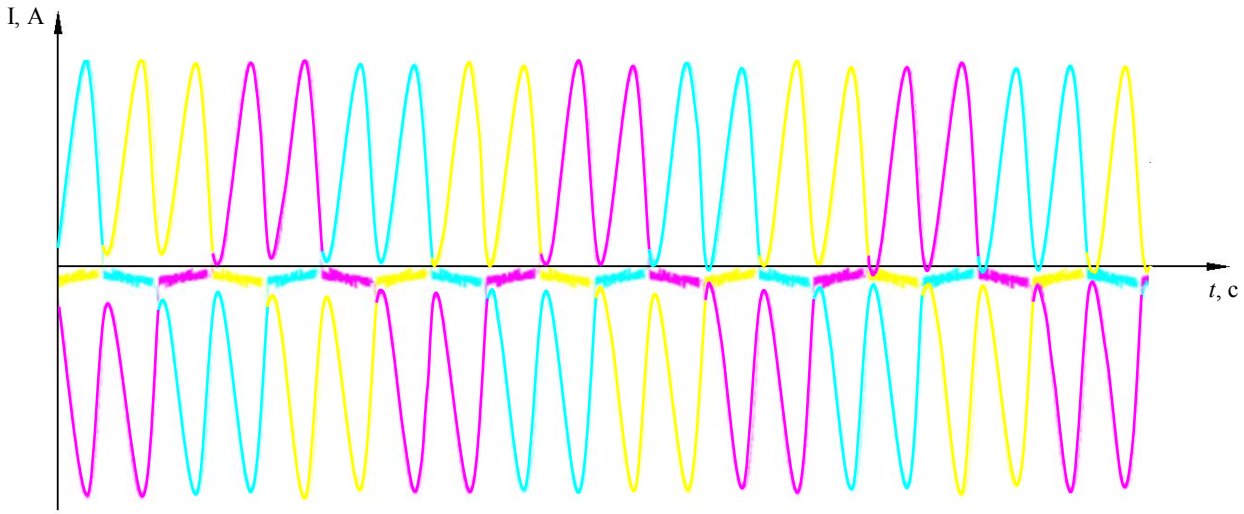


Рис.4. Синусоида тока, полученная в результате моделирования

В рамках данной работы рассматривается работа одной секции ГРЩ в нормальном режиме работы. В среде MathLab схема СЭЭС представлена на рис.3 [2, 3, 10, 16].

Блок «Дизельный двигатель» [20] моделирует работу дизельного двигателя внутреннего сгорания, блок «Синхронный генератор» – синхронного двигателя (в представленной модели был использован блок Synchronous Machine pu Standard из библиотеки Simulink), блок «Привод с частотным управлением» – блок с трансформатором, преобразователем частоты и гребным двигателем.

Зная основные параметры судовых агрегатов, данную модель можно перестроить под другие модели судов и получать необходимые параметры электрической сети. Также данный принцип построения моделей автономных электроэнергетических систем дает представление о построении автономных электроэнергетических систем морских буровых установок, где также используются нелинейные потребители электрической энергии, и др.

Полученная в результате моделирования синусоида тока представлена на рис.4.

Результаты исследования и их обсуждения. Полученная синусоида отличается от эталонной синусоиды. Главной причиной изменения формы синусоиды являются гармоники высшего порядка, генерируемые частотным управлением привода. Негативные явления, к которым могут привести гармоники высшего порядка, описаны выше.

Существующие способы снижения нелинейных искажений предполагают применение как схемных или структурных решений, так и различных устройств подавления высших гармоник. В частности, используются преобразователи с повышенной фазностью, сетевые дроссели и фильтры, дроссели постоянного тока, резонансные и синусные фильтры. Основным недостатком перечисленных выше устройств являются их значительные массогабаритные показатели, что особенно чувствуется в автономных электроэнергетических системах, к которым и относятся СЭЭС. Современным средством фильтрации гармоник высших порядков является активный фильтр [9, 14].

Активный фильтр высших гармоник тока включается в сеть параллельно нагрузке, генерирующей высшие гармоники тока. Он содержит IGBT-транзисторы и работает по принципу генератора «антигармоник» тока для компенсации высших гармоник тока нелинейной нагрузки. Активный фильтр обладает автоматической настройкой для компенсации высших гармоник резко переменных нагрузок. Также он полностью контролирует ток компенсации по принципу источника тока, что исключает вероятность возникновения резонансных явлений, свойственных пассивным фильтрам. Это вместе с компактными размерами силовых транзисторов обеспечивает небольшие габариты силовой части активного фильтра [5], т.е. использование активных фильтров в автономных электроэнергетических системах, к которым относится морской транспорт, способно привести к экономии ресурсов за счет выполнения большого спектра работ в сравнительно малых габаритах.

Таким образом, построенная компьютерная модель выявила проблему с наличием высших гармоник выше допустимого уровня. Современным путем по улучшению коэффициента нелинейных искажений является использование активных фильтров гармоник.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Анисимов Я.Ф.* Особенности применения полупроводниковых преобразователей в судовых электроустановках. Л.: Судостроение, 1983. 232 с.

2. *Баранов А. П.* Моделирование судового электрооборудования и средств автоматизации / А.П.Баранов, М.М.Раимов. СПб: Элмор, 1997. 232 с.

3. *Белов В.Ф.* Автоматизация проектирования электромагнитной совместимости автономных преобразовательных систем. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 1993. 343 с.

4. *Беспалов В.Я.* Электрические машины. М.: Академия, 2006. 316 с.

5. *Вольдек А.И.* Электрические машины. Л.: Энергия, 1974. 840 с.

6. *Дьяконов В.П.* MATLAB и Simulink в электроэнергетике: Справочник / В.П.Дьяконов, А.А.Пеньков. М.: Горячая линия – Телеком, 2009. 816 с.

7. *Жежеленко И.В.* Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат, 2000. 331 с.

8. *Запальский В.Н.* Влияние отклонения напряжения и частоты на качество электроснабжения морского подвижного объекта / В.Н.Запальский, К.Н.Запальский // Вестник КДПУ им. М.Остроградского. Вып. 3(56). 2009. Ч. 2. 189 с.

9. *Зиновьев Г.С.* Улучшение электромагнитной совместимости выпрямителей трехфазного тока и питающей сети // Электр. питание. 2001. № 1. С. 19-22.

DOI *10.18454/PMI.2016.6.853*

10. *Козярук А.Е.* Вентильные преобразователи в судовых электромеханических системах / А.Е.Козярук, Е.Г.Плахтына. Л.: Судостроение, 1987. 192 с.

11. *Копылов И.П.* Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа, 2001. 327 с.

12. *Коробко Г.И.* Анализ построения силовых схем стабилизаторов переменного напряжения с широтно-импульсными преобразователями / Г.И.Коробко, С.В.Попов. Электрооборудование промышленных установок: Межвузовский сборник научных трудов / НГТУ. Н.Новгород, 2001. С. 25-28.

13. *Лазарев Ю.В.* Моделирование процессов и систем в MATLAB. СПб.: БХВ – Петербург, 2005. 512 с.

14. *Розанов Ю.К.* Современные методы регулирования качества электроэнергии средствами силовой электроники / Ю.К.Розанов, М.В.Рябчинский, А.А.Кваснюк // Электротехника. 1999. № 4. С. 28-32.

15. Правила классификации и постройки судов: В 4-х т. СПб: Российский морской регистр судоходства, 2013. Т. 3. 69 с.

16. Справочник судового электротехника: В 3-х т. / Под ред. Г.И.Китаенко. Т. 2. Судовое электрооборудование. Л.: Судостроение, 1980. 624 с.

17. *Черных И.В.* Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, Sim Power Systems и Simulink. СПб: Питер, 2008. 288 с.

18. *Шидловский А.К.* Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях / А.К.Шидловский, А.Ф.Жаркин. Киев: Наукова думка, 2005. 210 с.

19. Электротехническая совместимость электрооборудования автономных систем / Под ред. А.П.Булекова. М.: Энергоатомиздат, 1995. 352 с.

20. *Qiuli Yu, Dr. Noel N.Schulz.* Design, Modeling and Simulation of Power Generation and Electric Propulsion System for IPS for All-Electric Ships // American society of naval engineers. Virginia, 2007. Vol. 358. P. 1-8.

Авторы: **И.А.Паньков**, *главный инженер проекта*, *pankov-ivan@rambler.ru* (*Спецстройпроект № 3*, *Санкт-Петербург*, *Россия*), **В.Я.Фролов**, *д-р техн. наук*, *профессор*, *заведующий кафедрой*, *froloveed@gmail.com* (*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*, *Санкт-Петербург*, *Россия*).

Статья принята к публикации 02.08.2016.