DOI: 10.25515/PMI.2017.5.563

УДК 621.311.001.57

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

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

С постоянным развитием электроники для управления и контроля работы за ответственными элементами электроэнергетических систем повышаются и требования к качеству электроэнергии. Вопросы повышения качества электроэнергии находят ответы в системах электроснабжения, которые относятся к системообразующим, ввиду их более широкого распространения в отличие от автономных электроэнергетических систем. В свою очередь, с развитием морского и речного флота, с появлением такого перспективного направления для добычи полезных ископаемых, как Арктика, автономные электроэнергетические установки приобретают особую важность. Одной из основных проблем таких систем является малая изученность проблемы качества электроэнергии. В статье представлена модель автономной электроэнергетической системы. Для моделирования таких систем все чаще и чаще используют пакет MathLab с приложением Simulink. С помощью разработанной модели приводится оценка качества электроэнергии в ней, сравнение полученной оценки в существующих системах и предлагается современное решение для улучшения качества электроэнергии.

***Ключевые слова*:** модель Simulink, автономная электроэнергетическая система, электромагнитная совместимость, качество электрической энергии

***Как цитировать эту статью*:** Паньков И.А. Повышение качества электроэнергии в автономных электроэнергетических системах / И.А.Паньков, В.Я.Фролов // Записки Горного института. 2017. Т. 227. С. 563-568. DOI: 10.25515/PMI.2017.5.563

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 [6, 16]. Особенно это касается автономных электроэнергетических систем, к которым относятся судовые (СЭЭС) и буровые электроэнергетические системы (БЭЭС). Опыт их эксплуатации показывает, что задача поддержания надлежащего уровня напряжения и частоты на шинах главных распределительных щитов в различных режимах работы, а также коэффициентов несимметрии нагрузок решается в современных автономных энергетических системах (АЭЭС) без особых проблем. Этого 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 АЭЭС нелинейных потребителей, к которым относятся управляемые и неуправляемые выпрямители, преобразователи частоты, светотехническое оборудование и др. Потребление нелинейными приемниками несинусоидального тока приводит к генерации в сеть высших гармоник тока, которые искажают форму напряжения сети. Размер искажения напряжения в АЭЭС определяется мощностью статических преобразователей, их схемой, индуктивным сопротивлением генератора и сети высшим гармоникам, глубиной регулирования напряжения и пр. Наличие высших гармоник напряжения в судовой сети негативно сказывается на работе как потребителей, так и источников электроэнергии, которыми в АЭЭС являются дизель-генераторные установки [1, 8, 9, 20, 21].

Гармоники воздействуют на генератор негативным образом, ухудшая как его работу, так и работу всей АЭЭС в целом. При уровне гармоник, выше нормируемого, в системе происходят ложные срабатывания защиты и некорректная работа систем управления, что может вывести из строя всю электроустановку. Системы управления оборудованием, в частности силовым приводом, из-за искажений не способны работать надлежащим образом, так как искажения искривляют синусоиду тока и напряжения, вследствие чего оборудование либо отключается, либо выходит из строя, что в ответственных АЭЭС недопустимо из-за важности выполняемых ими функций.

Целью работы является определение уровня гармоник в существующих АЭЭС, оценка их влияния на генератор и разработка современного способа уменьшения уровня гармонических составляющих в сети действующей АЭЭС. Для достижения поставленных целей необходимо смоделировать работу АЭЭС. Применение современных программных продуктов для математиче-

DOI: 10.25515/PMI.2017.5.563

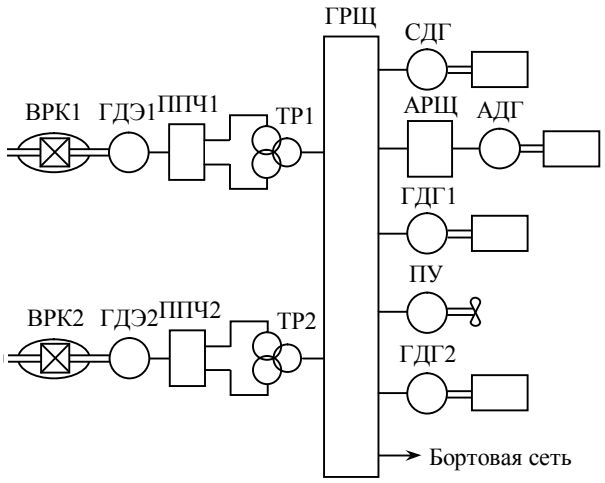


Рис.1. Структурная схема судовой электроэнергетической системы

ского 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 [7, 15, 19].

Методика исследования. В состав главной дизель-электрической энергетической установки (рис.1) судна входят: два главных дизель-генераторных агрегата мощностью по 1000 кВт (ГДГ1, 2), стояночный дизель-генератор (СДГ), два гребных электродвигателя асинхронного типа мощностью по 550 кВт (ГЭД1, 2), два полупроводниковых преобразователя частоты (ППЧ1, 2) мощностью 700 кВ·А, два трехобмоточных повышающих трансформатора мощностью 800 кВ·А (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 [2, 3, 12, 18].

В рамках данной работы рассматривается аварийная ситуация, в которой вышел из строя один основной дизель-генератор и питание двух винторулевых колонок осуществляется от одного оставшегося в работе дизель-генератора. Схема СЭЭС в среде MathLab представлена на рис.2.

Блок «Дизельный двигатель» [22] 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 [7]. Для оценки работы системы при резкопеременной нагрузке блоки, моделирующие привод с частотным управлением, настроены на постоянное резкое увеличение нагрузки на валу.

Результаты исследования. Полученная синусоида тока приведена на рис.3. Как можно заметить, ее форма отличается от эталонной. Анализ гармонических составляющих показывает, что коэффициент нелинейных искажений в системе составляет порядка 25 %, что является недопустимым для нормальной работы оборудования.

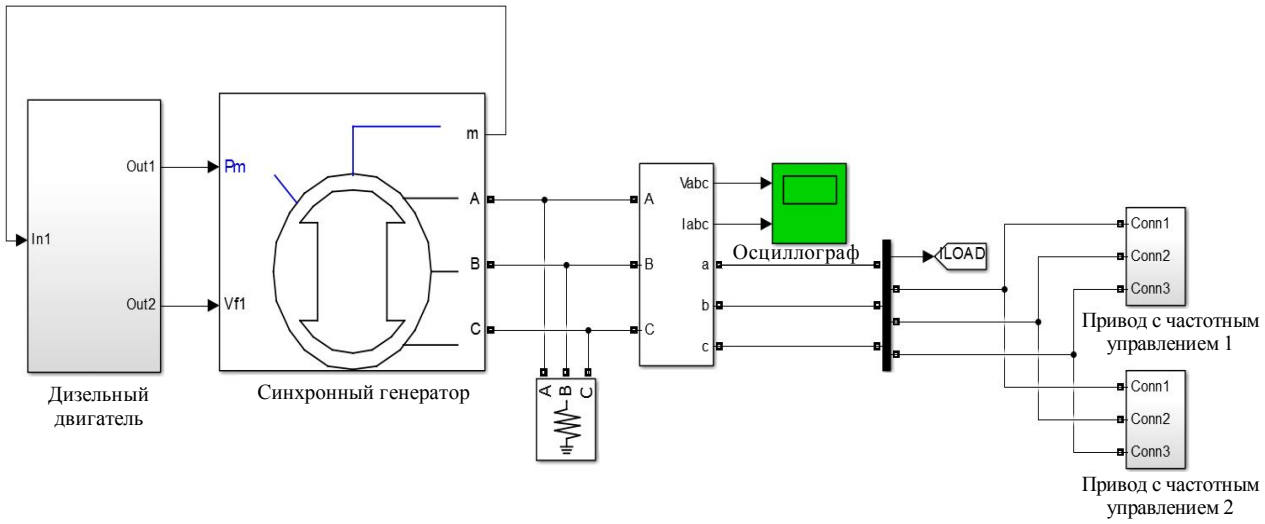


Рис.2. Схема судовой электроэнергетической системы

DOI: 10.25515/PMI.2017.5.563

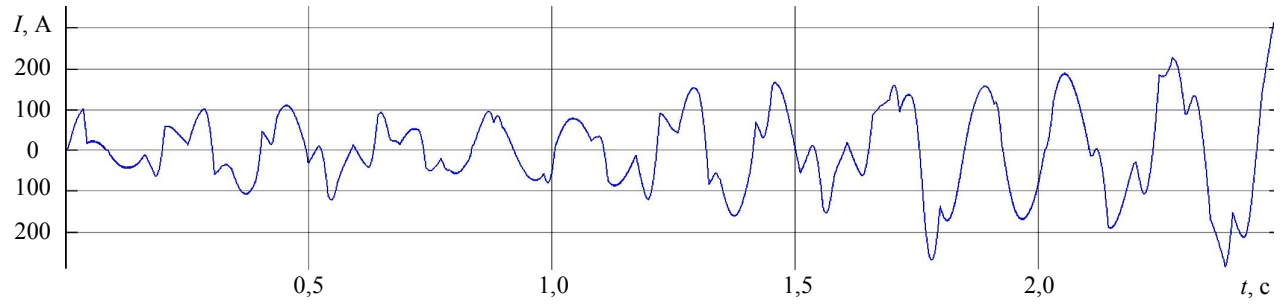


Рис.3. Синусоида тока в смоделированной СЭЭС

Выявленные в ходе моделирования гармонические искажения подтверждаются и в процессе эксплуатации АЭЭС. Анализ работы электроэнергетической системы самоподъемной буровой установки (СПБУ) «Арктическая» в разных режимах приведен в таблице.

Результаты измерений при работе СПБУ «Арктическая» в разных режимах работы

Режим работы	Σ*P*, кВт	Σ*Q*, квар	cos ϕ	THDU1, %	THDU2, %	THDI, %
Бурение:	1780	2446	0,59	***12***	0	***16,5***
по технологии 1						
по технологии 2	1594	2158	0,59	***10***	9,8	***12,4***
Спускоподъемные операции:	1380	800	0,86	4	3,8	***10***
по технологии 1						
по технологии 2	1550	1700	0,67	8	9,2	***15,1***
Цементирование	800	480	0,86	0,6	0	0,5

Примечание. Жирным курсивом выделены значения, превышающие нормируемые.

Измерения взяты на разведочной скважине 2300 м, где: Σ*P* – активная мощность в БЭЭС, суммарно по двум вводам; Σ*Q* – реактивная мощность в БЭЭС, суммарно по двум вводам; THDU1 – коэффициент нелинейных искажений напряжения в сети 660 В; THDU2 – коэффициент нелинейных искажений напряжения в сети 400 В; THDI – коэффициент нелинейных искажений тока в БЭЭС.

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 устройств являются их значительные массогабаритные показатели, что представляется критичным в автономных электроэнергетических системах, так как увеличение массогабаритных показателей приводит к повышению эксплуатационных издержек. Современным средством является активный фильтр [10, 17].

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. Вместе с компактными размерами силовых транзисторов это обеспечивает небольшие габариты силовой части активного фильтра [11].

Упрощенная модель активного фильтра гармоник приведена на рис.4 [5]. Основными блоками активного фильтра являются инвентор и накопители энергии – конденсаторы. В модели используется упрощенная система управления активным фильтром: для формирования сигналов управления инвентором используется блок формирования эталонного сигнала, действующее значение и частота которого соответствуют измеренным значениям тока нелинейной нагрузки.

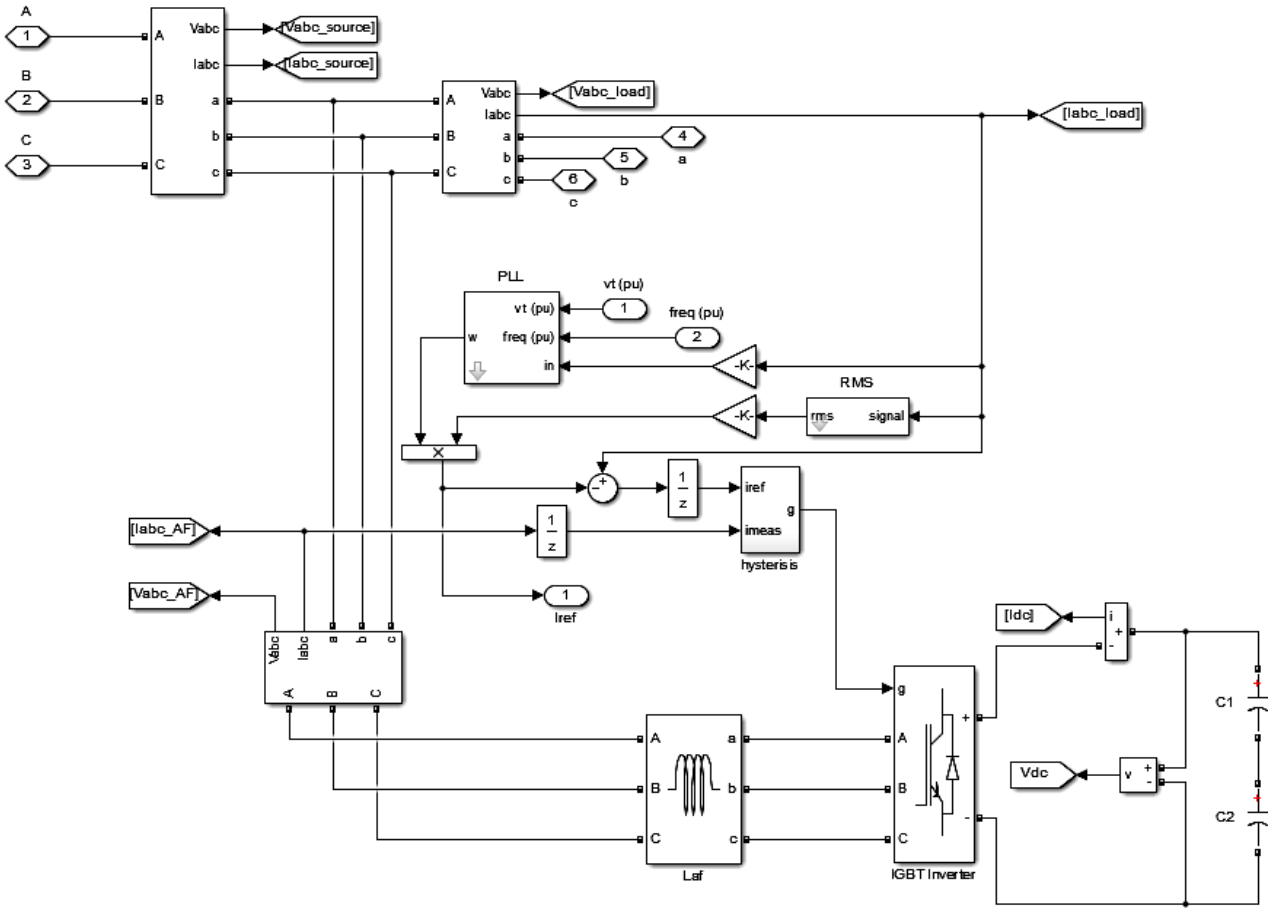


Рис.4. Упрощенная модель активного фильтра гармоник

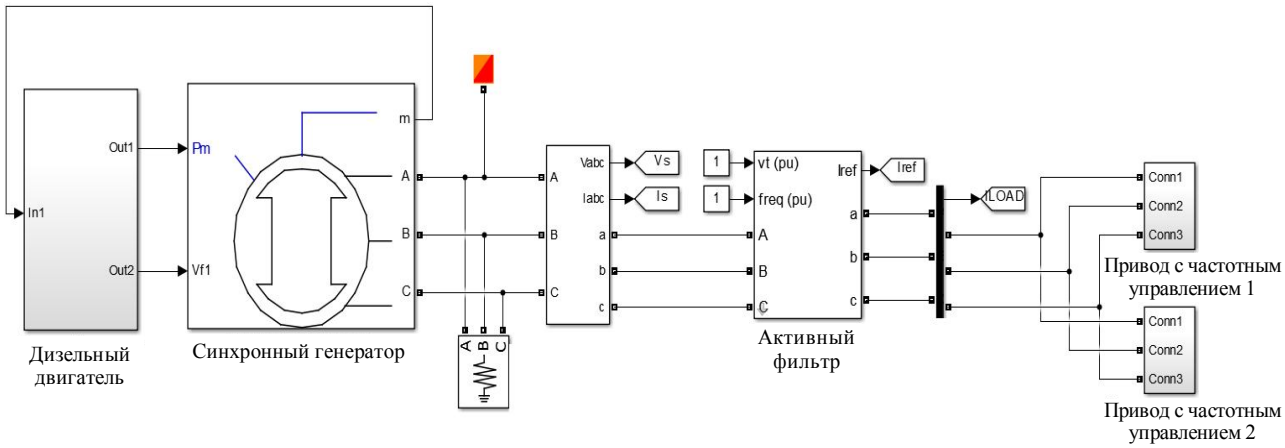


Рис.5. Схема судовой электроэнергетической системы с включенным в нее активным фильтром

В отличие от приведенной модели, активные фильтры ведущих мировых производителей строятся на основе мощных микропроцессорных систем с применением специальных процессоров для цифровой обработки сигналов, что позволяет добиваться высоких показателей динамической компенсации реактивной мощности и фильтрации нелинейных искажений в системе. Модель АЭЭС с активным фильтром в ней представлена на рис.5.

Результаты работы. Для сравнения на диаграммах рис.6, *а* приведены результаты с работающим активным фильтром (1) и без него (2). Диаграмма рис.6, *б* показывает корректирующий сигнал активного фильтра.

Заключение. Активный фильтр высших гармоник является современным средством для борьбы с нелинейными искажениями. Однако его работа в автономных электроэнергетических

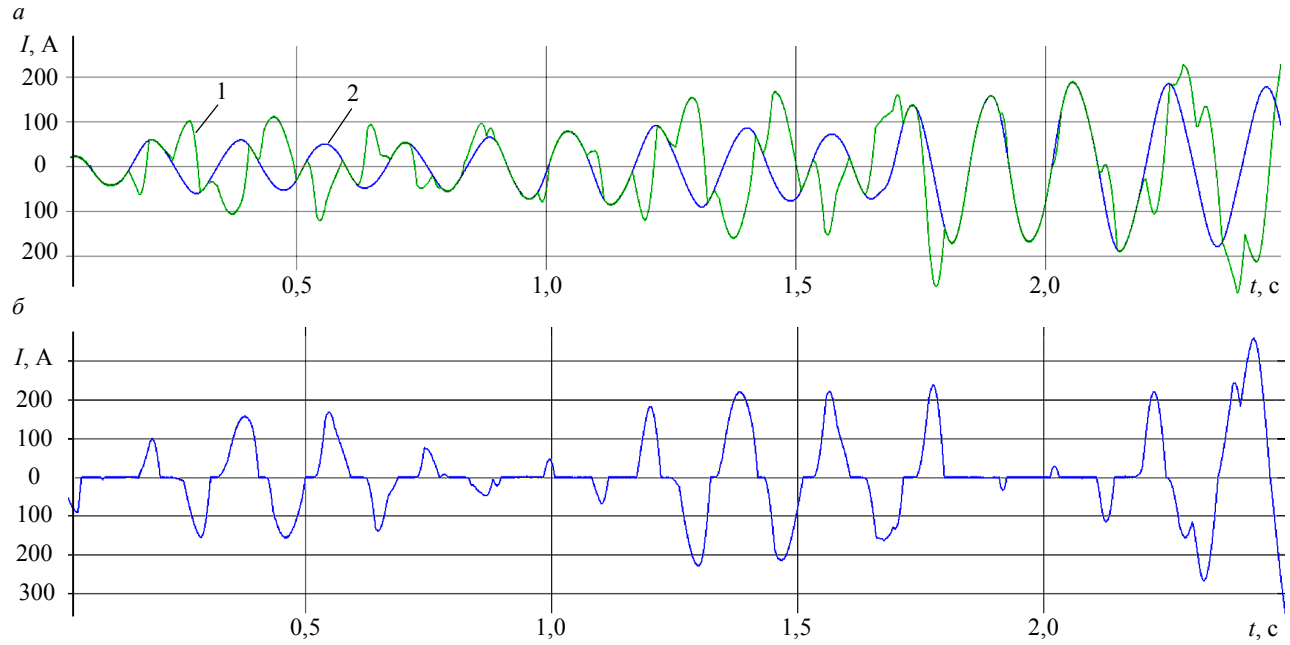


Рис.6. Результаты работы активного фильтра

системах, к которым относятся, в частности, судовые и буровые электроэнергетические системы практически не изучена, поэтому данное направление исследований останется актуальным. Это связано с возрастающей в наши дни важностью такого стратегически важного направления для добычи нефти и газа, как Арктика. Добыча в этом регионе предусматривается с помощью буровых установок морского базирования, на которых используются силовые выпрямители и частотные преобразователи, которые, в свою очередь, ухудшают работу электроэнергетической системы буровой установки и способны вывести ее из строя, что практически недопустимо в суровых условиях арктического климата и большой удаленности буровых установок. В частности, для уменьшения нелинейных искажений в работе электроэнергетической системы СПБУ «Арктическая», результаты которой приведены в таблице, необходимо установить два активных фильтра на 375 А.

Анализ существующих пассивных способов и устройств для снижения нелинейных искажений напряжения показал их недостаточную результативность, громоздкость или практическую нецелесообразность использования в АЭЭС. Активные фильтры позволяют целенаправленно воздействовать на нелинейные искажения напряжения, обеспечивать высокую эффективность компенсации реактивной мощности в меньших массогабаритных показателях и одновременно снижать коэффициент нелинейных искажений, создаваемый работой нелинейных потребителей. Таким образом, использование активных фильтров в автономных электроэнергетических системах, к которым относится морской транспорт и автономные буровые установки, способно привести к экономии ресурсов за счет выполнения большого спектра работ в сравнительно малых габаритах.

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: Учебник для вузов / 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 Мордовского университета, 1993. 343 с.

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

5. *Вольдек А.И.* Электрические машины: Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. Изд. 2-е, перераб. и доп. Л.: Энергия, 1974. 840 с.

6. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 18 с.

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

8. *Жежеленко И.В.* Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 4-е изд. перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2000. 331 с.

9. *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. 2009. Вып. 3 (56). Часть 2. 189 с.

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

11. Качество электрической энергии горных предприятий / Н.М.Кузнецов, Ю.В.Бебихов, А.В.Самсонов, А.Н.Егоров, А.С.Семенов. М.: Изд-во Российской академии естествознания, 2012. 68 с.

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

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

14. *Коробко Г.И.* Анализ построения силовых схем стабилизаторов переменного напряжения (СПН) с широтно-импульсными преобразователями / Г.И.Коробко, С.В.Попов // Электрооборудование промышленных установок: Межвуз. сб. науч. трудов. Нижний Новгород: НГТУ, 2001. С. 25-28.

15. *Лазарев Ю.В.* Моделирование процессов и систем в MATLAB: Учебный курс. СПб: БХВ-Петербург, 2005. 512 с.

16. Правила классификации и постройки морских судов: В 4 т. Т. 3. СПб: Российский морской регистр судоходства, 2013. 104 с.

17. *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.

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

19. *Черных И.В.* Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. СПб: Питер, 2008. 288 с.

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

21. Электротехническая совместимость электрооборудования автономных систем / Под ред. А.П.Булекова. М.: Энергоатомиздат, 1995. 325 с.

22. *Qiuli Yu.* Design, modeling and simulation of power generation and electric propulsion system for IPS for all-electric ships / Qiuli Yu, Dr. Noel N.Schulz // 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*, *froloveed@gmail.com* (*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*, *Санкт-Петербург*, *Россия*).

Статья принята к публикации 28.03.2017.