

DOI: 10.24143/2073-1574-2021-2-90-98
УДК 681.5

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ МОРСКИХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

А. С. Соболев¹, А. В. Вынга¹, С. Г. Черный^{1,2}

¹ Керченский государственный морской технологический университет,
Керчь, Российская Федерация

² Государственный университет морского и речного флота
им. адмирала С. О. Макарова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Исследованы факторы, влияющие на качество электроэнергии в системах электроснабжения морских судов. Рассматриваются проблемы, вызванные электромагнитными помехами на судах, в числе которых падение напряжения в электрических сетях вследствие наличия нелинейных нагрузок в системе, асимметричность питания. Выявлена необходимость использования активных фильтров в автономных энергосистемах. Разработана модель активного фильтра для замкнутой системы питания корабля с нелинейной несимметричной нагрузкой. Проиллюстрирована схема модели активного фильтра в MATLAB/Simulink. Моделирование проводилось с учетом различных параметров системы. Приведен пример программного кода для реализации преобразования координат из «abc» в «dq». Отмечен недостаток рассматриваемой схемы – при увеличении асимметрии и нелинейности нагрузки пропорционально увеличиваются потери мощности на фильтрацию тока. Рассматриваются зависимости измеренного значения гармонических искажений напряжения (согласно International Electronic Commission (IEC) 61000-2-4:2002) и наблюдаемых явлений в установке; измеренного значения гармонических искажений тока и наблюдаемых явлений в установке. Представлены схемы блока трехфазного инвертора на полевых транзисторах, блока нелинейной нагрузки. В результате моделирования сделан вывод, что компенсирующий фильтр активного тока повысит качество электроэнергии на борту судна. Фильтр устраняет несимметричность, сглаживает гармоники тока и компенсирует реактивную составляющую токов. Использование подобной схемы целесообразно для автономных систем ограниченной мощности на судах торгового флота.

Ключевые слова: гармоника, ток, MATLAB, моделирование, искажение напряжения.

Для цитирования: Соболев А. С., Вынга А. В., Черный С. Г. Разработка имитационной модели активного фильтра для морских интеллектуальных транспортных систем // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2021. № 2. С. 90–98. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-2-90-98.

Введение

Современные энергетические системы на большинстве судов, как правило, вынуждены работать в сложной электромагнитной среде вследствие весьма ограниченных мощностей системы, вырабатывающей электроэнергию. Ограничение мощности обусловлено присутствием оборудования, работающего в режиме резко изменяемой нагрузки, на судах современного флота. Вторым весомым фактором является воздействие работы токоведущего оборудования на общую электромагнитную среду. Работа приводит к генерации высших гармоник, чей уровень имеет большое отклонение от нормативов, регламентированных ГОСТ 32144-2013 [1].

Наличие всех перечисленных условий неизбежно приводит к неподконтрольным изменениям формы, а также непосредственно величины напряжения, питающего потребителя. Такого рода негативное воздействие на параметр качества электрической энергии в судовой энергетической системе приводит к неизбежному сокращению срока службы оборудования в целом. Как следствие, появляются значительные потери в потребителях и токоведущих узлах, что неизбежно приводит к повышенному расходу топлива.

Проблемы, вызванные электромагнитными помехами на судах

Перечислим приоритетные проблемы в рамках актуализации энергетических и автоматизированных систем морского транспорта [2–5]:

1. Высшие гармонические составляющие напряжения и искажения за счет электромагнитных помех. Зачастую их присутствие объясняется наличием нелинейных нагрузок в судовой электроэнергетической системе. Токи высших гармоник, которые протекают в электросетях, вызывают паразитные падения напряжения в электрических сетях;

2. Несимметричность. Однофазные приемники нередко применяются на судах, что приводит к асимметричному питанию. Несимметричность токов неизбежно ведет к несимметричности напряжения. Данный фактор способствует образованию ненормальных фазных, а также линейных напряжений. Таким образом, происходит местный перегрев роторов синхронных генераторов, а также случаются нежелательные колебания их отдельных узлов. В результате снижается пропускная способность трехфазной системы в линиях электропередач и трансформаторах, нарушается работа асинхронных двигателей, выпрямителей, что делает использование регулирующих и компенсационных установок менее эффективным. Наличие данных факторов приводит к дополнительным потерям активной мощности.

Возникает проблема контроля качества электроэнергии в петлевых судовых электрических сетях. Активные фильтры тока решают проблему гармонических токов в энергосистеме. Они также компенсируют реактивную мощность и балансируют нагрузку по трем фазам (если нагрузка несимметрична). Таким образом, гармонические и реактивные составляющие нагрузки обеспечиваются шунтирующими фильтрами активной мощности. Задача работы – снизить влияние описанных выше негативных факторов на судовую сеть. Предлагается использовать активный фильтр параллельно с нелинейной несимметричной нагрузкой для решения рассматриваемой проблемы. Одним из этапов внедрения оборудования на судно является предварительное имитационное математическое моделирование применения устройства в заданных условиях.

Разработка математической имитационной модели

Для моделирования использовался программный комплекс MATLAB. Разработаны модели отдельного инвертора напряжения и его каскадной связи с системой управления. Общий вид модели представлен на рис. 1.

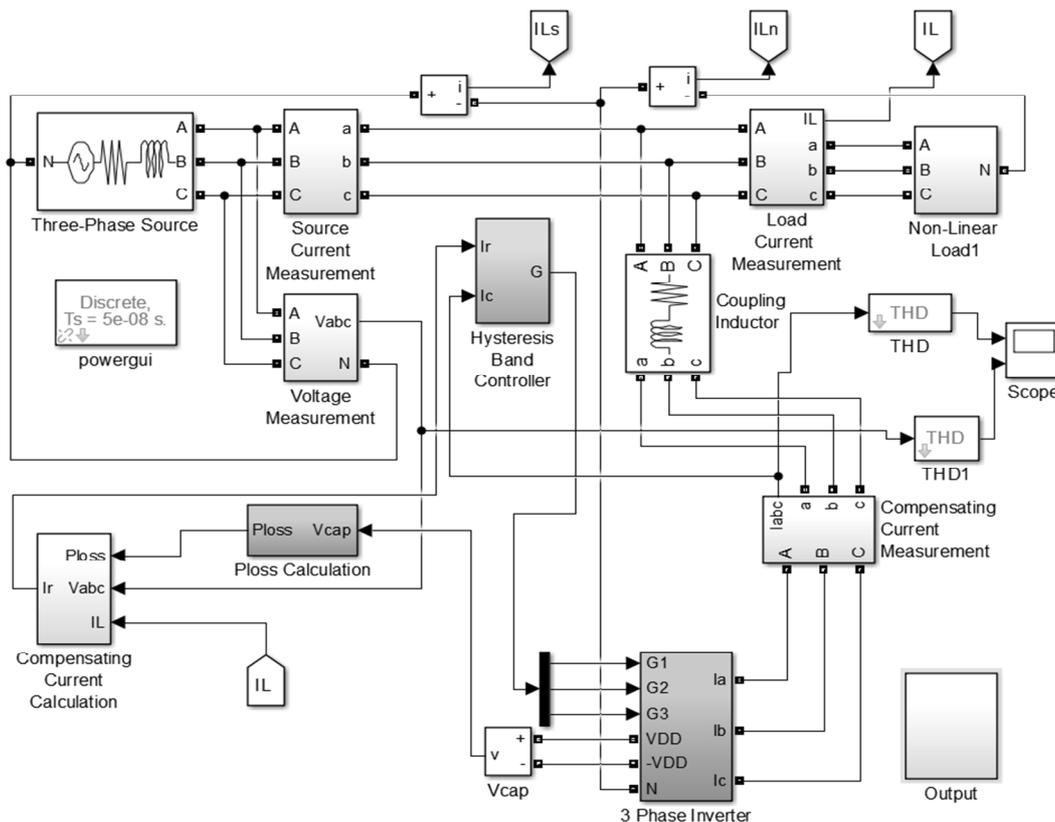


Рис. 1. Общий вид модели активного фильтра в MATLAB/Simulink

Модель активного фильтра работает следующим образом. Нелинейная нагрузка приводит к неравномерному потреблению тока. Блок вычисления компенсирующего тока сравнивает значения опорных токов и токов на выходе. Опорный ток – это среднее мгновенное значение тока нагрузки без задержки по фазе относительно соответствующего фазного напряжения. Далее ток нагрузки преобразуется в систему координат «dq0». Начальное положение оси d выбирается по тому принципу, что активная составляющая тока задается осью d. Колебательная составляющая по осям d и q тока нагрузки необходима для удаления гармоник. Фиксированная часть оси q должна быть введена для компенсации реактивной мощности. Компонент нулевой последовательности требуется для балансировки нагрузки. Программа написана на языке MATLAB. Пример программного кода для реализации преобразования координат из «abc» в «dq»:

```

<function [i0,p0,p,q]= fcn(va,vb,vc,ial,ibl,icl)
v_zero=(va+vb+vc)/sqrt(3);
v_alpha=(va-vb/2-vc/2)*sqrt(2/3);
v_beta=(vb-vc)/sqrt(2);
il_zero=(ial+ibl+icl)/sqrt(3);
il_alpha=(ial-ibl/2-icl/2)*sqrt(2/3);
il_beta=(ibl-icl)/sqrt(2);
i0=il_zero;
p0=v_zero.*il_zero;
p=v_alpha.*il_alpha+v_beta.*il_beta;
q=v_beta.*il_alpha-v_alpha.*il_beta;».

```

Следовательно, ток, который необходимо ввести для компенсации, рассчитывается в системе координат «dq0». Далее выполняется преобразование в трехфазную систему координат «abc». Этот ток является эталонным компенсационным током и подается на трехфазный инвертор, который создает значение компенсационного тока на основе отрицательной обратной связи. Инвертор собран на транзисторах MOSFET по трехфазной мостовой схеме (рис. 2).

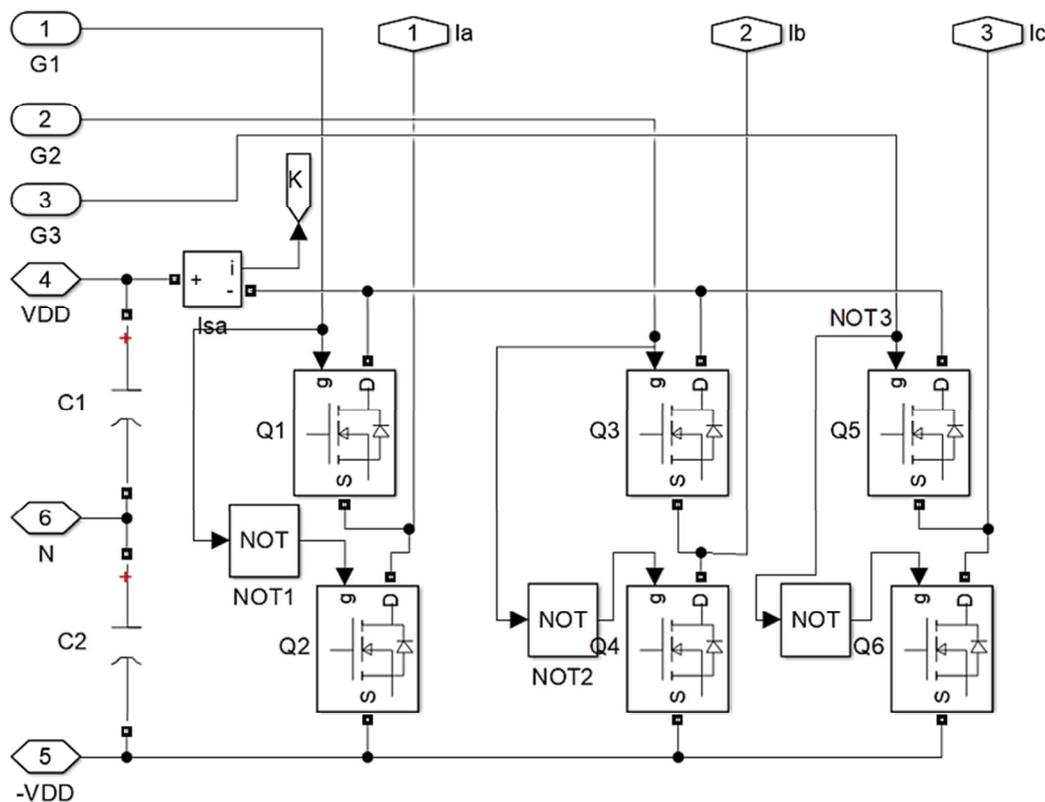


Рис. 2. Блок трехфазного инвертора на полевых транзисторах

Компенсирующий ток вводится в сеть через трехфазный инвертор с использованием метода контроля тока полосы гистерезиса (НВСС). Через дроссель подается ток на соответствующую фазу. Согласно закону Кирхгофа токи складываются таким образом, что симметричный синусоидальный ток потребляется от источника независимо от тока нагрузки. Однако недостаток этой схемы заключается в том, что при большей асимметрии и нелинейности нагрузки пропорционально возрастают потери мощности на фильтрацию тока. В дальнейшем схема предусматривает сохранение качества электроэнергии при увеличении ее потребления.

Блоки THD и THDi позволяют оценить гармонические искажения тока и напряжения соответственно.

Общее гармоническое искажение напряжения выражается как

$$\text{THDu} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} = \sqrt{\left(\frac{U_{rms}}{U_1}\right)^2 - 1},$$

где U_{rms} – среднеквадратичное значение напряжения, В.

Ток при этом равен:

$$\text{THDi} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_1}\right)^2 - 1},$$

где I_{rms} – текущее среднеквадратичное значение, А; I_h – амплитудное значение тока гармоник частоты h ; I_1 – амплитудное значение тока основной гармоники, А.

Согласно International Electronic Commission (IEC) 61000-2-4:2002 [6] измеренное значение гармонических искажений напряжения и наблюдаемые явления в установке взаимосвязаны следующим образом:

1. Нормальным считается значение гармонических искажений напряжения менее 5 %. Нет опасности неисправности;
2. Значение гармонических искажений напряжения от 5 до 8 % указывает на существенные гармонические помехи. Возможны некоторые неисправности;
3. Значение гармонических искажений напряжения более 8 % указывает на очень большие гармонические помехи. Возможны сбои в работе. Требуется подробный анализ и использование устройств подавления помех;

4. Суммарное гармоническое искажение тока характеризует искажение волны тока.

Измеренное значение гармонических искажений тока и явления, наблюдаемые в установке:

1. Нормальным считается значение гармонических искажений напряжения менее 10 %. Нет опасности неисправности;
2. Значения гармонических искажений тока от 10 до 50 % указывают на значительные гармонические помехи. Возникает опасность нагрева, что требует завышения параметров кабелей и источников;
3. Значения гармонических искажений тока более 50 % предполагают очень большие гармонические помехи. Возможны сбои в работе.

Созданная модель имеет следующие параметры:

- линейное напряжение источника питания – 50 В;
- частота – 50 Гц.

Сопротивления и индуктивности следующих номиналов подключаются к каждой фазе как нелинейная нагрузка через универсальный мост (рис. 3):

- активное сопротивление фазы А – 25 Ом;
- активное сопротивление фазы В – 40 Ом;
- активное сопротивление фазы С – 30 Ом;
- индуктивность фазы А – 0,5 Гн;
- индуктивность фазы В – 0,8 Гн;
- индуктивность фазы С – 0,9 Гн.

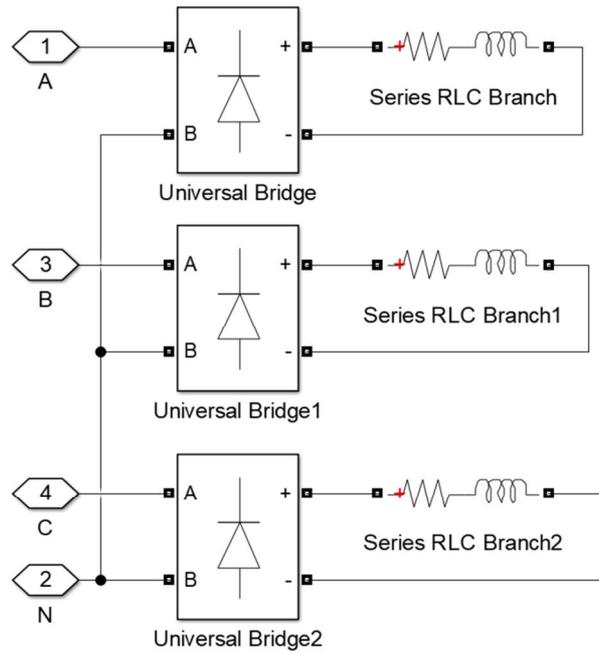


Рис. 3. Блок нелинейной нагрузки

Моделирование результатов

Моделирование проводилось для двух случаев – без активного фильтра и с текущей фильтрацией. Нелинейная нагрузка отводит электрический ток от сети в виде меандра в обоих случаях моделирования (рис. 4, 5).

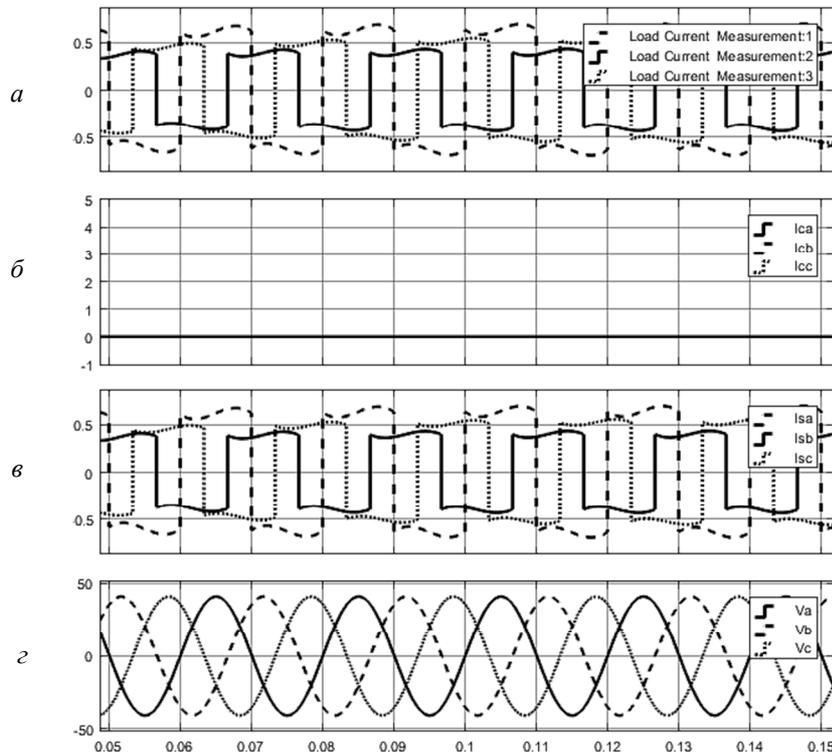


Рис. 4. Результаты моделирования без активного фильтра:

а – ток нагрузки; *б* – ток активного фильтра; *в* – ток источника; *г* – напряжение источника

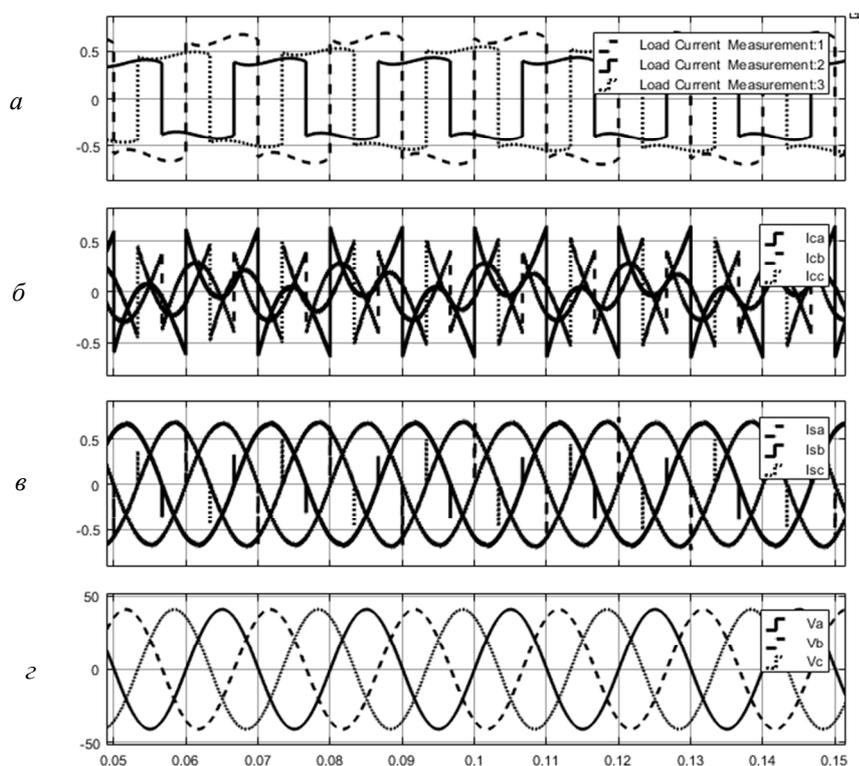


Рис. 5. Результаты моделирования с активным фильтром:
a – ток нагрузки; *б* – ток активного фильтра; *в* – ток источника; *г* – напряжение источника

С такими же параметрами ток берется из источника без использования активного фильтра. Для рассматриваемого случая коэффициент гармонических искажений для напряжения составляет 0,1 %, а для тока – 60 %. Величина гармонических искажений тока значительно превышает требования стандарта IEC 61000-2-4:2002. В реальных устройствах такой ток отрицательно влияет на источник и другие сетевые устройства [2].

При моделировании с активным фильтром (рис. 5) активная система фильтрации создает ток таким образом, что при добавлении токов фильтра и нагрузки от источника потребляется симметричный трехфазный ток. В ходе моделирования были получены следующие коэффициенты гармонических искажений: напряжения – 0,0016 %; тока – 3 %. Результаты, полученные при моделировании, соответствуют требованиям стандарта IEC 61000-2-4:2002. Так же, как на рис. 2, потребляемый ток источника не только симметричен и синусоидален, но и совпадает по фазе с напряжением источник, тем самым устраняя присутствие реактивности в системе и, следовательно, дополнительное потребление энергии.

Результаты моделирования подтвердили, что использование фильтра активного тока в судовой системе электроснабжения с обратной связью позволит сохранить качество электроэнергии и снизить составляющую реактивного тока [6, 7]. Активный фильтр поддерживает гармоничность тока, потребляемого от источника. Таким образом, использование сложных электронных устройств позволяет контролировать качество электроэнергии на борту, что, в свою очередь, снижает энергопотребление и увеличивает срок службы судового оборудования. Результаты моделирования проиллюстрировали возможность использования такого рода фильтра в системе питания корабля.

Заключение

В ходе исследования в среде моделирования MATLAB/Simulink была реализована модель замкнутой электроэнергетической системы корабля с реальным источником напряжения, несимметричной нелинейной нагрузкой и компенсирующим активным фильтром. Предложенные принципы реализации активного фильтра в режиме источника тока позволяют совместить возможности многоуровневого формирования напряжения с высоким быстродействием,

что способствует повышению эффективности фильтра при нелинейной нагрузке. Разработанная модель активного фильтра позволяет снизить гармонические искажения по току с 60 до 3 %, что соответствует требованиям ИЕС 61000-2-4:2002.

Применение разработанного фильтра гармоник поспособствует предотвращению:

- преждевременного старения оборудования и, как следствие, необходимости его замены ранее запланированного срока, если оно изначально не обеспечивало запас мощности;
- перегрузок в распределительной сети, которые приводят к увеличению потребления электроэнергии и увеличению потерь;
- искажения формы тока, вызывающего ложное срабатывание выключателей, что может привести к остановке производственного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *ГОСТ 32144-2013*. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения М.: Стандартинформ, 2014. 88 с.
2. *ГОСТ Р 51317.2.4-2000 (МЭК 61000-2-4-94)*. Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Уровни электромагнитной совместимости для низкочастотных кондуктивных помех в системах электроснабжения промышленных предприятий. М.: Изд-во стандартов, 2001. 94 с.
3. *Соболев А. С., Черный С. Г., Ерофеев П. А.* Разработка имитационных моделей для точной настройки и отладки судовых преобразователей частоты // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2020. № 4. С. 95–104.
4. *Anant G. Kulkarni, Dr. Manoj Jha, Dr. M. F. Qureshi.* Simulation of fault diagnosis of induction motor based on spectral analysis of stator current signal using fast fourier transform // IJISSET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. 2014. Vol. 1. Iss. 4. P. 104–136.
5. *Niranjan Bhujel.* Three Phase Shunt Active Power Filter using dq0 transformation MATLAB Central File Exchange. Retrieved July 30, 2020. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/62006-three-phase-shunt-active-power-filter-using-dq0-transformation> (дата обращения: 01.01.2021).
6. *Черный С. Г., Доровской В. А.* Методы и средства оценивания интроспективного мониторинга // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2020. № 1. С. 75–87.
7. *Черный С. Г., Авдеев Б. А., Вынгра А. В.* Разработка имитационной модели асинхронного электропривода с применением векторного управления, как компонента структурного программного модуля // Информ. технологии и вычисл. системы. 2020. № 2. С. 75–84.

Статья поступила в редакцию 17.03.2021

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Сергеевич Соболев – магистрант кафедры машин и аппаратов пищевых производств; Керченский государственный морской технологический университет; Россия, 298309, Керчь; sobolev.alexandr1496@gmail.com.

Алексей Викторович Вынгра – аспирант кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства; Керченский государственный морской технологический университет; Россия, 298309, Керчь; Elag1995@gmail.com.

Сергей Григорьевич Черный – канд. техн. наук, доцент; зав. кафедрой электрооборудования судов и автоматизации производства; Керченский государственный морской технологический университет; Россия, 298309, Керчь; доцент кафедры комплексного обеспечения информационной безопасности; Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова; Россия, 198035, Санкт-Петербург; sergiiblack@gmail.com.



DEVELOPING SIMULATION MODEL OF ACTIVE FILTER FOR MARINE INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS

A. S. Sobolev¹, A. V. Vyngra¹, S. G. Chernyi^{1,2}

¹ Kerch State Maritime Technological University,
Kerch, Russian Federation

² Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article studies the factors influencing the quality of electricity in the power supply systems of sea vessels. Problems caused by electromagnetic interference on ships including voltage drop in the electrical networks due to the nonlinear loads in the system, as well as power asymmetry are considered. The necessity of using active filters in autonomous power systems is found out. A model of an active filter for a closed power supply system with a nonlinear asymmetric load has been developed. The diagram of the active filter model in MATLAB / Simulink environment is illustrated. The simulation was carried out paying attention to various parameters of the system. There has been given an example of a program code for transforming the *abc* coordinates to the *dq* coordinates. The disadvantage of the considered circuit is stated: the greater the asymmetry and nonlinearity of the load, the lower the power for current filtering. There are considered the dependences between the measured value of voltage harmonic distortion (according to International Electronic Commission (IEC) 61000-2-4: 2002) and the observed phenomena in the unit; the measured value of the harmonic current distortion and the observed phenomena in the unit. According to the simulation results, it was inferred that the active current compensating filter will improve the quality of power on board the ship. The filter eliminates the imbalance, evens current harmonics and compensates the reactive component of currents. The scheme is advisable for using in autonomous systems of limited power on the merchant ships.

Key words: harmonic, current, MATLAB, simulating, voltage distortion.

For citation: Sobolev A. S., Vyngra A. V., Chernyi S. G. Developing simulation model of active filter for marine intelligent transportation systems. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2021;2:90-98. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2021-2-90-98.

REFERENCES

1. GOST 32144-2013. *Elektricheskaja energija. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaia. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniia obshchego naznacheniiia* [Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Electricity quality standards in general-purpose power supply systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 88 p.
2. GOST R 51317.2.4-2000 (MEK 61000-2-4-94). *Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaia. Elektromagnitnaia obstanovka. Urovni elektromagnitnoi sovmestimosti dlia nizkочастотных кондуктивных помех в системах электроснабжения промышленныkh предприятий* [GOST R 51317.2.4-2000 (IEC 61000-2-4-94). Electromagnetic compatibility of technical means. Electromagnetic environment. Electromagnetic compatibility levels for low-frequency conducted interference in power supply systems of industrial enterprises]. Moscow, Izd-vo standartov, 2001. 94 p.
3. Sobolev A. S., Chernyi S. G., Erofeev P. A. Razrabotka imitatsionnykh modelei dlia tochnoi nastroiки i otladki sudovykh preobrazovatelei chastoty [Development of simulation models for fine tuning and debugging of ship frequency converters]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaja tekhnika i tekhnologija*, 2020, no. 4, pp. 95-104.
4. Anant G. Kulkarni, Dr. Manoj Jha, Dr. M. F. Qureshi. Simulation of fault diagnosis of induction motor based on spectral analysis of stator current signal using fast fourier transform. *IJISSET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 2014, vol. 1, iss. 4, pp. 104-136.
5. Niranjan Bhujel. *Three Phase Shunt Active Power Filter using dq0 transformation MATLAB Central File Exchange*. Retrieved July 30, 2020. Available at: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/62006-three-phase-shunt-active-power-filter-using-dq0-transformation> (accessed: 01.01.2021).
6. Chernyi S. G., Dorovskoi V. A. Metody i sredstva otsenivaniia introspektivnogo monitoringa [Methods and tools for assessing introspective monitoring]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsii*, 2020, no. 1, pp. 75-87.

7. Chernyi S. G., Avdeev B. A., Vyngra A. V. Razrabotka imitatsionnoi modeli asinkhronnogo elektroprivoda s primeneniem vektornogo upravleniia, kak komponenta strukturnogo programmnoho modul'ia [Developing simulation model of asynchronous electric drive using vector control as component of structural software module]. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy*, 2020, no. 2, pp. 75-84.

The article submitted to the editors 17.03.2021

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexandr S. Sobolev – Master's Course Student of the Department of Machines and Apparatuses of Food Production; Kerch State Maritime Technological University; Russia, 298309, Kerch; sobolev.alexandr1496@gmail.com.

Aleksei V. Vyngra – Postgraduate Student of the Department of Ship Electrical Equipment and Industrial Automation; Kerch State Maritime Technological University; Russia, 298309, Kerch; Elag1995@gmail.com.

Sergei G. Chernyi – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Head of the Department of Ship Electrical Equipment and Production Automation; Kerch State Maritime Technological University; Russia, 298309, Kerch; Assistant Professor of the Department of Complex Information Security; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; Russia, 198035, Saint-Petersburg; sergiiblack@gmail.com.

