

## МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СУДНОВОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ІЗ НЕЛІНІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

**А. О. Дранкова, С. С. Міхайков, І. І. Красовський**  
Національний університет «Одеська морська академія»

**Анотація.** Проведено огляд сучасних методів підвищення якості електроенергії суднової системи електроживлення із нелінійним навантаженням. Виконано математичне моделювання систем «Автономне джерело живлення – фільтрокомпенсуючі пристрої – нелінійне навантаження» в пакеті *MATLAB Simulink*, проведено гармонійний аналіз струму та напруги. В якості нелінійного навантаження представлено асинхронний двигун потужністю 1500 кВт з частотним перетворювачем, який працює на електропривод підрулюючого пристрою.

**Ключові слова:** автономне джерело, частотний перетворювач, асинхронний двигун, підрулюючий пристрій, пасивний фільтр, активний фільтр, гібридний фільтр, сумарний коефіцієнт гармонік (THD).

### Введення

Однією з причин погіршення якості електроенергії є наявність нелінійного навантаження у судновій силовій мережі. Широке введення статичних силових перетворювачів, частотно – регульованого електроприводу, енергозберігаючих систем освітлення призводить до зміни характеру електричних навантажень багатьох споживачів. При цьому, споживання електроенергії низької якості, в свою чергу призводить до інжекції в судову силову мережу електромагнітних спотворень, а саме, погіршення форми струму та напруги силової мережі. Провали та кидки напруги, несинусоїдальна форма напруги та струму призводять до збільшення втрат, швидкому старінню ізоляції і зменшенню терміну служби електричних приладів, а також викликають збої у роботі чутливого електронного обладнання та приладів.

Таким чином, аналіз методів підвищення якості електроенергії суднової силової мережі із нелінійним навантаженням є актуальною задачею.

### Ціль роботи

Порівняльний аналіз методів підвищення якості електроенергії суднової високовольтної системи електроживлення з нелінійним навантаженням.

### Матеріали дослідження

В роботі розглядається суднова високо-

вольтна силова мережа напругою 3300 В та лінійною частотою 60 Гц із нелінійним характером навантаження, в якості якого використано комплектний електропривод підрулюючого пристрою потужністю 1,5 МВт.

Огляд методів фільтрації в системі «Автономне джерело – частотний перетворювач – асинхронний двигун – навантаження» показує, що універсальним способом підтримки якості електроенергії є використання спеціальних компенсуючих пристроїв – силових фільтрів гармонік (СФГ). На ряду з ослабленням високочастотних гармонік струму і напруги вони виконують функції компенсації реактивної потужності та регулювання напруги в точці приєднання [1,2,3,7].

СФГ класифікуються за такими ознаками:

- за схемою включення в мережу - паралельні, послідовні і комбіновані структури;
- за типом елементів - пасивні, активні і гібридні структури;
- за числом фаз – однофазні та трифазні структури.

Для проведення досліджень було побудовано чотири моделі в електронному пакеті *Simulink Matlab*: «Автономне джерело із нелінійним навантаженням», «Автономне джерело – пасивний фільтр – нелінійне навантаження», «Автономне джерело – активний фільтр – нелінійне навантаження», «Автономне джерело – гібридний фільтр – нелінійне навантаження».

За допомогою побудованих моделей було проведено гармонійний аналіз напруги та струму

трифазної суднової силової мережі. В моделях використано високовольтний частотний перетворювач з векторним управлінням з діапазоном потужностей 315-16200 кВт, який працює на електропривод підрулюючого пристрою.

На рис.1 зображено модель «Автономне джерело із нелінійним навантаженням», нижче – осцилограма спотворених форм напруги та струму вище вказаної моделі (рис.2).

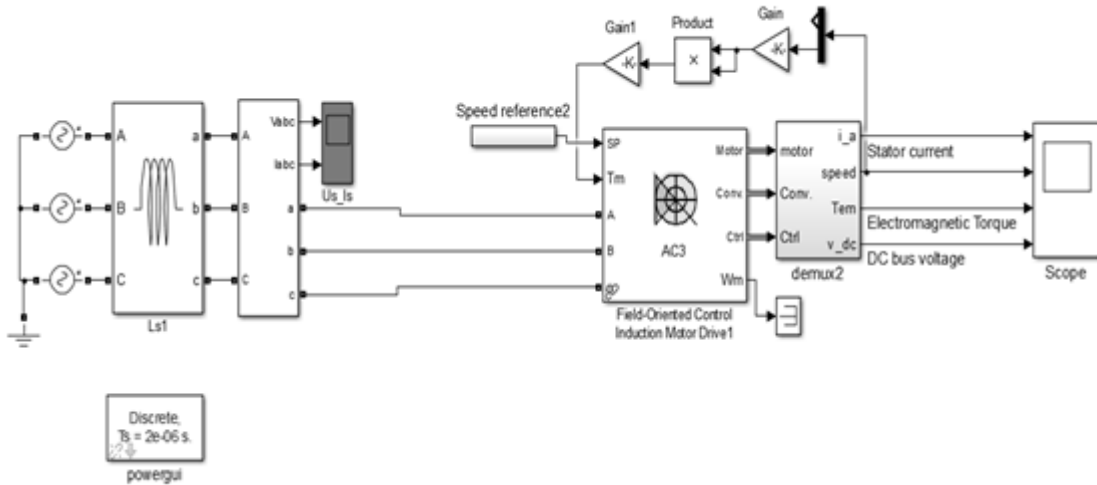


Рис. 1. Модель «Автономне джерело із нелінійним навантаженням»

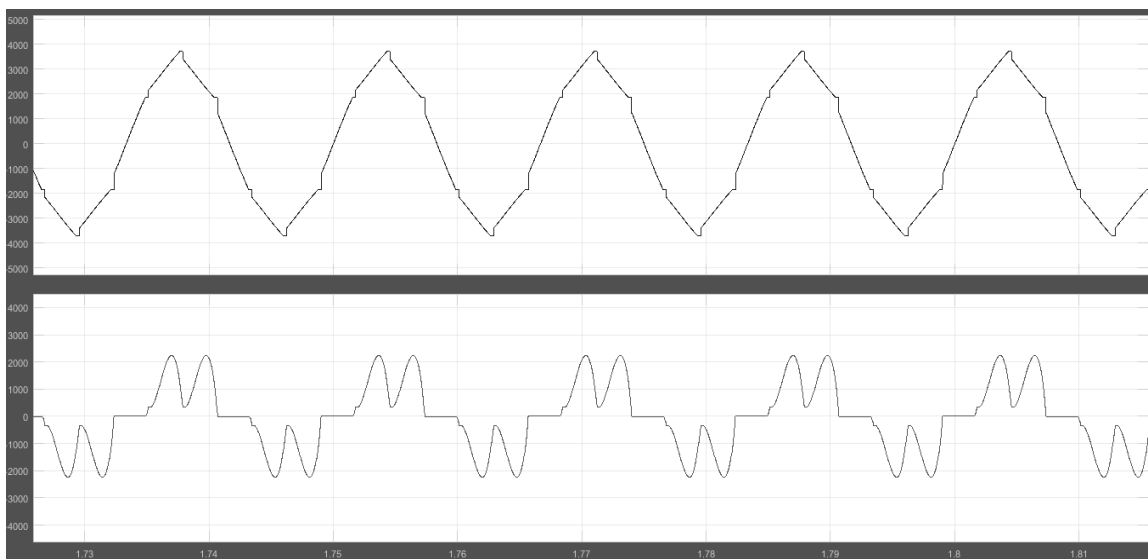


Рис. 2. Осцилограми напруги та струму

По розрахункам в моделі отримані середні коефіцієнти гармонічних спотворень THD струму та напруги, які складають 56% та 6% відповідно. Це свідчить, що для підвищення якості електроенергії суднової мережі необхідно застосування СФГ.

Традиційний метод ослаблення вищих гармонік напруги та струму в мережах електропостачання, це використання пасивних фільтрів гармонік (ПФ). ПФ являє собою частотно-резонансне коло, що забезпечує

ослаблення налаштованої високочастотної гармоніки, за рахунок створення шляху з найменшим опором [1,3,4,5].

В моделі «Автономне джерело – пасивний фільтр – нелінійне навантаження» (рис.3) застосовано ПФ С-типу другого порядку. Найважливіша перевага ПФ С-типу полягає в тому, що вони забезпечують малі втрати на основний гармоніці. Схема пасивного фільтру С-типу для трьохфазної силової мережі наведено на рис. 4. У табл.1 наведено параметри фільтру.

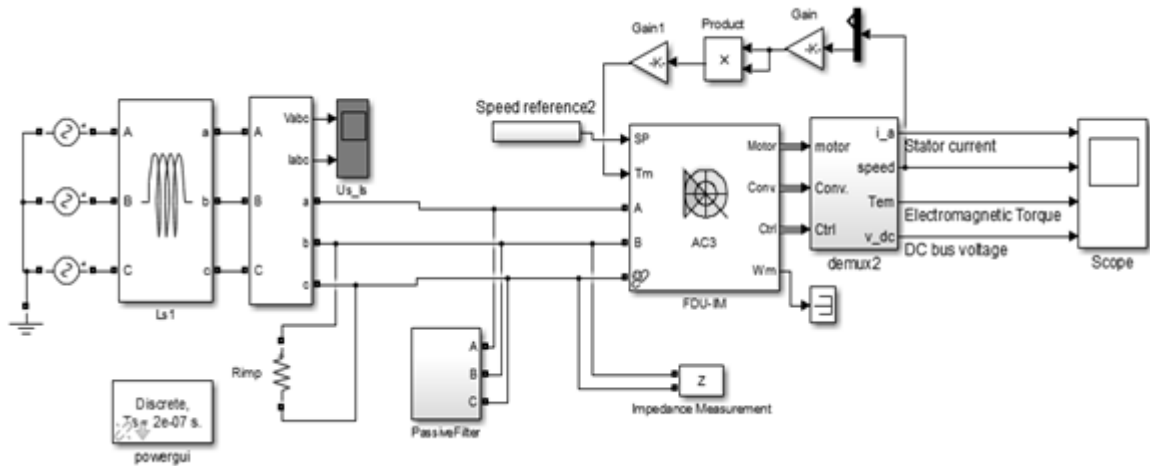


Рис. 3. Модель «Автономне джерело – пасивний фільтр – нелінійне навантаження»

Розрахунок ПФГ С-типу виконано для компенсації 5-ї, 7-ї, 11-ї, 13-ї гармонік. Задаємося деякими параметрами мережі і фільтра: напруга мережі  $U=3300$  В, частота мережі  $f=60$  Гц, індуктивність мережі  $L_S = 0,1$  мГн, реактивна потужність фільтра  $Q_F = 1$  Мвар ( $Q_F \approx Q_{сн}$ ), коефіцієнт розподілення гармонік  $k = 1,5$ , кратність гармонік  $n_g = 5, 7, 11, 13$  та відповідно значення циклічних частот гармонік [10].

Лінія  $L_2C_2$  налаштована на резонансну частоту вищої гармоніки

$$L_2 = \frac{1}{\omega_1^2 C_2}. \quad (1)$$

Вираз для резонансної частоти фільтра  $\omega_r = n_g \omega_1$  має наступний вигляд

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_2 \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}} \rightarrow C_2 = C_1 (n_g^2 - 1). \quad (2)$$

Реактивна потужність фільтра на основній гармоніці задається наступним співвідношенням, з якого визначаємо ємність  $C_1$ :

$$Q_F = -\frac{U^2}{\text{Im}(Z_F(\omega_1))} \rightarrow C_1 = \frac{Q_F}{\omega_1 U^2}. \quad (3)$$

Демпферний опір визначаємо за формулою:

$$R_d = \frac{U^2}{n_g^3 Q_F^2 k \omega_1 L_S} \sqrt{U^4 - n_g^4 Q_F^2 k \omega_1^2 L_S^2}. \quad (4)$$

Таблиця 1

Номер гармоніки	Параметри ПФ С-типу			
	$C_1$ , мФ	$C_2$ , мФ	$L_2$ , мГн	$R_d$ , Ом
5 (300 Гц)	0.24	5.84	1.21	6289.54
7 (420 Гц)	0.24	11.71	0.63	2255.37
11 (660 Гц)	0.24	29.24	0.24	510.61
13 (780 Гц)	0.24	40.93	0.17	251.32

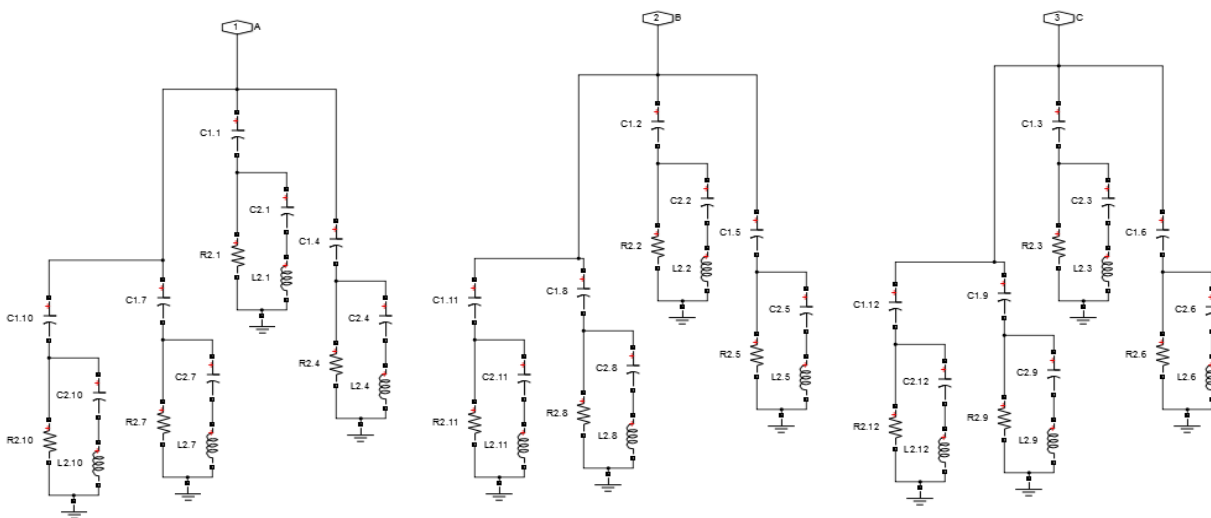


Рис. 4. Блок ПФ С-типу

Як видно з осцилограм (рис.5), підключення пасивних фільтрів паралельно силової мережі покращує форму напруги та струму. THD складає 2% для напруги та 4% для струму.

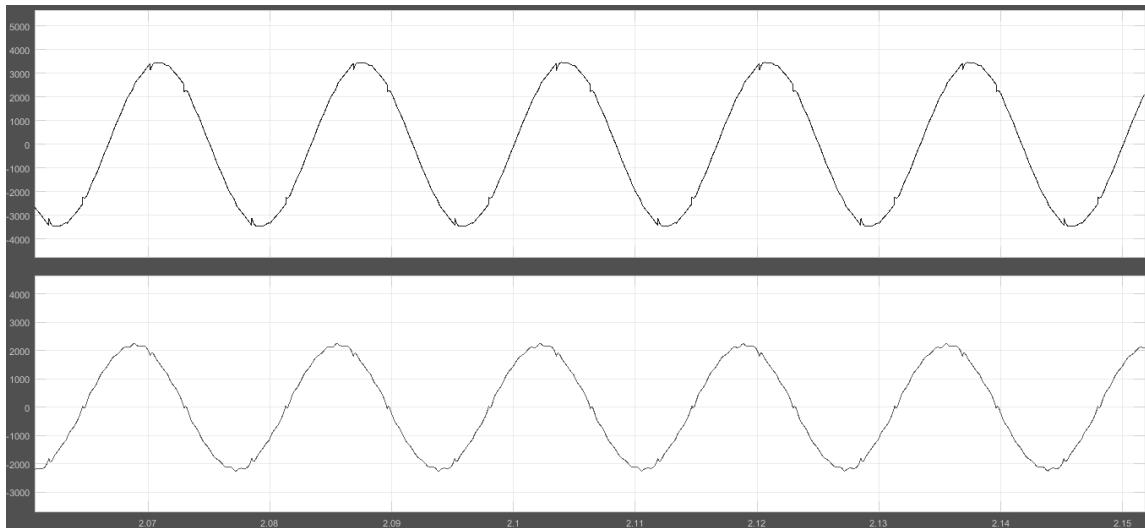


Рис. 5. Осцилограми напруги та струму із використанням ПФ С-типу

З літературного аналізу відомо, що пасивні фільтри гармонік є статичними пристроями [3,4,5,8]. Ефективність ПФ зменшується за рахунок зміни гармонійного складу струму та напруги в мережі, а також при – зміні імпедансу мережі. Ще один недолік це ймовірність резонансу в паралельному коливальному контурі, утвореному пасивним фільтром і індуктивністю мережі живлення, на частотах, близьких до частот високочастотних гармонік.

Альтернативою ПФ є активні фільтри гармонік (АФ). Це комутаційні пристрої, які виконують відразу декілька функцій: усунення вищих гармонік струму і напруги, корекція коефіцієнта потужності і т.п. [2,6,7,9]. АФ за своєю структурою є паралельними та послідовними. Паралельний АФ призначений для компенсації вищих гармонік струму, а послідовний - для компенсації вищих гармонік напруги. У дослідженнях була використана модель паралельного АФ (рис.6).

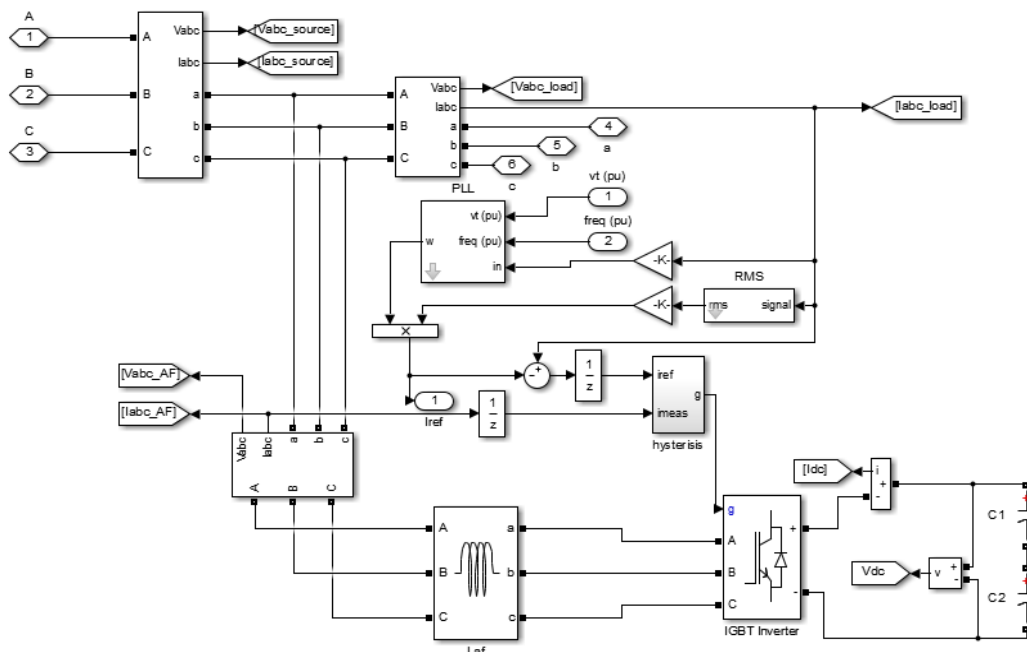


Рис. 6. Модель паралельного АФ

На рис.7 зображена модель «Автономне джерело – паралельний АФ – нелінійне навантаження», відповідні осцилограми – рис.8.

Розрахункове середнє значення THD напруги при використанні АФ дорівнює 1%, а струму – 2%.

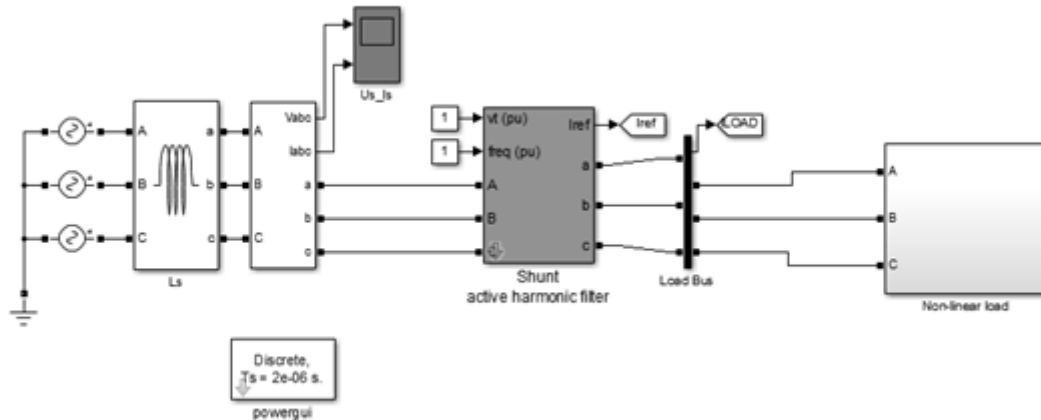


Рис. 7. Модель «Автономне джерело – паралельний АФ – нелінійне навантаження»

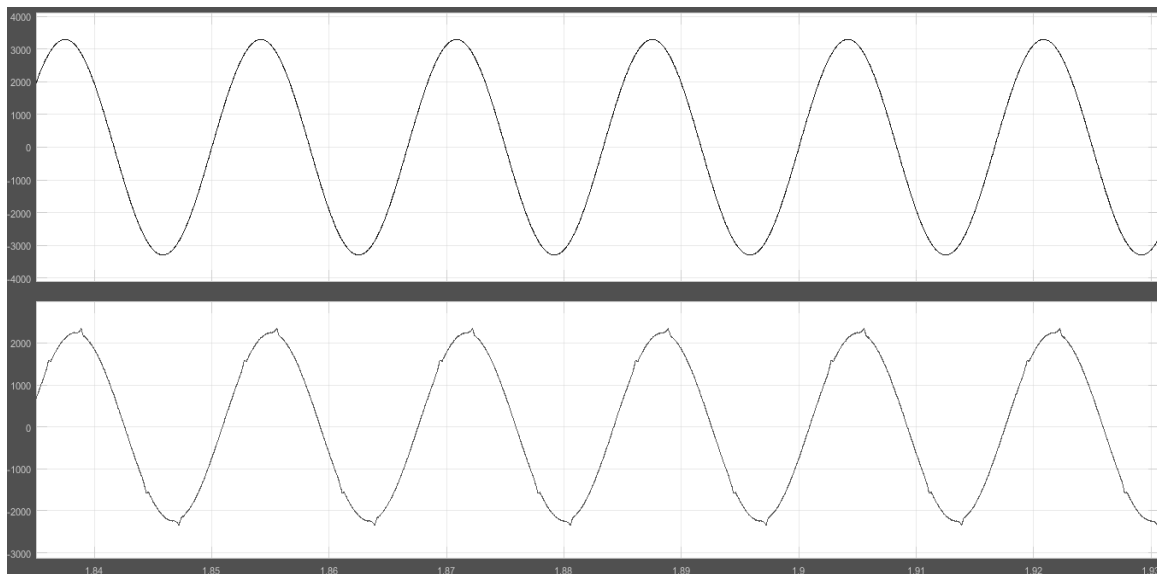


Рис. 8. Осцилограми напруги та струму із використанням АФ

Гібридні силові фільтри (ГФ) вищих гармонік є комбінація пасивних та активних фільтрів, які підключаються паралельно мережі. Елементи пасивного фільтра розраховані так, що значення його імпедансу мінімально для заданих високочастотних гармонік (5-ої, 7-ої, 11-ої, 13-ої). Завдання АФ, як правило, прибрати з мережі живлення гармоніки більш вищих порядків [7,8].

Переваги гібридних силових фільтрів це значно менші розміри та низька вартість активної частини, у порівнянні з АФ. Це

можливо, за рахунок зниження потужності активного фільтра. У порівнянні з пасивними фільтрами, ГФ збільшують ефективність компенсації нелінійних спотворень при зміні параметрів нелінійного навантаження [10,11].

На рис.9 зображена модель «Автономне джерело – ГФ – нелінійне навантаження», відповідні осцилограми напруги та струму – на рис.10. Результати розрахунків при моделюванні показали, що середнє зазначення THD напруги дорівнює 0,1%, а струму – 1%.

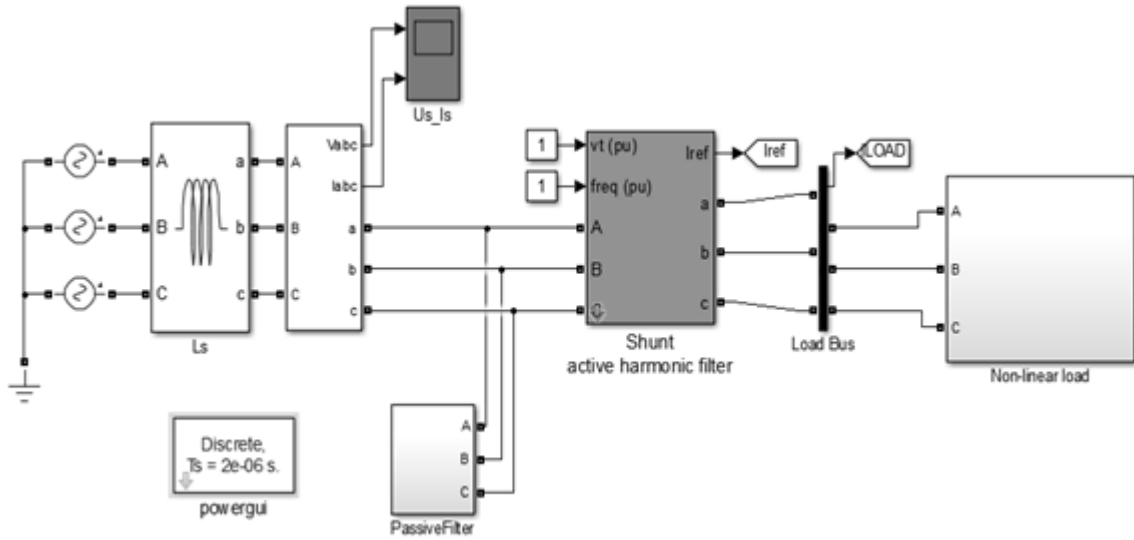


Рис. 9. Модель «Автономне джерело – ГФ – нелінійне навантаження»

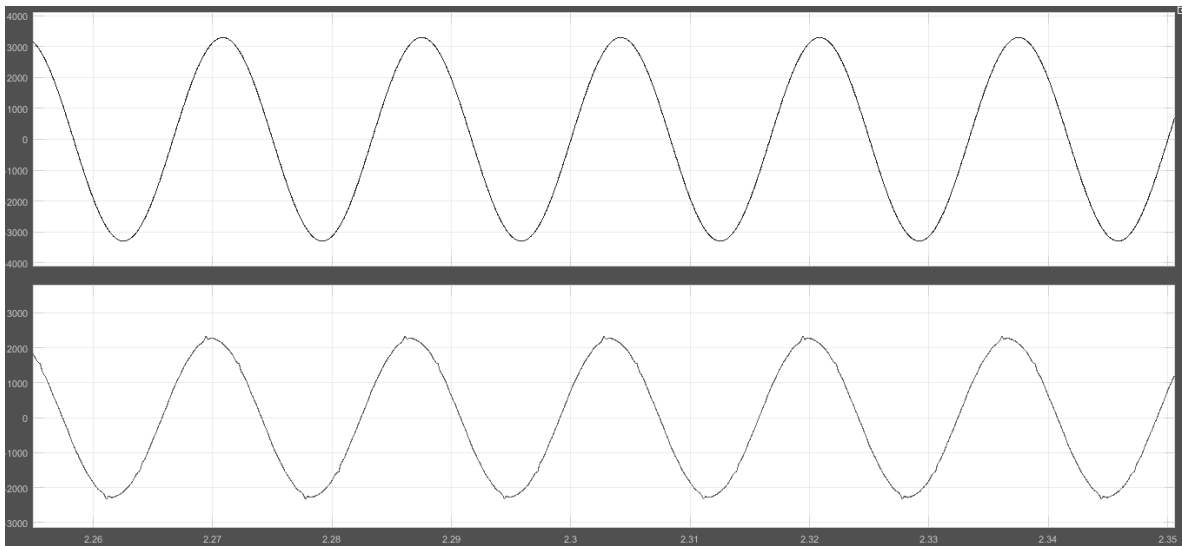


Рис. 10. Осцилограми напруги та струму із використанням ГФ

Відповідно проведеному аналізу результатів моделювання було побудовано порівняльні діаграми коефіцієнтів 5-ої, 7-ої, 11-ої, 13-ої гармонік напруги (рис.11) та струму (рис.12) від основної гармоніки при використанні різних фільтрів.



Рис. 11. Діаграма вмісту гармонік напруги



Рис. 12. Діаграма вмісту гармонік струму

Таблиця 2 складена для порівняльного аналізу значень THD напруги та THD струму при

використанні пасивного, активного та гібридного фільтрів.

Таблиця 2

Значення THD напруги та струму

Тип фільтра	THD%, напруги	THD%, струму
Пасивний	2	4
Активний	0,9	1,54
Гібридний	0,1	1,2

### Висновки

Проведене моделювання та якісний аналіз отриманих результатів підтверджує загальні теоретичні положення стосовно наявності вищих гармонік напруги та струму в мережі із нелінійним навантаженням, а також демонструє ефективність використання фільтрокомпенсуючих пристроїв різних принципів та структур для їх пригнічення.

### Список використаної літератури

1. Арриллага, Дж. Гармоники в электрических системах [Текст]: Пер. с англ. / Дж. Арриллага, Д. Бредли, П. Боджер.– М.: Энергоатомиздат, 1990.– 320 с.: ил.
2. Akagi, H. Active harmonic filters [Text]. – Proceedings of the IEEE. Vol. 93, 2005, No. 12, pp. 2128–2141.
3. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Текст]. – М.: Гардарики, 2002. – 638 с.: ил.
4. Nassif, A. D., Xu, W., Freitas, W. An investigation on the selection of filter topologies for passive filter applications [Text]. – IEEE transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 3, 2009, pp. 1710–1718.
5. Das, J. Passive filters – potentialities and limitations [Text]. – IEEE trans. on industry applications. Vol. 40, No.1, January/February, 2004, pp. 232–241.
6. Kale, M., Ozdemir, E. Harmonics and reactive power compensation with shunt active power filter under non-ideal mains voltage [Text] // Electric Power Syst. 2005. Res. 77. P. 363–370.
7. Дранкова, А. О. Підвищення якості електроенергії суднової високовольтної мережі з нелінійним навантаженням [Текст] / А. О. Дранкова, А. І. Шестака, І. І. Красовський // Матеріали науково-методичної конференції «Актуальні питання суднової електротехніки і радіотехніки» 29.11.2016 – 30.11.2016 – Одеса: НУ «ОМА». – 2017. – С. 68–75.

8. Дранкова, А. О. Способи підвищення якості електроенергії в автономних енергетичних системах [Текст] / А. О. Дранкова, І. І. Красовський // Матеріали науково-методичної конференції «Актуальні питання суднової електротехніки і радіотехніки» 15.12.2015 – 16.12.2015 – Одеса: НУ «ОМА». – 2016. – С. 45–48.

9. Zamora, I., Egura, P., Mazon, A.J., Torres, E., Sagastabeitia, K.J. /Using active filters to reduce THD in traction systems [Text] // Department of Electrical Engineering University of the Basque Country.

10. Gholamrezaei, M., Masoum, M.A.S., Kalantar, M. Parallel combination of passive and hybrid power filters for harmonic mitigation [Text] // 18th International power system conference. – pp. 7–15.

11. Akagi, H. Modern active and traditional passive filters [Text] // Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences. – 2006, Vol. 54, no. 3. – pp. 255–269.

### Referances

1. Arrillaga, Dzh., Bredli, D., Bodzher, P. (1990), Power System Harmonics [Garmoniki v elektricheskikh sistemah], *Energoatomizdat*, Moscow, pp. 320 (In Russian).
2. Akagi, H. (2005) Active harmonic filters Proceedings of the IEEE. Vol. 93, , No. 12, pp. 2128–2141.
3. Bessonov, L. A. (2002), Theory of Electrical Engineering. Electric Circuits [Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektricheskije cepi], *Gardariki Publ.*, Moscow, pp. 638 (In Russian).
4. Nassif, A. D., Xu, W., Freitas, W. (2009) An investigation on the selection of filter topologies for passive filter applications. – IEEE transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 3, , pp. 1710–1718.
5. Das, J. (2004) Passive filters – potentialities and limitations. – IEEE trans. on industry applications. Vol. 40, No. 1, January/February, , pp. 232–241.
6. Kale, M., Ozdemir, E. (2005) Harmonics and reactive power compensation with shunt active power filter under non-ideal mains voltage // Electric Power Syst.. Res. 77. P. 363–370.
7. Drankova, A. O., Shestaka, A. I., Krasovskiy, I. I. (2017), Improve power quality of ship's high-voltage network with a nonlinear load [Pidvischenya yakosti elektroenergii sudnovoy visocovoltnoyi merezhi z neliniynim navanta-

genyam], *NU «OMA» Publ.*, Odessa, pp.68–75, (In Ukrainian).

8. Drankova, A. O., Krasovskyi, I. I. (2016), Ways of improving the quality of electricity in autonomous power system [Sposobi pidvischenya yakosti elektroenergii v avtonomnih energetichnih sistemah], *NU «OMA» Publ.*, Odessa, pp.45–48, (In Ukrainian).

9. Zamora, I., Egura, P., Mazon, A.J., Torres, E., Sagastabeitia, K.J. /Using active filters to reduce THD in traction systems // Department of Electrical Engineering University of the Basque Country.

10. Gholamrezaei, M., Masoum, M.A.S., Kalantar, M. Parallel combination of passive and hybrid power filters for harmonic mitigation // 18th International power system conference. – p. 7–15.

11. Akagi, H.(2006) Modern active and traditional passive filters // Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences. – Vol. 54, no. 3. – p. 255–269.

## METHODS TO IMPROVE THE QUALITY OF ELECTRICAL SUPPLY OF SHIP SYSTEM WITH NONLINEAR LOAD

**A. O. Drankova, S. S. Mikhaykov, I. I. Krasovskyi**

*National University «Odessa Maritime Academy»*

**Abstract.** The article presents the modern methods of improving electricity of ship's power supply system with nonlinear load. Four mathematical models of "autonomous source - nonlinear load", "autonomous source - passive filter - nonlinear load", "autonomous source - active filter - nonlinear load", "autonomous source - hybrid filter - nonlinear load" are constructed in the package MATLAB Simulink and conducted harmonic analysis of current and voltage ship's power network. The passive filter C-type has been performed on the 5th, 7th, 9th, 11th harmonics for ship's high-voltage network 3300 V, frequency 60 Hz. As a non-linear load is using an induction motor with 1500 kW capacity and frequency converter that operates on bow thruster. Modeling and the qualitative analysis were carried out and obtained results confirmed the general theoretical provisions on the presence of higher harmonics of voltage and current in the ship's power network with nonlinear load, and also demonstrates the effectiveness of using filter-compensating devices of various principles and structures for their suppression.

**Key words:** autonomous source, frequency converters, induction motors, thruster, passive filter, active filter, hybrid filter, total harmonic distortion.

## МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ СУДОВОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ

**А. О. Дранкова, С. С. Михайков, И. И. Красовский**

*Национальный университет «Одесская Морская Академия»*

**Аннотация.** Проведен обзор современных методов повышения качества электроэнергии судовой системы электроснабжения с нелинейной нагрузкой. Выполнено математическое моделирование систем «Автономный источник – фильтрокомпенсирующие устройства – нелинейная нагрузка» в пакете MATLAB Simulink, проведено гармонический анализ тока и напряжения судовой силовой сети. В качестве нелинейной нагрузки представлен асинхронный двигатель мощностью 1500 кВт с частотным преобразователем, который работает на привод подруливающего устройства.

**Ключевые слова:** автономный источник, частотный преобразователь, асинхронный двигатель, подруливающее устройство, пассивный фильтр, активный фильтр, гибридный фильтр, суммарный коэффициент гармоник (THD).

Отримано 14.04.2017





**Дранкова Алла Олегівна**, т.+38(050)3917390, доцент кафедри суднової електромеханіки та електротехніки Національного університету «Одеська морська академія» (вул. Дидрихсона, 8, м. Одеса, Україна, 65029).  
E-mail: [drankova64@mail.ru](mailto:drankova64@mail.ru)

**Drankova Alla**, с.п.+38(050)3917390, ass. Professor, National University «Odessa Maritime Academy», Department of Electromechanics and Electrical Engineering (8, Didrihson st., с. Odessa, Ukraine, 65029). Ukraine.  
E-mail: [drankova64@mail.ru](mailto:drankova64@mail.ru)

**ORCID ID:** 0000-0002-2072-1599



**Міхайков Сергій Сергійович**, т.+38(093)7195888, аспірант кафедри суднової електромеханіки та електротехніки Національного університету «Одеська морська академія» (вул. Дидрихсона, 8, м. Одеса, Україна, 65029).  
E-mail: [pilot.vodolaz@gmail.com](mailto:pilot.vodolaz@gmail.com)

**Mikhaykov Sergiy**, с.п.+38(093)7195888, aspirant, National University «Odessa Maritime Academy», Department of Electromechanics and Electrical Engineering (8, Didrihson st., с. Odessa, Ukraine, 65029). Ukraine.  
E-mail: [pilot.vodolaz@gmail.com](mailto:pilot.vodolaz@gmail.com)

**ORCID ID:** 0000-0002-5757-1651



**Красовський Ігор Ігорович**, т.+38(063)1523141, магістр кафедри суднової електромеханіки та електротехніки Національного університету «Одеська морська академія» (вул. Дидрихсона, 8, м. Одеса, Україна, 65029).  
E-mail: [ikras@ymail.com](mailto:ikras@ymail.com)

**Krasovskiy Igor**, с.п.+38(063)1523141, master, National University «Odessa Maritime Academy», Department of Electromechanics and Electrical Engineering (8, Didrihson st., с. Odessa, Ukraine, 65029). Ukraine.  
E-mail: [ikras@ymail.com](mailto:ikras@ymail.com)

**ORCID ID:** 0000-0001-8832-973X