

- cal networks and systems*, 2010, no. 4, pp. 73-76. (Rus.)
7. Grechuhin V.N. Novye razrabotki jelektronnyh izmeritel'nyh transformatorov toka i naprjazhenija 110-220 kV. *Doklady I Mezhd. conf. «Innovatsionnye proekty v elektrosetevom komplekse»* [New developments of instrument current and voltage transformers of 110-220 voltage range. Proceedings of 1st Int. Conf. «Innovative projects in the electric grid complex»] Available at: www.ruscable.ru/article/Novye_razrabotki_elektronnyh_izmeritelnyh/ (accessed 13 May 2018). (Rus.)
 8. D'jachenko M. D., Podnebennaja S.K. *Cifrovaja zashhita (apparatnoe i algoritmicheskoe obespechenie): ucheb. posobie* [Digital protection (hardware and knoware): tutorial]. Mariupol, SHEE «PSTU» Publ., 2014. 398 p. (Rus.)
 9. D'jachenko M.D., D'jachenko V.M. *Visokovol'tnii vimiriuval'nii transformator strumu* [High-voltage instrument current transformer]. Patent UA, no. 110009, 2015. (Ukr.)
 10. Korneev M. Ispol'zovanie katushki Rogovskogo dlja tokovyh izmerenij [Using Rogowski coil for current measuring]. *Elektronnye komponenty – Electronic components*, 2014, no. 5 pp. 123-127. (Rus.)
 11. Kojovic L. High-Precision Rogowski Coils for Improved Relay Protection, Control and Measurements Available at: www.studyres.com/doc/8824053/02049.
 12. Texas Instruments INA188 datasheet Available at: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina188.pdf> (accessed 01 June 2018).
 13. Andrusevich A. Upravlenie potentsialom. Tsifrovye potentsiometry Maxim/Dallas [Potential control. Maxim/Dallas digital potentiometers]. *Novosti elektroniki – Electronics News*, 2006, no. 15, pp. 3-6. (Rus.)
 14. Analog Devices AD5271 datasheet Available at: www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5270_5271.pdf (accessed 01 June 2018).

Рецензент: В.В. Бурлака
канд. техн. наук, доц., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 15.08.2018

УДК 621.314.2

doi: 10.31498/2225-6733.37.2018.160280

© Яшаров Р.К.¹, Поднебenna С.К.²

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ СУДОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Метою роботи є забезпечення електромагнітної сумісності у судових електроенергетичних мережах за рахунок зниження рівня вищих гармонік струму. Встановлено, що основними нелінійними споживачами в судових електричних мережах є перетворювачі частоти (на базі некерованого випрямляча) у складі систем регульованого асинхронного електроприводу. Запропоновано використання в судових електроенергетичних системах активних фільтрів вищих гармонік, що дозволить забезпечити електромагнітну сумісність обладнання, виключити несинусоїдальність напруги живлення електрообладнання судових систем та покращити надійність таких систем. Ефективність запропонованого підходу щодо можливості фільтрації вищих гармонік струму у точці підключення активного фільтру до судової електричної мережі доведена в результаті імітаційного моделювання.

Ключові слова: *судова електрична мережа, перетворювач частоти, асинхронний двигун, нелінійні споживачі, паралельний активний фільтр, теорія миттєвої потужності, неактивні складові потужності, гістерезисне регулювання, електромагнітна сумісність.*

¹ студент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, yasharov_r_k@ukr.net

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, podsvet@gmail.com

Яшаров Р.К., Поднебенная С.К. Обеспечение электромагнитной совместимости судовых электрических сетей. Целью работы является обеспечение электромагнитной совместимости в судовых электроэнергетических сетях за счет снижения уровня высших гармоник тока. Установлено, что основными нелинейными потребителями в судовых электрических сетях являются преобразователи частоты (на базе неуправляемых выпрямителей) в составе систем регулируемого асинхронного электропривода. Предложено использование в судовых электроэнергетических системах активных фильтров высших гармоник, что позволит обеспечить электромагнитную совместимость оборудования, исключить несинусоидальность напряжения питания электрооборудования судовых систем и улучшить надежность таких систем. В результате имитационного моделирования показана эффективность предложенного подхода относительно возможности фильтрации высших гармоник тока в точке подключения активного фильтра к судовой электрической сети.

Ключевые слова: судовая электрическая сеть, преобразователь частоты, асинхронный двигатель, нелинейные потребители, параллельный активный фильтр, теория мгновенной мощности, неактивные составляющие мощности, гистерезисное регулирование, электромагнитная совместимость.

R.K. Yasharov, S.K. Podnebennaya. Ensuring of ship electrical networks electromagnetic compatibility. The aim of the work is to ensure electromagnetic compatibility in the ship electric power networks by reducing the level of higher current harmonics. It has been established that the main non-linear consumers in ship electrical networks are frequency converters (based on six-pulse diode rectifiers) as part of adjustable asynchronous electric drive systems. It is proposed to use active harmonic filters in ship electric power systems, which will ensure the electromagnetic compatibility of equipment, eliminate the non-sinusoidal voltage of the electrical supply of ship systems and improve the reliability of such systems. A simulation modeling of the ship network with non-linear loads and a parallel active filter based on a voltage inverter has been carried out in the work. The instantaneous power theory is used to calculate the current of the active filter. A filter with hysteresis control is used to control the filter current. The simulation results confirmed the effectiveness of the proposed approach with respect to the possibility of filtering higher current harmonics at the point of connecting the active filter to the ship's electrical network. The practical significance of the work lies in the proved necessity to ensure electromagnetic compatibility of the ship electrical networks and the non-sinusoidal currents and voltages of the ship in particular. The efficiency of using power active filters in ship electrical networks to compensate for inactive components of the power consumed by nonlinear consumers has been shown.

Keywords: ship electrical network, frequency converter, asynchronous motor, nonlinear consumers, parallel active filter, theory of instantaneous power, inactive power components, hysteresis control, electromagnetic compatibility.

Постановка проблеми. Забезпечення якості електроенергії в живильних мережах на сьогоднішній день є актуальним напрямком, про це говорять підвищені вимоги до якості електроенергії. Особливо це стосується автономних електроенергетичних систем, до яких відносяться суднові електроенергетичні системи (СЕЕС). Досвід їх експлуатації показує, що завдання підтримки належного рівня напруги і частоти на шинах головного розподільного щита (ГРЩ) в різних режимах роботи, а також величин коефіцієнтів несиметрії навантажень, вирішується в сучасних СЕЕС без особливих проблем. Це не можна сказати про такий показник якості, як коефіцієнт нелінійних спотворень напруги, який показує, наскільки фактична форма напруги відрізняється від синусоїдальної.

Спотворення форми напруги живлення пов'язано з наявністю в складі СЕЕС нелінійних споживачів, до яких відносяться керовані і некеровані випрямлячі, перетворювачі частоти, світлотехнічне обладнання та ін. Перетворювачі частоти на судах використовуються для живлення і управління електродвигунами гребних електричних установок (ГЕУ), судових електроприводів, технологічних механізмів і обладнання та ін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Споживання нелінійними приймачами несинусоїдального струму призводить до генерації в мережу вищих гармонік струму, які спотворюють форму напруги мережі. Величина спотворення напруги СЕЕС визначається потужністю статичних перетворювачів, їх схемою, індуктивним опором генератора і мережі вищих гармонік, глибиною регулювання напруги і при наявності вищих гармонік в напрузі суднової мережі негативно позначається на роботі як джерел, так і споживачів електроенергії [1-3].

В електричних машинах вищі гармоніки викликають додаткові втрати, що призводить до підвищення загальної температури і нагрівання, а також до підвищеної вібрації. У кабельних лініях вищі гармоніки призводять до прискорення процесу старіння ізоляції і додаткових втрат в лініях. Під дією вищих гармонік може бути порушена нормальна робота систем захисту і автоматики, виникають помилкові спрацьовування, збої в роботі систем синхронізації і автоматичного розподілу навантажень при паралельній роботі генераторів і т. д. Негативно впливають вищі гармоніки і на самі перетворювачі, погіршуються умови комутації, виникають збої в системі управління, що може збільшувати пульсації на стороні випрямленого струму. В роботі електродвигунів неминуче виникають процеси, які негативно впливають на кабельну мережу і обладнання. Це виражається у зниженні ефективності його використання та прискоренні старіння обладнання мережі [1, 2]. Щоб уникнути цих поширених проблем, необхідно подбати про електромагнітну сумісність. У зв'язку з цим стаття є актуальною.

Існуючі способи забезпечення електромагнітної сумісності за рахунок зниження нелінійних спотворень [2-5] передбачають застосування як схемних або структурних рішень, так і різних пристроїв зниження рівнів вищих гармонік. Зокрема, використовуються перетворювачі з підвищеною фазністю, мережеві дроселі та фільтри, дроселі постійного струму, резонансні і синусні фільтри. Основним недоліком перерахованих пристроїв є їх значні масогабаритні показники, що представляється критичним в судових електроенергетичних системах, так як збільшення масогабаритних показників призводить до підвищення експлуатаційних витрат. Сучасним засобом забезпечення електромагнітної сумісності є активні фільтри (АФ). В [3] описані різні структури активних фільтрів. Для судових електромереж розглянемо використання паралельних активних фільтрів.

Мета роботи – підвищення електромагнітної сумісності суднових електромереж на судні і зниження рівня вищих гармонік в мережі за рахунок використання силових паралельних активних фільтрів.

Викладення основного матеріалу. Схема досліджуваної електроенергетичної системи зображена на рис. 1. Синхронний генератор живить судову електромережу, від якої отримують живлення системи асинхронного електропривода з прямим пуском (P_{AC}) та частотно-регульованого електропривода (P_{DC}).

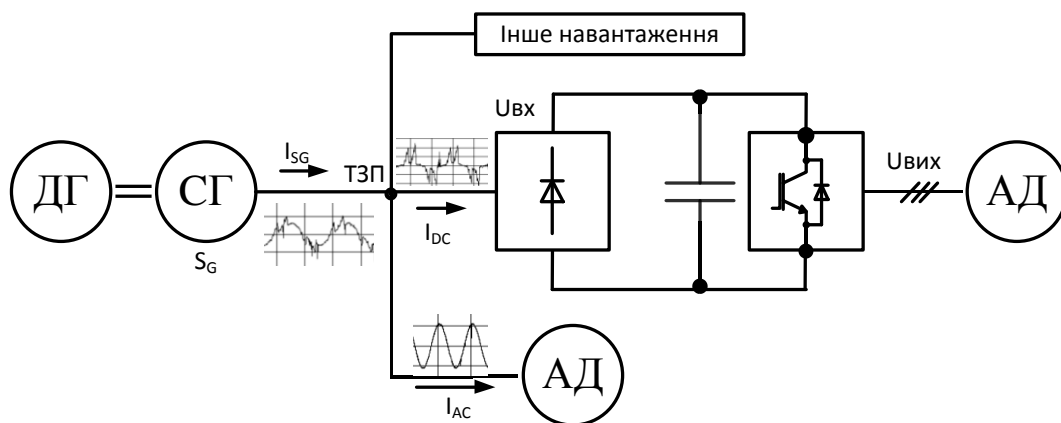


Рис. 1 – Досліджувана судова електроенергетична система

Розрахуємо потужність активного фільтру на прикладі діючої СЕЕС. АФ необхідний для компенсації вищих гармонік струму нелінійного навантаження, що живиться від судової енергосистеми. Значення сумарної встановленої потужності генераторів з урахуванням резерву по-

тужності (20%) наступне: два основних генератора потужністю 300 кВт (375 кВА) кожен. У таблиці 1 наведені дані активного навантаження судна у різних режимах (для типового судна).

Таблиця 1

Найменування параметрів	Режим роботи судна				
	Стоянка без завантаження	Стоянка з завантаженням	Ходовий режим	Зйомка з якоря	Аварійний режим
Активна потужність, кВт	127	271	425	506	133

Згідно з методикою, описаною в [3], для попереднього вибору потужності АФ потрібно знати:

- активну потужність навантаження (на першій гармоніці), P_1 , кВт;
- вихідний коефіцієнт потужності (КП) навантаження, PF ;
- бажаний КП системи «АФ + навантаження», PF_d ;
- коефіцієнт несинусоїдальності струму навантаження THD_1 .

Повна потужність навантаження S_L може бути знайдена як:

$$S_L = \frac{P_1}{PF} = \sqrt{P_1^2 + S_N^2}, \quad (1)$$

де $S_N^2 = N^2 - Q_1^2$ – потужність спотворень; N – неактивна потужність навантаження, ВАр; Q_1 – реактивна потужність навантаження на першій гармоніці, ВАр.

При компенсації КП до PF_d вираз можна записати з урахуванням деяких залишкових спотворень:

$$S'_L = \frac{P_1}{PF_d} = \sqrt{P_1^2 + (S_N - S_C)^2}, \quad (2)$$

де S_C – потужність компенсатора, ВА.

З цих виразів отримаємо вираз для знаходження відносної потужності АФ:

$$\frac{S_C}{P_1} = \sqrt{\frac{1}{PF^2} - 1} - \sqrt{\frac{1}{PF_d^2} - 1}. \quad (3)$$

Вихідні дані для розрахунку активного фільтру для найважчого режиму наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Дані для розрахунку					
S_G , кВА	P_{AC} , кВт	P_{DC} , кВт	THD_1	PF	PF_d
750	356	150	28%	0,68	0,9

Після розрахунку за формулами (1)-(3) встановлено, що відносна потужність АФ, який зможе компенсувати спотворення до бажаного коефіцієнту потужності, становить 0,59, що в іменованих одиницях становить 300 кВА. До установки можна запропонувати активний фільтр ADF P300W-450/480 встановленою потужністю 312 кВА, струм компенсації 450 А (на першій гармоніці 50 Гц), що виробляються компанією «Comsys AB» (Швеція).

Для перевірки запропонованого підходу проведено імітаційне моделювання фільтра в MATLAB Simulink. Активний фільтр підключається у точці загального приєднання ТЗП (показана на рис. 1). На рис. 2 наведена імітаційна модель судової системи електропостачання з підключеним активним фільтром гармонік паралельного типу.

Живляча система (2 основних генератори) моделюється як джерело трифазної напруги частоти 50 Гц. Модель представлена ідеальним джерелом електрорушійної сили (ЕРС) з внутрішнім активно-індуктивним опором. Навантаження моделюється у блоці «Non Linear Load» і представляє собою паралельно поєднані перетворювач частоти та трифазне симетричне RLC-навантаження, що імітує асинхронні двигуни у сталому режимі. Активно-індуктивне потужне навантаження включається з витримкою часу.

миттєвої активної потужності та миттєвою реактивною потужністю.

Увімкнення активного фільтру відбувається у момент часу 0,02 с (через один період напруги мережі), увімкнення активно-індуктивного навантаження – у момент часу 0,04 с.

Результати спектрального аналізу струму навантаження і мережі при роботі активного фільтру наведені на рис. 4.

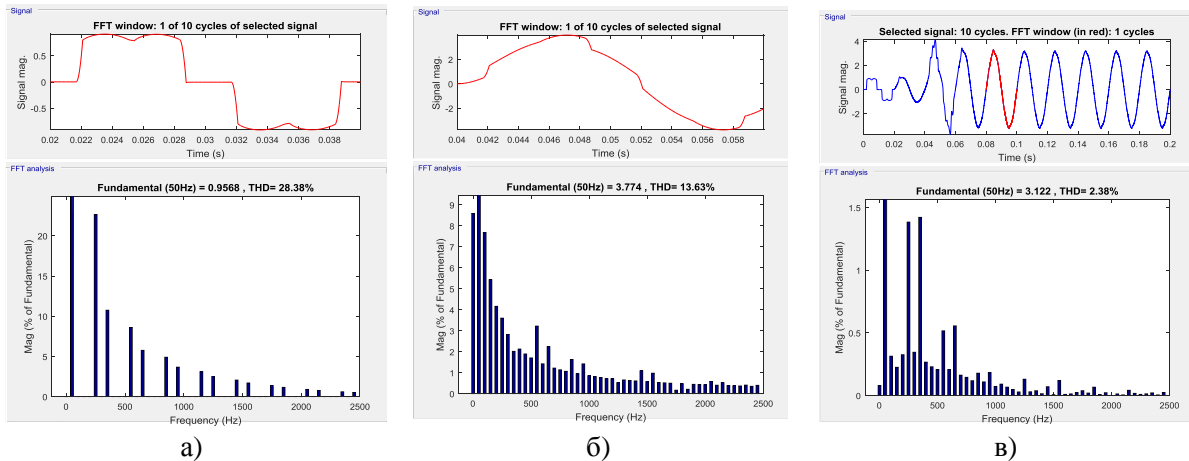


Рис. 4 – Результати моделювання: а – спектр струму джерела, включені ПЧ, $THD_1 = 28,38\%$; б – спектр струму джерела, включені ПЧ, і активно-індуктивне навантаження, $THD_1 = 13,63\%$; в – спектр струму джерела (після компенсації), $THD_1 = 2,38\%$

Висновки

1. Встановлено, що на сучасних судах основним джерелом несинусоїдальності є перетворювачі частоти, що встановлюють для управління систем електроприводів.

2. Запропоновано використання в судових електроенергетичних системах активних фільтрів гармонік, що дозволить забезпечити електромагнітну сумісність обладнання, виключити несинусоїдальності напруги живлення електрообладнання судових систем та покращити надійність таких систем. Активні фільтри дозволяють цілеспрямовано впливати на нелінійні спотворення напруги, забезпечувати високу ефективність компенсації реактивної потужності і одночасно знижувати коефіцієнт нелінійних спотворень.

3. Результати досліджень підтверджують ефективність підходу щодо використання паралельних активних фільтрів для забезпечення електромагнітної сумісності в судовій електричній мережі.

Список використаних джерел:

1. Запальский В.Н. Влияние отклонения напряжения и частоты на качество электроснабжения морского подвижного объекта / В.Н. Запальский, К.Н. Запальский // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – № 3 (56), ч. 2. – 2009. – С. 187-190.
2. 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. Mode of access: DOI: 10.25515/PMI.2017.5.563.
3. Бурлака В.В. Сучасні силові активні фільтри та імпульсні джерела живлення з корекцією коефіцієнта потужності : монографія / В.В. Бурлака, С.К. Поднебенна, С.В. Гулаков. – Маріуполь : ПДТУ, 2015. – 196 с.
4. Зиновьев Г.С. Улучшение электромагнитной совместимости выпрямителей трехфазного тока и питающей сети / Г.С. Зиновьев // Электропитание. – 2001. – № 1. – С. 19-22.
5. 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.

References:

1. Zapal'skiy V.N., Zapal'skii K.N. Vliyaniye otkloneniya napryazheniya i chastoty na kachestvo elektrosnabzheniya morskogo podvizhnogo ob'yekta [The effect of voltage and frequency deviation on the quality of the power supply of the maritime mobile object]. *Visnik Kremenchuts'kogo natsional'nogo universitetu imeni Mikhaila Ostrograds'kogo – Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, 2009, pp. 187-190. (Rus.)
2. Pan'kov I.A., Frolov V.Ya. Povysheniye kachestva elektroenergii v avtonomnykh elektroenergeticheskikh sistemakh [Improving the quality of electricity in autonomous power systems]. *Zapiski Gornogo instituta – Journal of Mining Institute*, 2017, vol. 227, pp. 563-568. doi: 10.25515/PMI.2017.5.563. (Rus.)
3. Burlaka V.V., Podnebennaya S.K., Gulakov S.V. *Suchasni sylovi aktyvni fil'try ta impul'sni dzhherela zhyvlennya z korektsiyeyu koefitsiyenta potuzhnosti: monografiia* [Modern power active filters and pulsed power supplies with power factor correction: monograph]. Mariupol, PSTU Publ., 2015. 196 p. (Ukr.)
4. Zinov'yev G.S. Uluchsheniye elektromagnitnoy sovmestimosti vypryamiteley trekhfaznogo toka i pitayushchey seti [Improving the electromagnetic compatibility of three-phase rectifiers and power supply]. *Elektropitaniye – Power Supply*, 2001 vol. 1, pp.19-22. (Rus.)
5. Rozanov Yu.K., Ryabchinskiy M.V., Kvasnyuk A.A. Sovremennyye metody regulirovaniya kachestva elektroenergii sredstvami silovoy elektroniki [Modern methods of regulating the quality of electricity by means of power electronics]. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 1999, vol. 4, pp. 28-32. (Rus.)

Рецензент: С.В. Гулаков
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 19.09.2018