

УДК 621.314.621

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.68.029>

## УДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСОБІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СУДНОВИХ ЕЕС З НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ ПРОПУЛЬСИВНИМИ КОМПЛЕКСАМИ

Д.О. Жук\*, канд. техн. наук, О.К. Жук\*\*, канд. техн. наук, М.О. Козлов\*\*\*

Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова,  
пр. Героїв України, 9, Миколаїв, 54025, Україна  
e-mail: [dmytro.zhuk@nuos.edu.ua](mailto:dmytro.zhuk@nuos.edu.ua)

*Розглянуто можливі напрямки удосконалення засобів забезпечення якості електроенергії (ЯЕ) з метою підвищення їхньої ефективності з урахуванням схемних і режимних особливостей інтегрованих суднових електроенергетичних систем (СЕЕС) з напівпровідниковими пропульсивними комплексами (НПК). Запропоновано та досліджено одно- та дволанковий варіанти системних керованих фільтрокомпенсуючих пристроїв (КФКП), призначених для одночасної повної компенсації реактивної потужності (РП), а також суттєвого послаблення гармонічних спотворень напруги і струму в СЕЕС з НПК. Реалізовано підхід до моделювання, який дає змогу порівняти вплив запропонованих КФКП на інтегральний коефіцієнт гармонічних спотворень напруги в системах з різними типами вхідних випрямлячів у складі перетворювачів частоти (ПЧ) НПК з урахуванням можливого відхилення частоти суднової мережі. Бібл. 7, рис. 7, таблиця.*

**Ключові слова:** якість електроенергії, суднова електроенергетична система, судновий напівпровідниковий пропульсивний комплекс, перетворювач частоти, керований фільтрокомпенсуючий пристрій.

**Вступ.** Проблема якості електроенергії (ЯЕ) в електроенергетичних системах автономних морських об'єктів, насамперед, для суден з потужними напівпровідниковими комплексами та єдиною інтегрованою судною електроенергетичною системою (СЕЕС) залишається вельми актуальною через вплив ЯЕ на умови експлуатації і безпеку судна в цілому. У морській галузі широко відомі інциденти з катастрофічними наслідками, що трапилися через низьку ЯЕ, такі як аварії на пасажирському круїзному лайнері RMC «Queen Mary 2» (вихід з ладу конденсатора в кормовому приміщенні фільтра гармонік та вибух в кормовому головному розподільному щиті; тимчасова втрата судном маневреності) [1–3], на пасажирському судні MC «Statendam» (спалах дуги в головному вимикачі та пожежа в приміщенні головного розподільного щита) [1] та на нафтовій платформі «Tern Alpha» (вибух в газокompресійному модулі, пожежа, евакуація персоналу, зупинка процесу буріння) [1].

Короткий перелік найбільш актуальних для СЕЕС показників ЯЕ з відповідними нормами, що прийняті органами ІЕЕЕ та ІЕС, а також класифікаційними товариствами ABS та PRS [2], наведено в табл.1. Ці показники охоплюють:  $\delta f_p$ ,  $\delta f_{tr}$ ,  $\delta f_{per}$ ,  $\delta f_{max}$  – стале, перехідне, періодичне, максимальне відхилення частоти відповідно;  $\delta U_p$ ,  $\delta U_{tr}$ ,  $\delta U_{per}$ ,  $\delta U_{max}$  – стале, перехідне, періодичне, максимальне відхилення напруги відповідно;  $K_U$  (THD) – інтегральний коефіцієнт гармонічних спотворень напруги;  $K_{U(v)}$  – коефіцієнт  $v$ -ї гармоніки напруги;  $\delta P$ ,  $\delta Q$  – коефіцієнти відхилень пропорційності розподілу активної та реактивної потужності.

Інтегровані ЕЕС суден та морських платформ з пропульсивними комплексами мають спільні особливості, які ускладнюють задачу забезпечення ЯЕ:

1. На відміну від сухопутної суднова електрична мережа є автономною та гнучкою енергетичною системою. Її генеруюча здатність заздалегідь точно визначена і обмежена.
2. Потужність КЗ СЕЕС є значно меншою, а її еквівалентний опір є відносно більшим порівняно з промисловими мережами.
3. Потужність окремих навантажень СЕЕС сумірна з потужністю окремої генераторної установки.
4. Морські умови є дуже мінливими, що призводить до незапланованого ступінчастого змінювання активного та реактивного навантаження, напруги, частоти та рівня гармонік суднової мережі.



5. СЕЕС можна розглядати як систему змінюваної частоти та напруги з довгостроковими (сталими) або швидкоплинними (короткочасними, перехідними) значеннями відповідних параметрів [2].

6. Паралельна робота множинних генераторів потребує керування розподілом активної та реактивної потужності.

Показник	Значення показника			
	IEEE - 45	PN-IEC6100 92-101	ABS	PRS
$\delta f_p$	$\pm 3\%$	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$
$\delta f_{tr}$				
а) значення	$\pm 4\%$	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$
б) тривалість	2с	5с	5с	5с
$\delta U_{per}$	0,5%	0,5%	–	–
$\delta U_{max}$	5,5%	12,5%	–	–
$\delta U_p$	$\pm 5\%$	6% – 10%	+6% – 10%	+6% – 10%
$\delta U_{tr}$				
а) значення	$\pm 16\%$	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$
б) тривалість	2с	1,5с	1,5с	1,5с
$\delta U_{per}$	5%	2%	–	–
$\delta U_{max}$	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$	–	–
$K_U$ (THD)	5%	5%	5%	7,5%
$K_{U(v)}$	3%	3%	3%	4,5%
Стрибки напруги	2500В ( $U_{ном}=380-600В$ )	5,5 $U_{ном}$	$\delta f_{max}$	–
$u_s$ , $t_{нар}/t_{сп}$	1000В ( $U_{ном}=380-600В$ )	1,2μс/50μс		
$\delta P$	–	–	$\pm 15\%$	$\pm 15\%$
$\delta Q$	–	–	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$

**Метою роботи** є удосконалення суднових загальносистемних засобів забезпечення ЯЕ шляхом досягнення їх багатofункціональності, керованості та ефективності щодо показників за основним призначенням при інваріантності або слабкій чутливості до впливу інших, ускладнюючих рішення цієї задачі, показників.

**Матеріал досліджень.** Типовий пропульсивний (руховий) або підрулюючий комплекс на сучасних суднах змінного струму має за основу перетворювачі частоти (ПЧ), здебільшого з проміжною ланкою постійного струму, отримані через комбінацію випрямляч-автономний інвертор, наприклад інвертор напруги (АІН) з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) при роботі на асинхронний двигун (АД) або інвертор струму (АІС), з комутацією навантаженням – синхронним двигуном (СД) (рис. 1). Таким чином, напівпровідниковий пропульсивний комплекс (НПК) впливає на якість електроенергії в СЕЕС саме через вхідний випрямляч ПЧ.

Результати аналізу досліджень із зазначеної тематики [2–5] визначають два основних напрямки вирішення проблеми ЯЕ в суднових ЕЕС з потужними НПК: 1. Застосування удосконалених схемотехнічних рішень вхідних випрямлячів у складі НПК з метою мінімізації генерованих ними в мережу неактивних складових потужності: реактивної та спотворення; 2. Створення та удосконалення ефективних керованих мережевих засобів зменшення гармонік та компенсації реактивної потужності (фільтрокомпенсуючих пристроїв), що відповідають специфічним вимогам та умовам функціонування СЕЕС з потужними НПК.

Реалізація першого напрямку пов'язана з широким використанням на вході потужних ПЧ: а) 12-пульсних тиристорних керованих випрямлячів (КВ) разом з фазозсувними трансформаторами [3, 4] (рис.1 а); б) діодних некерованих випрямлячів (НВ), у тому числі з підвищеною пульсністю (рис. 1 б, в) [4, 5]; в) активних випрямлячів (АВ) AFE з високочастотною ШІМ (рис.1 з) [2, 4].

КВ створюють високий рівень гармонічних спотворень в низькочастотній області спектру 50Гц – 2,5 кГц, а також споживають значну РП, яка вимагає керованої компенсації.

АВ генерують в діапазоні від 2,5кГц до 10кГц високочастотні спотворення, які спричиняють значно серйозніші наслідки, ніж низькочастотні [5]. Слід зазначити, що саме через цю причину світові виробники засобів забезпечення ЯЕ в морській галузі останнім часом відмовляються від використання активних випрямлячів з високочастотною ШІМ в частотнорегульованих пропульсивних приводах [5]. З цієї ж причини вони уникають використання силових активних фільтрів в СЕЕС з НПК [5].

Аналіз проблем, напрямків та результатів удосконалення сучасних засобів забезпечення ЯЕ в СЕЕС з НПК з врахуванням реалій морської практики свідчить, що стратегічна лінія провідних світових виробників і науковців полягає в прийнятті комплексних рішень, які поєднують використання традиційних багатопульсних діодних вхідних випрямлячів ПЧ та інноваційних фільтрокомпенсуючих пристроїв, які мають бути загальносистемними, керованими, такими, що ефективно повністю компенсують реактивну потужність та значно послаблюють рівень спотворень напруги і струму мережі в діапазоні 50Гц...2,5 кГц, а також не створюють додаткових високочастотних спотворень у діапазоні 2,5...10 кГц та зберігають ефективність при відхиленнях частоти суднової мережі  $\pm 10\%$  в сталих та перехідних режимах.

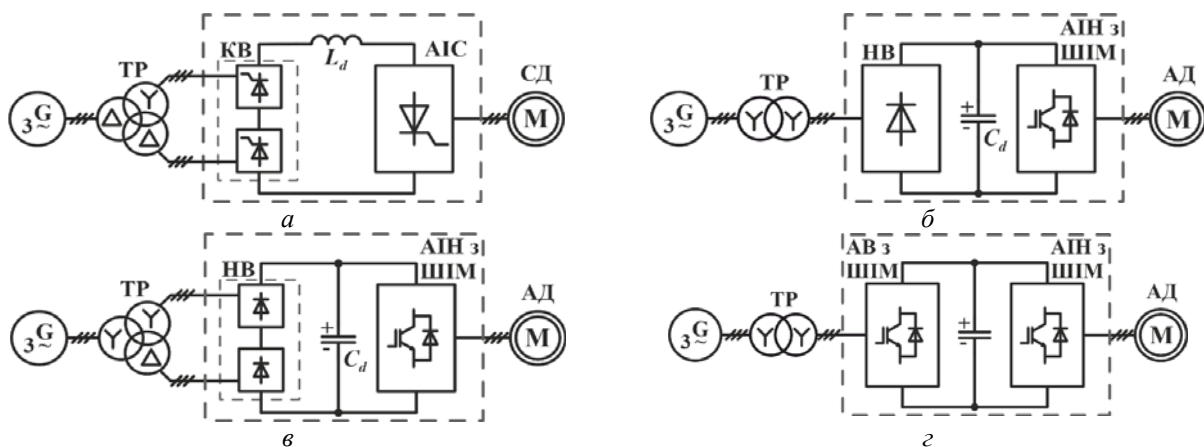


Рис. 1. Основні структури перетворювачів частоти, які використовуються в сучасних суднових НПК за типами вхідних перетворювачів: а – з 12-пульсним KB та AIC ; б – з 6-пульсним NB та AIIH з ШІМ ; в – з 12-пульсним NB та AIIH з ШІМ ; г – з AB та AIIH з ШІМ

Наприклад, таким вимогам відповідає одноланковий керований фільтрокомпенсуючий пристрій (КФКП), запропонований і розглянутий в [6, 7], який вдало поєднує функції одночасної керованої повної компенсації реактивної потужності в СЕЕС, незалежно від причин і джерел, що її породжують, а також суттєвого зниження гармонічних спотворень від впливу НПК без виникнення резонансних явищ. КФКП як керований компенсатор неактивних складових потужності, створюваних НПК, має також зменшувати сталі та перехідні відхилення напруги мережі за умови можливих відхилень частоти. Структурно-функціональні схеми системи синхронний

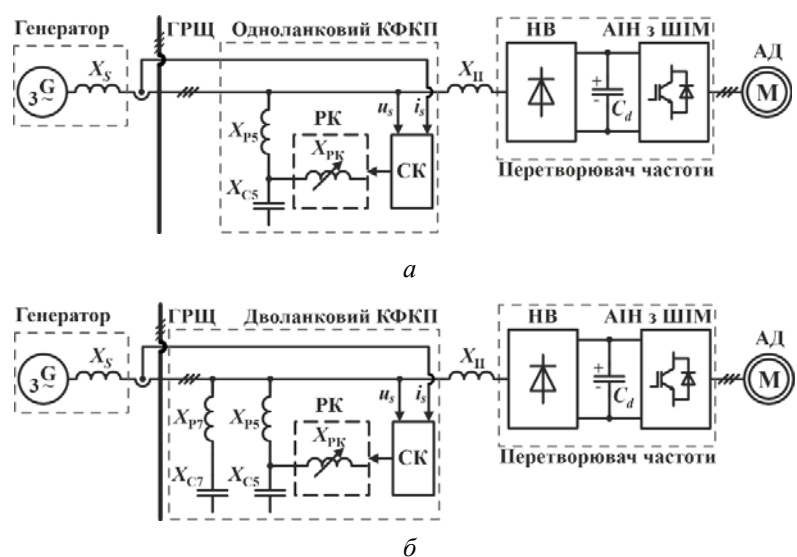


Рис. 2. Схеми підключення одно- (а) та дволанкового (б) КФКП до системи «СГ – ПЧ»

генератор – перетворювач частоти (СГ – ПЧ) з одно- та дволанковим КФКП показані на рис. 2.

Одноланковий КФКП (рис. 2, а) містить силовий резонансний фільтр (РФ), налаштований на гармоніку найнижчого порядку, генеровану в мережу вхідним випрямлячем, та керований реакторний компенсатор (РК) з широтно-імпульсним регулюванням (ШІР). Він виконує подвійну функцію: усуває з напруги СЕЕС гармоніку налаштування РФ разом з послабленням інших вищих гармонік, а також спільно з РК здійснює повну керовану компенсацію РП, враховуючи в балансі дію всіх елементів СЕЕС, включаючи сам КФКП. У дволанковому КФКП (рис. 2, б) перша ланка така ж, як і в одноланковому. Друга некерована резонансна ланка – є резонансним фільтром, що усуває зі спектрів напруги і струму мережі гармоніку наступного порядку, а також сприяє послабленню інших гармонік більш високих порядків. Вона є додатковим джерелом нерегульованої реактивної потужності, яка також компенсується.

Розрахунок КФКП передбачає виконання умов балансу реактивної потужності в системі та обмеження  $K_U$  [6]. При правильному виборі параметрів РФ ( $X_{R\Phi}$  і  $X_{C\Phi}$ ) для збереження його ефективності при гранично допустимому сталому відхиленні частоти СЕЕС  $\delta f_p = \pm 5\%$  [2], необхідно враховувати додаткову умову  $X_{R\Phi} \leq 0,5X_S$ .

Структурно-функціональна реалізація в MATLAB одно- та дволанкових КФКП, як складових моделей досліджуваних систем з НПК на базі пропульсивних електроприводів з ПЧ у варіантах з вхідними 6-пульсними або 12-пульсними (некерованими або керованими) випрямлячами, представлені на рис. 3 а, б.

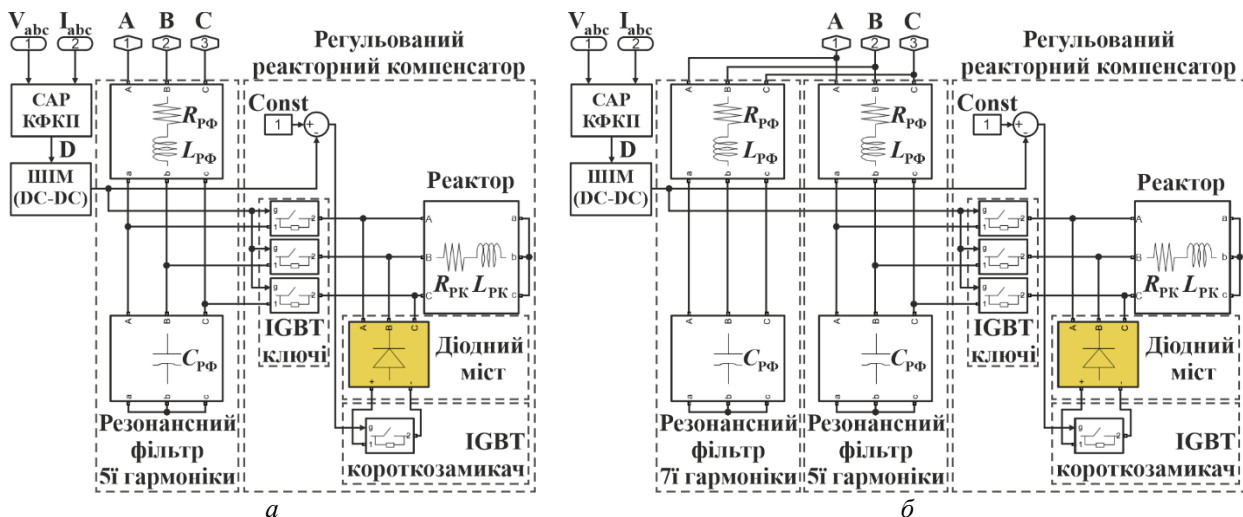


Рис. 3. MATLAB-моделі одно- (а) та дволанкового (б) КФКП

З метою перевірки ефективності запропонованих одно- та дволанкових КФКП та методи визначення їхніх параметрів виконано порівняльне дослідження рівнів коефіцієнтів спотворення напруги і струму мережі за результатами моделювання системи СГ – ПЧ при різних типах, конфігураціях та поєднаннях КФКП і вхідних випрямлячів у складі ПЧ в умовах змінювання частоти генератора. Щоб результати моделювання були зіставними, параметри моделі кожної системи визначено, виходячи з умови однакового співвідношення активної потужності генератора і перетворювача частоти:  $P_{СГ} = 1000$  кВт;  $P_{ПЧ} = 600$  кВт.

На рис. 4 представлено результати моделювання для СЕЕС з НПК на базі ПЧ з вхідним 6-пульсним тиристорним КВ без КФКП та при його підключенні.

Таким чином, як свідчать результати моделювання, комплекс «одномостовий КВ – дволанковий КФКП» по відношенню до суднової мережі діє подібно до двомостового 12-пульсного КВ з усуненням 5- та 7-ї гармонік без застосування додаткового триобмоткового фазозсувного трансформатора та випрямного моста, виконуючи ще й повну керовану компенсацію реактивної потужності, а також зменшення  $K_U$  від 18,35 до 4,86 %.

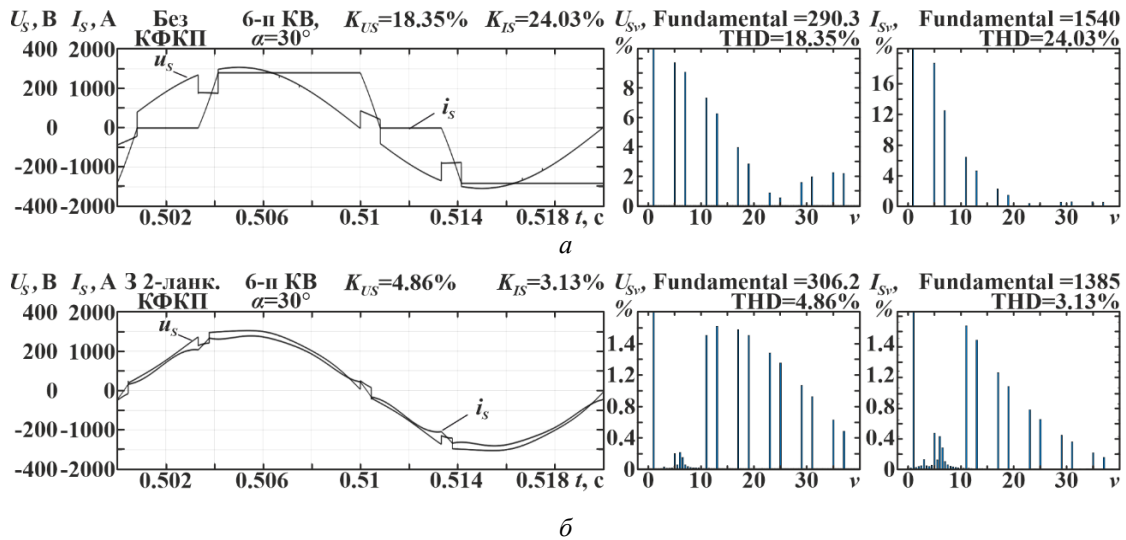


Рис. 4. Результати моделювання напруги і струму в часовій області, їхні спектри і величини коефіцієнтів спотворень  $K_U, K_I$  в мережі СЕЕС з НПК на базі ПЧ з вхідним 6-пульсним тиристорним КВ при куті керування  $\alpha = 30^\circ$  і фіксованій частоті мережі 50 Гц: а – без КФКП; б – з дволанковим КФКП

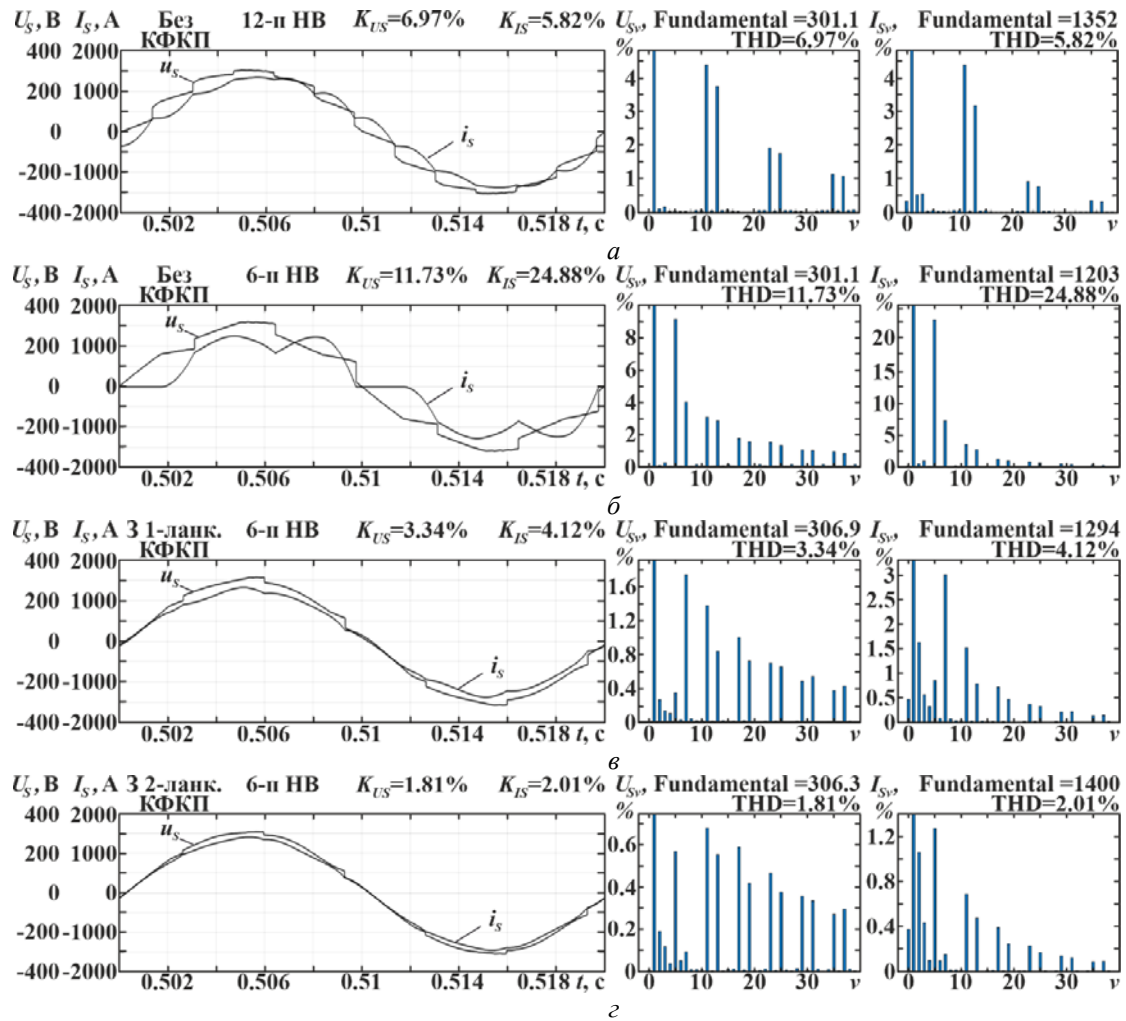


Рис. 5. Результати моделювання напруги і струму в часовій області, їхні спектри і величини коефіцієнтів спотворень  $K_U, K_I$  в мережі СЕЕС з НПК на базі ПЧ: а, б – з вхідними 12-пульсним і 6-пульсним НВ без КФКП; в, г – з вхідним 6-пульсним НВ відповідно при підключених одно- і дволанкового КФКП

На рис. 5 представлено результати моделювання для СЕЕС з НПК на базі ПЧ з вхідними 12-ти і 6-пульсним НВ без КФКП; з 6-пульсним НВ за наявності одно- або дволанкового КФКП.

Отже, модельний експеримент свідчить, що заміна дорогої 12-пульсної двомостової схеми НВ з триобмотковим трансформатором 6-пульсним одномостовим НВ у поєднанні з дволанковим КФКП, налаштованим на 5- та 7-у гармоніки, дає змогу послабити  $K_U$  від 11,73 до 1,81 %. Цю корисну властивість дволанкового КФКП зафіксовано вперше.

За результатами моделювання на рис. 6 побудовані залежності  $K_U$  від відхилень частоти мережі в діапазоні  $f = (50 \pm 10)$  Гц для систем з одно- та дволанковими КФКП при варіантах 6- і 12-пульсного вхідного КВ та 6- і 12-пульсного вхідного НВ у складі ПЧ НПК. Представлені результати дозволяють виявити наступні закономірності:

1. Частотні залежності  $K_U$  для систем з одноланковими КФКП мають майже монотонний характер з незначним збільшенням  $K_U$  при зростанні частоти.
2. Для систем з дволанковими КФКП графіки зазначених залежностей мають явно виражену область увігнутості, околі фіксованої частоти 50 Гц, на краях якої (зліва і справа) спостерігаються різкі пікові зростання  $K_U$ .

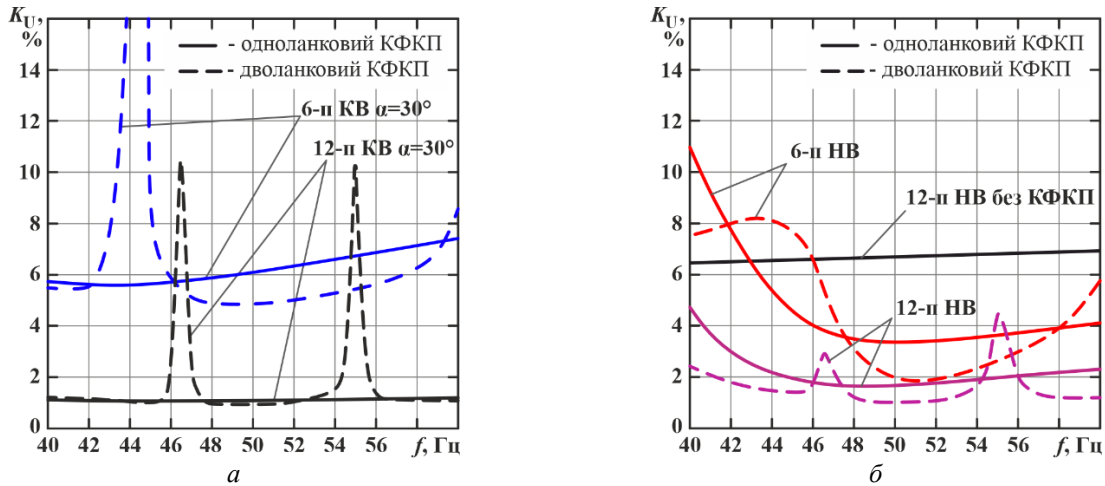


Рис. 6. Залежності  $K_U$  від відхилень частоти в діапазоні  $f = (50 \pm 10)$  Гц для систем з одно- та дволанковими КФКП: *a* – при 6- та 12-пульсному вхідному КВ ПЧ; *б* – при 6- та 12-пульсному вхідному НВ ПЧ

Виявлені закономірності добре узгоджуються з частотними характеристиками еквівалентного повного опору СЕЕС з одно- та дволанковими КФКП  $Z_E(f)$ , представленими відповідно на рис. 7 *a*, *б*.

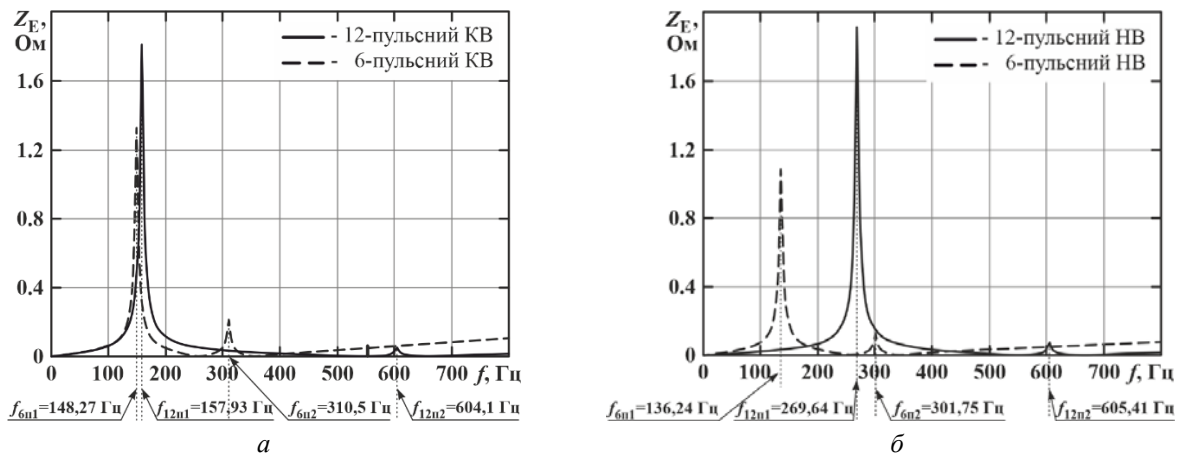


Рис. 7. Частотні характеристики еквівалентного повного опору СЕЕС  $Z_E(f)$  з одно- (*a*) та дволанковими (*б*) КФКП

На графіках  $Z_E(f)$  спостерігаються максимуми – полюси, на частотах яких виникає резонансне підвищення гармонік напруги мережі, що в свою чергу спричиняє різке зростання  $K_U$ . Характер графіків характеристик  $K_U(f)$  пояснюється тим, що при відхиленнях частоти мережі спостерігаються відповідні зміни частотного діапазону кожної гармоніки, генерованої в мережу вхідним випрямлячем ПЧ; граничні частоти цього діапазону дорівнюють добутку найменшого та найбільшого значення частоти мережі на порядок гармоніки. Якщо в цей діапазон потрапляють частоти полюсів еквівалентного опору системи, то спостерігається резонансне підвищення відповідних гармонік, а отже, і інтегрального коефіцієнта спотворення  $K_U$ . Виявлена і описана закономірність спостерігається в СЕЕС тільки з дволанковими КФКП, що наочно ілюструється залежностями  $K_U(f)$  на рис. 6 а, б.

**Висновки.** Отже, з одного боку, застосування дволанкових КФКП замість одноланкових забезпечує значно більш ефективне (в 2...5 разів) послаблення  $K_U$ , а з іншого боку, при відхиленнях частоти мережі необхідна додаткова перевірка систем з дволанковими КФКП на відсутність резонансного підвищення  $K_U$ . З графіків  $K_U(f)$  на рис. 6 а, б випливає, що зазначена вимога завжди виконується за умови  $\Delta f = \pm 5\%$ , що відповідає нормам на допустимі сталі відхилення частоти, згідно з морськими стандартами [2]. У перехідних режимах, коли допускається  $\Delta f = \pm 10\%$  [2], щоб уникнути резонансного підвищення  $K_U$  слід застосовувати тільки одноланкові КФКП.

1. Mindykowski J., Tarasiuk T., Gnaciński P. Review of Legal Aspects of Electrical Power Quality in Ship Systems in the Wake of the Novelisation and Implementation of IACS Rules and Requirement. *Energies* 2021, 14, 3151. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14113151>
2. Mindykowski J. Contemporary challenges to power quality in ship systems-metrological perspective. In Proceedings of the 22nd IMEKO TC4 International Symposium 20th, *International Workshop on ADC Modelling and Testing*, Iasi, Romania, 14–15 September 2017; Pp. 536–558. URL: <https://www.imeko.info/publications/tc4-2017/IMEKO-TC4-2017-106.pdf>
3. Report on the investigation of the catastrophic failure of a capacitor in the aft harmonic filter room on board RMS «Queen Mary 2» while approaching Barcelona 23 September 2010. MAIB. Less Serious Casualty Report №28/2011 December 2011.
4. Evans I., Hoevenaars H., Meeting harmonics limits on marine vessels, *Proceedings of the IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, ESTS'07, Arlington, VA, USA, 21-23 May 2007, Pp. 115–121.
5. Hoevenaars T. Passive vs Active Harmonic Mitigation. *PQ Synergy Conference: Chang Rai, Thailand*, Apr. 24 – 27, 2017.
6. Жук А.К., Жук Д.А. Криворучко Д.В. Фiltroкомпенсирующее устройство с широтно-импульсным регулированием реакторного компенсатора. *Електротехніка і електромеханіка*. 2016, №4(2), С. 59–66. URL: <https://eir.nuos.edu.ua/items/d2d75d68-3eeb-48b8-9636-53a144110cb5>
7. Zhuk O., Zhuk D., Kryvoruchko D., D'yakonov O. Control of Improved Hybrid Power Line Conditioner. Proceedings of the IEEE 38th International Conference on *Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2018)*, Pp. 605–610. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2018.8477453>

## IMPROVEMENT OF MEANS OF ENSURING THE QUALITY OF ELECTRICAL ENERGY IN VESSEL EES WITH SEMICONDUCTOR PROPULSION COMPLEXES

**D.O. Zhuk, O.K. Zhuk, M.O. Kozlov**

National university of shipbuilding n.a. admiral Makarov,  
Pr. of Ukrainian heroes, 9, Mykolaiv, 54025, Ukraine  
e-mail: [dmytro.zhuk@nuos.edu.ua](mailto:dmytro.zhuk@nuos.edu.ua)

*Considered are possible directions for improving the means of ensuring the quality of electric power (PQ) in order to increase their efficiency, taking into account the schematic and mode features of integrated ship electric power systems (SEPS) with semiconductor propulsion complexes (SPC). One- and two-link variants of system controlled filter compensation devices (CFCD) designed for simultaneous full compensation of reactive power, as well as significant weakening of harmonic distortions of voltage and current in SEPS with SPC, are proposed and investigated. A modeling approach has been implemented that allows to compare the effect of the proposed CFCD on the integral coefficient of*

voltage harmonic distortions in systems with different types of input rectifiers as part of the frequency converters (FC) of the SPC, taking into account the possible deviation of the frequency of the ship's network. Ref. 7, fig.7, table.

**Keywords:** power quality, ship power system, ship semi-conductor propulsive complex, frequency converter, controlled filter compensation device.

1. Mindykowski J., Tarasiuk T., Gnaciński P. Review of Legal Aspects of Electrical Power Quality in Ship Systems in the Wake of the Novelisation and Implementation of IACS Rules and Requirement. *Energies* 2021, 14, 3151. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14113151>
2. Mindykowski J. Contemporary challenges to power quality in ship systems-metrological perspective. In Proceedings of the 22nd IMEKO TC4 International Symposium 20th, *International Workshop on ADC Modelling and Testing*, Iasi, Romania, 14–15 September 2017. Pp. 536–558. URL: <https://www.imeko.info/publications/tc4-2017/IMEKO-TC4-2017-106.pdf>
3. Report on the investigation of the catastrophic failure of a capacitor in the aft harmonic filter room on board RMS «Queen Mary 2» while approaching Barcelona 23 September 2010. MAIB. Less Serious Casualty Report №28/2011 December 2011.
4. Evans I., Hoevenaars H., Meeting harmonics limits on marine vessels, *Proceedings of the IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, ESTS'07, Arlington, VA, USA, 21-23 May 2007, Pp. 115–121.
5. Hoevenaars T. Passive vs Active Harmonic Mitigation. *PQ Synergy Conference*: Chang Rai, Thailand, Apr. 24–27, 2017.
6. Zhuk A.K., Zhuk D.A. Krivoruchko D.V. Filter-compensating device with pulse-width regulation of the reactor compensator. *Electrical engineering and electromechanics*. 2016, No. 4(2). Pp. 59–66. (Rus) URL: <https://eir.nuos.edu.ua/items/d2d75d68-3eeb-48b8-9636-53a144110cb5>
7. Zhuk O., Zhuk D., Kryvoruchko D., D'yakonov O. Control of Improved Hybrid Power Line Conditioner. Proceedings of the IEEE 38th International Conference on *Electronics and Nanotechnology* (ELNANO-2018). Pp. 605–610. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2018.8477453>

Надійшла: 13.05.2024

Прийнята: 05.07.2024

Submitted: 13.05.2024

Accepted: 05.07.2024