

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ПОТУЖНОГО ПРИСТРОЮ ПЛАВНОГО ПУСКУ ІЗ СУДНОВОЮ МЕРЕЖЕЮ В ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМАХ

В.В. Бушер¹, докт.техн.наук, В.М. Захарченко², докт.техн.наук, О.В. Глазева², канд.техн.наук, К.А. Хандакжи³, канд.техн.наук

¹ - Одеський національний політехнічний університет,

пр. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна,

victor.v.bousher@gmail.com

² - Національний університет «Одеська морська академія»,

вул. Дідріхсона, 8, Одеса, 65029, Україна,

zvn@onma.edu.ua, o.glazeva@gmail.com

³ - Технічний університет Тафіла,

Тафіла, Йорданія,

drkhandakji@yahoo.com

Здійснено моделювання високовольтного електроприводу баутрастера з пристроєм плавного пуску та запропоновано методику синтезу і метод комутації фільтрів С-типу для забезпечення електромагнітної сумісності електроприводу з судновою мережею в перехідних та усталених режимах. Встановлено, що для пригнічення високочастотних складових у динамічних режимах і підвищення коефіцієнта потужності до оптимального рівня в усталених режимах доцільно використовувати конденсатор фільтра 5-ї гармоніки, відповідно переміщуючи елементи фільтруючого пристрою одночасно з байпасним контактором. Фільтри 7-ї, 11/13-ї гармонік при цьому обираються так, щоб забезпечити відповідність коефіцієнтів гармонійних спотворень за напругою та струмом вимогам стандартів. Бібл. 9, рис. 2.

Ключові слова: пристрій плавного пуску, електромагнітна сумісність, динамічний режим, пасивний фільтр, сумарні гармонійні спотворення, перетворення Фур'є.

Вступ. У сучасних суднових системах електроприводу все частіше використовують регульовані напівпровідникові перетворювачі, які, в свою чергу, характеризуються підвищеним рівнем електромагнітних перешкод. Тому велика увага приділяється питанням розробки методів і засобів, що забезпечують електромагнітну сумісність (ЕМС) устаткування суднових електроенергетичних систем (СЕЕС) у різних режимах роботи потужних суднових електроприводів для заданої якості електроенергії відповідно до вимог стандартів (МЕК (ІЕС) 60034-1, 60034-17, 60050-161, 61000, 61800) [9].

В автономних суднових електротехнічних системах через важкі умови роботи електроустаткування і підвищених вимог до його надійності впроваджуються тиристорні перетворювачі напруги (ТПН) для управління асинхронними двигунами (АД) з потужностями, що досягають 25% і більше від потужності джерел суднової електромережі. Однак це призводить до значного викривлення форми живлячих струмів і напруги, завантаження електромережі додатковою реактивною потужністю і потужністю викривлення. Несинусоїдальність напруги мережі живлення, наявність у зв'язку з цим вищих гармонійних складових напруги і струмів, у свою чергу, негативно впливає на роботу електроустаткування (зростають втрати в електричних машинах, скорочується термін служби електричної ізоляції), засобів автоматизації, зв'язку і персональних комп'ютерів [1].

Відомо, що наразі чисельність АД з напівпровідниковими перетворювачами (НП) на судах досягає 80...90 % від загального числа асинхронних двигунів, тому підвищення якості електроенергії, а саме наближення форми живлячої напруги і струмів до синусоїдальної, є надзвичайно важливою і актуальною задачею.

У багатьох роботах виконано аналіз гармонійного складу струму і напруги в усталених режимах ТПН–АД, в яких використовується зворотний зв'язок за швидкістю, або з підтримкою струму «під відсічку» протягом перехідного процесу, що також може розглядатись як різновид усталеного режиму [7]. Але в баутрастерах на судах високовольтні ТПН–АД найчастіше використовуються як пристрої плавного пуску (ППП) з лінійною зміною напруги або кута відпирання тиристорів. Це (з урахуванням вентиляторного навантаження на валу двигуна) забезпечує необхідне зменшення перевантаження як механічних елементів приводу, так і електроенергетичної системи судна. В роботі [6] проаналізовано зміну гармонійного складу струму та напруги протягом перехідного процесу за такого режиму роботи. На підставі проведеного аналізу виконується синтез фільтрів вищих гармонік для забезпечення вимог електромагнітної сумісності з мережею живлення, які виключаються з роботи по закінченні перехідних процесів [2, 4]. В усталених режимах для компенсації реактивної складової потужності використовують конденсаторні батареї відповідної ємності.

Мета роботи – на підставі аналізу гармонійного складу струмів і напруги під час плавного пуску в потужних високовольтних електроприводах баутрастерів з тиристорними перетворювачами напруги з урахуванням обмеженої потужності мережі і обрання найгірших режимів розробити рекомендації щодо оптимізації вибору як параметрів фільтрів вищих гармонік, так і конденсаторної батареї.

Матеріали досліджень. Об'єктом дослідження обрано пристрій плавного пуску з АД АМІ630L10АВ (3,3 MW) від високовольтної мережі 6,6 kV для обґрунтування методики вибору фільтрів вищих гармонік у динамічних режимах.

Функціонально асинхронний електропривод з ППП складається з силової частини із трьох (у нереверсивному) або п'яти (в реверсивному) зустрічно-паралельних пар тиристорів, системи імпульсно-фазового управління, регулятора кута відпирання тиристорів за обраним законом, байпасного контактора, який підключає АД до мережі живлення після повного відпирання тиристорів. При розробці моделі високовольтної системи «Суднова мережа – ТПН – АД – Навантаження» основними вихідними даними були номінальні параметри АД з короткозамкненим ротором, механічні характеристики відцентрового механізму (Bow Thruster ТСТ-315), параметри суднової мережі: номінальна напруга (6,6 kV) та частота (60 Hz), опір мережі обрано в 4 рази меншим ніж у АД.

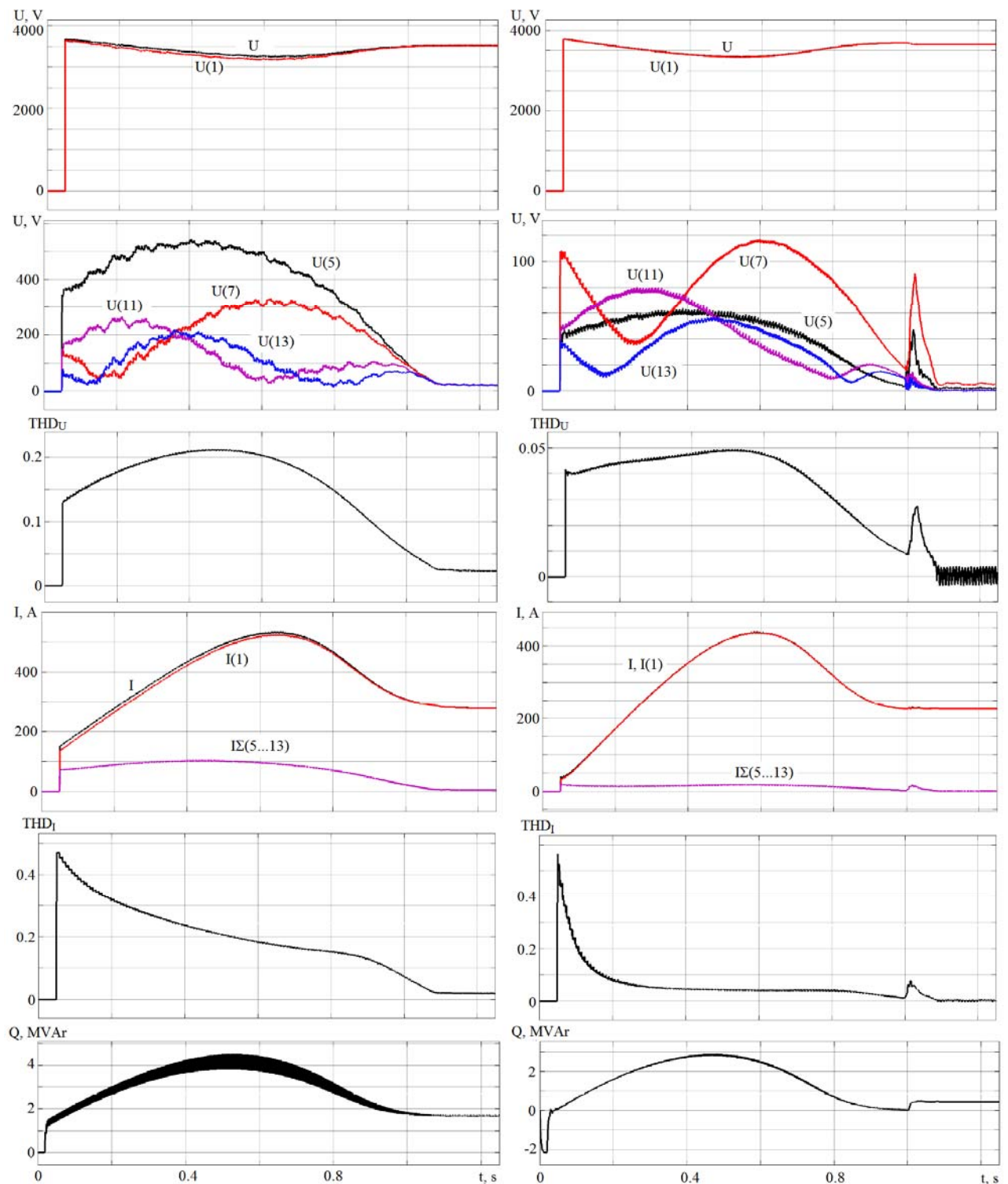


Рис. 1

У моделі системи отримано часові діаграми напруги U , струмів I на ділянках «Суднова мережа – ТПН», їхніх існуючих гармонійних складових від 1-ї до 13-ї ($U(1)\dots U(13)$, $I(1)\dots I(13)$), коефіцієнтів сумарного гармонійного спотворення THD_U , THD_I та реактивної потужності Q , які зображено на рис. 1 ліворуч.

Як видно з отриманих результатів, найбільше значення коефіцієнт гармонійних спотворень THD_U має при розгоні АД і значно перевищує допустиме за ГОСТ 13109-97 значення 8%, а THD_I перевищує допустиме значення при великих кутах відпирання тиристорів протягом майже половини часу перехідного процесу. В усталеному режимі реактивна потужність становить більше 50 % корисної потужності двигуна, що призводить до підвищення струму в мережі на 10...15 %.

Для пригнічення вищих гармонік використаємо фільтри С-типу, які складаються з конденсатора $C1$, резонансного контура $C2-L2$ та паралельного до нього резистора $R2$ для зменшення добротності контура.

Попередні розрахунки показали, що конденсатор $C1$ у фільтрах може мати ємність, яка близька до ємності конденсатора, який повинен компенсувати реактивну потужність двигуна.

Це надає змогу запропонувати наступний алгоритм розрахунку параметрів фільтрів і роботи фільтруючого пристрою, який відрізняється від відомих [5, 10].

Цей алгоритм складається з наступних кроків.

1. Розрахуємо ємність компенсаційного конденсатора $C=2*(0.7\dots 0.8)Q/U^2$.
2. Використаємо цей конденсатор як $C1$ у фільтрі 5-ї гармоніки ($C_{1.5}=C$). Тоді відповідно отримаємо $C_{2.5}=C_{1.5}*(5^2-1)$, $L_{2.5}=1/(2\pi f)^2 C_{2.5}$.
3. Обираємо $R_{2.5}$ так, щоб отримати добротність контура 10...15 та розраховуємо перехідні процеси з урахуванням фільтра 5-ї гармоніки.
4. Обираємо параметри фільтрів 7-ї та 11/13-ї гармонік так, щоб забезпечити пригнічення цих складових до отримання задовільного рівня THD_U , THD_I .

У результаті отримуємо фільтруючий пристрій, схему якого показано на рис. 2. Крім типових фільтрів С-типу він включає два трифазні контактори:

$K_{2.5}$ – нормально розімкнений, який спрацьовує одночасно з байпасним контактором і перетворює фільтр С-типу в компенсаційний конденсатор. Завдяки тому, що до комутації він вже підключений до мережі, перехідні процеси в ньому не навантажують мережу надвеликими струмами;

$K_{2.7_11}$ – нормально замкнений, який розмикається одночасно з байпасним контактором і виключає з системи непотрібні в усталених режимах елементи фільтруючого пристрою.

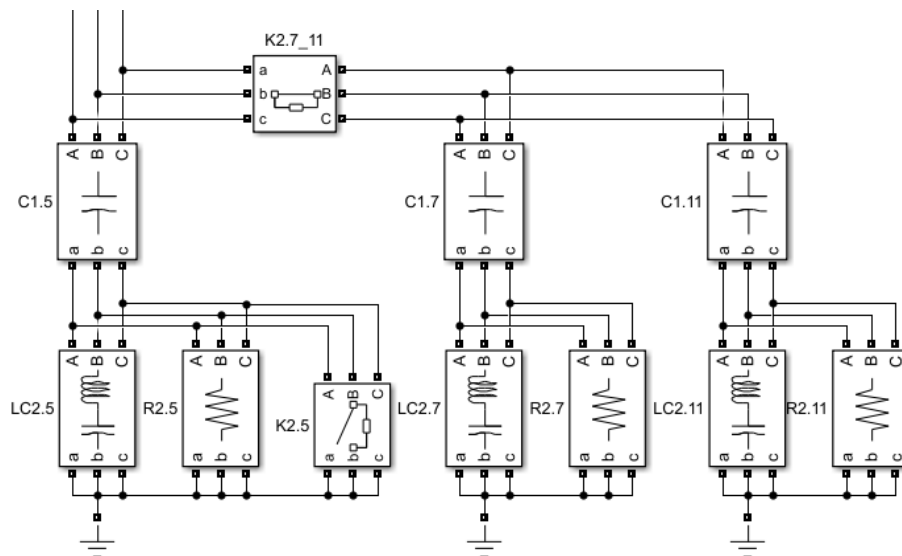


Рис. 2

Важливо зазначити, що така модифікація не збільшує кількість контакторів, але дає змогу позбутися компенсаційної конденсаторної батареї. У результаті використання такого пристрою отримано перехідні процеси, які зображено на рис. 1 праворуч.

Видно, що амплітуду вищих гармонік за напругою зменшено у 3–9 разів, що забезпечує $THD_U < 5\%$, сумарний струм вищих гармонік зменшено в 4 рази зі 100 до 25 А, що забезпечує $THD_I < 10\%$ протягом більшої частини перехідного процесу. Комутація контакторів (у момент часу 1 с) не призводить до суттєвих навантажень у мережі та електромагнітних коливань струмів і напруги. В усталеному режимі реактивну потужність зменшено до 0.5 MVar, що відповідно дало змогу зменшити струми з 280 до 230 А.

Висновки. На підставі моделювання високовольтного електроприводу баутрастера з пристроєм плавного пуску і фільтрами вищих гармонік отримано результати, які дають змогу запропонувати метод синтезу і комутації фільтрів С-типу для забезпечення електромагнітної сумісності електроприводу з судовою мережею в перехідних та усталених режимах, оснований на тому, що для пригнічення високочастотних складових у динамічних режимах і підвищення коефіцієнта потужності до оптимального рівня в усталених режимах доцільно використовувати конденсатор фільтра 5-ї гармоніки, відповідно перемикаючи елементи фільтруючого пристрою одночасно з байпасним контактором. Фільтри 7-ї, 11/13-ї гармонік при цьому обираються так, щоб забезпечити відповідність коефіцієнтів гармонійних спотворень за напругою та струмом вимогам стандартів електромагнітної сумісності. Також це дає змогу зменшити кількість і сумарну ємність конденсаторних батарей у фільтруючому пристрої.

1. Анисимов Я.Ф., Васильев Е.П. Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей и судовых электроустановок. Л.: Судостроение, 1990. 264 с.
2. Арриллага Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
3. Вершинин В.И., Загривный Э.А., Козярук А.Е. Электромагнитная и электромеханическая совместимость в электротехнических системах с полупроводниковыми преобразователями. СПб.: Изд. СПГИ (ТУ), 2000. 69 с.
4. Воршевский А.А., Гальперин В.Е. Электромагнитная совместимость судовых технических средств. СПб.: ГМТУ. 2006. 317 с.
5. Глазева О.В., Бушер В.В. Методика розрахунку параметрів пасивних фільтрів вищих гармонік Зб. матеріалів VI міжн. наук.-практ. конф. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті* (MINTT-2014). Херсон, Україна. 2014. С. 240-243.
6. Захарченко В.М., Бушер В.В., Глазева О.В., Хандакжи К. Аналіз електромагнітної сумісності потужного пристрою плавного пуску із судовою мережею в динамічних режимах. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2016. Вип. 21(97). С. 17–23.
7. Зюзев А.М., Степанюк Д.П., Бубнов М.В. Применение ФКУ для улучшения электромагнитной совместимости с сетью устройств плавного пуска асинхронных двигателей. *Энергетика и электромагнитная совместимость электроприводов переменного тока*, ЭППТ–2015. Екатеринбург, 2015. С. 83-88.
8. Ткачук А., Кривовяз В., Копырин В., Силуков А. Плавный пуск группы высоковольтных асинхронных электроприводов центробежных механизмов. *Силовая электроника*. 2008. Вып.2. С. 54-58.
9. IEEE Standards Association, 519-2014-IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. New York, IEEE, 2014. URL: <https://standards.ieee.org/findstds/standard/519-2014.html>.

УДК 629.5.064.5

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ МОЩНОГО УСТРОЙСТВА ПЛАВНОГО ПУСКА С СУДОВОЙ СЕТЬЮ В ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ

В.В. Бушер¹, докт.техн.наук, **В.Н. Захарченко**², докт.техн.наук, **О.В. Глазева**², канд.техн.наук, **К.А. Хандакжи**³, канд.техн.наук

¹- Одесский национальный политехнический университет,

пр. Шевченко, 1, Одесса, 65044, Украина, victor.v.bousher@gmail.com

²- Национальный университет «Одесская морская академия»,

ул. Дидрихсона, 8, Одесса, 65029, Украина, zvz@onma.edu.ua, o.glazeva@gmail.com

³- Тафила Технический Университет,

Тафила, Иордания,

drkhandakji@yahoo.com

Проведено моделювання високовольтного електроприводу баутрастера з пристроєм плавного пуску і запропоновано методика синтезу і метод комутації фільтрів С-типу для забезпечення електромагнітної сумісності електроприводу з судовою мережею в перехідних та установившихся режимах. Установлено, що для подавлення високочастотних складових в перехідних процесах і підвищення коефіцієнта потужності до оптимального рівня в установившихся процесах цілесобразно використовувати конденсатор фільтра 5-ї гармоніки, забезпечивши відповідну комутацію елементів фільтра одночасно з підключенням байпасного контактора. Фільтри 7-ї, 11/13-ї гармонік при цьому вибираються так, щоб забезпечити відповідність коефіцієнтів гармонічних спотворень по току і напругі вимогам стандартів. Бібл. 9, рис. 2.

Ключевые слова: устройство плавного пуска, электромагнитная совместимость, динамический режим, пассивный фильтр, суммарные гармоничные искажения, преобразование Фурье.

PROVISION OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF A HIGH-POWER SOFT STARTER WITH VESSEL'S POWER SYSTEM IN DYNAMIC MODES

V. Busher¹, V. Zakharchenko², O. Glazeva², K. Khandakji³

¹ - Odesa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine,

pr. Shevchenka, 1, Odesa, 65044, Ukraine,

victor.v.bousher@gmail.com

² - Odesa National Maritime Academy, Odessa, Ukraine,

st. Didrikhsona, 8, Odesa, 65029, Ukraine,

zvn@onma.edu.ua,

o.glazeva@gmail.com

³ - Tafila Technical University,

Tafila, Jordan,

drkhandakji@yahoo.com

A soft starter-fed high voltage induction motor drive of a ship bow thruster is simulated. The synthesis procedure and switching methodology of a C-type filter are proposed to ensure the electromagnetic compatibility of the electric drive with the ship electrical power system in transient and steady-state conditions. Analysis shows that, suppression of high-frequency components in transients, and maintaining the power factor at the optimum level in steady-state operation is reasonable by using a 5th-harmonic capacitive filter, ensuring the appropriate switching of the filter elements simultaneously with the connection of the by-pass contactor. The filters of the 7th, 11th/13th harmonics are selected in such a way to ensure that the total harmonic distortion of the line current and voltage meet the standards defined by IEC.

References 9, figures 2.

Keywords: high-power soft starter, electromagnetic compatibility, dynamic mode, passive filter, total harmonic distortion, vessel's power system, Fourier transform.

1. Anisimov Ya.F., Vasilev E.P. Electromagnetic Compatibility of Semiconductor Converters and Ship's Electrical Equipment. St. Petersburg: Sudostroenie, 1990. 264 p. (Rus)
2. Arrillaga Dzh., Bredli D., Bodzher P. Power System Harmonics. Moskva: Energoatomizdat, 1990. 320 p. (Rus)
3. Vershinin V.I., Zagrivnyi E.A., Kozyaruk A.E. Electromagnetic and Electromechanical Compatibility in Electro-technical Systems with Semiconductor Converters. St. Petersburg: SPGGI(TU), 2000. 69 p. (Rus)
4. Vorshevskii A.A., Galperin V.E. Electromagnetic Compatibility of Ship's Technical Facilities. St. Petersburg: MGTU, 2006. 317 p. (Rus)
5. Glazeva O.V., Busher V.V. Methodology of Higher Harmonics Passive Filters Calculation. VI International Conference on Modern information and innovative technologies in transport (MINTT-2014). Kherson, Ukraine, 2014. Pp. 240-243. (Ukr)
6. Zakharchenko V.N., Busher V.V., Glazeva O.V., Khandakji K. Analysis of Electromagnetic Compatibility of High-Power Soft Starter with Vessel's Power Network in Dynamic Modes. *Elektrotekhnicheskie i comp-iuternye sistemy*. 2016. No 21(97). Pp. 17-23. (Ukr)
7. Zyuzev A., Stepanyuk D. Using FKU for Improvement of Electromagnetic Compatibility of Soft Starters. EPPT-2015, Ekaterinburg. 2015. Pp. 83-88. (Rus)
8. Tkachuk A., Krivovyaz V., Kopyrin V., Silukov A. Continuously Variable Start of a Group of High-Voltage Asynchronous Electric Drives of Centrifugal Mechanisms. *Silovaia elektronika*. 2008. No 2. Pp. 54-57. (Rus)
9. IEEE Standards Association, 519-2014-IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, New York, IEEE, 2014. URL: <https://standards.ieee.org/findstds/standard/519-2014.html>

Надійшла 05.03.2018

Остаточний варіант 17.09.2018