

УДК 621.314

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.59.099>

## ОДНОФАЗНИЙ ГІБРИДНИЙ ФІЛЬТР ДЛЯ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

**В.М. Губаревич**<sup>\*</sup>, канд. техн. наук, **Ю.В. Маруня**<sup>\*\*</sup>, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна  
e-mail: [marunia@ied.org.ua](mailto:marunia@ied.org.ua)

Проведено аналіз однофазного гібридного фільтра гармонік струму мережі, який може застосовуватися в децентралізованій системі електропостачання. Виконано математичне моделювання такої системи, що живить мостовий випрямляч із ємнісним фільтром та активним навантаженням потужністю 10 кВт. Проведено порівняння спектрограм і епюр струму різних конфігурацій гібридного фільтра, реалізованого в активній частині на основі активного коректора паралельного типу, а в пасивній частині – ширококутового ЛМС-фільтра з додатковою обмоткою  $L_d$ . Визначено максимальні відхилення струму від форми першої гармоніки струму споживання для різних структур пасивного фільтра, що є визначальним для розрахунку силової частини активного фільтра. Розраховано встановлену потужність активного фільтра, отримано коефіцієнти гармонік струму споживання мережі живлення. Бібл. 11, рис. 5, таблиця.

**Ключові слова:** коефіцієнт гармонік струму,  $THD_I$ , пасивний фільтр, активний фільтр паралельного типу, гібридний фільтр, децентралізована система електропостачання.

Велика кількість електротехнічних пристроїв здійснює живлення свого навантаження від мостових випрямлячів із ємнісним фільтром [1]. Мостовий випрямляч споживає струм несинусоїдної форми і є потужним нелінійним навантаженням для децентралізованих систем електропостачання (СЕП), погіршуючи параметри якості електроенергії мережі. СЕП обмеженої потужності накладають вимоги до навантажень, що підключені до них. Якщо несинусоїдний струм проходить через коло з поздовжніми параметрами, то виникають спотворення напруги у вузлах підключення інших споживачів, що впливає на їхню роботу. Це породжує проблеми електромагнітної сумісності. Важливою й основною вимогою забезпечення ефективності функціонування та експлуатації децентралізованої СЕП як системи з обмеженою потужністю є дотримання нормованого рівня параметрів якості електричної енергії [2]. І чим «слабкішою» є така система, тобто чим більший відносний опір короткого замикання вона має, тим суворішими мають бути обмеження за показниками якості електроенергії, щоби дістати безпечну та безвідмовну роботу споживачів. Тому електромагнітна сумісність мостових випрямлячів з децентралізованими СЕП є обов'язковою. Сучасна система «СЕП – споживач» (рис. 1) являє собою комплекс, що складається з децентралізованої мережі обмеженої потужності, яка має порівняно великий опір короткого замикання ( $Z_{K3} > 4\%$ ), мостового випрямляча з ємнісним фільтром та активним навантаженням і засобів узгодження вхідних кіл випрямляча з мережею живлення, які можуть бути реалізовані на основі силових фільтрів, приєднаних послідовно або паралельно до входу випрямляча. Одним зі шляхів розв'язання проблеми електромагнітної сумісності мостового випрямляча з ємнісним фільтром та СЕП є встановлення гібридних фільтрів [3–6]. Вони являють собою схемне об'єднання активних та пасивних фільтрів, параметри

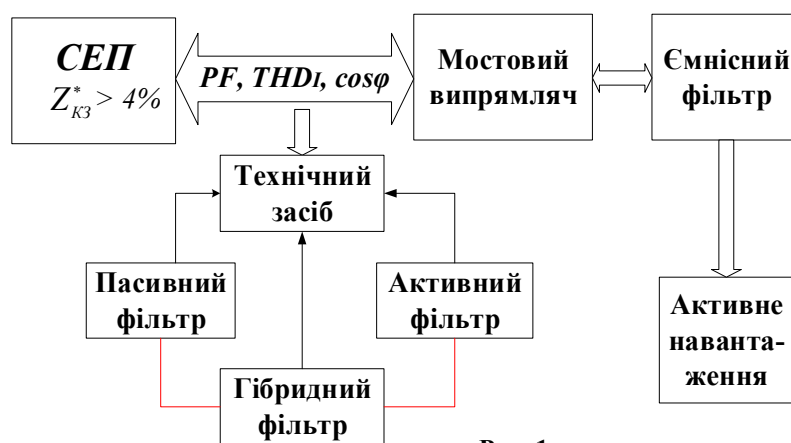


Рис. 1

яких відрізняються від параметрів, які вони мали б у випадку роздільного їхнього застосування у разі роботи на те ж навантаження [7]. Така концепція перспективна як для індивідуальних навантажень, так і для варіативних поєднань на рівні всієї енергосистеми, адже дає змогу отримати бажаний рівень фільтрації, використовуючи структури, розраховані на меншу встановлену потужність щодо потужності навантаження. У роботі [8] за допомогою імітаційного моделювання в спеціалізованій програмі *Omega 2010*, розробленій в Інституті електродинаміки НАН України, досліджено однофазні варіанти гібридного фільтра, реалізовані в активній частині на основі активного коректора форми струму (АКФС), принцип роботи якого описано в [9], а в пасивній частині – в одному випадку з 3 % лінійним реактором, а в другому – з широкосмуговим *LMC*-фільтром. Технічне рішення гібридного фільтра на основі структур АКФС+*LMC* дало змогу знизити діюче значення струму активного фільтра, а, отже, його масу і габарити й відповідно вартість. Однак у разі застосування *LMC*-фільтра на вході випрямляча на кривій споживаного струму виникають комутаційні сплески в моменти, коли випрямляч починає споживати струм із мережі, як показано на рис. 2, де зображено криві струмів у різних точках такої структури: *LMC*-фільтр – мостовий випрямляч – ємнісний фільтр  $C_\phi$  – активне навантаження  $R_H$ .

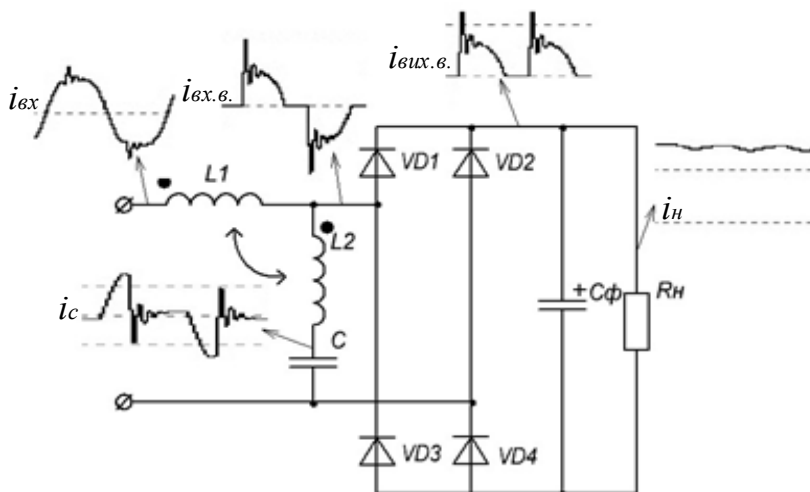


Рис. 2

У роботі [10] було досліджено варіанти впливу на амплітуду комутаційного сплеску, які полягають у тому, що між поздовжньою обмоткою *LMC*-фільтра ( $L1$ , рис. 2) і входом випрямляча включається додаткова обмотка  $Ld$  зустрічно та узгоджено стосовно  $L1$ . Визначено, що приглушення зазначеного сплеску струму більш ефективно в разі під'єднання цієї обмотки узгоджено до поздовжньої обмотки *LMC*-фільтра. Було б

доцільно розглянути вдосконалений таким чином *LMC*-фільтр у складі гібридної структури.

**Метою пропонованої роботи** є дослідження структури однофазного гібридного фільтра на основі АКФС та широкосмугового *LMC*-фільтра з додатковою обмоткою  $Ld$ , що включена узгоджено до поздовжньої обмотки, на вході мостового випрямляча з ємнісним фільтром та активним навантаженням для отримання рекомендацій з можливості застосування розглянутого фільтра в децентралізованих СЕП.

Для ефективного та надійного функціонування СЕП задамося бажаними параметрами якості електричної енергії, що споживається навантаженням, а саме: значення коефіцієнта гармонік струму  $THD_I < 2\%$ , коефіцієнта потужності  $PF = \cos \varphi \cdot [1 + (THD_I)^2]^{-1/2}$  – близьке до одиниці. Малі значення  $THD_I$  було обрано з урахуванням того, що децентралізовані СЕП можуть мати спотворення форми наруги, тобто значний показник коефіцієнта гармонік напруги мережі  $THD_U (> 4\%)$  [11], що пропорційно призведе до відповідного підвищеного значення  $THD_I$ .

На рис. 3 наведено схему гібридного фільтра, що складається з пасивного *LMC*-фільтра (з додатковою обмоткою  $Ld$ ) та АКФС, який представлено паралельним з'єднанням джерел струму, що генерують струм активного коректора  $i_{af}$  у вигляді 3-, 5-, 7- та 9-ї гармонік різних амплітуди та фази (позначено як АФ). Кількість згенерованих гармонік виявилася достатньою для отримання заданих значень параметрів якості електроенергії. Гармоніки вищих порядків не генеруються в цьому випадку, адже завдяки властивості *LMC*-фільтра ефективно їх приглушувати, їхній внесок у показник коефіцієнта гармонік струму мережі проти

вищезазначених мізерно малий (десяті долі відсотку). У разі потреби дістати показник  $THD_I$  наближеним до нульового значення можна підкорегувати імітаційну модель та врахувати гармоніки включно до 27-ї (показано далі на спектрограмі рис. 4 б). Параметри схеми для моделювання були такими [11]:  $U_M=230$  В, частота напруги 50 Гц, потужність навантаження 10 кВт, ємність конденсатора фільтра  $C_\phi=10$  мФ. LMC-фільтр представлено реактором з індуктивностями  $L1=5,3$  мГн,  $L2=1,23$  мГн,  $Ld=0,8$  мГн та конденсатором із ємністю  $C=170$  мкФ. Значення обмотки  $Ld=0,8$  мГн як оптимальне для зазначеного LMC-фільтра було визначено, з одного боку, з урахуванням показників навантаження, за якими  $P_H=10$  кВт,  $U_H=300$  В  $\pm 10$  %, та з іншого – досягненням мінімальної величини максимального відхилення струму пасивного фільтра від амплітуди основної частоти струму споживання з мережі. Результати моделювання процесів, що виникають у такій схемі, наведено в таблиці.

Варіант 1 ілюструє значення величин, отриманих для структури гібридного фільтра на основі активного фільтра та пасивного широкосмугового LMC-фільтра. Варіант 2 стосується гібридного фільтра з вдосконаленим LMC-фільтром, де  $I_{вх}$  та  $I_{вх,m}$  – діюче та амплітудне значення вхідного струму споживання з мережі живлення,  $\Delta I$  – максимальне відхилення від форми першої гармоніки вхідного струму споживання з мережі живлення,  $I_{аф}$  – діюче значення струму активного фільтра,  $I_H$  та  $U_H$  – середнє значення струму та напруги навантаження (коефіцієнт пульсацій  $\leq 5$  %),  $THD_I$  – коефіцієнт гармонік струму споживання з мережі живлення. Коефіцієнт потужності  $PF$  в такому випадку має значення 0,989 для обох варіантів, адже  $\cos\varphi = 0,99$ .

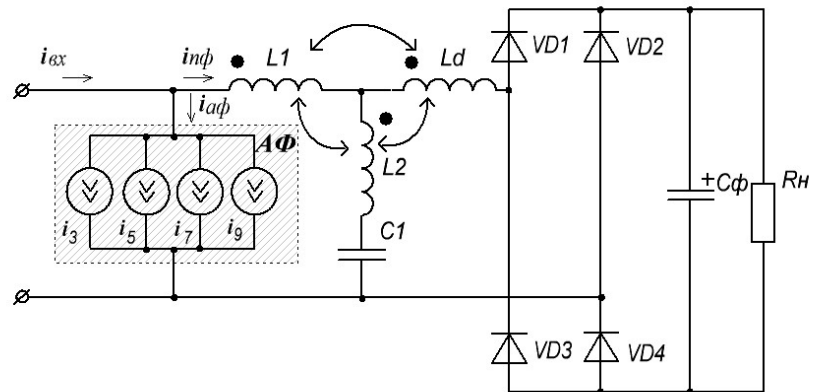


Рис. 3

Варіанти	$I_{вх}, A$	$I_{вх,m}, A$	$I_{аф}, A$	$\Delta I, A$	$U_H, B$	$I_H, A$	$THD_I, \%$	
1	АФ+ LMC	50,82	72,54	8,76	19,15	290,4	34,4	1,73
2	АФ+LMC+Ld	49,31	69,96	5,74	10,45	286	35,2	1,55

Для розглянутого пристрою діюче значення струму  $I_{аф}$  визначається як

$$I_{аф} = \sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2}, \quad (1)$$

де  $I_3...I_9$  – діючі значення струмів гармонік, що генеруються АФ. Отже, встановлена потужність для структури АФ+LMC складає

$$S_{аф} = I_{аф} \times U_1 = 8,76 \times 230 = 2 \text{ кВА},$$

тобто становить 20 % потужності навантаження. Саме вона визначає здебільшого вартість гібридного фільтра. Для структури LMC-фільтра з додатковою обмоткою  $Ld$  цей показник значно менший і складає 1,3 кВА, тобто становить лише 13 % потужності навантаження (таблиця, варіант 2).

Головну перевагу вдосконаленого LMC-фільтра ілюструють епюри, що зображено на рис. 4 та 5. На рис. 4 показано спектр струму LMC-фільтра до (рис. 4 а) та після (рис. 4 б) вдосконалення.

Рівень третьої гармоніки струму хоч і зріс (рис. 4 б), проте вдалося зменшити всі інші рівні гармонік, починаючи з сьомої, завдяки чому і зменшилася встановлена потужність АКФС (формула 1). Це відображається на формі струму LMC-фільтра (рис. 5 а – «до» та рис. 5 б – «після» вдосконалення).

Миттєве значення  $i_{аф}$  генерується як різниця між миттєвими значеннями повного

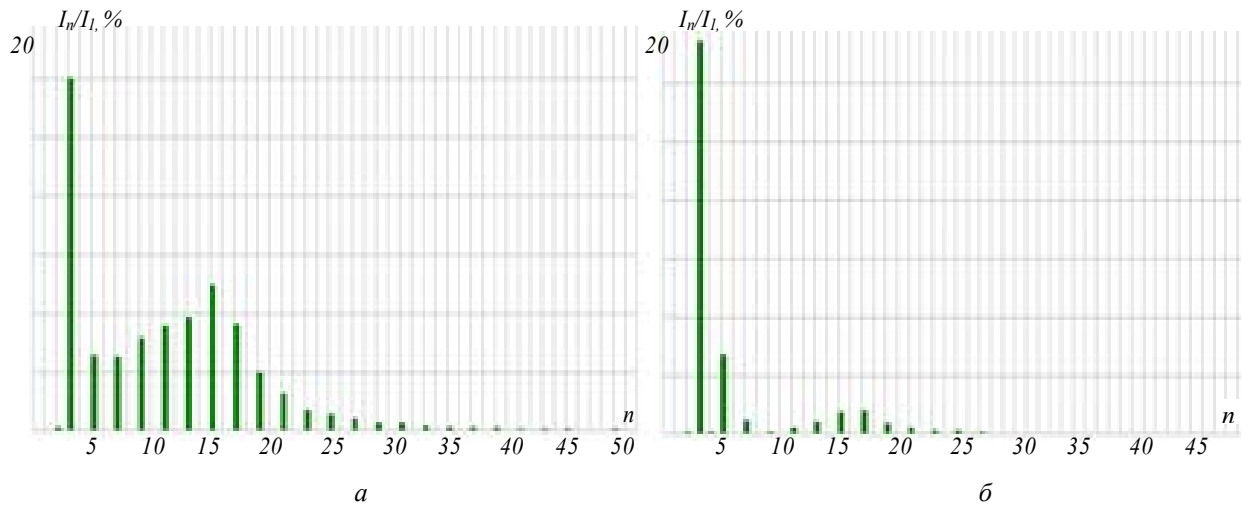


Рис. 4

струму навантаження та першої гармоніки струму споживання з мережі. Складання миттєвих значень струму активного фільтра зі струмом пасивного фільтра забезпечує споживання з мережі живлення вхідного струму синусоїдної форми, що за фазою збігається з напругою мережі. Можна зазначити, що амплітуда сплеску струму визначає максимальне відхилення від форми першої гармоніки вхідного струму споживання  $\Delta I$ . Згідно з таблицею значення  $\Delta I$  майже вдвічі менше для 2-го варіанту структури.

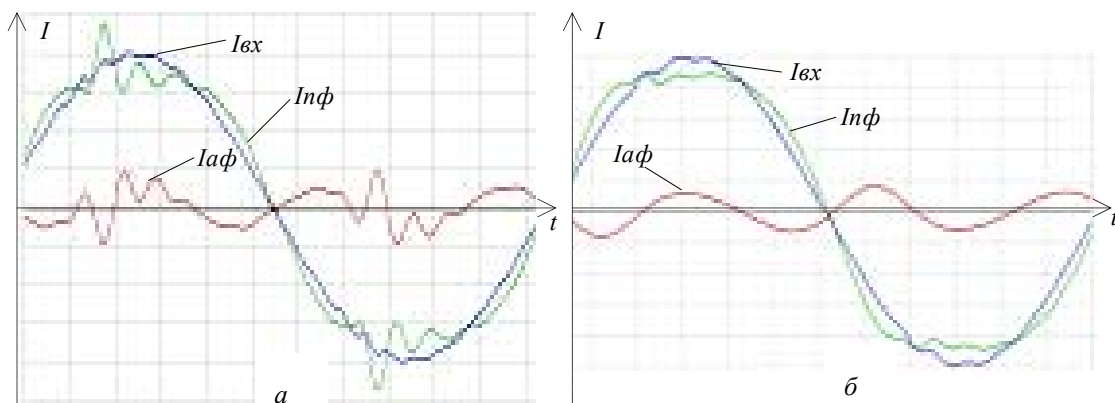


Рис. 5

**Висновок.** Введення узгоджено увімкненої до поздовжньої додаткової обмотки *LMC*-фільтра дало змогу суттєво зменшити встановлену потужність активного коректора в гібридній конфігурації (на 35 %), зменшити струм, на який розраховується АКФС, тобто максимальний струм через силовий реактор активного коректора (на 45,4 %), поліпшити коефіцієнт гармонік струму споживання з мережі (на 10,4 %) завдяки покращенню спектра вищих гармонік струму пасивного фільтра. Розглянутий гібридний фільтр рекомендовано для застосування в децентралізованих СЕП.

Фінансується за держбюджетною темою "Розробка електронного та електротехнічного обладнання для нової технології плавлення та обробки скла та гірських порід індукційними струмами середнього діапазону частот" (Шифр "Розпла"), що виконується за Постановою Бюро ВФПЕ 05.07.2016, протокол № 11. Державний реєстраційний номер 0117U002584. КПКВК 6541030.

1. Bose B. K.. Modern Power Electronics and AC Drives. Prentice Hall PTR, 2002. 711 p.
2. IEC 61000-3-12:2011. Electromagnetic compatibility. Part 3-2: Limits. Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current  $>16A$  and  $\leq 75A$  per phase.
3. Волков И.В. Новая концепция построения силовых цепей частотно-регулируемых асинхронных электроприводов. *Технічна електродинаміка*. 1999. № 4. С. 21–26.
4. Levin M., Volkov I. Universal harmonic mitigating system. Patent USA 6127743. Oct.3, 2000.

5. Levin M., Volkov I. Combined harmonic filter and phase converter. Patent USA 2006/0197385b A1, Sep.7, 2006.
6. Волков И.В., Акинин К.П., Исаков Г.В. Сравнительный анализ способов фильтрации токов, потребляемых выпрямительными установками. *Технічна електродинаміка*. 1999. № 6. С. 23–27.
7. Волков И.В., Стяжкин В.П., Подейко П.П. Подавление гармоник тока питания мощных однофазных нагрузок. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 5. С. 36–42.
8. Маруня Ю.В. Однофазний гібридний фільтр на вході випрямляча з ємнісним фільтром та активним навантаженням. *Праці Інституту електродинаміки НАНУ*. 2020. Вип. 55. С. 11–15. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.55.011>
9. Спирін В.М., Губаревич В.М., Гребенюк В.Г., Салко С.В., Маруня Ю.В. Дослідження роботи активного коректора форми струму при малій потужності навантаження. *Праці Інституту електродинаміки НАНУ*. 2016. Вип. 43. С. 96–101.
10. Губаревич В.Н. Маруня Ю.В. Однофазный широкополосный LMC-фильтр на входе выпрямителя с емкостной нагрузкой. *Вісник НТУ "Харківський політехнічний інститут"*. 2015. Вип. 12 (1121). С. 398–401.
11. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT).

### SINGLE-PHASE HYBRID FILTER FOR DECENTRALIZED POWER SYSTEMS

V. M. Gubarevich, Yu.V. Marunia

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine  
e-mail: [marunia@ied.org.ua](mailto:marunia@ied.org.ua)

*The analysis of the single-phase hybrid filter of network current harmonics, which can be applied in the decentralized power system, was carried out. Mathematical modeling of such a system that feeds a bridge rectifier with a capacitive filter and the 10 kW active load was performed. A comparison of current spectrograms and current diagrams of different configurations of a hybrid filter implemented in the active part on the basis of an active corrector of the parallel type, and in the passive part - a broadband LMC filter with an additional winding  $L_d$  was carried out. The maximum current deviations from the shape of the first harmonic of the current consumption for different structures of the passive filter were determined, which is decisive for the calculation of the power part of the active filter. The installed power of the active filter was calculated, the harmonic coefficients of the current consumption of the power supply network were obtained. Ref. 11, fig. 5, table.*

**Keywords:** current harmonic coefficient,  $THD_I$ , passive filter, active filter of parallel type, hybrid filter, decentralized power supply system.

1. Bose B. K.. Modern Power Electronics and AC Drives. Prentice Hall PTR, 2002. 711 p.
2. IEC 61000-3-12:2011. Electromagnetic compatibility. Part 3-2: Limits. Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current  $>16A$  and  $\leq 75A$  per phase.
3. Volkov I.V. New concept of construction of power circuits of variable frequency asynchronous electric drives. *Tekhnichna elektrodynamika*. 1999. No 4. Pp. 21–26. (Rus)
4. Levin M., Volkov I. Universal harmonic mitigating system. Patent USA 6127743. Oct.3, 2000.
5. Levin M., Volkov I. Combined harmonic filter and phase converter. Patent USA 2006/0197385b A1, Sep.7, 2006.
6. Volkov I.V., Akinin K.P., Isakov G.V. Comparative analysis of methods of filtering currents consumed by rectifier units. *Tekhnichna elektrodynamika*. 1999. No 6. Pp. 23–27. (Rus)
7. Volkov I.V., Styazhkin V.P., Podeiko P.P. Suppression of current harmonics feeding powerful single-phase loads. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2019. No 5. Pp. 36–42. (Rus)
8. Marunia Yu.V. Single-phase hybrid filter at the input of the rectifier with a capacitive filter and active load. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2020. No 55. Pp. 11–15. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.55.011>
9. Spirin V.M., Gubarevich V.M., Grebenyuk V.G., Salko S.V., Marunya Yu.V. Study of the active current shape corrector at low load power. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2016. No 43. Pp. 96–101. (Ukr)
10. Gubarevich V.N., Marunia Yu.V. Single-phase broadband LMC filter at the rectifier input with capacitive load. *Visnyk NTU KhPI*. 2015. No 12 (1121). Pp. 398–401. (Rus)
11. State Standard of Ukraine EN 50160:2014. Characteristics of power supply voltage in general purpose electrical networks (EN 50160:2010, IDT). (Ukr)

Надійшла: 03.08.2021

Received: 03.08.2021