

НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

УДК 621.314

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.099>

ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА ЇХНЄ ПОЛІПШЕННЯ АКТИВНИМИ ФІЛЬТРАМИ

М.Ю. Артеменко^{1*}, докт. техн. наук, **В.В. Чопик**^{2**}, канд. техн. наук, **В.М. Михальський**^{2***}, чл.-кор. НАН України, **С.Й. Поліщук**^{2****}, канд. техн. наук, **І.А. Шаповал**^{2*****}, докт. техн. наук
 1 – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна
 2 – Інститут електродинаміки НАН України, пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна
 e-mail: mikhalsky@ied.org.ua

Стаття присвячена питанню якості електроенергії та ролі активних фільтрів у її поліпшенні. Розглянуто характеристики якості електроенергії, які включають несинусоїдність напруги, несиметрію напруги, гармонічні спотворення вхідного струму та співвідношення між активною та повною потужністю. Розглянуто різні технічні засоби компенсації неактивної потужності та поліпшення спектрів струмів і напруг, включно з активними фільтрами, та сучасні стандарти, що регламентують вимоги до них. Описано переваги активних фільтрів, такі як зниження втрат енергії, придушення вищих гармонік, корекція коефіцієнта потужності та зменшення флікера. Наведено коректне визначення повної потужності для обґрунтування енергоефективної стратегії керування паралельним активним фільтром із метою мінімізації потужності втрат у лінії передачі. Для зручності розподіленої компенсації потужності небалансу відповідний їй вектор струму представлено чотирма ортогональними складовими, що створюють окремі внески в потужність втрат лінії передачі. Застосування активних фільтрів у системах живлення може покращити якість електроенергії та забезпечити ефективне використання електрообладнання. Бібл. 14.

Ключові слова: якість електроенергії, ефективність, технічні засоби, активні фільтри гармонік, нелінійне навантаження.

Електроенергія як особливий продукт має певні характеристики, що дають можливість визначити її придатність для різних виробничих процесів. Цей набір характеристик, що дають змогу споживачам електроенергії виконувати призначені функції, узагальнюється поняттям "якість електроенергії". Останнім часом велику увагу приділяють підвищенню якості електроенергії. Це пов'язано з тим, що невідповідність якості електроенергії встановленим показникам може чинити негативний вплив на електроспоживання, режими роботи електрообладнання, системи релейного захисту, автоматики й телемеханіки, виробничі процеси та призвести до значних економічних утрат через зниження надійності електропостачання. Проблема економного використання всіх видів енергії, зокрема електроенергії, і підвищення ефективності роботи електрообладнання є важливою державною проблемою [1]. **Метою статті** є огляд показників якості електроенергії та демонстрація можливостей активних фільтрів щодо їхнього поліпшення.

Якість електроенергії відображають такі групи показників.

1. Величини, що характеризують несинусоїдність напруги [2].

Коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N U_n^2}}{U_1} 100\%, \quad (1)$$



де U_n – діюче значення n -ї гармонічної складової напруги, В; N – номер останньої з урахованих гармонічних складових напруги (стандартом встановлюється $N = 40$); U_1 – діюче значення напруги основної частоти, В. За наявності вищих гармонічних складових кривої напруги процес старіння ізоляції проводів мережі живлення протікає інтенсивніше, що пояснюється прискоренням небажаних фізико-хімічних процесів у діелектриках під дією високочастотного електричного поля.

Коефіцієнт n -ї гармонічної складової напруги дорівнює:

$$K_{U_n} = \frac{U_n}{U_1} 100\%. \quad (2)$$

Задля його обчислення необхідно визначити значення напруги окремих гармонік, що генеруються нелінійним навантаженням. Нормально та гранично припустимі значення K_{U_n} є нормованими величинами. Стандарт дає змогу не враховувати гармонічні складові порядків понад 40 або ті, значення яких менші за 0,3 %.

Небезпеку для електрообладнання становлять спотворення синусоїдності кривої напруги понад 8 % або наявність у кривій напруги її гармонічних складових непарного (парного) порядку з коефіцієнтом гармонік більшим за 5 %.

2. Величини, що характеризують несиметрію напруги основної частоти.

Коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю визначається відношенням діючого значення напруги зворотної послідовності основної частоти трифазної напруги $U_{-(1)}$ до номінальної лінійної напруги U_{LNOM} , вираженим у відсотках:

$$K_{-U} = \frac{U_{-(1)}}{U_{LNOM}} 100\%. \quad (3)$$

Коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю трифазної чотирипроводної системи живлення (з нульовим проводом) визначається відношенням діючого значення напруги нульової послідовності основної частоти $U_{0(1)}$ до номінальної фазної напруги U_{NOM} , вираженим у відсотках:

$$K_{0U} = \frac{U_{0(1)}}{U_{NOM}} 100\%. \quad (4)$$

Нормально та гранично припустимі значення коефіцієнтів несиметрії напруг за зворотною та нульовою послідовностями дорівнюють 2,0 та 4,0 % відповідно.

3. Величини, що характеризують гармонічні спотворення вхідного струму [3].

Коефіцієнт загальних гармонічних спотворень струму:

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2}; \quad (5)$$

– зважений коефіцієнт гармонічних спотворень вхідного струму:

$$WTHD = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \left(\frac{n^k I_n}{I_1} \right)^2}; \quad (6)$$

– частково зважений коефіцієнт гармонічних спотворень струму:

$$PWHd = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \left(\frac{\sqrt{n} I_n}{I_1} \right)^2}, \quad (7)$$

де I_n – діюче значення n -ї гармонічної складової струму; I_1 – діюче значення основної гармонічної складової струму; $k = 1$ у випадку чисто індуктивного опору мережі, і відповідно $k = -1$ у випадку чисто ємнісного опору мережі. Відносні значення парних гармонічних складових до 12-ї включно не мають перевищувати $16/n$, %. Парні гармонічні складові з номерами $n > 12$, а також непарні гармонічні складові враховуються під час встановлення норм THD і $PWHd$.

У разі проходження струмів вищих гармонік елементами системи електропостачання виникають додаткові втрати електроенергії, насамперед в трансформаторах, двигунах і генераторах. У низці випадків ці втрати можуть призвести до неприпустимих порушень теплового режиму електрообладнання.

4. Величини, що характеризують співвідношення між активною та повною потужностями.

Активна потужність P дорівнює середньому значенню миттєвої потужності за період напруги живлення та визначає кількість електромагнітної енергії, що незворотно перетворюється за цей час в інші види енергії. Повна потужність є одним із базових понять теорії потужності, що визначається як максимальна активна потужність навантаження, що може бути досягнута за заданих напруг системи живлення та потужності втрат в лінії передачі [4, 5]. Повна потужність S зазвичай більша, ніж активна потужність P через існування неактивних складових потужності, струми яких, не створюючи корисного ефекту передачі електроенергії споживачеві, призводять до збільшення втрат енергії в лінії передачі. Виділяють три неактивні складові повної потужності [4]: реактивна потужність (потужність зсуву) Q , зумовлена фазовими зсувами між гармонічними складовими напруг та струмів; потужність спотворення R , зумовлена гармоніками струмів нелінійного навантаження, яких немає в спектрі напруг живлення; потужність несиметрії (небалансу) B , що виникає лише в багатофазних системах через несиметрію навантаження фаз. У загальному випадку повна потужність пов'язана зі своїми складовими квадратичним співвідношенням:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + B^2 + R^2. \quad (8)$$

Коефіцієнт потужності визначається відношенням активної потужності до повної $A = P / S$, і є важливим критерієм енергоефективності процесу постачання електроенергії.

Основними технічними засобами компенсації неактивної потужності та поліпшення спектрів струмів і напруг є [6]: синхронні компенсатори; тиристорні компенсатори реактивної потужності; пасивні фільтрокомпенсуючі пристрої; активні фільтри; трансформаторні компенсатори струму нульового проводу; параметричні джерела струму; випрямні агрегати з підвищеними енергетичними показниками.

Цільові пристрої поліпшення якості електроенергії мають низку стандартів, за якими регулюється їхнє використання. Як приклад, далі перелічено стандарти, які визначають вимоги до окремих пристроїв для компенсації неактивної потужності та поліпшення спектрів струмів і напруг.

Стандарти для синхронних компенсаторів: ІЕС 60076-6 – визначає вимоги до синхронних компенсаторів струму і напруги; ІЕЕЕ С37.99 – встановлює вимоги до компенсаторів для високовольтних систем. Стандарти для тиристорних компенсаторів реактивної потужності: ІЕС 60146 – визначає загальні вимоги до електронних пристроїв зі змінною реактивною потужністю; ІЕЕЕ 519 – встановлює вимоги до гармонічних струмів, спотворень напруги та флікери, що створюються тиристорними компенсаторами. Стандарти для активних фільтрів: ІЕС 61000-3-4 – визначає вимоги до активних фільтрів щодо гармонічних струмів; ІЕЕЕ 519 – встановлює вимоги до гармонічних струмів та спотворень напруги, що створюються активними фільтрами.

На сьогодні АФ є одним з найперспективніших технічних засобів зниження рівня вищих гармонік та зменшення втрат енергії і, як наслідок, забезпечення якості електроенергії завдяки таким своїм перевагам: зменшення потужності втрат внаслідок компенсації неактивних складових потужності; зменшення коефіцієнта нелінійних спотворень струму приблизно у співвідношенні 1:10; можливість повної компенсації вищих гармонік напруги або струму незалежно від амплітуд і початкових фаз гармонік; можливість нарощування потужності компенсації до необхідного рівня внаслідок паралельного чи послідовного підключень ідентичних модулів; відсутність резонансу на будь-якій частоті; нечутливість до впливу коливань частоти; несхильність до перевантаження; гнучкість у застосуванні.

Застосування різних типів АФ обумовлене їхніми властивостями задля розв'язання конкретної задачі [7] та можливостями одночасного виконання декількох функцій, як-от:

придушення вищих гармонік; зменшення потужності втрат; корекція коефіцієнта потужності; зменшення флікера; корекція частотних характеристик системи живлення та виключення негативних резонансних явищ.

Можна виділити окрему категорію стандартів, які регулюють встановлення, експлуатацію та загальні вимоги до напівпровідникових активних фільтрів: IEC 61000-3-2 – цей стандарт встановлює ліміти гармонічних струмів, які можуть бути введені електричним обладнанням у мережу живлення, він також визначає технічні вимоги до активних фільтрів для зниження гармонічних спотворень; IEC 61000-3-4 – цей стандарт встановлює ліміти флікер-спотворень, які можуть бути викликані електричним обладнанням, а також вимоги до активних фільтрів для зниження флікер-спотворень та забезпечення стабільності напруги в мережі; IEC 61000-3-12 – цей стандарт встановлює ліміти спотворень напруги в мережі, які можуть бути викликані електричним обладнанням, та вимоги до активних фільтрів для зниження спотворень напруги; IEEE 519 – цей стандарт визначає граничні значення гармонік і спотворень струму, які можуть бути внесені електричним обладнанням у мережу живлення, та встановлює вимоги до активних фільтрів для забезпечення відповідності цим граничним значенням.

Ці стандарти визначають нормативні вимоги та процедури тестування для активних фільтрів, які забезпечують електромагнітну сумісність із мережею живлення. Вони гарантують, що активні фільтри виконують свої функції ефективно та відповідають вимогам безпеки та якості. IEC 61000-3-2, IEC 61000-3-4 та IEC 61000-3-12 – як зазначалося раніше, ці стандарти визначають ліміти гармонічних струмів, флікер-спотворень та спотворень напруги, які можуть бути викликані електричним обладнанням. Активні фільтри, які відповідають цим стандартам, сприяють забезпеченню вимог щодо електромагнітної сумісності з мережею живлення.

Підвищення коефіцієнта потужності є однією з найважливіших задач АФ, і для її успішного розв'язання потрібно коректно визначити повну потужність за відомими струмами та напругами багатофазної системи живлення. Формула Бухгольца [8] визначає квадрат повної потужності як добуток сум середньоквадратичних значень струмів та напруг, однак сума середньоквадратичних значень струмів пропорційна потужності втрат лише за умови однаковості опорів лінії передачі. Тому в діючому стандарті [9] одним із множників квадрата повної потужності трифазної чотирипровідної системи є ефективний струм, значення якого пропорційно потужності втрат за різних значень опорів лінійних проводів та нейтралі. Ще детальніше вплив різних опорів лінії передачі на множники напруги та струму квадрату повної потужності відображено в роботах [10, 11]. Водночас розмірності векторів напруги та струму, що використовується для аналізу, дорівнюють кількості проводів багатофазної системи живлення, а напруги відраховуються відносно точки штучного заземлення. У [12] узагальнено результати теоретичних та експериментальних досліджень, спрямовані на коректне визначення повної потужності для обґрунтування стратегій керування паралельними активними фільтрами з метою мінімізації потужності втрат в лінії передачі.

Для визначення повної потужності використано скорочений координатний базис, в якому використовуються вектор фазних напруг $\mathbf{u}(t)$, виміряних відносно нейтрального проводу, та вектор лінійних струмів $\mathbf{i}(t)$. У практичному плані це дало змогу зменшити кількість сенсорів та імпульсних регуляторів компенсаційних струмів, а також позбутися проблеми організації точки штучного заземлення для вимірювання напруг. Співвідношення між опорами проводів лінії передачі встановлює матриця $\mathbf{R} = \mathbf{D} + r_N \mathbf{j}\mathbf{j}^{\wedge}$, де \mathbf{D} – діагональна матриця опорів лінійних проводів; r_N – опір нейтрального проводу; \mathbf{j} – вектор, що складається з одиниць за кількістю лінійних проводів; \wedge – знак транспонування. У результаті використання інтегральної нерівності Шварца для максимізації активної потужності отримана така формула повної потужності багатофазної системи живлення, записана з використанням позначення $T^{-1} \int_T \mathbf{x}^{\wedge}(t)\mathbf{y}(t)dt = \mathbf{x} \circ \mathbf{y}$ для скалярного добутку довільних однорозмірних векторів:

$$S = \sqrt{(\mathbf{i} \circ \mathbf{R}\mathbf{i}) \times (\mathbf{u} \circ \mathbf{R}^{-1}\mathbf{u})}.$$

Перший множник підкореневого виразу є потужністю втрат у лінії передачі, викликаних протіканням струмів, другий відображає потужність теплових втрат, викликаних напругами. Таким чином, повна потужність є середнім геометричним значенням потужностей теплових втрат у лінії передачі, викликаних заданими струмами та напругами багатозазної системи електроживлення. Кожна із зазначених потужностей залежить від абсолютних значень опорів лінії передачі, однак повна потужність, що може бути представлена у вигляді

$$S = \sqrt{[\mathbf{i} \circ (\mathbf{R} / r_N)\mathbf{i}] \times \mathbf{u} \circ (\mathbf{R} / r_N)^{-1}\mathbf{u}} = \sqrt{(\mathbf{i} \circ \bar{\mathbf{R}}\mathbf{i}) \times (\mathbf{u} \circ \bar{\mathbf{R}}^{-1}\mathbf{u})}, \quad (9)$$

залежить лише від співвідношення між опорами лінійних проводів та нейтралі, що встановлює діагональна матриця $\bar{\mathbf{D}} = \mathbf{D} / r_N$.

Формулі (2) визначення повної потужності відповідає вектор активного струму

$$\mathbf{i}_A(t) = \frac{P}{\mathbf{u} \circ \bar{\mathbf{R}}^{-1}\mathbf{u}} \bar{\mathbf{R}}^{-1}\mathbf{u}(t), \quad (10)$$

що має формувати ПАФ у лінії передачі шляхом генерування компенсаційних струмів. За такого струму досягається одиничне значення коефіцієнта потужності та мінімальне значення потужності втрат $\Delta P_{MIN} = P^2 / (\mathbf{u} \circ \mathbf{R}^{-1}\mathbf{u})$.

Попри те, що ПАФ є ефективним засобом компенсації струмів неактивних потужностей, їхня установка в мікромережах, підключених до розподільних мереж у вигляді окремого пристрою, збільшує загальну вартість забезпечення якості електроенергії. Для зменшення вартості мікромереж розробники почали зосереджуватися на ідеях розподіленої активної фільтрації, покладаючи функції компенсації вищих гармонік та небажаних складових потужності на інвертори перетворювачів відновлюваної енергії, що мають резерви повної потужності [13]. У такому разі насамперед підлягає компенсації потужність небалансу, оскільки активна та реактивна потужності використовуються для балансування розподільних мереж. Для зручності розподіленої компенсації потужності небалансу відповідний їй вектор струму доцільно представити якомога більшою кількістю ортогональних складових, що створюють окремі внески в потужність втрат лінії передачі. У [14] виділено чотири ортогональні складові вектора струму потужності небалансу, синхронізовані симетричними синусоїдними напругами трифазної чотирипровідної розподільної мережі з діючим значенням U лінійної напруги:

$$\mathbf{i}_B(t) = \frac{D_R}{U^2} \begin{Bmatrix} u_A(t) \\ u_C(t) \\ u_B(t) \end{Bmatrix} + \frac{D_I}{U^2 \sqrt{3}} \begin{Bmatrix} u_{BC}(t) \\ u_{AB}(t) \\ u_{CA}(t) \end{Bmatrix} + \frac{N_R}{U^2} \begin{Bmatrix} u_A(t) \\ u_A(t) \\ u_A(t) \end{Bmatrix} + \frac{N_I}{U^2 \sqrt{3}} \begin{Bmatrix} u_{BC}(t) \\ u_{BC}(t) \\ u_{BC}(t) \end{Bmatrix}.$$

Кожна з інтегральних потужностей D_R, D_I, N_R, N_I забезпечує квадратичний внесок у квадрат потужності небалансу:

$$B^2 = D_R^2 + D_I^2 + (N_R^2 + N_I^2)(1 + 3\rho),$$

де $\rho = r_N / r$ – відношення резистивних параметрів лінії передачі, а кожна з ортогональних складових вектора струму – відповідний внесок в потужність втрат:

$$\Delta P_B = [D_R^2 + D_I^2 + (N_R^2 + N_I^2)(1 + 3\rho)]rU^{-2}.$$

Отримано інтегральні формули для визначення кожної з чотирьох квадратичних складових потужності небалансу та структурні схеми пристроїв для їхньої реалізації, а також показано, що ці формули зберігають вихідні значення потужностей за наявності струмів вищих гармонік.

Фінансується за держбюджетною темою «Розробка наукових основ та принципів побудови напівпровідникових перетворювачів з розширеними функціональними можливостями і методів керування ними в системах з джерелами розосередженої генерації» (шифр «АДАПТЕР»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ НАН України від 09.07.2019 р., протокол № 12. Державний реєстраційний номер роботи 0120U002005. КПКВК 6541030.

1. Стратегія енергозбереження в Україні. Т.1. За ред. В. А. Жовтянського, М. М. Кулика, Б. С. Стогнія. Київ : Академперіодика, 2006. 580 с.
2. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності: ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). К.: Держстандарт України, 2014. 27 с.
3. ДСТУ ІЕС 61000-3-12:2009 "Електромагнітна сумісність. Частина 3-12. Норми. Норми на гармоніки струму, створені обладнанням із номінальним вхідним струмом понад 16А та до 75А включно на фазу, підключеним до низьковольтних електропостачальних систем загального призначення" (ІЕС61000-3-12:2004, IDT); ДСТУ ІЕС 61000-3-12:2009.
4. Маевский О. А. Энергетические показатели вентиляльных преобразователей. М.: Энергия, 1978. 320 с.
5. Emanuel A.E. Power definitions and the physical mechanism of power flow. John Wiley & Sons. IEEE Press. 2010. 274 p.
6. Батрак Л. М. Енергоефективне управління паралельним активним фільтром трифазної чотирипровідної системи живлення: Дис. ... канд. техн. наук: 05.09.12 / Національний технічний університет України «КПІ». Київ, 2016. 176 с.
7. Бурлака В. В., Поднебенна С. К., Гулаков С. В. Сучасні силові активні фільтри та імпульсні джерела живлення з корекцією коефіцієнта потужності. Маріуполь: ПДТУ, 2015. 196 с.
8. Buchholz F., Das Begriffssystem Rechteistung, Wirkleistung, totale Blindleistung, *Selbstverlag München*, 1950.
9. IEEE Std. 1459-2010 Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal non-sinusoidal, balanced or unbalanced conditions. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2010.5439063>
10. Willems L. Jacques and Ghijselen A. Jozef, The Relation between the Generalized Apparent Power and the Voltage Reference. *L'Energia Elettrica*. 2004. Vol. 81. No 5–6. Pp. 37–45.
11. Jeon S.J. Definitions of Apparent Power and Power Factor in a Power System Having Transmission Lines With Unequal Resistances. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2005. Vol. 20. No 3. Pp. 1806–1811. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.848658>
12. Артеменко М.Ю., Михальський В.М., Шаповал І.А. Теорія активної фільтрації багатофазних систем електроживлення, спрямована на мінімізацію потужності втрат в лінії передачі. Київ, Інститут електродинаміки НАН України, 2021. 235 с.
13. Benavides-Córdoba Santiago, Urrea-Quintero Jorge-Humberto, Muñoz-Galeano Nicolás, Cano-Quintero Juan-B., Segui-Chilet Salvador. Optimal distribution of the fundamental non-efficient load current terms between the energy gateways connected in grid-tied microgrids. *Heliyon*. 2023. Vol. 9. Issue 2. e13650. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13650>
14. Artemenko M.Yu., Chopyk V.V., Mikhalsky V.M., Shapoval I.A., Polishchuk. S.Y. The unbalance power identification in the three-phase four-wire power supply system for the needs of its distributed compensation. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 2. С. 12–20. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.012>

ELECTRICAL ENERGY QUALITY INDICATORS AND THEIR IMPROVEMENT BY ACTIVE FILTERS

M.Yu. Artemenko¹, V.V. Chopyk², V.M. Mikhalsky², S.Y. Polishchuk², I.A. Shapoval²

1 – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",

Beresteiskiy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

2 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteiskiy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: mikhalsky@ied.org.ua

This article discusses power quality and the role of active filters in improving power quality. The characteristic of this article discusses power quality and the role of active filters in improving power quality. Power quality characteristics, including voltage non-sinusoidality, voltage unbalance, input current harmonic distortion and the ratio of active to full power, are considered. Various technical means of compensating reactive power and improving current and voltage spectra, including active filters, and current standards governing their requirements are considered. The benefits of active filters, such as reduced energy losses, suppression of higher harmonics, power factor correction and flicker reduction, are described. A correct definition of apparent power is presented to justify an energy efficient control strategy for a shunt active filter to minimize power losses in the transmission line. To facilitate the distributed compensation of unbalance power, the corresponding current vector is represented by four orthogonal components, which produce separate contributions to the transmission line loss power. The use of active filters in power systems can improve power quality and ensure efficient use of electrical equipment. Ref. 14.

Keywords: power quality, efficiency, technical means, active harmonic filters, nonlinear load.

1. Energy saving strategy in Ukraine: Analytical and reference materials. Vol.1 / Edited by V. A. Zhovtianskoho, M. M. Kulyka, B. S. Stohniia. Kyiv : Akadempriodyka, 2006. 580 p. (Ukr)
2. Characteristics of power supply voltage in general-purpose electrical networks: DSTU EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). К.: Derzhstandart Ukrainy, 2014. 27 p. (Ukr)
3. DSTU IEC 61000-3-12: 2009 "Electromagnetic compatibility. Part 3-12. Norms. Norms for current harmonics created by equipment with rated input current above 16A and up to 75A inclusive per phase connected to low-

- voltage power supply systems of general purpose" (IEC61000-3-12: 2004, IDT): DSTU IEC 61000-3-12: 2009. (Ukr)
4. Maevsky O. A. Energy indicators of valve converters. Moscow: Energiya, 1978. 320 p. (Rus).
 5. Emanuel A.E. Power definitions and the physical mechanism of power flow. John Wiley & Sons. IEEE Press. 2010. 274 p.
 6. Batrak L. M. Energy-efficient control of a parallel active filter of a three-phase four-wire power supply system: PhD thesis.: 05.09.12 / Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy «KPI». Kyiv, 2016. 176 p. (Ukr)
 7. Burlaka V. V., Podnebenna S. K., Hulakov S. V. Modern power active filters and pulse power supplies with power factor correction. Mariupol: PDTU, 2015. 196 p. (Ukr)
 8. Buchholz F., Das Begriffssystem Rechteistung, Wirkleistung, totale Blindleistung, *Selbstverlag München*, 1950.
 9. IEEE Std. 1459-2010 Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal non-sinusoidal, balanced or unbalanced conditions. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2010.5439063>
 10. Willems L. Jacques and Ghijselen A. Jozef, The Relation between the Generalized Apparent Power and the Voltage Reference. *L'Energia Elettrica*. 2004. Vol. 81. No 5-6. Pp. 37–45.
 11. Jeon S.J. Definitions of Apparent Power and Power Factor in a Power System Having Transmission Lines With Unequal Resistances. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2005. Vol. 20. No 3. Pp. 1806–1811. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.848658>
 12. Artemenko M.Yu., Mykhalskyi V.M., Shapoval I.A The theory of active filtering of multiphase power supply systems aimed at minimising power losses in the transmission line. Kyiv, Instytut elektrodynamiky NAN Ukrainy, 2021, 235 p. (Ukr)
 13. Benavides-Córdoba Santiago, Urrea-Quintero Jorge-Humberto, Muñoz-Galeano Nicolás, Cano-Quintero Juan-B., Segui-Chilet Salvador, Optimal distribution of the fundamental non-efficient load current terms between the energy gateways connected in grid-tied microgrids, *Heliyon*, 2023. Vol. 9. Issue 2. e13650. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13650>
 14. Artemenko M.Yu., Chopyk V.V., Mikhalsky V.M., Shapoval I.A., Polishchuk S.Y. The unbalance power identification in the three-phase four-wire power supply system for the needs of its distributed compensation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 2. Pp. 12–20. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.012>

Надійшла: 31.05.2023

Прийнята: 13.06.2023

Submitted: 31.05.2023

Accepted: 13.06.2023