

**ВИМІРЮВАННЯ ТА КОМПЕНСАЦІЯ НЕАКТИВНИХ ПОТУЖНОСТЕЙ ТРИФАЗНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ЗАСОБАМИ ПАРАЛЕЛЬНОЇ АКТИВНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ**

**М.Ю. Артеменко**<sup>1\*</sup>, докт. техн. наук, **Ю.В. Кутафін**<sup>1\*\*</sup>, докт. філос., **В.В. Чопик**<sup>2\*\*\*</sup>, канд. техн. наук, **В.М. Михальський**<sup>2\*\*\*\*</sup>, докт. техн. наук, **І.А. Шаповал**<sup>2\*\*\*\*\*</sup>, докт. техн. наук, **С.Й. Поліщук**<sup>2\*\*\*\*\*</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> НТУ України «КПІ ім. І. Сікорського», пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна.

<sup>2</sup> Інститут електродинаміки НАН України, пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: [mikhalsky@ied.org.ua](mailto:mikhalsky@ied.org.ua).

*В даній роботі отримала подальший розвиток теорія потужності трифазних систем електроживлення шляхом обґрунтування нових формул розрахунку потужності небалансу трифазних чотирипровідних систем електроживлення на основі вимірювання активних та реактивних потужностей окремих фаз, що можуть бути використані для формування компенсаційних сигналів в розподіленій активній фільтрації з централізованим керуванням. Запропоновано нову структурну схему керування автономним паралельним активним фільтром з розширеними функціональними можливостями та підвищеною швидкодією, що може використовуватися як в трипровідній, так і в чотирипровідній системах електроживлення. Комп'ютерне моделювання підтвердило адекватність нових формул для розрахунку складових потужності небалансу та ефективність запропонованих стратегій активної фільтрації для мінімізації потужності втрат в лінії передачі. Бібл. 11, рис. 3, табл. 1.*

**Ключові слова:** потужність небалансу, стратегія керування паралельним активним фільтром, мінімізація потужності втрат.

**Вступ.** Наявність неактивних потужностей в трифазних електромережах викликана як реактивним характером і нелінійністю навантаження, так і несиметрією завантаження окремих фаз [1]. Кількісна міра несиметрії навантаження стандарт [2] визначає потужність небалансу, але формули її визначення, наведені в [2, 3], містять лише квадрат цієї величини, що не дає змоги побудувати стратегії її компенсації засобами паралельної активної фільтрації. Окремі складові потужності небалансу трифазних систем визначені в частотній області через комплексні провідності, які обчислюються за відомими параметрами стаціонарного навантаження окремих фаз [4, 5], що не дає можливості застосування цієї теорії для фільтрації струмів нестационарного навантаження. Для потреб розподіленої активної фільтрації потужність небалансу доцільно представити максимальною кількістю окремих складових, струмові компоненти яких є взаємно ортогональними, що зумовлює окремі внески цих складових у потужність втрат та повну потужність [6–8]. **Метою даної роботи** є подальший розвиток теорії компенсації неактивних потужностей для динамічно змінюваного несиметричного навантаження в системах централізованої та децентралізованої розподіленої генерації відповідно до класифікації [9].

**Вимірювання та компенсація неактивних потужностей трифазної чотирипровідної системи за централізованого керування розподіленою активною фільтрацією.** Енергетичний процес в трифазній чотирипровідній мережі електроживлення за умов симетричного синусоїдного джерела та лінійного несиметричного навантаження повністю визначається трикоординатними векторами фазних напруг  $u(t)$  та лінійних струмів  $i(t)$ , представленими в системі симетричних

© Артеменко М.Ю., Кутафін Ю.В., Чопик В.В., Михальський В.М., Шаповал І.А., Поліщук С.Й., 2024

ORCID: \* <https://orcid.org/0000-0001-9341-9238>; \*\* <https://orcid.org/0000-0002-8156-1277>;

\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-5046-5223>; \*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-8251-3111>;

\*\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-9107-5061>; \*\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-6978-2747>

Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

координат частотної області [8]

$$\bar{\mathbf{u}} = \left\| \dot{U}_A \quad \dot{U}_B \quad \dot{U}_C \right\|^\wedge = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_T \mathbf{u}(t) e^{-j\omega t} dt = U \bar{\mathbf{e}}_+; \quad (1)$$

$$\bar{\mathbf{i}} = \left\| \dot{I}_A \quad \dot{I}_B \quad \dot{I}_C \right\|^\wedge = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_T \mathbf{i}(t) e^{-j\omega t} dt = \dot{I}_+ \bar{\mathbf{e}}_+ + \dot{I}_- \bar{\mathbf{e}}_- + \dot{I}_0 \bar{\mathbf{e}}_0 = [(P - jQ) \bar{\mathbf{e}}_+ + (D_R - jD_I) \bar{\mathbf{e}}_- + (N_R - jN_I) \bar{\mathbf{e}}_0] / U,$$

де  $\bar{\mathbf{e}}_+ = \left\| 1 \quad \tilde{a} \quad \dot{a} \right\|^\wedge / \sqrt{3}$ ;  $\bar{\mathbf{e}}_- = \bar{\mathbf{e}}_+^* = \left\| 1 \quad \dot{a} \quad \tilde{a} \right\|^\wedge / \sqrt{3}$ ;  $\bar{\mathbf{e}}_0 = \left\| 1 \quad 1 \quad 1 \right\|^\wedge / \sqrt{3}$  – орти симетричних координат прямої, зворотної та нульової послідовності;  $^\wedge, ^*$  – символи транспонування та комплексного спряження;  $U$  – діюче значення лінійної напруги;  $P, Q$  – активна та реактивна потужності;  $D_R, D_I, N_R, N_I$  – скалярні коефіцієнти розкладання потужності небалансу на ортогональні складові.

Вимірювання усіх складових повної потужності за формулами та схемами, запропонованими в [8], потребує 10 електронних ватметрів, що значно ускладнює систему керування активним фільтром. Знайдемо зв'язок зазначених потужностей з активними та реактивними потужностями окремих фаз.

Для лінійного несиметричного навантаження, що описується комплексними провідностями  $\bar{Y}_A, \bar{Y}_B, \bar{Y}_C$ , увімкненими до чотирипровідної системи живлення зіркою, комплексні потужності з (1) визначаються за формулою [8]

$$P - jQ = U^2 (\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C) / 3; \quad D_R - jD_I = U^2 (\bar{Y}_A + \dot{a} \bar{Y}_B + \tilde{a} \bar{Y}_C) / 3; \quad N_R - jN_I = U^2 (\bar{Y}_A + \tilde{a} \bar{Y}_B + \dot{a} \bar{Y}_C) / 3.$$

Виразивши кожен комплексну провідність через активну та реактивну потужність відповідної фази та діюче значення фазної напруги  $U_\phi = U / \sqrt{3}$

$$\bar{Y}_k = \dot{I}_k / \dot{U}_k = \dot{I}_k (\dot{U}_k)^* / \dot{U}_k (\dot{U}_k)^* = (P_k - jQ_k) / U_\phi^2 = 3(P_k - jQ_k) / U^2; \quad k = A, B, C,$$

матимемо матричний зв'язок зазначених потужностей

$$\begin{pmatrix} P - jQ \\ D_R - jD_I \\ N_R - jN_I \end{pmatrix} = \frac{U^2}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \tilde{a} \\ 1 & \tilde{a} & \dot{a} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{Y}_A \\ \bar{Y}_B \\ \bar{Y}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \tilde{a} \\ 1 & \tilde{a} & \dot{a} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_A - jQ_A \\ P_B - jQ_B \\ P_C - jQ_C \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Виділивши дійсні та реальні частини лівої та правої частин (2), отримаємо систему рівнянь, що виражає потужності (1) через активні та реактивні потужності окремих фаз

$$\begin{aligned} X &= X_A + X_B + X_C; & X_2 &= \sqrt{3}(X_B - X_C)/2; & X_3 &= X_A - X_B + X_C/2, \\ D_R &= P_3 + Q_2; & D_I &= Q_3 - P_2; & N_R &= P_3 - Q_2; & N_I &= Q_3 + P_2 \end{aligned}, \quad (3)$$

де для скорочення запису використане позначення  $X$ , якщо відповідне рівняння справедливе як для активних потужностей, позначених  $P$ , так і реактивних потужностей, позначених  $Q$ . Отримані значення потужностей (3) можуть бути використані для формування сигналу компенсаційних струмів [8]

$$\mathbf{i}^c(t) = \begin{pmatrix} \dot{i}_A^c \\ \dot{i}_B^c \\ \dot{i}_C^c \end{pmatrix} = \frac{Q}{U^2 \sqrt{3}} \begin{pmatrix} u_{BC} \\ u_{CA} \\ u_{AB} \end{pmatrix} + \frac{D_R}{U^2} \begin{pmatrix} u_A \\ u_C \\ u_B \end{pmatrix} + \frac{D_I}{U \sqrt{3}} \begin{pmatrix} u_{BC} \\ u_{AB} \\ u_{CA} \end{pmatrix} + \frac{N_R}{U^2} \begin{pmatrix} u_A \\ u_A \\ u_A \end{pmatrix} + \frac{N_I}{U^2 \sqrt{3}} \begin{pmatrix} u_{BC} \\ u_{BC} \\ u_{BC} \end{pmatrix} \quad (4)$$

у процесі розподіленої паралельної активної фільтрації струмів мережі, оскільки усі п'ять компонентів (4) є взаємоортогональними та можуть компенсуватися незалежно. Перевагою використання формул (3) є простий спосіб отримання неактивних потужностей шляхом перерахунку активних та реактивних потужностей окремих фаз, вимірювання яких є стандартною процедурою централізованого керування розподіленою генерацією [9].

**Вимірювання та компенсація неактивних потужностей трифазних систем автономним паралельним активним фільтром.** В трифазних трипровідних системах сума координат обох векторів з (1) дорівнює нулю як в часовій, так і в частотній областях, тому  $N_R = N_I = 0$ . Для швидкодійного вимірювання інших неактивних потужностей та формування відповідних їм компенсаційних струмів запропонована структурна схема системи керування автономного паралельного активного фільтра (ПАФ) з розширеними функціональними можливостями [7], виділена пунктирною лінією на рис. 1. Вхідне перетворення трифазних координат струму та напруги

здійснюється відповідно до  $pq$ -теорії миттєвої потужності шляхом множення на скорочену матрицю

$$\text{Кларк } \mathbf{T}_{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}.$$

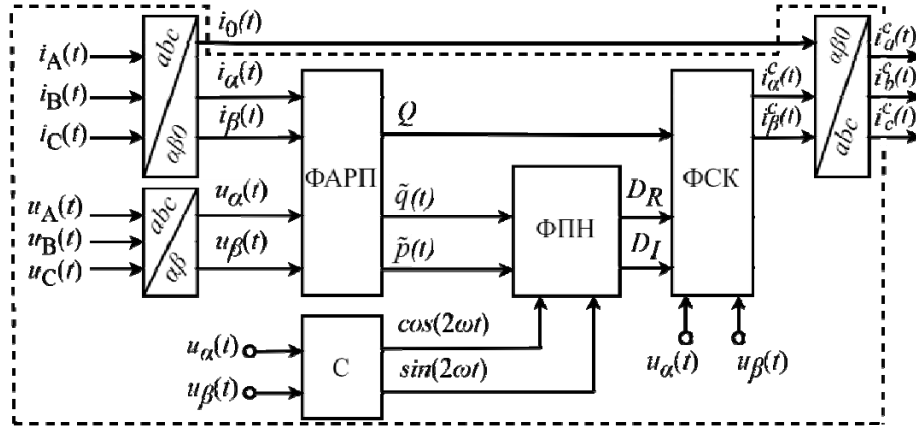


Рис. 1

Це веде до зниження розмірності відповідних векторів та набуття ними форм

$$\underline{\mathbf{u}} = \mathbf{T}_{\alpha\beta} \bar{\mathbf{u}} = \frac{U}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_\alpha \\ \dot{U}_\beta \end{bmatrix}; \underline{\mathbf{i}} = \begin{bmatrix} \dot{I}_\alpha \\ \dot{I}_\beta \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{\alpha\beta} \bar{\mathbf{i}} = \frac{1}{U_\alpha^2 + U_\beta^2} \left( P \begin{bmatrix} \dot{U}_\alpha \\ \dot{U}_\beta \end{bmatrix} + Q \begin{bmatrix} \dot{U}_\beta \\ -\dot{U}_\alpha \end{bmatrix} + D_R \begin{bmatrix} \dot{U}_\alpha \\ -\dot{U}_\beta \end{bmatrix} + D_I \begin{bmatrix} \dot{U}_\beta \\ \dot{U}_\alpha \end{bmatrix} \right). \quad (5)$$

Формувач складових активної та реактивної потужностей ФАРП виділяє реактивну потужність  $Q$  та пульсуючі складники відповідних потужностей

$$\tilde{p}(t) = p(t) - P = D_R \cos(2\omega t) + D_I \sin(2\omega t); \quad \tilde{q}(t) = q(t) - Q = D_R \sin(2\omega t) - D_I \cos(2\omega t). \quad (6)$$

В синхронізаторі  $C$  гармонічні функції подвійної частоти виражаються через миттєві значення перетворених напруг мережі  $\underline{\mathbf{u}}^\wedge(t) = \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \sin(\omega t) \end{bmatrix}$  за формулами

$$\cos(2\omega t) = \cos^2(\omega t) - \sin^2(\omega t) = (u_\alpha^2 - u_\beta^2) / U^2; \quad \sin(2\omega t) = 2 \sin(\omega t) \cos(\omega t) = 2u_\alpha u_\beta / U^2.$$

Це дає змогу формувачу потужностей небалансу ФПН неперервно виділяти складові цієї потужності

$$\begin{bmatrix} D_R \\ D_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(2\omega t) & \sin(2\omega t) \\ \sin(2\omega t) & -\cos(2\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p}(t) \\ \tilde{q}(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \begin{bmatrix} (u_\alpha^2 - u_\beta^2) \tilde{p} + 2u_\alpha u_\beta \tilde{q} \\ 2u_\alpha u_\beta \tilde{p} - (u_\alpha^2 - u_\beta^2) \tilde{q} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

На виході формувача струмів компенсації ФСК виділяється двокоординатний трикомпонентний сигнал

$$\mathbf{i}_{\alpha\beta}^c(t) = \begin{bmatrix} i_\alpha^c \\ i_\beta^c \end{bmatrix} = \frac{Q}{U^2} \begin{bmatrix} u_\beta \\ -u_\alpha \end{bmatrix} + \frac{D_R}{U^2} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ -u_\beta \end{bmatrix} + \frac{D_I}{U^2} \begin{bmatrix} u_\beta \\ u_\alpha \end{bmatrix}, \quad (8)$$

що далі перетворюється на трикоординатний сигнал керування фільтром шляхом множення на транспоновану матрицю  $\mathbf{T}_{\alpha\beta}$ . Неперервне виділення потужностей небалансу у запропонований спосіб збільшує швидкість автономного ПАФ для динамічного навантаження.

Розглянемо можливість розвинення розробленої схеми керування ПАФ на рис. 1 з метою поширення області його застосування на трифазні чотирипровідні системи. Пульсації миттєвих потужностей в такій системі визначаються виразами

$$\tilde{p}(t) = \text{Re}(\bar{\mathbf{u}}^\wedge \bar{\mathbf{i}}^\wedge e^{j2\omega t}) = \text{Re}\{U \bar{\mathbf{e}}_+ [(P - jQ) \bar{\mathbf{e}}_+ + (D_R - jD_I) \bar{\mathbf{e}}_- + (N_R - jN_I) \bar{\mathbf{e}}_0] / U\} =$$

$$= \text{Re}[(D_R - jD_I) e^{j2\omega t}] = D_R \cos(2\omega t) + D_I \sin(2\omega t); \quad \tilde{q}(t) = \text{Re}(-j \bar{\mathbf{u}}^\wedge \bar{\mathbf{i}}^\wedge e^{j2\omega t}) = D_R \sin(2\omega t) - D_I \cos(2\omega t),$$

аналогічними (6). Складові струмів компенсації з потужностями  $N_R$  та  $N_I$ , притаманні чотирипровідній мережі за несиметричного навантаження,

$$\dot{I}_0 \bar{\mathbf{e}}_0 = U^{-1} (N_R - jN_I) \bar{\mathbf{e}}_0 = (\bar{\mathbf{e}}_0^\wedge \bar{\mathbf{i}}) \bar{\mathbf{e}}_0 = \left[ (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) / 3 \right] \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^\wedge$$

можуть бути легко реалізовані в часовій області розширеною матрицею Кларк  $\mathbf{T}_{\alpha\beta 0}$ , як показано на рис. 1, та безпосередньо включені у вихідний сигнал компенсації через транспоновану розширену

матрицю Кларк. В результаті отримаємо структурну схему керування ПАФ з розширеними функціональними можливостями та підвищеною швидкодією, що може використовуватися як в трипровідній, так і в чотирипровідній мережі.

**Верифікація запропонованих стратегій активної фільтрації струмів комп'ютерним моделюванням.** Векторний компенсаційний сигнал (4) з обчисленими відповідно до (3) потужностями використовувався для керування залежними джерелами струмів ПАФ в комп'ютерній моделі трифазної чотирипровідної системи (рис. 2), реалізованій в програмному середовищі *PLECS*. Значення активного опору фази *A*  $R_A$  дискретно змінюється з часом, починаючи від значення 1 Ом в момент часу  $t=0$ , і надалі зростає на 1 Ом кожні 0.1 секунди. Навантаження інших фаз відповідають комплексним опорам  $\bar{Z}_B = R_B + jX_B = 4 - j$ ,  $\bar{Z}_C = R_C + jX_C = 1 + 4j$ . Напряга мережі 220 В.

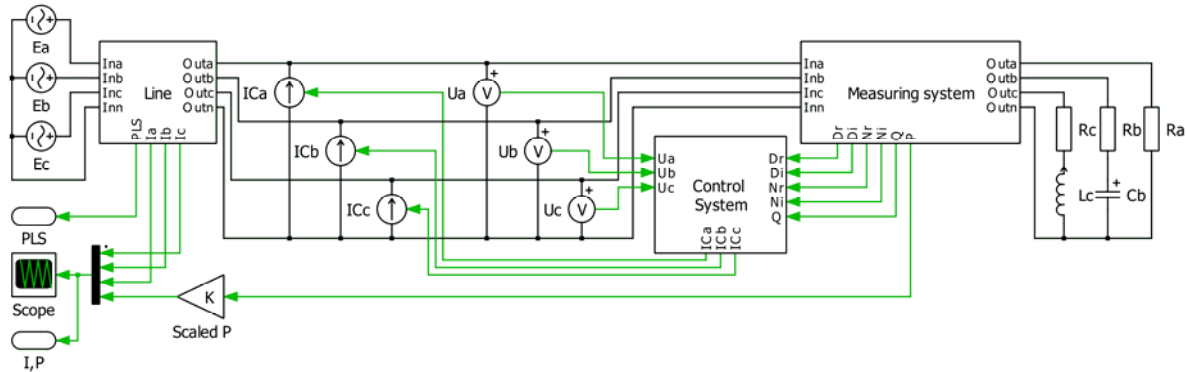


Рис. 2

Результати моделювання активної фільтрації для динамічного навантаження (рис. 3) показують, що по завершенні перехідних процесів струми лінії передачі  $I_{ra}$ ,  $I_{rb}$ ,  $I_{rc}$  залишаються синусоїдними та симетричними, а їхні амплітуди відповідають поточному значенню активної потужності  $P$ .

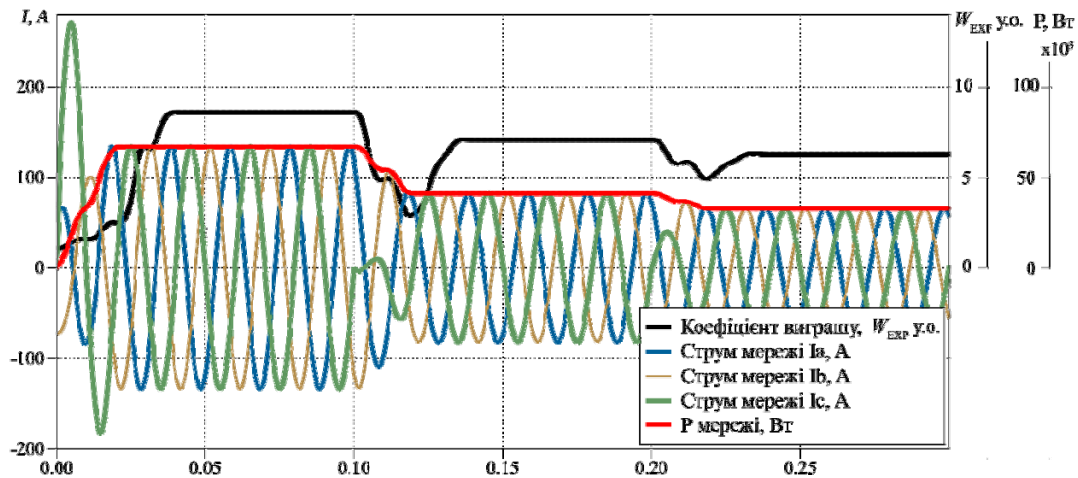


Рис. 3

Перевірявся також коефіцієнт вигащу за потужністю втрат  $W = \Delta P / \Delta P_{MIN}$ , де  $\Delta P$  – потужність втрат в лінії передачі за відсутності ПАФ;  $\Delta P_{MIN}$  – мінімально можливе значення потужності втрат для даного навантаження, що забезпечує ПАФ шляхом формування активного струму трифазної системи в лінії передачі. Відповідно до [10] цей коефіцієнт може бути використаний для експериментальної верифікації коефіцієнта потужності

$$A = P/S = \sqrt{\Delta P_{MIN} / \Delta P} = W^{-1/2}, \quad (9)$$

де під повною потужністю  $S$  розуміється її ефективне значення за визначенням [2]. Коефіцієнт потужності трифазної чотирипровідної системи з лінійним несиметричним навантаженням, що ідентифікується комплексними провідностями  $\bar{Y}_k = 1 / \bar{Z}_k$ ,  $k = A, B, C$ , визначений в [11] як

$$A = \text{Re}(\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C) / \sqrt{3(Y_A^2 + Y_B^2 + Y_C^2 + \rho|\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C|^2)}, \quad (10)$$

де  $\rho = r_N / r$  – відношення опору нейтрального проводу до опору лінійного проводу.

Підстановка (9) в (10) дає розрахунковий коефіцієнт виграшу за потужністю втрат

$$W = 3 \left( Y_A^2 + Y_B^2 + Y_C^2 + \rho |\bar{Y}_A + \tilde{a}\bar{Y}_B + \tilde{a}\bar{Y}_C|^2 \right) / \operatorname{Re}^2 (\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C). \quad (11)$$

Значення цього коефіцієнта для трьох часових інтервалів зміни навантаження, представлених на рис. 3, та  $\rho = 3$  зведено в таблиці.

$\bar{Z}_k$	$\bar{Z}_A = 1, \bar{Z}_B = 4 - j, \bar{Z}_C = 1 + 4j$	$\bar{Z}_A = 2, \bar{Z}_B = 4 - j, \bar{Z}_C = 1 + 4j$	$\bar{Z}_A = 3, \bar{Z}_B = 4 - j, \bar{Z}_C = 1 + 4j$
$\bar{Y}_k$	$\bar{Y}_A = 1, \bar{Y}_B = \frac{4+j}{17}, \bar{Y}_C = \frac{1-4j}{17}$	$\bar{Y}_A = \frac{1}{2}, \bar{Y}_B = \frac{4+j}{17}, \bar{Y}_C = \frac{1-4j}{17}$	$\bar{Y}_A = \frac{1}{3}, \bar{Y}_B = \frac{4+j}{17}, \bar{Y}_C = \frac{1-4j}{17}$
$W$	8.617799787	7.078220359	6.284201798
$W_{EXP}$	8.610	7.061	6.263

Експериментальні значення коефіцієнта виграшу за потужністю втрат  $W_{EXP}$ , наведені на рис. 3 та в останньому рядку таблиці, відповідають всім розрахунковим значенням, що підтверджує адекватність нових формул (3) для розрахунку складових потужності небалансу та ефективність запропонованих стратегій активної фільтрації для формування активного струму в лінії передачі. Застосування стратегії керування ПАФ с формуванням неактивних потужностей за структурною схемою (рис. 1) дає аналогічні результати.

**Висновки.** 1. Обґрунтовано нові формули розрахунку чотирьох складових потужності небалансу трифазних чотирипровідних систем електроживлення на основі вимірювання активних та реактивних потужностей окремих фаз, що можуть бути використані для формування компенсаційних сигналів в розподіленій активній фільтрації з централізованим керуванням.

2. Теорія потужності трифазних систем отримала подальший розвиток, який полягає у поєднанні наявних методів розрахунку для трипровідних систем з розширеною матрицею Кларк, що дало змогу поширити ці методи для чотирипровідних систем.

3. Запропоновано нову структурну схему керування ПАФ з розширеними функціональними можливостями та підвищеною швидкодією, що може використовуватися як в трипровідній, так і в чотирипровідній системах електроживлення.

4. Комп'ютерне моделювання підтвердило адекватність нових формул для розрахунку складових потужності небалансу та ефективність запропонованих стратегій активної фільтрації для формування активного струму в лінії передачі.

1. Гриб О.Г., Сокол Е.И., Жаркин А.Ф., Васильченко В.И., Ущуповский К.В., Светелик А.Д., Гапон Д.А., Громадский Ю.С., Новский В.А., Михайлов В.П., Шевченко С.Ю., Иерусалимова Т.С., Олефир Д.А. Качество электрической энергии. Т. 3: Методы и средства повышения качества электрической энергии. Харьков: ПП Граф-Ікс, 2014. 292 с.

2. IEEE Standard 1459-2010. Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal non-sinusoidal, balanced or unbalanced conditions. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2010.5439063>.

3. Сиротин Ю.А., Гриб О.Г., Гапон Д.А., Иерусалимова Т.С., Швец С.В. Учет неактивных составляющих полной мощности. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»: збірник наукових праць. Тематичний випуск: Гідравлічні машини та гідроагрегати*. 2017. № 22 (1244). С. 71–76.

4. Czarnecki L.S. Currents Physical Components (CPC) in Circuits with Non-sinusoidal Voltages and Currents. Part 2: Three-phase three-wire linear circuits. *Electrical Power Quality and Utilization Journal*. 2006. Vol. XII. No 1. Pp. 3–13.

5. Czarnecki L.S., Haley P.M. Unbalanced Power in Four-Wire Systems and its Reactive Compensation. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2015. Vol. 30. No 1. Pp. 53–63.

6. Santiago Benavides-Córdoba, Jorge-Humberto Urrea-Quintero, Nicolás Muñoz-Galeano, Juan-B Cano-Quintero, Salvador Segui-Chilet. 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>.

7. Artemenko M.Yu., Polishchuk S.Y., Chopyk V.V., Mikhalsky V.M., Shapoval I.A. Integral power theory and active filtering using the  $\alpha$ - $\beta$  reference frame. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. Pp. 60004–60014. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3393767>.

8. 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>.

9. Cheng Z., Duan J., Chow M.-Y. To Centralize or to Distribute: That Is the Question: A Comparison of Advanced Microgrid Management Systems. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2018. Vol. 12. No 1. Pp. 6–24. DOI: <https://doi.org/10.1109/MIE.2018.2789926>.

10. Majordomo J.G., Usaola J. Apparent Power and Power Factor Definitions for Polyphase Non-Linear Loads when Supply Conductors Present Different Resistances. *European Trans. on Electrical Power*. 1993. Vol. 3. No 6. Pp. 415–420.

11. Артеменко М.Ю., Костюк Р.Ю. Коефіцієнт потужності та коефіцієнт корисної дії трифазних систем живлення при лінійному несиметричному навантаженні. *Електроніка та зв'язок*. 2015. № 6. С. 17–23.

## MEASUREMENT AND COMPENSATION OF THREE-PHASE POWER SUPPLY SYSTEM INACTIVE POWERS BY SHUNT ACTIVE FILTERING

M.Yu. Artemenko<sup>1</sup>, Yu.V. Kutafin<sup>1</sup>, V.V. Chopyk<sup>2</sup>, V.M. Mikhalsky<sup>2</sup>, I.A. Shapoval<sup>2</sup>, S.Y. Polishchuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",

Beresteyskiy Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

<sup>2</sup> Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteyskiy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: [mikhalsky@ied.org.ua](mailto:mikhalsky@ied.org.ua).

*In this paper, the power theory of three-phase power supply systems was further developed by substantiating new formulas for calculating the unbalance power of three-phase four-wire power supply systems based on the measurement of active and reactive powers of individual phases, which can be used to form compensation signals in distributed active filtering with centralized control. A new structural scheme for controlling an autonomous shunt active filter with extended functionality and increased speed is proposed, which can be used in both three-wire and four-wire power supply systems. Computer modeling confirmed the adequacy of the new formulas for calculating the unbalance power components and the effectiveness of the proposed active filtering strategies to minimize power losses in the transmission line. References 11, figures 3, table 1.*

**Key words:** unbalance power, parallel active filter control strategy, power loss minimization.

1. Hryb O.H., Sokol Ye.I., Zharkin A.F., Vasilchenko V.I., Uschapovskyi K.V., Svetelik A.D., Hapon D.A., Hromadskyi Yu.S., Novskyi V.A., Mikhailov V.P., Shevchenko S.Yu., Ierusalymova T.S. Olefir D.A. Quality of electrical energy. Vol. 3. Methods and means of improving the quality of electrical power. Kharkiv: PP Hraf-X, 2014. 292 p. (Rus)

2. IEEE Standard 1459-2010. Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal non-sinusoidal, balanced or unbalanced conditions. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2010.5439063>.

3. Syrotyn Yu.A., Hryb O.H., Hapon D.A., Ierusalymova T.S., Shvets S.V. Accounting for inactive components of apparent power. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu KhPI: zbirnyk naukovykh prats. Tematychnyi vypusk: Hidravlichni mashyny ta agregaty*. 2017. No 22 (1244). Pp.71–76. (Rus)

4. Czarnecki L.S. Currents Physical Components (CPC) in Circuits with Non-sinusoidal Voltages and Currents. Part 2: Three-phase three-wire linear circuits. *Electrical Power Quality and Utilization Journal*. 2006. Vol. XII. No 1. Pp. 3–13..

5. Czarnecki L.S., Haley P.M. Unbalanced Power in Four-Wire Systems and its Reactive Compensation. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2015. Vol. 30. No 1. Pp. 53–63.

6. Santiago Benavides-Córdoba, Jorge-Humberto Urrea-Quintero, Nicolás Muñoz-Galeano, Juan-B Cano-Quintero, Salvador Segui-Chilet. 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>.

7. Artemenko M.Yu., Polishchuk S.Y., Chopyk V.V., Mikhalsky V.M., Shapoval I.A. Integral power theory and active filtering using the  $\alpha$ - $\beta$  reference frame. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. Pp. 60004–60014. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3393767>.

8. 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/techmed2022.02.012>.

9. Cheng Z., Duan J., Chow M.-Y. To Centralize or to Distribute: That Is the Question: A Comparison of Advanced Microgrid Management Systems. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2018. Vol. 12. No 1. Pp. 6–24. DOI: <https://doi.org/10.1109/MIE.2018.2789926>.

10. Majordomo J.G., Usaola J. Apparent Power and Power Factor Definitions for Polyphase Non-Linear Loads when Supply Conductors Present Different Resistances. *European Trans. on Electrical Power*. 1993. Vol. 3. No 6. Pp. 415–420.

11. Artemenko M.Yu., Kostyuk R.Yu. The power factor and efficiency of three-phase power systems under linear asymmetric load. *Elektronika ta zviazok*. 2015. No 6. Pp. 17–23. (Ukr)

Надійшла 05.06.2024

Остаточний варіант 15.07.2024