

ПОДОЛАННЯ ПРОБЛЕМИ ТРЕТЬОЇ ГАРМОНІКИ В ТЕОРІЇ АКТИВНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ТРИФАЗНИХ ТРИПРОВІДНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

М.Ю. Артеменко^{1*}, докт. техн. наук, Ю.В. Кутафін^{2**}, докт. філософ., П.Б. Федорченко¹, В.В. Чопик^{3***}, канд. техн. наук, І.А. Шаповал^{3****}, докт. техн. наук

1 – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна

2 – Академія праці, соціальних відносин і туризму, вул. Кільцева дорога, 3-А, Київ, 03187, Україна

3 – Інститут електродинаміки НАН України, пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: artemenko_m_ju@ukr.net

У роботі з'ясований механізм виникнення та надана кількісна оцінка ефекту появи третьої гармоніки у векторі миттєвого активного струму трифазної системи електроживлення з симетричними синусоїдними напругами джерела за наявності несиметрії лінійного навантаження. Показано, що додаткова фільтрація пульсуючої складової миттєвої реактивної потужності споживаного трифазного струму усуває проблему третьої гармоніки та повністю відповідає паралельній активній фільтрації за інтегральними ортогональними складовими потужності небалансу. Запропоновано новий спосіб паралельної активної фільтрації за інтегральними ортогональними складовими потужності небалансу, що використовує активні та реактивні потужності окремих фаз трифазної трипровідної системи електроживлення. Комп'ютерне моделювання підтвердило ефективність способу активної фільтрації на основі вимірювання активних та реактивних потужностей окремих фаз. Бібл. 20, рис. 5.

Ключові слова: паралельний активний фільтр, миттєвий активний струм, потужність небалансу, активні та реактивні потужності окремих фаз.

Актуальність роботи. Нині існує достатньо велика кількість теорій миттєвої та інтегральної потужностей, узагальнено розглянутих в [1,2], на яких базуються стратегії керування напівпровідниковими паралельними активними фільтрами (ПАФ) багатofазних систем електроживлення. Перевагами історично перших інтегральних теорій потужності [3–7] є можливості досягти мінімально можливих втрат енергії в лінії передачі та оптимізувати спектральний склад споживаних струмів як для лінійного, так і для нелінійного навантаження. Це вимагає осереднення миттєвих значень споживаної потужності й мережних напруг та наявності накопичувача енергії у складі активного фільтра. Переваги миттєвих теорій [8–12]: підвищення швидкодії через уникнення часових затримок формування компенсаційного сигналу; виключення принципової необхідності накопичувача енергії. Остання публікація [13] свідчить про можливість миттєвої теорії потужності досягти для окремих випадків навантаження ефектів активної фільтрації, притаманних інтегральним теоріям. Водночас суттєвою вадою миттєвих теорій є так звана проблема третьої гармоніки [14–16], що полягає в наявності цієї гармоніки у відфільтрованому струмі джерела, сформованому на основі класичної теорії миттєвої потужності за наявності несиметрії навантаження.

Метою статті є деталізація факторів, що спричиняють появу третьої гармоніки струму в миттєвому активному струмі трифазної системи електроживлення з симетричними синусоїдними напругами, їхня кількісна оцінка, подальше розвинення способів активної фільтрації та позбавлених цього недоліку.

Базові положення теорії миттєвої потужності.

Теорії миттєвої потужності багатofазних систем електроживлення [2–7] оперують з векторами фазних напруг $\mathbf{u}(t)$ та лінійних струмів $\mathbf{i}(t)$ для формування в лінії передачі вектора миттєвого активного струму $\mathbf{i}_p(t)$, пропорційного миттєвій активній потужності $p(t) = \mathbf{u}^{\wedge}(t)\mathbf{i}(t)$



$$\mathbf{i}_p(t) = \frac{p(t)}{\mathbf{u}^\wedge(t)\mathbf{u}(t)} \mathbf{u}(t), \quad (1)$$

де $^\wedge$ – знак транспонування. Водночас засобами активної фільтрації неперервно компенсують у часі вектор залишкового струму $\mathbf{i}_q(t) = \mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_p(t)$. Цей вектор пропорційний миттєвій неактивній потужності

$$\mathbf{i}_q(t) = \frac{q(t)}{\mathbf{u}_q^\wedge(t)\mathbf{u}_q(t)} \mathbf{u}_q(t); \quad q(t) = \mathbf{u}_q^\wedge(t)\mathbf{i}(t), \quad (2)$$

причому опорні вектори зазначених струмів є миттєво ортогональними $\mathbf{u}_q^\wedge(t)\mathbf{u}(t) = 0$ та мають однакові норми $\mathbf{u}^\wedge(t)\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}_q^\wedge(t)\mathbf{u}_q(t)$. Унаслідок цього квадрати миттєвих потужностей задовольняють квадратичне співвідношення

$$p^2(t) + q^2(t) = s^2(t), \quad (3)$$

де $s(t) = \sqrt{\mathbf{u}^\wedge(t)\mathbf{u}(t) \times \mathbf{i}^\wedge(t)\mathbf{i}(t)}$ – миттєва повна потужність.

Така миттєва активна фільтрація дає змогу зменшити миттєву потужність втрат у лінії передачі від початкового значення Δp за відсутності фільтра до значення Δp_F за наявності фільтра відповідно до коефіцієнта виграшу за потужністю миттєвих втрат [2]:

$$w(t) = \frac{\Delta p(t)}{\Delta p_F(t)} = \frac{\mathbf{i}^\wedge(t)\mathbf{i}(t)}{\mathbf{i}_p^\wedge(t)\mathbf{i}_p(t)} = \frac{s^2(t)}{p^2(t)} = \lambda^{-2}(t), \quad (4)$$

де $\lambda(t) = p(t) / s(t)$ – коефіцієнт миттєвої потужності.

Сутність проблеми третьої гармоніки та шляхи її подолання.

У синусоїдному режимі трифазної трипровідної системи із симетричним джерелом вектор напруг $\mathbf{u}(t)$ може бути представлений в комплексній області пропорційним орту симетричних складових прямої послідовності чергування фаз $\bar{\mathbf{e}}_+$:

$$\mathbf{u}(t) \leftrightarrow \bar{\mathbf{u}} = U\bar{\mathbf{e}}_+ = \frac{U}{\sqrt{3}} \|\tilde{a} \quad \dot{a}\|^\wedge, \quad (5)$$

причому $\mathbf{u}^\wedge(t)\mathbf{u}(t) = \bar{\mathbf{u}}^\wedge\bar{\mathbf{u}}^* = U^2$, де $\dot{a} = e^{j2\pi/3}$; $\tilde{a} = e^{-j2\pi/3}$, $*$ – знак комплексного спряження; U – діюче значення лінійної напруги трифазного джерела. Несиметричне лінійне навантаження викликає комплексний струм джерела, що може бути розкладений за ортами симетричних складових [2, 16]:

$$\bar{\mathbf{i}} = \frac{P - jQ}{U} \bar{\mathbf{e}}_+ + \frac{D_R - jD_I}{U} \bar{\mathbf{e}}_- = \frac{P\bar{\mathbf{e}}_+ + Q(-j\bar{\mathbf{e}}_+) + D_R\bar{\mathbf{e}}_- + D_I(-j\bar{\mathbf{e}}_-)}{U}, \quad (6)$$

де $\bar{\mathbf{e}}_- = \bar{\mathbf{e}}_+^*$ – орт симетричних складових зворотної послідовності; P, Q – інтегральні активна й реактивна потужності; D_R, D_I – інтегральні складові потужності небалансу, що мають окремі квадратичні внески в квадрат повної потужності $S^2 = U^2(\bar{\mathbf{i}}^\wedge\bar{\mathbf{i}}^*) = P^2 + Q^2 + D_R^2 + D_I^2$.

Миттєва активна потужність визначається виразом [16]:

$$\begin{aligned} p(t) &= \text{Re}(\bar{\mathbf{u}}^\wedge\bar{\mathbf{i}}^*) + \text{Re}(\bar{\mathbf{u}}^\wedge\bar{\mathbf{i}}e^{j2\omega t}) = \\ &= \text{Re}(P - jQ) + \text{Re}[(D_R - jD_I)e^{j2\omega t}] = P + \tilde{p}(t), \end{aligned} \quad (7)$$

де $\tilde{p}(t) = \text{Re}[(D_R - jD_I)e^{j2\omega t}] = D_R \cos(2\omega t) + D_I \sin(2\omega t)$ – пульсуюча складова миттєвої активної потужності.

Підстановка отриманих значень у вираз (1) дає споживаний струм трифазного джерела в часовій області за наявності зазначеної миттєвої активної фільтрації

$$\mathbf{i}_p(t) = \frac{\sqrt{2}[P + \tilde{p}(t)]}{U\sqrt{3}} \begin{Bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{Bmatrix}. \quad (8)$$

Із аналізу (8) випливає, що третя гармоніка струму з'являється в результаті множення гармонічних функцій пульсуючої складової $\tilde{p}(t)$ подвійної частоти мережі на кожен зі складових опорного вектора одинарної частоти. Епюри спотворених струмів мережі з використанням зазначеної миттєвої активної фільтрації для значень параметрів $P = 1; D_R = D_I = 0.1$ наведено на рис. 1.

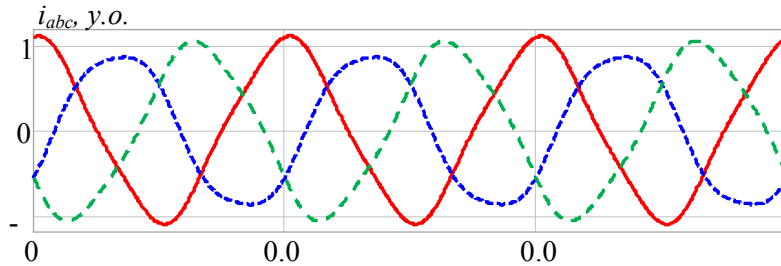


Рис. 1. Приклад спотворення струмів мережі третьою гармонікою

Дослідимо добуток гармонічних функцій із (8) детальніше:

$$[D_R \cos(2\omega t) + D_I \sin(2\omega t)] \times \begin{vmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{vmatrix} =$$

$$= \frac{D_R}{2} \begin{vmatrix} \cos(3\omega t) \\ \cos(3\omega t - 2\pi/3) \\ \cos(3\omega t + 2\pi/3) \end{vmatrix} + \frac{D_R}{2} \begin{vmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ \cos(\omega t - 2\pi/3) \end{vmatrix} + \frac{D_I}{2} \begin{vmatrix} \sin(3\omega t) \\ \sin(3\omega t - 2\pi/3) \\ \sin(3\omega t + 2\pi/3) \end{vmatrix} + \frac{D_I}{2} \begin{vmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t + 2\pi/3) \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) \end{vmatrix}. \quad (9)$$

Отже, у часовій області третя гармоніка миттєвого активного струму має вигляд

$$\mathbf{i}_{p3}(t) = \frac{D_R}{U\sqrt{6}} \begin{vmatrix} \cos(3\omega t) \\ \cos(3\omega t - 2\pi/3) \\ \cos(3\omega t + 2\pi/3) \end{vmatrix} + \frac{D_I}{U\sqrt{6}} \begin{vmatrix} \sin(3\omega t) \\ \sin(3\omega t - 2\pi/3) \\ \sin(3\omega t + 2\pi/3) \end{vmatrix},$$

що відповідає вектору комплексних діючих значень

$$\bar{\mathbf{i}}_{p3} = \frac{D_R}{2U} \bar{\mathbf{e}} + \frac{D_I}{2U} (-j\bar{\mathbf{e}}) = \frac{(D_R - jD_I)}{2U} \bar{\mathbf{e}} \quad (10)$$

з нормою (середньоквадратичним значенням) $I_{p3} = \sqrt{\bar{\mathbf{i}}_{p3} \times \bar{\mathbf{i}}_{p3}^*} = \sqrt{D_R^2 + D_I^2} / 2U$. Наявність третьої гармоніки у відфільтрованому струмі трифазного джерела неприпустима для задач якісного споживання електроенергії (рис. 1).

Знайдемо миттєву неактивну потужність

$$q(t) = \text{Re}(-j\bar{\mathbf{u}} \wedge \bar{\mathbf{i}}^*) + \text{Re}(-j\bar{\mathbf{u}} \wedge \bar{\mathbf{i}} e^{j2\omega t}) = Q + \text{Im}(\bar{\mathbf{u}} \wedge \bar{\mathbf{i}} e^{j2\omega t}) = Q + \tilde{q}(t), \quad (11)$$

де $\tilde{q}(t) = \text{Im}(\bar{\mathbf{u}} \wedge \bar{\mathbf{i}} e^{j2\omega t}) = D_R \sin(2\omega t) - D_I \cos(2\omega t)$ – пульсуюча складова миттєвої неактивної потужності, та її добуток на опорний вектор $\mathbf{u}_q(t)$:

$$\tilde{q}(t)\mathbf{u}_q(t) = [D_R \sin(2\omega t) - D_I \cos(2\omega t)] \times \begin{vmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{vmatrix} =$$

$$= -\frac{D_R}{2} \begin{vmatrix} \cos(3\omega t) \\ \cos(3\omega t - 2\pi/3) \\ \cos(3\omega t + 2\pi/3) \end{vmatrix} + \frac{D_R}{2} \begin{vmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ \cos(\omega t - 2\pi/3) \end{vmatrix} - \frac{D_I}{2} \begin{vmatrix} \sin(3\omega t) \\ \sin(3\omega t - 2\pi/3) \\ \sin(3\omega t + 2\pi/3) \end{vmatrix} + \frac{D_I}{2} \begin{vmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t + 2\pi/3) \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) \end{vmatrix}. \quad (12)$$

Порівнюючи (9) та (12), помічаємо, що складові основної гармоніки є синфазними, а складові третьої гармоніки протифазні. Отже, одночасна компенсація пульсуючих складових миттєвих потужностей шляхом формування складової струму паралельного фільтра

$$\mathbf{i}_D(t) = \frac{\tilde{p}(t)\mathbf{u}(t) + \tilde{q}(t)\mathbf{u}_q(t)}{\mathbf{u}^{\wedge}(t)\mathbf{u}(t)} = \frac{\sqrt{2}D_R}{U\sqrt{3}} \begin{vmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ \cos(\omega t - 2\pi/3) \end{vmatrix} + \frac{\sqrt{2}D_I}{U\sqrt{3}} \begin{vmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t + 2\pi/3) \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) \end{vmatrix} \quad (13)$$

дає змогу усунути третю гармоніку споживаного струму та повністю відповідає розкладанню (6) струму несиметричного навантаження за ортами симетричних складових.

Отже, для якісної фільтрації трифазних струмів несиметричного навантаження необхідно одночасно компенсувати пульсуючі складові обох миттєвих потужностей $\tilde{p}(t)$ та $\tilde{q}(t)$. Однак водночас контролером активного фільтра необхідно розраховувати та відслідковувати миттєві аналогові сигнали пульсуючих складових обох миттєвих потужностей. Такий самий ефект якості споживаного струму, але з більшою заводо захищеністю дає обчислення потужностей D_R, D_I інтегральними методами [2, 16, 17], що підвищує точність розрахунку компенсаційного сигналу та дає змогу використовувати розподілену активну фільтрацію для компенсації окремих ортогональних складових потужності небалансу. Розглянемо інший спосіб розрахунку D_R, D_I із використанням інтегральних активних та реактивних потужностей окремих фаз трифазної трипровідної системи електроживлення.

Спосіб формування потужностей небалансу за активними та реактивними потужностями окремих фаз.

Сукупність оперативно вимірюваних активних та реактивних потужностей окремих фаз навантаження є необхідною складовою автоматизованих систем контролю та обліку енергоресурсів [18]. Зв'язавши кожну з комплексних провідностей несиметричного навантаження, наприклад, АВ із потужностями цієї фази $\bar{Y}_{AB} = \dot{I}_{AB} / \dot{U}_{AB} = (P_{AB} - jQ_{AB}) / U^2$, виразимо комплексний вектор споживаних струмів через відповідні потужності:

$$\bar{\mathbf{i}} = \begin{vmatrix} \dot{U}_{AB}\bar{Y}_{AB} - \dot{U}_{CA}\bar{Y}_{CA} \\ \dot{U}_{BC}\bar{Y}_{BC} - \dot{U}_{AB}\bar{Y}_{AB} \\ \dot{U}_{CA}\bar{Y}_{CA} - \dot{U}_{BC}\bar{Y}_{BC} \end{vmatrix} = Ue^{j\pi/6} \begin{vmatrix} 1 & 0 & -\dot{a} \\ -1 & \tilde{a} & 0 \\ 0 & -\tilde{a} & \dot{a} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \bar{Y}_{AB} \\ \bar{Y}_{BC} \\ \bar{Y}_{CA} \end{vmatrix} = \frac{e^{j\pi/6}}{U} \begin{vmatrix} 1 & 0 & -\dot{a} \\ -1 & \tilde{a} & 0 \\ 0 & -\tilde{a} & \dot{a} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} P_{AB} - jQ_{AB} \\ P_{BC} - jQ_{BC} \\ P_{CA} - jQ_{CA} \end{vmatrix}. \quad (14)$$

Із порівняння (14) із (6) встановлюємо вирази для комплексної потужності небалансу

$$D_R - jD_I = U\bar{\mathbf{e}}_+^{\wedge} \bar{\mathbf{i}} = \frac{e^{j\pi/6}}{\sqrt{3}} \begin{vmatrix} 1 \\ \tilde{a} \\ \dot{a} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 & -\dot{a} \\ -1 & \tilde{a} & 0 \\ 0 & -\tilde{a} & \dot{a} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} P_{AB} - jQ_{AB} \\ P_{BC} - jQ_{BC} \\ P_{CA} - jQ_{CA} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} e^{j\pi/3} \\ -1 \\ e^{-j\pi/3} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} P_{AB} - jQ_{AB} \\ P_{BC} - jQ_{BC} \\ P_{CA} - jQ_{CA} \end{vmatrix}. \quad (15)$$

Прирівнювання дійсних та уявних частин (15) дає аналітичні вирази для шуканих скалярних величин потужностей небалансу:

$$D_R = \frac{P_{AB} + P_{CA}}{2} - P_{BC} + \frac{\sqrt{3}(Q_{AB} - Q_{CA})}{2}; \quad D_I = \frac{\sqrt{3}(P_{CA} - P_{AB})}{2} + \frac{Q_{AB} + Q_{CA}}{2} - Q_{BC}. \quad (16)$$

Для верифікації отриманих формул та підтвердження ефективності алгоритмів активної фільтрації з їхнім використанням застосуємо коефіцієнт виграшу за потужністю інтегральних втрат, що однозначно пов'язаний з інтегральним коефіцієнтом потужності навантаження

$$B = \frac{\Delta P}{\Delta P_F} = \frac{1}{A^2} = \frac{S^2}{P^2}, \quad (17)$$

де ΔP – потужність втрат на резистивних опорах лінії передачі за відсутності активного фільтра, ΔP_F – потужність тих самих втрат у разі використання фільтра.

Для фокусування уваги на наявності додаткових втрат у лінії передачі, викликаних струмами, пов'язаними саме з потужностями небалансу, за відсутності реактивних струмів розглянемо несиметричне чисто активне навантаження трифазної трипровідної мережі з комплексними провідностями $\bar{Y}_{AB} = G$; $\bar{Y}_{BC} = kG$; $\bar{Y}_{CA} = 0$, де k – змінний параметр, що може змінюватися в діапазоні $0 \dots 1$.

Коефіцієнт потужності несиметричного лінійного навантаження визначається співвідношенням [19]

$$\lambda = P / S = \operatorname{Re}(\bar{y}_0) / \sqrt{y_-^2 + y_0^2}, \quad (18)$$

де для досліджуваної схеми

$$\bar{y}_- = \bar{Y}_{AB} + \dot{a} \bar{Y}_{BC} + \tilde{a} \bar{Y}_{CA} = G + k \dot{a} G = G(1 + k \dot{a}); \quad \bar{y}_0 = \bar{Y}_{AB} + \bar{Y}_{BC} + \bar{Y}_{CA} = G(1 + k).$$

Прогнозований вираз за потужністю інтегральних втрат

$$B = \lambda^{-2} = \frac{y_-^2 + y_0^2}{\operatorname{Re}^2(\bar{y}_0)} = 1 + \frac{y_-^2 + \operatorname{Im}^2(\bar{y}_0)}{\operatorname{Re}^2(\bar{y}_0)} = 1 + \frac{(1 + k \dot{a})(1 + k \tilde{a})}{(1 + k)^2} = 1 + \frac{1 - k + k^2}{(1 + k)^2} \quad (19)$$

представлений у вигляді залежності від параметра k на рис. 2.

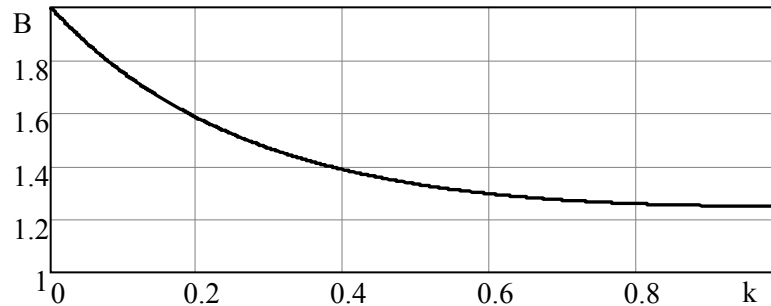


Рис. 2. Графік прогнозованого виразу за потужністю інтегральних втрат

Комп'ютерне моделювання способу активної фільтрації на основі вимірювання активних та реактивних потужностей окремих фаз.

Основу комп'ютерної моделі для експериментальної верифікації запропонованого способу активної фільтрації складає схема в середовищі PLECS (рис. 3), детально описана в [20]. Відмінність полягає в модифікації модуля Inactive Power Calculator, що обчислює значення потужностей небалансу DR та DI за формулами (16), та введенні блоків PQab, PQbc та PQac, що вимірюють активні та реактивні потужності окремих фаз навантаження. Активна потужність кожної фази розраховується як осереднений на періоді мережових напруг добуток відповідних миттєвих значень струму та напруги. Реактивна потужність розраховується аналогічно, але миттєві значення напруги беруться із затримкою на чверть періоду. Обчислені значення неактивних потужностей разом з виміряними лінійними напругами U_{ac} та U_{bc} подаються на модуль Control System, що обчислює струми компенсації за формулами роботи [20].

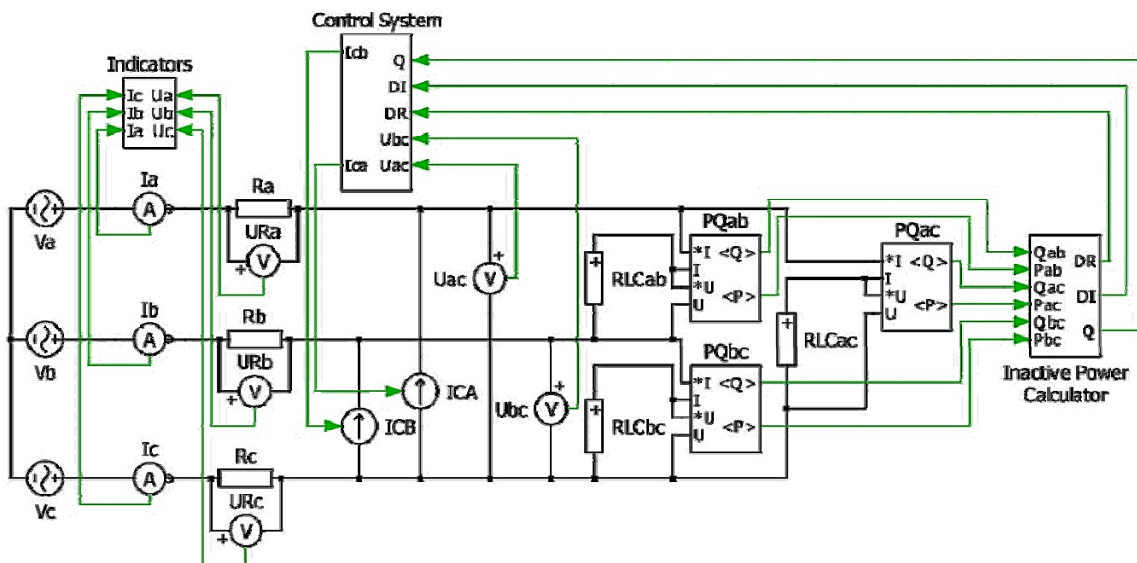


Рис. 3. Схема комп'ютерної моделі трифазної трипровідної системи живлення

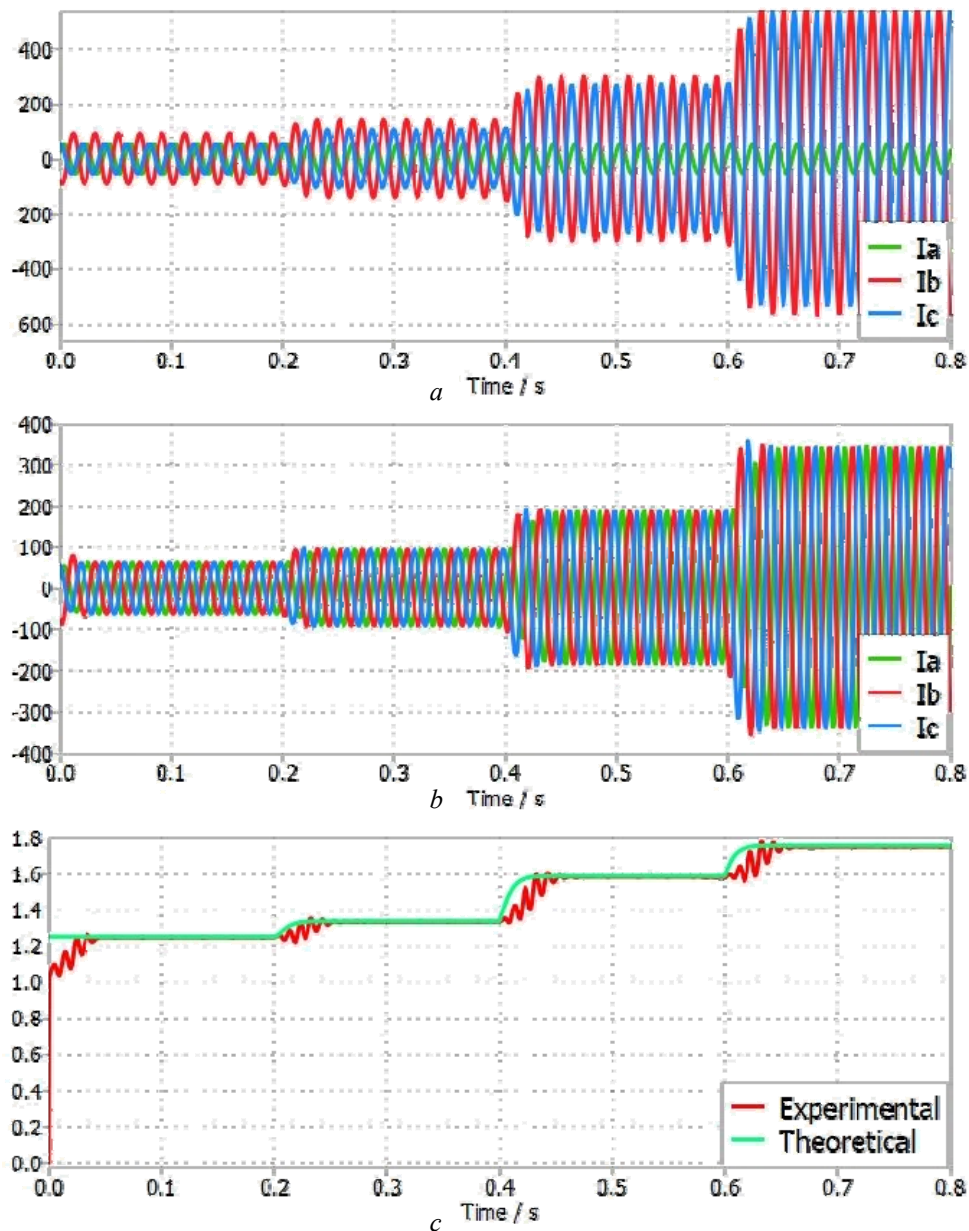


Рис. 4. Часові діаграми роботи трифазної системи електроживлення з несиметричним чисто активним навантаженням: *a* – струми лінії передачі за відсутності фільтрації; *b* – струми лінії передачі за наявності фільтрації; *c* – прогнозована та експериментальна залежності коефіцієнта виграшу за потужністю інтегральних втрат

У першому експерименті (часові діаграми на рис. 4) перевірявся виграш за потужністю інтегральних втрат у разі застосування запропонованого способу активної фільтрації для несиметричного чисто активного навантаження (графік прогнозованого виграшу на рис. 2). Водночас величини реактивних потужностей приймалися нульовими, а величини активних потужностей фаз змінювались за законом $P_{AB} = 3 \times 220^2 = P_0$; $P_{BC} = k(t)P_0$; $P_{CA} = 0$, де на першому інтервалі $k = 1$, другому – $k = 1/2$, третьому – $k = 1/5$, четвертому інтервалі $k = 1/10$.

Продemonстровано симетрію споживаних струмів за наявності запропонованої активної фільтрації для довільного k та виграші за потужністю втрат відповідно до (19).

У другому експерименті (часові діаграми на рис. 5) моделювалося несиметричне навантаження, активні й реактивні потужності окремих фаз якого відповідали інтервальним значенням на рис. 5 *a, b*. Несиметрія споживаних струмів (рис. 5 *c*) компенсувалась запропонованим способом активної фільтрації у кожному робочому інтервалі (рис. 5 *d*), забезпечуючи інтервальні коефіцієнти виграшу за потужністю втрат, наведені на рис. 5 *e*.

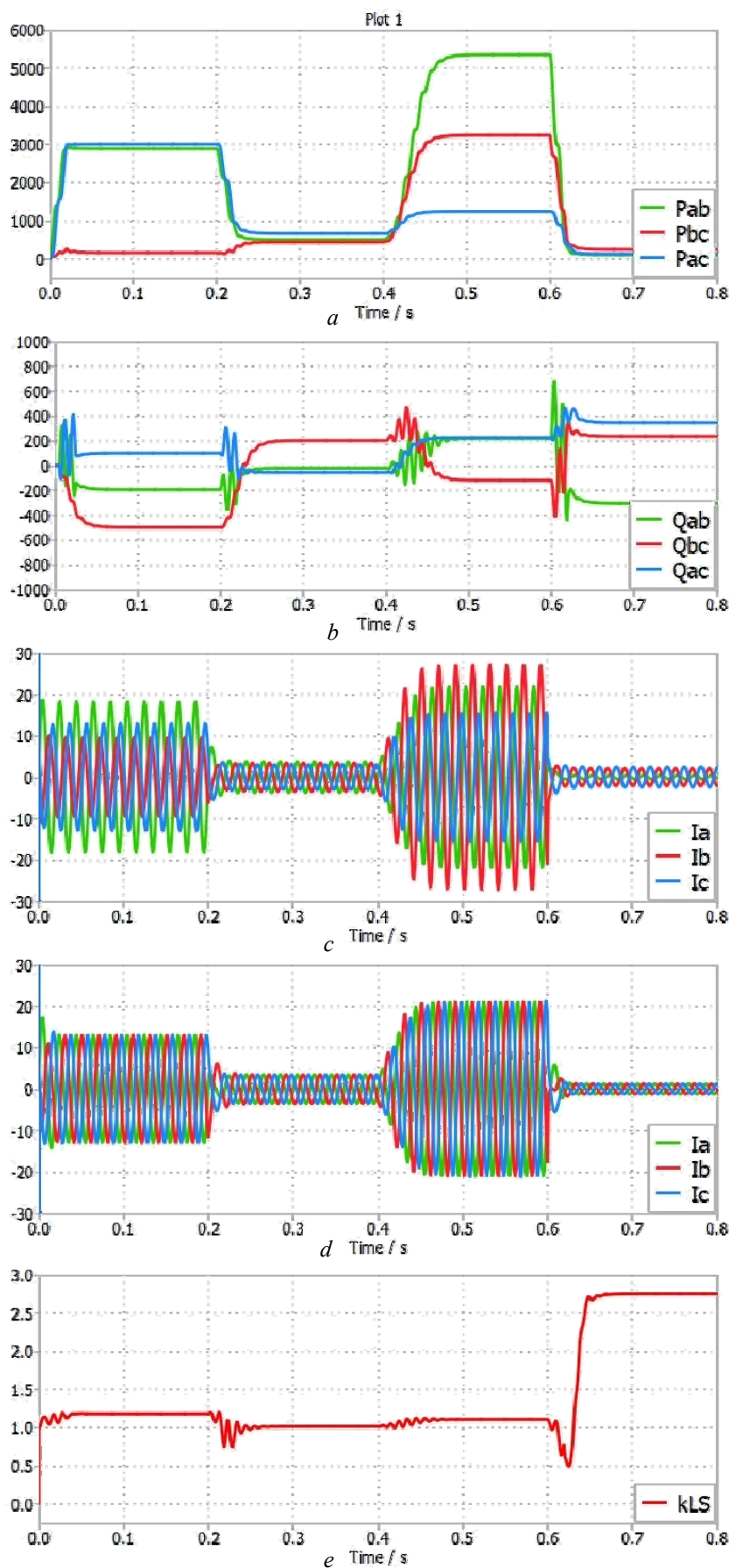


Рис 5. Часові діаграми роботи трифазної системи електроживлення зі змінюваним несиметричним лінійним навантаженням
a, b – активні й реактивні потужності навантажень окремих фаз;
c, d – струми лінії передачі за відсутності та наявності активної фільтрації;
e – коефіцієнт виграшу за потужністю інтегральних втрат

У цілому комп'ютерне моделювання підтвердило ефективність способу активної фільтрації на основі вимірювання активних та реактивних потужностей окремих фаз.

Висновки. 1. Показано, що стратегія активної фільтрації трифазної трипровідної системи електроживлення на основі формування в лінії передачі вектора миттєвого активного струму класичних теорій миттєвої потужності веде до появи третьої гармоніки споживаних струмів, навіть для лінійного несиметричного навантаження.

2. Встановлено, що діюче значення цієї третьої гармоніки споживаних струмів пропорційне середньоквадратичному значенню інтегральних ортогональних складових потужності небалансу.

3. Показано, що додаткова фільтрація пульсуючої складової миттєвої реактивної потужності споживаного трифазного струму усуває проблему третьої гармоніки та за ефективністю дії повністю еквівалентна паралельній активній фільтрації за інтегральними ортогональними складовими потужності небалансу.

4. Запропоновано новий спосіб паралельної активної фільтрації за інтегральними ортогональними складовими потужності небалансу, верифікований комп'ютерним моделюванням, що використовує активні та реактивні потужності окремих фаз трифазної трипровідної системи електроживлення.

Фінансується за держбюджетною темою «Дослідження методів підвищення ефективності систем електроживлення з джерелами розосередженої генерації шляхом розроблення нових способів побудови та керування напівпровідниковими компенсаторами збурень і неактивних складових потужності» (шифр «АДАПТЕР-2»), що виконується за Постановою Бюро БЕЕТ НАН України від 10.07.2024 р. Протокол № 3. Державний реєстраційний номер роботи 0125U000014. КПКВК 6541030.

1. Adrian A. Adăscălitei, Alexander E. Emanuel. Evolution of the Electric Power Componensation Definitions. *Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series*. 2015. No 39. Pp. 206–211.
2. Artemenko M.Yu., Chopyk V.V., Mykhalskyi V.M., Shapoval I.A. Chapter Power Quality Assessment and Improvement of Grid-tied Distributed Generation Systems. In book: *Electric Vehicles and Distributed Generation – Microgrid*. 2025. Pp. 89–146. DOI: <https://doi.org/10.1201/9788770046152-4>
3. Fryze S. Moc czynna, bierna i pozorna układu 3-fazowego o odkształconych przebiegach napięć fazowych i prądów przewodowych. *Wybrane zagadnienia teoretycznych podstaw elektrotechniki*. PWN, Warszawa, Wrocław. 1966. Pp. 250–256.
4. Depenbrock M. The FBD-method, a generally applicable tool for analyzing power relations. *IEEE Trans. Power Syst.* 1993. Vol. 8. No. 2. Pp. 381–387. DOI: <https://doi.org/10.1109/59.260849>
5. Czarnecki L.S. Currents' physical components (CPC) concept: A fundamental of power theory. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2008. Vol. 84. No. 6. Pp. 28–37. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISNCC.2008.4627483>
6. Tenti P. and Mattavelli P. A time-domain approach to power term definitions under non-sinusoidal conditions. *Proc. 6th Int. Workshop Power Definitions Meas. Under Non-Sinusoidal Conditions*, Milan, Italy, 2003. Pp. 1–10.
7. Malengret M. and Trevor Gaunt C. Active Currents, Power Factor, and Apparent Power for Practical Power Delivery Systems. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. Pp. 133095–133113. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010638>
8. Akagi H., Kanazawa Y. and Nabae A. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits. *Proc. IEEJ Int. Power Electron. Conf. (IPEC)*, Tokio, Japan, 1983, Pp. 1375–1386.
9. Herrera R.S. and Salmeron P. Instantaneous reactive power theory: A comparative evaluation of different formulations. *IEEE Trans. Power Del.* 2007. Vol. 22. No 1. Pp. 595–604. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.881468>
10. Kim H. and Akagi H. The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames. *Proc. IEEE Int. Conf. Power Electron. Drive Syst.*, Hong Kong. Jul. 1999. Pp. 422–427. DOI: <https://doi.org/10.1109/PEDS.1999.794600>
11. Soares V. Verdelho P. and Marques G.D. An instantaneous active and reactive current component method for active filters. *IEEE Trans. Power Electron.* 2000. Vol. 15. No 4. Pp. 660–669. DOI: <https://doi.org/10.1109/63.849036>
12. Zheng Peng F. and Lai J.-S. Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 1996. Vol. 45. No 1. Pp. 293–297. DOI: <https://doi.org/10.1109/19.481350>
13. Peng Fang Z., Hao Huang, Tolbert Leon M., Lehman Brad and Yu Ann Li. Spacetime pq theory for AC and DC electric power systems. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article number: 8169. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-90021-3>

14. Czarnecki L.S. On some misinterpretations of the instantaneous reactive power p-q theory. *IEEE Trans. Power Electron.* 2004. Vol. 19. No 3. Pp. 828–836. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2004.826500>.
15. Li Q., Peng G., and Mao C. The comparative study of instantaneous power theory in three-phase three-wire systems. *Proc. IEEE 3rd Conf. Energy Internet Energy Syst. Integr.* (EI2), Changsha, China, Nov. 2019. Pp. 1293–1298. DOI: <https://doi.org/10.1109/EI247390.2019.9062059>.
16. Artemenko M.Yu., Polishchuk S.Y., Chopyk V.V., Mikhalsky V.M., Shapoval I.A. Integral power theory and active filtering using the α - β reference frame. *IEEE Access.* 2024. Vol. 12. Pp. 60004–60014. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3393767>
17. 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 Electrodynamika.* 2022. No 2. Pp. 12–20. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.012>
18. On Approval of the Concept of Building Automated Electricity Metering Systems in the Energy Market. Order of 17.04.2000 N 32/28/28/276/75/54 of the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0032558-00> (Accessed 24.04.2025). (Ukr)
19. Artemenko M.Yu., Kostiuk R.Yr. Power factor and efficiency of three-phase power supply systems under linear asymmetric load. *Electronics and Communication.* 2015. No. 6. Pp. 17–23. (Ukr)
20. Mikhaïlo Artemenko, Yuri Kutafin. Measurement and compensation of unbalance powers in the coordinate system of the two-wattmeter method. *Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University.* 2022. No 6(137). Pp. 22–28. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.6.2> (Ukr)

OVERCOMING THE THIRD HARMONIC PROBLEM IN THE THEORY OF ACTIVE FILTRATION OF THREE-PHASE THREE-WIRE POWER SUPPLY SYSTEMS

M.Yu. Artemenko¹, Yu.V. Kutafin¹, P.B. Fedorchenko¹, V.V. Chopyk², I.A. Shapoval²

1 – National Technical University of Ukraine Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Beresteyskyi ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

2 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Beresteyskyi ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: artemenko_m_ju@ukr.net

In this paper the mechanism of occurrence and a quantitative assessment of the third harmonic effect in the instantaneous active current vector of a three-phase power supply system with symmetrical sinusoidal source voltages in the presence of line load asymmetry are elucidated. It is shown that additional filtering of the instantaneous reactive power pulsating component of the consumed three-phase current eliminates the problem of the third harmonic and fully corresponds to shunt active filtering by the integral orthogonal components of the unbalance power. A new method of shunt active filtering by integral orthogonal components of unbalance power is proposed, which uses the active and reactive powers of individual phases of a three-phase three-wire power supply system. Computer simulations have confirmed the effectiveness of the active filtering method based on the measurement of active and reactive powers of individual phases. Ref. 20, fig. 5.

Keywords: shunt active filter, instantaneous active current, unbalance power, active and reactive powers of individual phases.

Надійшла: 31.03.2025

Прийнята: 28.04.2025

Submitted: 31.03.2025

Accepted: 28.04.2025