УДК 621.314 DOI: https://doi.org/10.15407/techned2021.05.011

КЕРУВАННЯ ПАРАЛЕЛЬНИМ АКТИВНИМ ФІЛЬТРОМ ТРИФАЗНОЇ ТРИПРОВІДНОЇ МЕРЕЖІ В СИСТЕМІ КООРДИНАТ МЕТОДУ ДВОХ ВАТМЕТРІВ

М.Ю. Артеменко[1*], докт.техн.наук, **Ю.В. Кутафін**[1**], **В.М. Михальський**[2***], чл.-кор.НАН України,
С.Й. Поліщук[2****], канд.техн.наук, **В.В. Чопик**[2*****], канд.техн.наук,
І.А. Шаповал[2******], докт.техн.наук
[1] **НТУ України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»,**
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна,
[2] **Інститут електродинаміки НАН України,**
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна. **E-mail: mikhalsky@ied.org.ua**

У роботі запропоновано комбіновану систему керування паралельним активним фільтром в системі координат методу двох ватметрів, яка в залежності від умов використання реалізує одну з чотирьох стратегій активної фільтрації, оптимальних за певним показником якості. Найбільш перспективною є запропонована інтегральна стратегія керування активною фільтрацією з опорним вектором лінійних напруг прямої послідовності, що забезпечує симетричні синусоїдальні струми мережі та мінімальну пульсацію енергоспоживання за енергоефективності, що практично відповідає стратегії за концепцією С.Фрізе. Отримано нові формули розрахунку енергоефективності та пульсацій миттєвої потужності в трифазній трипровідній системі живлення за різних стратегіях активної фільтрації в умовах несиметрії напруг мережі живлення та лінійного несиметричного навантаження. Експериментальні дослідження підтвердили адекватність запропонованих стратегій та розрахунків. Бібл. 15, рис. 5, табл. 1.
Ключові слова: метод двох ватметрів, стратегія керування паралельним активним фільтром.

Вступ. Застосування активних силових фільтрів в трифазних трипровідних системах живлення є радикальним засобом поліпшення якості електроенергії у вузлах загального підключення потужних споживачів в умовах несиметрії напруг живлення, несиметрії та нелінійності навантаження [1–5]. Перевага віддається засобам паралельної фільтрації, оскільки паралельні активні фільтри (ПАФ) здебільшого переважають послідовні за потужністю втрат енергії на власних елементах [6]. Стратегії керування ПАФ базуються на компенсації неактивних складових струмів навантаження, що покращує гармонічний склад струмів, споживаних від трифазного джерела, та мінімізує потужність втрат в лінії передачі [7, 8]. Незважаючи на те, що теорії миттєвої та інтегральної потужностей пропонують різні способи декомпозиції струмів навантаження та відповідних їм втрат в лінії передачі, сформувався певний консенсус стосовно визначення активного струму трифазної трипровідної системи живлення. В теорії миттєвої потужності таке визначення було запропоновано Peng F.Z. та Lai J.S [9], в теорії інтегральної потужності актуальним залишається визначення активного струму Fryze S. [10]. В процесі реалізації таких струмів в лінії передачі за допомогою ПАФ переваги мають стратегії прямого розрахунку активних струмів, що відрізняються простотою реалізації, підвищеною точністю та швидкодією. Зазначеним вимогам відповідає алгоритм безпосереднього формування миттєвого активного струму в системі координат методу двох ватметрів, який оперує з двома струмовими координатами трифазної мережі та з двома координатами лінійних напруг. З використанням цієї системи координат в [11] представлено декілька стратегій керування ПАФ в межах теорії миттєвої потужності, в [12] – дві стратегії в рамках інтегральної теорії потужності.

Метою роботи є розробка комбінованої системи керування ПАФ в системі координат методу двох ватметрів, що реалізує найпривабливіші стратегії активної фільтрації теорій миттєвої та

© Артеменко М.Ю., Кутафін Ю.В. Михальський В.М., Поліщук С.Й., Чопик В.В., Шаповал І.А., 2021
ORCID ID: [*] https://orcid.org/0000-0001-9341-9238 ; [**] https://orcid.org/0000-0002-8156-1277 ;
[***] https://orcid.org/0000-0002-8251-3111 ; [****] https://orcid.org/0000-0002-6978-2747 ;
[*****] https://orcid.org/0000-0002-5046-5223 ; [******] https://orcid.org/0000-0002-9107-5061

інтегральної потужностей, їхня апробація та порівняльний аналіз в трифазних трипровідних мережах з синусоїдними несиметричними напругами.

1. Енергоефективні стратегії керування ПАФ. Такі стратегії спрямовані на мінімізацію потужності втрат в лінії передачі. В залежності від того, яке значення потужності втрат (миттєве чи інтегральне) мінімізується, розрізняють миттєве чи інтегральне значення векторів активного струму, що мають бути сформовані засобами активної фільтрації в лінії передачі. Розмірність цих векторів на одиницю менша за кількість фаз, і обидва вони є пропорційними вектору струмів короткого замикання багатофазного джерела мережі на опори лінії передачі, що можуть бути представлені матрицею опорів втрат $\mathbf{R} = r(\mathbf{I} + \mathbf{j}\mathbf{j}^T)$; ($r$ – величина опору кожного проводу лінії передачі); $\mathbf{I}$ – одинична матриця; $\mathbf{j}$ – одиничний вектор; ^{T} – знак транспонування. Для трифазної трипровідної мережі (рис. 1) вектор струмів короткого замикання має наступний вигляд в системі координат методу двох ватметрів під час вибору спільної точки С:

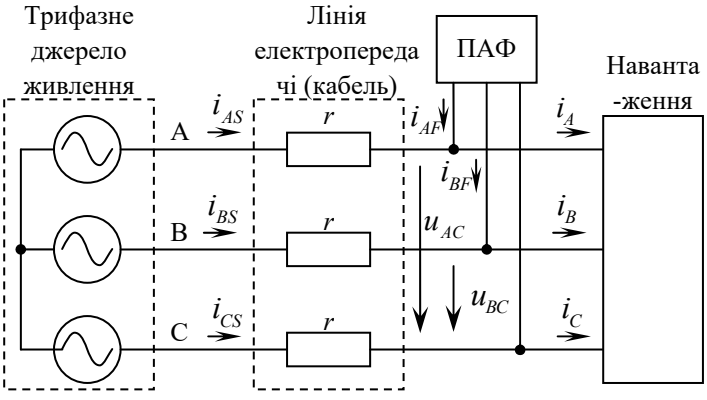

Рис. 1

$$\mathbf{i}_{SC}(t) = \begin{Vmatrix} i_{A0} \\ i_{B0} \end{Vmatrix} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{u}(t) = \left(r \begin{Vmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{Vmatrix} \right)^{-1} \begin{Vmatrix} u_{AC} \\ u_{BC} \end{Vmatrix} = \frac{2}{3r} \begin{Vmatrix} 1 & -1/2 \\ -1/2 & 1 \end{Vmatrix} \begin{Vmatrix} u_{AC} \\ u_{BC} \end{Vmatrix} = \frac{2}{3r} \begin{Vmatrix} u_{AC} - u_{BC}/2 \\ u_{BC} - u_{AC}/2 \end{Vmatrix}. \quad (1)$$

Коефіцієнтом пропорційності у випадку миттєвого значення активного струму є відношення миттєвої потужності навантаження $p(t) = \mathbf{u}^T(t)\mathbf{i}(t) = u_{AC}i_A + u_{BC}i_B$ до миттєвої потужності короткого замикання

$$p_{SC}(t) = \mathbf{u}^T(t)\mathbf{i}_{SC}(t) = \mathbf{u}^T(t)\mathbf{R}^{-1}\mathbf{u}(t) = \frac{2}{3r} \begin{Vmatrix} u_{AC} & u_{BC} \end{Vmatrix} \begin{Vmatrix} u_{AC} - u_{BC}/2 \\ u_{BC} - u_{AC}/2 \end{Vmatrix} = \frac{2}{3r}(u_{AC}^2 - u_{AC}u_{BC} + u_{BC}^2).$$

Підстановка визначених величин дає миттєве значення активного струму (далі миттєвий активний струм) в системі координат методу двох ватметрів [11]

$$\mathbf{i}_a(t) = \frac{p(t)}{p_{SC}(t)}\mathbf{i}_{SC}(t) = g_{MM}(t) \begin{Vmatrix} u_{AC} - u_{BC}/2 \\ u_{BC} - u_{AC}/2 \end{Vmatrix}, \quad (2)$$

де $g_{MM}(t) = (u_{AC}i_A + u_{BC}i_B)/(u_{AC}^2 - u_{AC}u_{BC} + u_{BC}^2)$.

Миттєвий активний струм (2) забезпечує необхідну миттєву потужність навантаження без будь-якого накопичувача енергії за мінімальній миттєвій потужності втрат. Перша стратегія паралельної активної фільтрації полягає у формуванні струмів двофазного трипровідного ПАФ (рис.1) за формулою [11]

$$\mathbf{i}_{F1}(t) = \mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_a(t) = \begin{Vmatrix} i_A \\ i_B \end{Vmatrix} - g_{MM}(t) \begin{Vmatrix} u_{AC} - u_{BC}/2 \\ u_{BC} - u_{AC}/2 \end{Vmatrix}. \quad (3)$$

Така стратегія забезпечує максимальний виграш за потужністю миттєвих втрат в лінії передачі порівняно з системою без фільтра [11], а від стратегії керування на основі *pq*-теорії миттєвої потужності вона відрізняється простотою реалізації за рахунок уникнення подвійного матричного перетворення координат, підвищеною точністю та швидкодією.

Мінімальні інтегральні втрати енергії в лінії передачі забезпечує вектор активного струму, коефіцієнтом пропорційності якого є відношення інтегральних потужностей навантаження та короткого замикання [12], причому, як правило, інтегрування здійснюється на періоді T напруг мережі

$$\mathbf{i}_A(t) = g_{II}(t) \begin{Vmatrix} u_{AC} - u_{BC}/2 \\ u_{BC} - u_{AC}/2 \end{Vmatrix}, \quad (4)$$

де $g_{II}(t)=\int_T p(t)dt/\int_T(u_{AC}^2-u_{AC}u_{BC}+u_{BC}^2)dt=P/\int_T(u_{AC}^2-u_{AC}u_{BC}+u_{BC}^2)dt.$

Відповідно, друга стратегія паралельної активної фільтрації полягає у формуванні струмів двофазного трипровідного ПАФ за формулою (3), але з коефіцієнтом пропорційності $g_{II}(t)$ [12]. Вона забезпечує максимальний виграш за потужністю інтегральних втрат в лінії передачі порівняно з системою без фільтра, що дорівнює мінус другій степені інтегрального коефіцієнта потужності [8], але потребує енергонакопичувального елемента, оскільки миттєва потужність навантаження, як правило. не дорівнює інтегральній.

Третя стратегія паралельної активної фільтрації, що повністю усуває пульсації миттєвої потужності трифазного джерела, реалізується за формулою (3), але з коефіцієнтом пропорційності $g_{IM}(t)=P/(u_{AC}^2-u_{AC}u_{BC}+u_{BC}^2)$ [11].

Дійсно, в цьому випадку миттєва потужність трифазного джерела

$$p_{S3}(t)=\mathbf{u}^T(t)\mathbf{i}_{S3}(t)=\mathbf{u}^T(t)\mathbf{i}(t)-\mathbf{u}^T(t)\mathbf{i}_{F3}(t)=p(t)-p(t)+g_{IM}(t)\|u_{AC}\quad u_{BC}\|\left\|\begin{matrix}u_{AC}-u_{BC}/2\\u_{BC}-u_{AC}/2\end{matrix}\right\|=$$

$$=P(u_{AC}^2-u_{AC}u_{BC}+u_{BC}^2)^{-1}(u_{AC}^2-u_{AC}u_{BC}+u_{BC}^2)=P,$$

тобто, в будь-який момент часу дорівнює інтегральній потужності навантаження.

Загальним недоліком усіх трьох розглянутих стратегій є несиметрія та/або несинусоїдність споживаних струмів за умов несиметрії та/або несинусоїдності опорного вектора напруг, якими виступають лінійні напруги мережі живлення. Задля забезпечення вимог сучасних стандартів [13] опорний вектор напруг для формування активного струму $\mathbf{i}_{A+}(t)$ має бути представлений симетричними синусоїдними напругами прямої послідовності. Таким чином, забезпечується четверта стратегія паралельної активної фільтрації за формулою [12]

$$\mathbf{i}_{F4}(t)=\mathbf{i}(t)-\mathbf{i}_{A+}(t)=\left\|\begin{matrix}i_A\\i_B\end{matrix}\right\|-g_{I+}(t)\left\|\begin{matrix}u_{AC+}-u_{BC+}/2\\u_{BC+}-u_{AC+}/2\end{matrix}\right\|,\qquad(5)$$

де $g_{I+}(t)=P/(u_{AC+}^2-u_{AC+}u_{BC+}+u_{BC+}^2);u_{AC+},u_{BC+}$ – відповідні лінійні синусоїдні напруги прямої послідовності чергування фаз. Така стратегія забезпечує симетричні синусоїдні споживані струми трифазного джерела за довільних спотвореннях напруг живлення та несиметрії й нелінійності навантаження.

2. Комбінована система керування ПАФ. Аналіз виразів (3), (5) для струмів ПАФ показує, що вони відрізняються лише величиною скалярного коефіцієнта пропорційності $g(t)$ та опорним вектором напруг, в якості яких використовуються лінійні напруги мережі або їхні симетричні складові прямої послідовності чергування фаз. Це дає змогу розробити комбіновану систему керування ПАФ (рис. 2), в якій в залежності від конкретних умов застосування обирається одна з чотирьох розглянутих стратегій активної фільтрації, кожна з яких є оптимальною за певним показником якості.

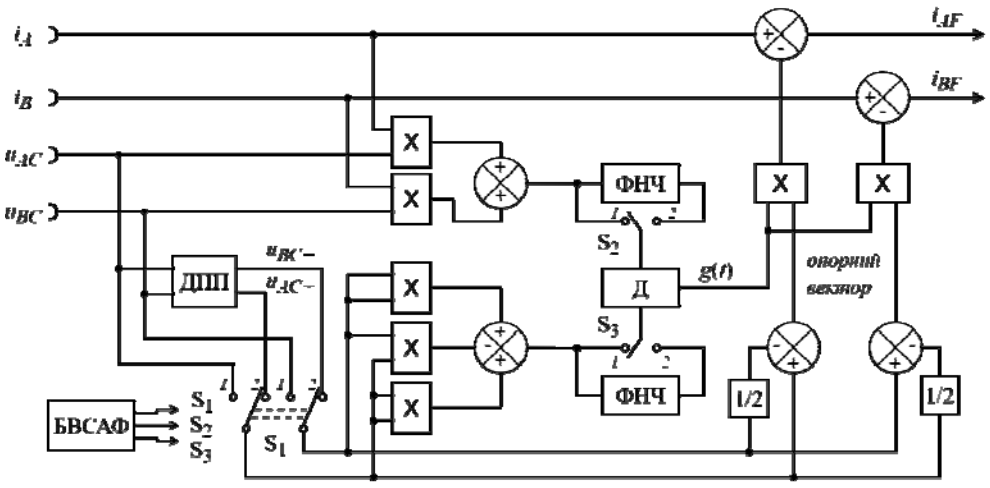

Рис. 2

Вхідними величинами є електричні змінні методу двох ватметрів: миттєві значення лінійних напруг відносно спільної точки С, тобто u_{AC} та u_{BC}, та два відповідні струми навантаження i_A та i_B. Конкретна стратегія забезпечується комутацією двопозиційних ключів S_1,S_2,S_3, блоком вибору стратегії активної фільтрації (БВСАФ) відповідно до таблиці.

Здвоєний двопозиційний ключ S_1 комутує результати вимірів лінійних напруг мережі для подальшої обробки (в положенні 1) або їхні симетричні складові прямої послідовності чергування фаз (в положенні 2), що виділяються детектором прямої послідовності (ДПП). Координати опорного вектора напруг формуються як дві лінійні комбінації вихідних напруг здвоєного ключа S_1 та множаться на величину коефіцієнта пропорційності $g(t)$, що формується дільником Д.

Миттєві або інтегральні величини чисельника та знаменника коефіцієнта пропорційності визначають стани ключів S_2 та S_3. Перші розраховуються як миттєва потужність навантаження $p(t)$ за методом двох ватметрів, а другі – за формулою $u_{AC}^2 - u_{AC}u_{BC} + u_{BC}^2$ з використанням стандартних блоків множення та додавання. Інтеграторами миттєвих значень є фільтри низьких частот (ФНЧ) з частотою зрізу, що дорівнює половині частоти мережі. Опорні значення струмів фільтра i_{AF} та i_{BF}, що є вихідними сигналами комбінованої системи керування, формуються з використанням миттєвих значень струмів навантаження та бажаних струмів трифазного джерела за формулами (3) та (5). Силова частина ПАФ може бути реалізована за схемами двофазного трипровідного інвертора, представленими в [11].

Стратегії активної фільтрації	Коефіцієнт пропорційності $g(t)$	Опорний вектор	Стани ключів		
			S_1	S_2	S_3
Стратегія 1	$g_{MM}(t)$	$\left\|u_{AC} - u_{BC}/2 \quad u_{BC} - u_{AC}/2\right\|^T$	1	1	1
Стратегія 2	$g_{II}(t)$	$\left\|u_{AC} - u_{BC}/2 \quad u_{BC} - u_{AC}/2\right\|^T$	1	2	2
Стратегія 3	$g_{IM}(t)$	$\left\|u_{AC} - u_{BC}/2 \quad u_{BC} - u_{AC}/2\right\|^T$	1	2	1
Стратегія 4	$g_{I+}(t)$	$\left\|u_{AC+} - u_{BC+}/2 \quad u_{BC+} - u_{AC+}/2\right\|^T$	2	2	1

3. Розрахунок енергоефективності та пульсацій миттєвої потужності для лінійного навантаження в режимі несиметричних синусоїдних напруг за різних стратегіях активної фільтрації. Енергоефективність застосування ПАФ може бути оцінена коефіцієнтом виграшу за потужністю втрат, який дорівнює відношенню потужності втрат в лінії передачі без фільтра до потужності втрат за наявності ПАФ [2] та набуває максимуму при формуванні інтегрального значення вектора активного струму трифазного джерела [8]

$$W = S^2 / P^2 = \Lambda^{-2},$$

де $\Lambda = P/S$ – коефіцієнт потужності; $S = UI$ – повна потужність; U, I – середньоквадратичні значення фазних напруг та лінійних струмів.

В синусоїдному несиметричному режимі напруг живлення без втрати степені узагальнення можна представити фазні напруги джерела комплексним вектором діючих значень

$$\bar{\boldsymbol{U}}_{\Phi} = \begin{Vmatrix} \dot{U}_{AO} \\ \dot{U}_{BO} \\ \dot{U}_{CO} \end{Vmatrix} = U_{+} \begin{Vmatrix} 1 \\ \tilde{a} \\ \dot{a} \end{Vmatrix} + U_{-} e^{j\theta} \begin{Vmatrix} 1 \\ \dot{a} \\ \tilde{a} \end{Vmatrix}, \tag{6}$$

де U_{+}, U_{-} – діючі значення фазних напруг прямої та зворотної послідовності; θ – величина фазового зсуву; $\dot{a} = e^{j2\pi/3}; \tilde{a} = (\dot{a})^* = e^{-j2\pi/3}$; * – знак комплексного спряження.

Комплексний вектор діючих значень лінійних напруг має вигляд

$$\bar{\boldsymbol{U}}_{Л} = \begin{Vmatrix} \dot{U}_{AB} \\ \dot{U}_{BC} \\ \dot{U}_{CA} \end{Vmatrix} = U_{+} \begin{Vmatrix} 1-\tilde{a} \\ \tilde{a}-\dot{a} \\ \dot{a}-1 \end{Vmatrix} + U_{-} e^{j\theta} \begin{Vmatrix} 1-\dot{a} \\ \dot{a}-\tilde{a} \\ \tilde{a}-1 \end{Vmatrix} = \sqrt{3} U_{+} e^{j\pi/6} \begin{Vmatrix} 1 \\ \tilde{a} \\ \dot{a} \end{Vmatrix} + \sqrt{3} U_{-} e^{j(\theta-\pi/6)} \begin{Vmatrix} 1 \\ \dot{a} \\ \tilde{a} \end{Vmatrix}. \tag{7}$$

Розрахуємо виграш за потужністю інтегральних втрат для лінійного навантаження, що повністю ідентифікується комплексними провідностями $\bar{Y}_{AB}; \bar{Y}_{BC}; \bar{Y}_{CA}$.

Комплексний вектор лінійних струмів визначається виразом

$$\overline{\boldsymbol{I}}_{Л}=\left\|\begin{matrix}\dot{I}_A\\ \dot{I}_B\\ \dot{I}_C\end{matrix}\right\|=\left\|\begin{matrix}\dot{U}_{AB}\overline{Y}_{AB}-\dot{U}_{CA}\overline{Y}_{CA}\\ \dot{U}_{BC}\overline{Y}_{BC}-\dot{U}_{AB}\overline{Y}_{AB}\\ \dot{U}_{CA}\overline{Y}_{CA}-\dot{U}_{BC}\overline{Y}_{BC}\end{matrix}\right\|=\sqrt{3}U_{+}e^{j\pi/6}\left\|\begin{matrix}\overline{Y}_{AB}-\dot{a}\overline{Y}_{CA}\\ -\overline{Y}_{AB}+\tilde{a}\overline{Y}_{BC}\\ -\tilde{a}\overline{Y}_{BC}+\dot{a}\overline{Y}_{CA}\end{matrix}\right\|+\sqrt{3}U_{-}e^{j(\theta-\pi/6)}\left\|\begin{matrix}\overline{Y}_{AB}-\tilde{a}\overline{Y}_{CA}\\ -\overline{Y}_{AB}+\dot{a}\overline{Y}_{BC}\\ -\dot{a}\overline{Y}_{BC}+\tilde{a}\overline{Y}_{CA}\end{matrix}\right\|.$$

Для спрощення розрахунків перейдемо до векторів лінійних струмів та фазних напруг в симетричних координатах шляхом множення на модифіковану обернену матрицю Фортеск'ю $\mathbf{F}^{-1}$ [14,15]

$$\underline{\boldsymbol{I}}=\mathbf{F}^{-1}\overline{\boldsymbol{I}}_{Л}=\frac{\sqrt{3}U_{+}e^{j\pi/6}}{\sqrt{3}}\left\|\begin{matrix}1 & \dot{a} & \tilde{a}\\ 1 & \tilde{a} & \dot{a}\end{matrix}\right\|\left\|\begin{matrix}\overline{Y}_{AB}-\dot{a}\overline{Y}_{CA}\\ -\overline{Y}_{AB}+\tilde{a}\overline{Y}_{BC}\\ -\tilde{a}\overline{Y}_{BC}+\dot{a}\overline{Y}_{CA}\end{matrix}\right\|+\frac{\sqrt{3}U_{-}e^{j(\theta-\pi/6)}}{\sqrt{3}}\left\|\begin{matrix}1 & \dot{a} & \tilde{a}\\ 1 & \tilde{a} & \dot{a}\end{matrix}\right\|\left\|\begin{matrix}\overline{Y}_{AB}-\tilde{a}\overline{Y}_{CA}\\ -\overline{Y}_{AB}+\dot{a}\overline{Y}_{BC}\\ -\dot{a}\overline{Y}_{BC}+\tilde{a}\overline{Y}_{CA}\end{matrix}\right\|=$$

$$=3U_{+}e^{j\pi/6}\left\|\begin{matrix}e^{-j\pi/6}\overline{Y}_0\\ e^{j\pi/6}\overline{Y}_{-}\end{matrix}\right\|+3U_{-}e^{j(\theta-\pi/6)}\left\|\begin{matrix}e^{-j\pi/6}\overline{Y}_{+}\\ e^{j\pi/6}\overline{Y}_0\end{matrix}\right\|=3U_{+}\left\|\begin{matrix}\overline{Y}_0+\chi e^{j(\theta-\pi/3)}\overline{Y}_{+}\\ e^{j\pi/3}(\overline{Y}_{-}+\chi e^{j(\theta-\pi/3)}\overline{Y}_0)\end{matrix}\right\|;$$

$$\underline{\boldsymbol{U}}=\mathbf{F}^{-1}\overline{\boldsymbol{U}}_{\Phi}=\frac{U_{+}}{\sqrt{3}}\left\|\begin{matrix}1 & \dot{a} & \tilde{a}\\ 1 & \tilde{a} & \dot{a}\end{matrix}\right\|\left\|\begin{matrix}1\\ \tilde{a}\\ \dot{a}\end{matrix}\right\|+\frac{U_{-}e^{j\theta}}{\sqrt{3}}\left\|\begin{matrix}1 & \dot{a} & \tilde{a}\\ 1 & \tilde{a} & \dot{a}\end{matrix}\right\|\left\|\begin{matrix}1\\ \dot{a}\\ \tilde{a}\end{matrix}\right\|=\sqrt{3}\left\|\begin{matrix}U_{+}\\ U_{-}e^{j\theta}\end{matrix}\right\|=\sqrt{3}U_{+}\left\|\begin{matrix}1\\ \chi e^{j\theta}\end{matrix}\right\|,$$

де $\left\|\begin{matrix}\overline{Y}_0\\ \overline{Y}_{+}\\ \overline{Y}_{-}\end{matrix}\right\|=\frac{1}{\sqrt{3}}\left\|\begin{matrix}1 & 1 & 1\\ 1 & \tilde{a} & \dot{a}\\ 1 & \dot{a} & \tilde{a}\end{matrix}\right\|\left\|\begin{matrix}\overline{Y}_{AB}\\ \overline{Y}_{BC}\\ \overline{Y}_{CA}\end{matrix}\right\|$ – комплексні провідності в симетричних координатах.

Величина активної потужності навантаження

$$P=\mathrm{Re}\,(\overline{\boldsymbol{U}}_{\Phi}^{T}\overline{\boldsymbol{I}}_{Л}^{*})=\mathrm{Re}\,[(\underline{\boldsymbol{U}}^{T})^{*}\underline{\boldsymbol{I}}]=3\sqrt{3}U_{+}^{2}\mathrm{Re}\left(\left\|\begin{matrix}1\\ \chi e^{-j\theta}\end{matrix}\right\|^{T}\left\|\begin{matrix}\overline{Y}_0+\chi e^{j(\theta-\pi/3)}\overline{Y}_{+}\\ e^{j\pi/3}\overline{Y}_{-}+\chi e^{j\theta}\overline{Y}_0)\end{matrix}\right\|\right)=$$

$$=3\sqrt{3}U_{+}^{2}\mathrm{Re}[\overline{Y}_0(1+\chi^2)+\chi e^{j(\theta-\pi/3)}\overline{Y}_{+}+\chi e^{j(\pi/3-\theta)}\overline{Y}_{-}]=3U_{+}^{2}\mathrm{Re}\left(\left\|\begin{matrix}1+\chi^2\\ \chi e^{j(\theta-\pi/3)}\\ \chi e^{j(\pi/3-\theta)}\end{matrix}\right\|^{T}\left\|\begin{matrix}1 & 1 & 1\\ 1 & \tilde{a} & \dot{a}\\ 1 & \dot{a} & \tilde{a}\end{matrix}\right\|\left\|\begin{matrix}\overline{Y}_{AB}\\ \overline{Y}_{BC}\\ \overline{Y}_{CA}\end{matrix}\right\|\right)=$$

$$=3U_{+}^{2}\mathrm{Re}\left(\left\|\begin{matrix}1+\chi^2+2\chi\cos(\theta-\pi/3)\\ 1+\chi^2+2\chi\cos(\theta-\pi)\\ 1+\chi^2+2\chi\cos(\theta+\pi/3)\end{matrix}\right\|^{T}\left\|\begin{matrix}\overline{Y}_{AB}\\ \overline{Y}_{BC}\\ \overline{Y}_{CA}\end{matrix}\right\|\right)=3U_{+}^{2}\{(1+\chi^2)\mathrm{Re}(\overline{Y}_{AB}+\overline{Y}_{BC}+\overline{Y}_{CA})+2\chi\Delta Y,$$

де $\Delta Y=[\mathrm{Re}(\overline{Y}_{AB})\cos(\theta-\pi/3)+\mathrm{Re}(\overline{Y}_{BC})\cos(\theta-\pi)+\mathrm{Re}(\overline{Y}_{CA})\cos(\theta+\pi/3)].$

Інші складові формули для коефіцієнта виграшу за потужністю втрат

$$I^2=\overline{\boldsymbol{I}}_{Л}^{T}\overline{\boldsymbol{I}}_{Л}^{*}=\underline{\boldsymbol{I}}^{T}\underline{\boldsymbol{I}}^{*}=9U_{+}^{2}\left[\left|\overline{Y}_0+\chi e^{j(\theta-\pi/3)}\overline{Y}_{+}\right|^2+\left|\overline{Y}_{-}+\chi e^{j(\theta-\pi/3)}\overline{Y}_0\right|^2\right]^2;\quad U^2=\overline{\boldsymbol{U}}_{\Phi}^{T}\overline{\boldsymbol{U}}_{\Phi}^{*}=\underline{\boldsymbol{U}}^{T}\underline{\boldsymbol{U}}^{*}=3U_{+}^{2}(1+\chi^2).$$

Введемо до розгляду лінійне несиметричне *mnG*-навантаження, що задається комплексними провідностями $\overline{Y}_{AB}=G+jmG;\overline{Y}_{BC}=G+jnG;\overline{Y}_{CA}=G-j(m+n)G$ та повністю ідентифікується дійсними числами *m*, *n* та додатною провідністю *G*. Для такого навантаження $\mathrm{Re}(\overline{Y}_{AB})=\mathrm{Re}(\overline{Y}_{BC})=\mathrm{Re}(\overline{Y}_{CA})=G;\mathrm{Re}(\overline{Y}_{AB}+\overline{Y}_{BC}+\overline{Y}_{CA})=3G;\Delta Y=0,$ а комплексні провідності в симетричних координатах мають вигляд

$$\left\|\begin{matrix}\overline{Y}_0\\ \overline{Y}_{+}\\ \overline{Y}_{-}\end{matrix}\right\|=\frac{1}{\sqrt{3}}\left\|\begin{matrix}1 & 1 & 1\\ 1 & \tilde{a} & \dot{a}\\ 1 & \dot{a} & \tilde{a}\end{matrix}\right\|\left\|\begin{matrix}G+jmG\\ G+jnG\\ G-j(m+n)G\end{matrix}\right\|=\frac{G}{\sqrt{3}}\left\|\begin{matrix}3\\ j(m+\tilde{a}n-\dot{a}m-\dot{a}n)\\ j(m+\dot{a}n-\tilde{a}m-\tilde{a}n)\end{matrix}\right\|=G\left\|\begin{matrix}\sqrt{3}\\ me^{j\pi/3}+n\\ me^{j2\pi/3}-n\end{matrix}\right\|=G\left\|\begin{matrix}\sqrt{3}\\ m/2+n+jm\sqrt{3}/2\\ -(m/2+n)+jm\sqrt{3}/2\end{matrix}\right\|=G\left\|\begin{matrix}\sqrt{3}\\ ke^{j\vartheta}\\ -ke^{-j\vartheta}\end{matrix}\right\|,$$

де $k^2=(m/2+n)^2+3m^2/4=m^2+mn+n^2; tg(\vartheta)=\sqrt{3}/(1+2n/m)$

Коефіцієнт виграшу за потужністю втрат для *mnG*-навантаження спрощується до вигляду

$$W=\frac{(\underline{\boldsymbol{U}}^T\underline{\boldsymbol{U}}^*)(\underline{\boldsymbol{I}}^T\underline{\boldsymbol{I}}^*)}{P^2}=\frac{9U_+^2\left[\left|\overline{Y}_0+\chi e^{j(\theta-\pi/3)}\overline{Y}_+\right|^2+\left|\overline{Y}_-+\chi e^{j(\theta-\pi/3)}\overline{Y}_0\right|^2\right]3U_+^2(1+\chi^2)}{[9U_+^2\{(1+\chi^2)G]^2}=$$

$$=\frac{\left|\overline{Y}_0+\chi e^{j(\theta-\pi/3)}\overline{Y}_+\right|^2+\left|\overline{Y}_-+\chi e^{j(\theta-\pi/3)}\overline{Y}_0\right|^2}{3(1+\chi^2)G^2}=\frac{\left|1+\chi e^{j(\theta-\pi/3)}ke^{j\vartheta}/\sqrt{3}\right|^2+\left|-ke^{-j\vartheta}/\sqrt{3}+\chi e^{j(\theta-\pi/3)}\right|^2}{1+\chi^2}= \tag{8}$$

$$=\frac{1+2\chi k\cos(\theta+\vartheta-\pi/3)/\sqrt{3}+\chi^2k^2/3+\chi^2-2k\chi\cos(\theta+\vartheta-\pi/3)/\sqrt{3}+k^2/3;}{1+\chi^2}=1+\frac{k^2}{3}=1+\frac{m^2+mn+n^2}{3}.$$

Отже, коефіцієнт виграшу за потужністю втрат для *mnG*-навантаження не залежить від фактора несиметрії χ, а повністю визначається значеннями параметрів *m* та *n*.

Розрахуємо пульсації миттєвої потужності трифазного джерела для *mnG*-навантаження без застосування ПАФ, перетворивши вираз [14] для миттєвої потужності

$$p(t)=\mathrm{Re}(\overline{\boldsymbol{U}}_\Phi^T\overline{\boldsymbol{I}}_Л^*+e^{j2\omega t}\overline{\boldsymbol{U}}_\Phi^T\overline{\boldsymbol{I}}_Л)=P+\mathrm{Re}(e^{j2\omega t}\underline{\boldsymbol{U}}^T\underline{\boldsymbol{I}})=$$

$$=P+\cos(2\omega t)\,\mathrm{Re}(\underline{\boldsymbol{U}}^T\underline{\boldsymbol{I}})-\sin(2\omega t)\,\mathrm{Im}(\underline{\boldsymbol{U}}^T\underline{\boldsymbol{I}})=P+P_{\sim0}\cos(2\omega t+\psi),$$

де $P_{\sim0}=\sqrt{\mathrm{Re}^2(\underline{\boldsymbol{U}}^T\underline{\boldsymbol{I}})+\mathrm{Im}^2(\underline{\boldsymbol{U}}^T\underline{\boldsymbol{I}})};\mathrm{tg}(\psi)=\mathrm{Im}(\underline{\boldsymbol{U}}^T\underline{\boldsymbol{I}})/\mathrm{Re}(\underline{\boldsymbol{U}}^T\underline{\boldsymbol{I}}).$

Отже, амплітуда пульсацій миттєвої потужності дорівнює модулю скалярного добутку зазначених векторів

$$P_{\sim0}=\left|\underline{\boldsymbol{U}}^T\underline{\boldsymbol{I}}\right|=\sqrt{3}U_+\times3U_+\left\|\begin{matrix}1\\ \chi e^{j\theta}\end{matrix}\right\|^T\left\|\begin{matrix}\overline{Y}_0+\chi e^{j(\theta-\pi/3)}\overline{Y}_+\\ e^{j\pi/3}(\overline{Y}_-+\chi e^{j(\theta-\pi/3)}\overline{Y}_0)\end{matrix}\right\|=3\sqrt{3}U_+^2\left|\overline{Y}_0+\chi e^{j(\theta-\pi/3)}\overline{Y}_++\chi e^{j(\theta+\pi/3)}\overline{Y}_-+\chi^2e^{j2\theta}\overline{Y}_0\right|=$$

$$=9U_+^2G\left|1+\chi^2e^{j2\theta}+k\chi[e^{j(\theta+\vartheta-\pi/3)}-e^{j(\theta-\vartheta-\pi/3)}]/\sqrt{3}\right|.$$

З огляду на тотожність $u_Ai_A+u_Bi_B+u_Ci_C=u_{AC}i_A+u_{BC}i_B$ пульсації миттєвої потужності у разі застосування розглянутих стратегії активної фільтрації будуть знайдені в системі координат методу двох ватметрів. Миттєва потужність трифазного джерела у разі застосування першої стратегії активної фільтрації

$$p_1(t)=\mathbf{u}(t)\mathbf{i}_a(t)=\left\|u_{AC}\quad u_{BC}\right\|g_{MM}(t)\left\|\begin{matrix}u_{AC}-u_{BC}/2\\ u_{BC}-u_{AC}/2\end{matrix}\right\|=\frac{u_{AC}i_A+u_{BC}i_B}{u_{AC}^2-u_{AC}u_{BC}+u_{BC}^2}(u_{AC}^2-u_{AC}u_{BC}+u_{BC}^2)=p(t)$$

дорівнює миттєвій потужності навантаження, тому відповідна амплітуда пульсацій миттєвої потужності для цієї стратегій $P_{\sim1}=P_{\sim0}$. Характерною ознакою третьої стратегії активної фільтрації є відсутність пульсацій миттєвої потужності $P_{\sim3}=0$.

Задля розрахунку пульсацій миттєвої потужності, що забезпечує друга стратегія активної фільтрації, визначаємо комплексні напруги опорного вектора активного струму в системі координат методу двох ватметрів

$$\left\|\begin{matrix}\dot{U}_{AC}-\dot{U}_{BC}/2\\ \dot{U}_{BC}-\dot{U}_{AC}/2\end{matrix}\right\|=\sqrt{3}U_+e^{j\pi/6}\left\|\begin{matrix}-\dot{a}-\tilde{a}/2\\ \tilde{a}+\dot{a}/2\end{matrix}\right\|+\sqrt{3}U_-e^{j(\theta-\pi/6)}\left\|\begin{matrix}-\tilde{a}-\dot{a}/2\\ \dot{a}+\tilde{a}/2\end{matrix}\right\|=$$

$$=\frac{3U_+}{2}\left\|\begin{matrix}e^{j\pi/6}e^{-j\pi/6}\\ e^{j\pi/6}e^{-j5\pi/6}\end{matrix}\right\|+\frac{3U_-e^{j\theta}}{2}\left\|\begin{matrix}e^{-j\pi/6}e^{j\pi/6}\\ e^{-j\pi/6}e^{j5\pi/6}\end{matrix}\right\|=\frac{3U_+}{2}\left\|\begin{matrix}1\\ \tilde{a}\end{matrix}\right\|+\frac{3U_-e^{j\theta}}{2}\left\|\begin{matrix}1\\ \dot{a}\end{matrix}\right\|=\frac{3U_+}{2}\left\|\begin{matrix}1+\chi e^{j\theta}\\ \tilde{a}+\chi e^{j\theta}\dot{a}\end{matrix}\right\|,\qquad \text{де } \chi=U_-/U_+. \tag{9}$$

Значення знаменника скалярного коефіцієнта з формули (4)

$$\int_T(u_{AC}^2-u_{AC}u_{BC}+u_{BC}^2)dt=\mathrm{Re}\left(\left\|\dot{U}_{AC}\quad\dot{U}_{BC}\right\|\left\|\begin{matrix}\dot{U}_{AC}-\dot{U}_{BC}/2\\ \dot{U}_{BC}-\dot{U}_{AC}/2\end{matrix}\right\|^*\right)=$$

$$=\frac{3\sqrt{3}}{2}U_+^2(e^{-j\pi/6}+\chi^2e^{j\pi/6}+e^{j\pi/6}+\chi^2e^{-j\pi/6})=\frac{3\sqrt{3}}{2}U_+^2(1+\chi^2)2\cos(\pi/6)=\frac{9}{2}U_+^2(1+\chi^2).$$

Отже, аналітичний вираз для комплексного вектора активного струму в синусоїдному

несиметричному режимі напруг живлення

$$\overline{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{A}} = \frac{2P}{9U_+^2(1+\chi^2)} \times \frac{3U_+}{2} \left\| \begin{matrix} 1+\chi e^{j\theta} \\ \tilde{a}+\chi e^{j\theta}\dot{a} \end{matrix} \right\| = \frac{P}{3U_+(1+\chi^2)} \left\| \begin{matrix} 1+\chi e^{j\theta} \\ \tilde{a}+\chi e^{j\theta}\dot{a} \end{matrix} \right\| \tag{10}$$

Амплітуда пульсацій миттєвої потужності трифазного джерела у разі використання другої стратегії активної фільтрації

$$P_{\sim 2} = \left|\overline{\boldsymbol{U}}^T \overline{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{A}}\right| = \frac{P}{3U_+(1+\chi^2)} \left\| \begin{matrix} \dot{U}_{AC} \\ \dot{U}_{BC} \end{matrix} \right\|^T \left\| \begin{matrix} 1+\chi e^{j\theta} \\ \tilde{a}+\chi e^{j\theta}\dot{a} \end{matrix} \right\| = \frac{\sqrt{3}U_+P}{3U_+(1+\chi^2)} \left\| \begin{matrix} -e^{j\pi/6}\dot{a} - \chi e^{j(\theta-\pi/6)}\tilde{a} \\ e^{j\pi/6}\tilde{a} + \chi e^{j(\theta-\pi/6)}\dot{a} \end{matrix} \right\|^T \left\| \begin{matrix} 1+\chi e^{j\theta} \\ \tilde{a}+\chi e^{j\theta}\dot{a} \end{matrix} \right\| =$$

$$= \frac{P}{\sqrt{3}(1+\chi^2)} \left| (e^{-j\pi/6} + e^{j\theta}\chi e^{j\pi/6})(1+\chi e^{j\theta}) + (e^{-j\pi/2} + e^{j\pi/2}\chi e^{j\theta})(\tilde{a}+\chi e^{j\theta}\dot{a}) \right| = \tag{11}$$

$$= \frac{P}{\sqrt{3}(1+\chi^2)} \left| e^{j\theta}\chi e^{j\pi/6} + \chi e^{j\theta}e^{-j\pi/6} + \chi e^{j\theta}(e^{-j\pi/6} + e^{j\pi/6}) \right| = \frac{4\chi P}{\sqrt{3}(1+\chi^2)} \left| e^{j\theta}\cos(\pi/6) \right| = \frac{2\chi P}{1+\chi^2}.$$

Комплексний вектор активного струму для четвертої стратегії отримаємо з (10) за $\chi = 0$, при цьому амплітуда пульсацій миттєвої потужності

$$P_{\sim 4} = \left|\overline{\boldsymbol{U}}^T \overline{\boldsymbol{I}}_{A+}\right| = \frac{P}{3U_+} \left\| \begin{matrix} \dot{U}_{AC} \\ \dot{U}_{BC} \end{matrix} \right\|^T \left\| \begin{matrix} 1 \\ \tilde{a} \end{matrix} \right\| = \frac{\sqrt{3}U_+P}{3U_+} \left\| \begin{matrix} -e^{j\pi/6}\dot{a} - \chi e^{j(\theta-\pi/6)}\tilde{a} \\ e^{j\pi/6}\tilde{a} + \chi e^{j(\theta-\pi/6)}\dot{a} \end{matrix} \right\|^T \left\| \begin{matrix} 1 \\ \tilde{a} \end{matrix} \right\| =$$

$$= \frac{P}{\sqrt{3}} \left| e^{-j\pi/6} + e^{j\theta}\chi e^{j\pi/6} + e^{j5\pi/6} + \chi e^{j\theta}e^{-j\pi/6} \right| = \frac{2\chi P}{\sqrt{3}} \left| e^{j\theta}\cos(\pi/6) \right| = \chi P. \tag{12}$$

Отже, застосування четвертої стратегії активної фільтрації з опорним вектором симетричних напруг прямої послідовності зменшує амплітуду пульсацій миттєвої потужності у $2/(1+\chi^2)$ рази порівняно з третьою стратегією за концепцією С.Фрізе, що узгоджується з результатами, отриманими в [15]. При цьому коефіцієнт виграшу за потужністю втрат від формування активного струму $\mathbf{i}_{A+}(t)$ в лінії передачі визначається виразом

$$W_+ = W/(1+\chi^2), \tag{13}$$

що з урахуванням реальних значень χ незначно поступається активному струму $\mathbf{i}_A(t)$.

4. Експериментальна верифікація результатів досліджень. Метою проведення комп'ютерного експерименту є верифікація формул (8, 13) розрахунку енергоефективності для другої та четвертої інтегральних стратегій, виразів для амплітуд пульсацій миттєвої потужності трифазного джерела у разі застосування кожної з чотирьох стратегій, а також їхній порівняльний аналіз за зазначеними показниками в трифазних трипровідних мережах з синусоїдними несиметричними напругами.

В комп'ютерній експериментальній моделі (рис. 3) паралельна активна фільтрація здійснюється залежними джерелами струму I_{CA} та I_{CB}. Сигнали керування ними задає система керування, що реалізує чотири розглянуті стратегії активної фільтрації шляхом комутації ключів S_1, S_2, S_3 відповідно до рис. 2. Моделювання проводилося за діючих значеннях фазних напруг U_+ = 100В, а коефіцієнт несиметрії при цьому складав $\chi = U_-/U_+ = 0.2$.

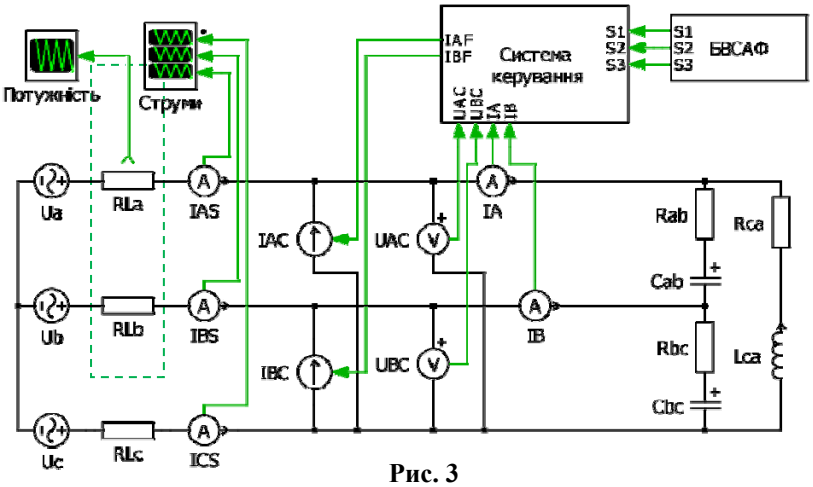

Рис. 3

Для реалізації *mnG*-навантаження, представленого комплексними провідностями $\overline{Y}_{AB} = G + jmG$; $\overline{Y}_{BC} = G + jnG; \overline{Y}_{CA} = G - j(m+n)G$, опори навантаження розраховувалися наступним чином:

$$R_{AB} = \left[G(m^2+1)\right]^{-1}; \quad R_{BC} = \left[G(n^2+1)\right]^{-1}; \quad R_{CA} = \left[G((m+n)^2+1)\right]^{-1}.$$

Тип реактивних елементів схеми може змінюватися в залежності від знаків коефіцієнтів m та n: за $m,n>0$ реактивна частина навантаження реалізується конденсатором, а для $m,n<0$ індуктивністю відповідно:

$$C_{AB}=\frac{G(m^2+1)}{\omega m};\quad L_{AB}=\frac{m}{G\omega(m^2+1)};\quad C_{BC}=\frac{G(n^2+1)}{\omega n};\quad L_{BC}=\frac{n}{G\omega(n^2+1)}..$$

Параметри навантаження C_{CA} або L_{CA} розраховуються з умови $m+n<0$ для ємності та $m+n>0$ – для індуктивності за наступними виразами:

$$C_{CA}=\frac{G[(m+n)^2+1]}{\omega(m+n)};\qquad L_{CA}=\frac{(m+n)}{G\omega[(m+n)^2+1]}.$$

Для підтвердження підвищення енергоефективності, що забезпечує друга стратегія активної фільтрації, було побудовано сімейство теоретичних графіків (показані пунктиром на рис. 4) за формулою (8). В процесі проведення експерименту було обрано числові набори $m=1,2,3,4$ та $n=1,2,3,4$, для яких розраховано параметри *mnG*-навантаження, проведено виміри потужностей відповідних інтегральних втрат на опорах лінії передачі без фільтра та під дією другої стратегії активної фільтрації. Отримані значення коефіцієнтів виграшів за потужністю втрат жирними точками позначено на рис. 4, засвідчивши повний збіг з теоретичними даними. Окремо перевірено, що коефіцієнт виграшу за потужністю інтегральних втрат для *mnG*-навантаження не залежить від параметрів несиметрії напруг джерела χ та θ, а повністю визначається значеннями параметрів навантаження m та n.

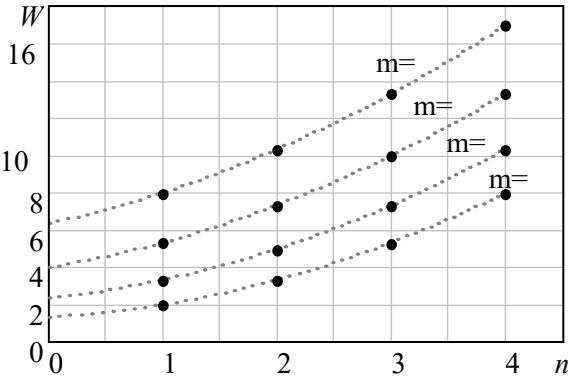

Рис. 4

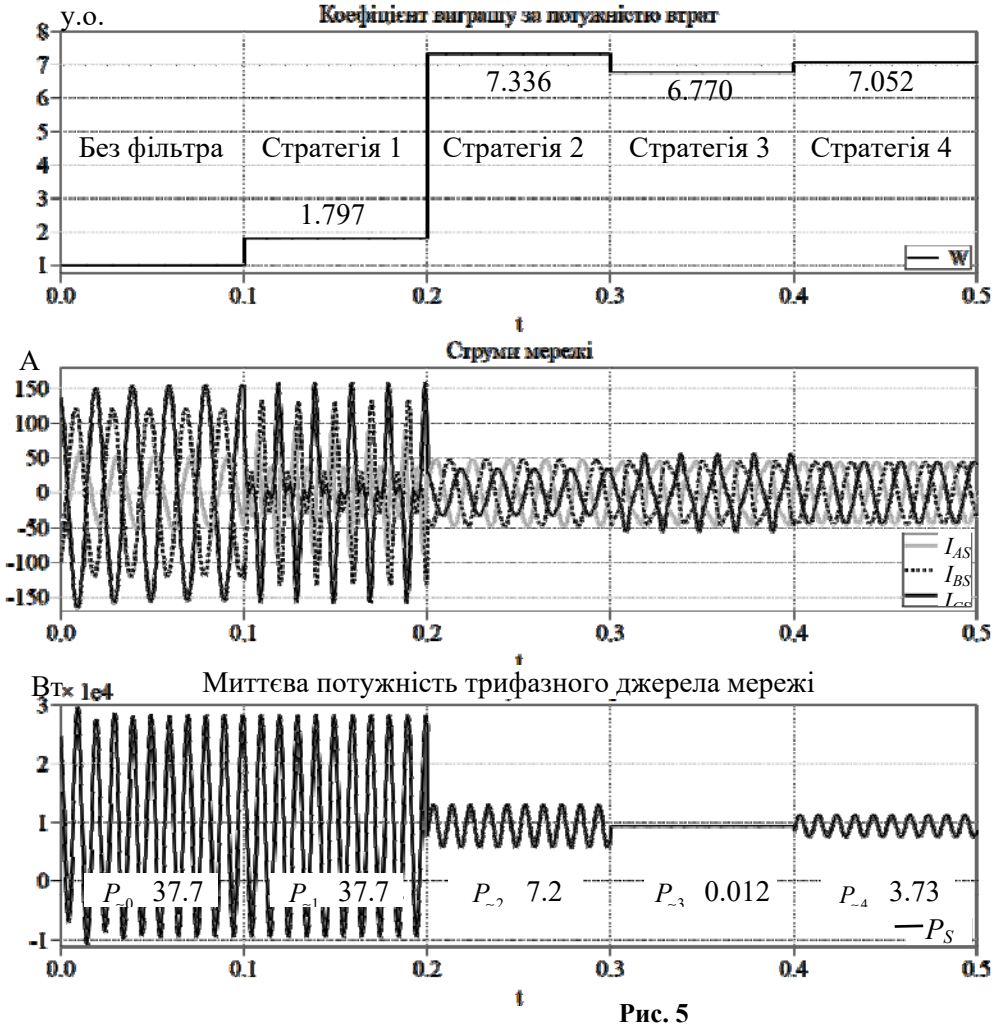

Рис. 5

Для порівняльного аналізу стратегій зафіксовано значення параметрів навантаження $m=2$ та $n=3$, $G=0.1$, $\theta=60°$ що реалізується елементами з параметрами:

$Rab=2$ Ом;

$Rbc=1$ Ом;

$Rca=0.385$ Ом;

$Cab=795$ мкФ;

$Cbc=1061$ мкФ;

$L_{CA}=6.12$ мГн

та послідовно в часі побудовано графіки коефіцієнтів виграшу за потужністю втрат, струмів мережі та миттєвої потужності трифазного джерела (рис. 5). Аналіз графіків свідчить, що в умовах несиметрії джерела відсутність пульсацій миттєвої потужності трифаз-

ного джерела у разі використанні третьої стратегії не забезпечує максимальної енергоефективності.

Найбільш перспективною є запропонована інтегральна стратегія керування активною фільтрацією з опорним вектором лінійних напруг прямої послідовності, що забезпечує симетричні синусоїдальні струми мережі та за майже однаковій енергоефективності ($W_+ / W = 7.052 / 7.336 = 0{,}9612868 = (1+\chi^2)^{-1}$ відповідно до (13)) зменшує амплітуду пульсацій миттєвої потужності у $P_{\sim 2} / P_{\sim 4} = 7.2 / 3.73 = 1{,}93 = 2/(1+\chi^2)$ разів порівняно зі стратегією за концепцією С.Фрізе відповідно до формул (11), (12).

Висновки.

1. Запропоновано комбіновану систему керування ПАФ в системі координат методу двох ватметрів, яка в залежності від умов використання реалізує одну з чотирьох стратегій активної фільтрації, оптимальних за наступними критеріями: максимальна енергоефективність за миттєвою чи інтегральною потужністю втрат в лінії передачі, відсутність пульсацій миттєвої потужності трифазного джерела, симетрія та синусоїдність споживаних струмів в умовах несиметрії джерела та навантаження.

2. Отримано формули розрахунку енергоефективності та пульсацій миттєвої потужності в трифазній трипровідній системі живлення у разі формування активного струму в лінії передачі в умовах несиметрії напруг живлення навантаження та лінійного несиметричного *mnG*-навантаження.

3. Експериментальні дослідження підтвердили адекватність запропонованих стратегій та розрахунків. Зокрема, дослідним шляхом доведено, що коефіцієнт виграшу за потужністю інтегральних втрат для *mnG*-навантаження не залежить від фактора несиметрії напруг джерела, а повністю визначається значеннями параметрів навантаження *m* та *n*; в умовах несиметрії джерела відсутність пульсацій миттєвої потужності трифазного джерела не забезпечує максимальної енергоефективності. Найбільш перспективною є запропонована інтегральна стратегія керування активною фільтрацією з опорним вектором лінійних напруг прямої послідовності, що забезпечує симетричні синусоїдальні струми мережі та за майже однаковій енергоефективності зменшує амплітуду пульсацій миттєвої потужності у $2/(1+\chi^2)$ рази порівняно зі стратегією за концепцією С.Фрізе.

Роботу виконано за бюджетною темою: "Розробка наукових основ та принципів побудови напівпровідникових перетворювачів з розширеними функціональними можливостями і методів керування ними в системах з джерелами розосередженої генерації" (Адаптер). (КПКВК 6541030).

SHUNT ACTIVE FILTER CONTROL OF A THREE-PHASE THREE-WIRE NETWORK IN THE REFERENCE FRAME OF THE TWO WATTMETERS METHOD

M.Yu. Artemenko[1], Y.V. Kutafin[1], V.M. Mykhalskyi[2], S.Y. Polishchuk[2], V.V. Chopyk[2], I.A. Shapoval[2]
[1] National Technical University of Ukraine " I. Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Peremohy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine,
[2] Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine. **E-mail: mikhalsky@ied.org.ua**

A combined control system for a shunt active filter in the reference frame of the two-wattmeters method has been proposed, which, depending on the conditions of use, implements one of the four active filtration strategies, optimal according to a certain quality indicator. The most promising is the proposed integral strategy for active filtration control with the reference vector of line voltages of direct sequence, which provides symmetric sinusoidal currents of the network and the minimum pulsation of power consumption for the almost identical energy-saving effect as the concept of S. Fryze. New formulas for calculating the energy-saving effect and pulsations of the instantaneous power in a three-phase system of power in the case of the formation of an active current in the transmission line in the conditions of asymmetry of loading voltage and linear asymmetric load have been developed. Simulation studies have confirmed the adequacy of the proposed strategies and calculations. References 15, figures 5, table 1.

***Keywords*:** two-wattmeters method, shunt active filter control strategy.

1. Akagi H., Watanable E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. Piscataway: IEEE Press, Second edition. 2017. 472 p.

2. Mayordomo J.G., Usaola J. Apparent power and power factor definitions for polyphase non-linear loads when

supply conductors present different resistances. *European Transactions on Electrical Power*. Nov/Dec 1993. Vol. 3. No. 6. Pp. 415–420. DOI: https://doi.org/10.1002/etep.4450030604

3. Garcesa A., Molinas M., Rodriguez P. A generalized compensation theory for active filters based on mathematical optimization in ABC frame. *Electric Power Systems Research*. 2012. Vol. 90. Pp. 1–10. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.03.011
4. Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L. Electricity quality at industrial enterprises. Moskva: Enerhoatomizdat, 2005. 262 p. (Rus)
5. Mykhalskyi V.M., Sobolev V.M., Shapoval I.A. and Chopyk V.V. Extension of the input reactive power regulation range of a matrix converter by control means. *Tekhnicnha Electrodynamika.* 2012. No 2. Pp. 53-54. (Ukr)
6. Salmerón Revuelta P., Pérez Litrán S. and Prieto Thomas J. Active Power Line Conditioners Design, Simulation and Implementation for Improving Power Quality. Elsevier Inc.: Academic Press, 2016. 436 p.
7. Rodrigo de Almeida Coelho, Núbia Silva Dantas Brito, George Rossany Soares de Lira, Érica Mangueira Lima. Effects of Currents Decomposition on Power Calculation in Nonsinusoidal Conditions. *Electrical Engineering*. 2020. Vol. 102. Pp. 2325–2339. DOI: https://doi.org/10.1007/s00202-020-01031-5
8. Artemenko M.Yu., Mykhalskyi V.M., Shapoval I.A. The theory of active filtration of multiphase power systems which is aimed at minimizing losses in the transmission line. Kyiv : Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, 2021. 235 p. (Ukr)
9. Peng F.Z. and Lai J.S. Generalized instantaneous reactive power theory of three-phase power systems. *IEEE Trans. Instrum. Meas*. Feb. 1996. Vol. 45. No. 1. Pp. 293–297. DOI: https://doi.org/10.1109/19.481350
10. Fryze S. Moc czynna, bierna i pozorna ukladu 3-fazowego o odksztalconych przebiegach napiec fazowych i pradów przewodowych. *Wybrane zagadnienia teoretycznych podstaw elektrotechniki*. Warszawa–Wroclaw: PWN. 1966. Pp. 250 – 256.
11. Artemenko M.Yu., Kutafin Yu.V., Mykhalskyi V.M., Chopyk V.V., Shapoval I.A., Polishchuk S.Y. Control Strategies for Three-Phase Three-Wire Shunt Active Filter in the Reference Frame of Two-Wattmeter Method. ELNANO-2020. Proceedings of the IEEE 40th International Conference on *Electronics and Nanotechnology*. Kyiv. Ukraine. 22-24 April 2020. Pp.780–785. DOI: https://doi.org/10.1109/ELNANO50318.2020.9088885
12. Artemenko M.Yu., Kutafin Yu.V., Mykhalskyi V.M., Chopyk V.V., Shapoval I.A., Polishchuk S.Y. Integral Strategies of Active Filtration in the Reference Frame of the Two-Wattmeters Method. Proceedings of the IEEE 19th International Conference *on Smart Technologies* (EUROCON) 2021. Lviv, Ukraine. 6-8 July 2021.
13. Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal non-sinusoidal, balanced or unbalanced conditions. IEEE Std. 1459-2010. DOI: https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2010.5439063
14. Sirotin Yu.A. Vector instantaneous power and energy modes of three-phase circuits. *Tekhnicha Elektrodynamika*. 2013. No 6. Pp. 57–65. (Rus)
15. Artemenko M.Yu., Batrak L.M., Polishchuk S.Y. Current Filtering in Three-Phase Three-Wire Power System at Asymmetric Sinusoidal Voltages. Proceedings of the IEEE 38th International Conference *on Electronics and Nanotechnology* (ELNANO) 2018. Kyiv, Ukraine. 24-26 April 2018. Pp. 611–616. DOI: https://doi.org/10.1109/ELNANO.2018.8477580

Надійшла 19.07.2021