

УДК 621.314

АРТЕМЕНКО М.Ю.<sup>\*</sup>, КАПЛУН В.В.<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Національний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

<sup>\*\*</sup> Київський національний університет технологій та дизайну

### ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ПАРАЛЕЛЬНИХ АКТИВНИХ СИЛОВИХ ФІЛЬТРІВ ТРИФАЗНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

**Мета.** Підвищення коефіцієнта потужності та відповідного значення ККД у трифазних системах електроживлення шляхом використання активних силових фільтрів.

**Методика.** Енергоефективність електротехнічного комплексу «паралельний активний силовий фільтр – силовий кабель системи електроживлення» оцінюється співвідношенням втрат енергії у силових елементах інвертора і силовому кабелі. Обґрунтовуються аналітичні умови доцільності застосування паралельного активного силового фільтра за показником економії електроенергії.

**Результати.** У роботі показані шляхи розв'язання екстремальних задач для параметрів, що визначають енергетичні характеристики трифазної системи живлення в несинусоїдному несиметричному режимі: визначення повної потужності з урахуванням співвідношення активних опорів силового чотирипровідного кабелю; мінімізація потужності втрат та максимізація коефіцієнта потужності.

**Наукова новизна.** Встановлений новий фізичний зміст запропонованої формули визначення повної потужності, що узгоджується з чинним європейським стандартом. Коректне визначення повної потужності дозволяє розробити енергоефективні алгоритми керування засобами паралельної активної фільтрації з метою підвищення ККД трифазної чотирипровідної системи електроживлення шляхом підвищення коефіцієнта потужності навантаження з урахуванням власних втрат фільтра.

**Практична значимість.** Одержані нові аналітичні залежності, що характеризують доцільність застосування паралельних активних силових фільтрів для підвищення енергоефективності чотирипровідних систем електроживлення. Ці співвідношення дають можливість обґрунтувати вибір елементної бази та частоти комутації силових інверторів паралельних активних силових фільтрів на стадії аванпроекування.

**Ключові слова:** коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт потужності, паралельний активний силовий фільтр, енергоефективність.

**Вступ.** Видобуток власних паливно-енергетичних ресурсів не задовольняє внутрішні потреби України. Особливо залежною від імпорту первинних енергоносіїв є галузь генерування електричної енергії, на долю якої приходить вагома частина споживання первинних паливних ресурсів. Саме тому енергоефективність електроенергетичних системах та пристроях є не лише економічним фактором, а й чинником формування енергетичної безпеки України. Вирішення цієї принципової проблеми здійснюється за декількома напрямками у всіх секторах електроспоживання, в тому числі й у вищих навчальних закладах [1]. Одним із перспективних технічних напрямів реалізації потенціалу енергозбереження є зниження втрат та відновлення якісних показників електроенергії на клеммах потужних споживачів застосуванням активних силових фільтрів [3]. Найбільшого поширення в трифазних системах електроживлення набули паралельні активні фільтри (ПАФ) з можливістю формування вхідного струму в умовах нестабільності навантаження та параметрів вхідної напруги.

**Постановка завдання.** Разом з тим до теперішнього часу не сформовані єдині наукові підходи щодо оптимальності алгоритмів керування ПАФ, оскільки кожен з них базується на певному фрагменті теорії потужності систем електроживлення [2-6], яка є предметом

полеміки та дискусій фахівців як в галузі електроенергетики, так і в галузі силової перетворювальної техніки. Особливо гостро така проблема постає у випадку, коли використовується трифазна чотирипровідна система живлення з нульовим проводом. Тому розвиток теорії потужностей систем електроживлення та створення на її основі нових алгоритмів керування ПАФ з метою поліпшення якості електроенергії та енергоефективності трифазної системи живлення є важливою науково-прикладною задачею.

**Результати досліджень.** Основні стратегії керування ПАФ можуть бути розділені на дві групи: пропорційно-векторного формування струмів трифазного джерела, побудовані на теорії потужності [2], кросс-векторній теорії та векторній стратегії формування струмів компенсації, з матричним перетворенням координат (найпоширенішими є оригінальна та модифікована  $pq$  - теорії, а також перетворення в  $\alpha\beta 0$ ,  $dq0$ ,  $pqr$  системах координат [3]). Стратегії керування першої групи передбачають формування вектора миттєвих значень струмів трифазного джерела пропорційним вектору миттєвих значень фазних напруг чи його частині з поліпшеним спектральним складом і переважають стратегії другої групи, що застосовують неодноразове матричне перетворення координат за трудомісткістю обчислень, точністю та швидкодією. Опорним вектором в межах першої групи стратегій є безпосередньо вектор миттєвих значень фазних напруг (стратегія S. Fryze) чи вектор миттєвих значень фазних напруг, позбавлений складової нульової послідовності, що дозволяє повністю позбутися струму в нульовому проводі (стратегія P. Salmeron, J. Montano [6]). Коефіцієнт пропорційності між векторами лінійних струмів та фазних напруг формують з умови нульової активної потужності ПАФ декількома способами, але найвища енергоефективність системи електроживлення забезпечується, якщо він дорівнює активній потужності навантаження, ділений на квадрат опорної напруги, осереднений на періоді  $T$  мережної напруги. В [6] показано, що при стратегії керування P. Salmeron, J. Montano потужність втрат в силовому чотирипровідному кабелі менша в порівнянні з втратами при керуванні за стратегією S. Fryze.

Як відомо, у теоретичній електротехніці коефіцієнт потужності можна вважати інтегральним чинником енергоефективності процесу споживання електроенергії:

$$\lambda = P / S, \quad (1)$$

де  $P = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) \mathbf{i}(t) dt$  – активна потужність трифазної системи;  $S$  – повна потужність;

$\mathbf{u}(t), \mathbf{i}(t)$  трикоординатні вектори миттєвих значень фазних напруг та лінійних струмів; – період мережної напруги;  $^T$  – знак транспонування. При визначенні повної потужності як трипровідних так і чотирипровідних систем здебільшого застосовується формула F. Buchholz у вигляді добутку середньоквадратичних норм векторів фазних напруг та лінійних струмів [5]

$$S = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}^T(t) \mathbf{i}(t) dt \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) \mathbf{u}(t) dt}. \quad (2)$$

Однак наявність нейтрального проводу, в якому протікає сумарний струм лінійних проводів, є суттєвою відмінністю чотирипровідної системи, оскільки збільшується потужність втрат порівняно з трипровідною системою. Незалежність повної потужності, розрахованої за формулою F. Buchholz, від співвідношення активних опорів з'єднувальних проводів викликає сумнів в коректності її застосування для чотирипровідних систем за наявності ненульового струму нейтрального проводу. Через неадекватність формули повної потужності невірно визначається і коефіцієнт потужності, внаслідок чого існуючі алгоритми врівноважування несиметричного навантаження, що реалізуються в активних фільтрах та

реактивних компенсаторах, не забезпечують оптимального енергетичного режиму, що характеризується мінімумом втрат та одиничним коефіцієнтом потужності.

Коректно повна потужність трифазної чотирипровідної системи живлення визначається як максимальна активна потужність навантаження, що може бути досягнута в процесі передачі енергії від трифазного джерела при заданих напругах та втратах на активних опорах силового кабелю [4]. У зв'язку з цим постає завдання розв'язання екстремальних задач для параметрів, що визначають енергетичні характеристики трифазної системи живлення в несинусоїдному несиметричному режимі: визначення повної потужності з урахуванням співвідношення активних опорів силового чотирипровідного кабелю; мінімізація потужності втрат та максимізація коефіцієнта потужності.

Розв'язки цих задач для резистивної моделі силового кабелю (рис.1) узагальнені в [8]. Для повної потужності трифазної системи  $S$  отримано вираз

$$S = P_{\max} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{i}(t) dt \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{u}(t) dt}, \quad (3)$$

де  $\mathbf{R} = r\mathbf{E} + r_N \mathbf{j}\mathbf{j}^T$  – матриця опорів втрат, симетрична відносно головної діагоналі,  $\mathbf{E}$  – одинична матриця.  $\mathbf{j}^T = \parallel 1 \ 1 \ 1 \parallel$  В трипровідній системі живлення потужність втрат також описується виразом (3) при  $\mathbf{R} = r\mathbf{E}$ . і формула (3) відповідає формулі Бухгольца (2).

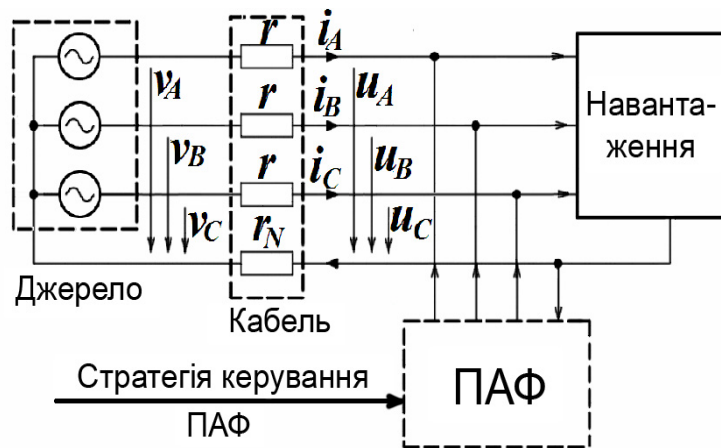


Рис. 1. Резистивна модель силового кабелю

Для чотирипровідної системи матриця  $\mathbf{R}$  впливає на інтегральні вирази з (3) за наявності складових нульової послідовності векторів фазних напруг та лінійних струмів, і формула повної потужності може бути представлена у вигляді

$$S = \sqrt{[U_{\perp}^2 + (1 - \sigma_0)U_0^2][I_{\perp}^2 + (1 - \sigma_0)^{-1}I_0^2]}, \quad (4)$$

де  $U_{\perp}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}_{\perp}^T(t) \mathbf{u}_{\perp}(t) dt; U_0^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}_0^T(t) \mathbf{u}_0(t) dt = \frac{1}{3T} \int_0^T u_+^2(t) dt; \mathbf{u}_0(t) = \mathbf{u}(t) - \mathbf{j} \frac{u_+(t)}{3};$

$u_+(t) = \mathbf{j}^T \mathbf{u}(t); \mathbf{u}_{\perp}(t) = \mathbf{u}(t) - \mathbf{u}_0(t); I_{\perp}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}_{\perp}^T(t) \mathbf{i}_{\perp}(t) dt; I_0^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}_0^T(t) \mathbf{i}_0(t) dt; \sigma_0 = \frac{3r_N}{r + 3r_N}.$

На відміну від формули Бухгольца, в формулі (4) за наявності складових нульової послідовності фазних напруг чи лінійних струмів чітко проглядається залежність повної потужності від співвідношення опорів силового кабелю, що задає коефіцієнт  $\sigma_0$ .

Порівняємо отриману в [8] формулу (4) з виразом для ефективної повної потужності чотирипровідної системи, наведеним у європейському стандарті [7]:

$$S_e = 3U_e I_e, \quad (5)$$

$$\text{де } U_e = \sqrt{\frac{3(U_A^2 + U_B^2 + U_C^2) + \xi(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)}{9(1 + \xi)}}; I_e = \sqrt{\frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + (r_N / r)I_N^2}{3}}$$

відповідно, ефективна фазна напруга та еквівалентний струм,  $\xi = 3R_Y / R_\Delta$  – коефіцієнт, що дорівнює відношенню активних потужностей, викликаних заданими фазними напругами, в частинах навантаження, з'єднаних трикутником та зіркою в схемі на рис. 2. Таке визначення повної потужності викликає певні незручності. По-перше, відношення опорів  $R_Y / R_\Delta$  і значення коефіцієнта  $\xi$  в загальному випадку є невідомим, і тоді рекомендовано [8] приймати  $\xi = 1$ , що відповідає необгрунтованій рівності зазначених активних потужностей  $P_Y = P_\Delta$ . По-друге, зміна співвідношення між активними опорами  $r_N / r$  впливає лише на еквівалентний струм, та не впливає на ефективну фазну напругу.

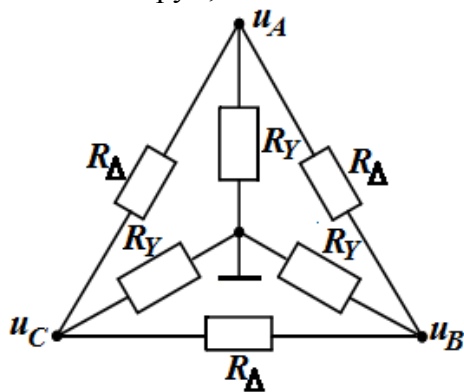


Рис. 2. Схема з'єднання опорів навантаження у трикутник та зірку

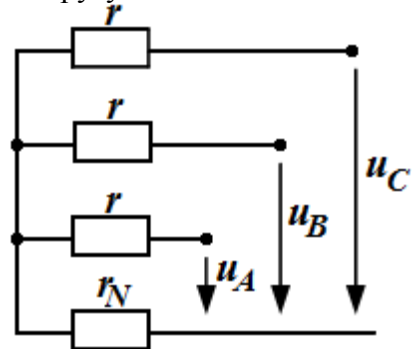


Рис. 3. Спрощена резистивна модель силового кабелю

Щоб позбутися зазначених недоліків, встановимо залежність між опорами  $R_Y, R_\Delta$  та  $r_N, r$ , за якої формули (4) та (5) є еквівалентними. Піднісши до квадрату обидві частини рівності (5) з урахуванням позначень формули (4), матимемо

$$S_e^2 = \frac{(U_A^2 + U_B^2 + U_C^2) + \xi(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2) / 3}{(1 + \xi)} \times [I_\perp^2 + (1 - \sigma_0)^{-1} I_0^2]. \quad (6)$$

Множник напруг з виразу (6) перетворюється до вигляду

$$\frac{(U_A^2 + U_B^2 + U_C^2) + \xi(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2) / 3}{(1 + \xi)} = \frac{(U_\perp^2 + U_0^2) + \xi U_\perp^2}{(1 + \xi)} = U_\perp^2 + U_0^2 / (1 + \xi).$$

Із порівняння його з першим множителем виразу (4) встановлюємо умову еквівалентності

$$1 - \sigma_0 = \frac{1}{1 + \xi},$$

звідки з урахуванням значень коефіцієнтів впливає співвідношення еквівалентності

$$R_Y / R_\Delta = r_N / r. \quad (7)$$

Отже, запропоновані формули повної потужності (3), (4) повністю еквівалентні стандартизованим [7] при виборі в схемі рис.2 для розрахунку еквівалентної напруги  $R_Y = r_N; R_\Delta = r$ . Співвідношення еквівалентності (7) усуває невизначеність коефіцієнта  $\xi$  в зазначеному європейському стандарті.

Знайдемо величину активної потужності  $P_N$  в схемі на рис. 3, що утворюється зі схеми рис. 1 шляхом замикання трифазного джерела. Потенціал спільної точки резисторів позначимо  $\varphi(t)$ , тоді:

$$\begin{aligned}
 P_N &= \frac{1}{T} \int_0^T \left\| \begin{matrix} u_A(t) & u_B(t) & u_C(t) \\ i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{matrix} \right\| dt = \frac{1}{rT} \int_0^T \left\| \begin{matrix} u_A(t) & u_B(t) & u_C(t) \\ u_A(t) - \varphi(t) \\ u_B(t) - \varphi(t) \\ u_C(t) - \varphi(t) \end{matrix} \right\| dt = \\
 &= \frac{1}{rT} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) [\mathbf{u}(t) - \varphi(t) \mathbf{j}] dt = \frac{1}{rT} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) \left[ \mathbf{u}(t) - \frac{u_A(t) + u_B(t) + u_C(t)}{r(3/r + 1/r_N)} \mathbf{j} \right] dt = \\
 &= \frac{1}{rT} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) \left[ \mathbf{u}(t) - \frac{3}{3 + r/r_N} \mathbf{u}_0(t) \right] dt = \frac{1}{rT} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) [\mathbf{u}(t) - \sigma_0 \mathbf{u}_0(t)] dt = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{u}(t) dt.
 \end{aligned}$$

Таким чином, інтеграл напруг з виразу (3) є величиною активної потужності, зумовленою фазними напругами навантаження, що розсіюється на активних опорах силового кабелю при короткому замиканні трифазного джерела, а фізичний зміст повної потужності, що задається формулами (3) та (4), формулюється як середнє геометричне потужностей втрат та зворотного короткого замикання системи живлення.

В результаті застосування формули (3) для цієї ж моделі трифазної чотирипровідної системи живлення отриманий вираз для коефіцієнта корисної дії  $\eta = P_L / P_S$  у вигляді розв'язку квадратного рівняння

$$\eta^{-2} - k_L \eta^{-1} + k_L - 1 + 1/\lambda^2 = 0, \tag{8}$$

де  $k_L = P_0 / P_L$  – коефіцієнт навантаження;  $P_0 = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{v}^T(t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{v}(t) dt$  – активна потужність

короткого замикання. Графіки залежностей ККД від коефіцієнта навантаження  $k_L$  при різних значеннях параметра  $a = \lambda^{-2} - 1$  наведені на рис. 4.

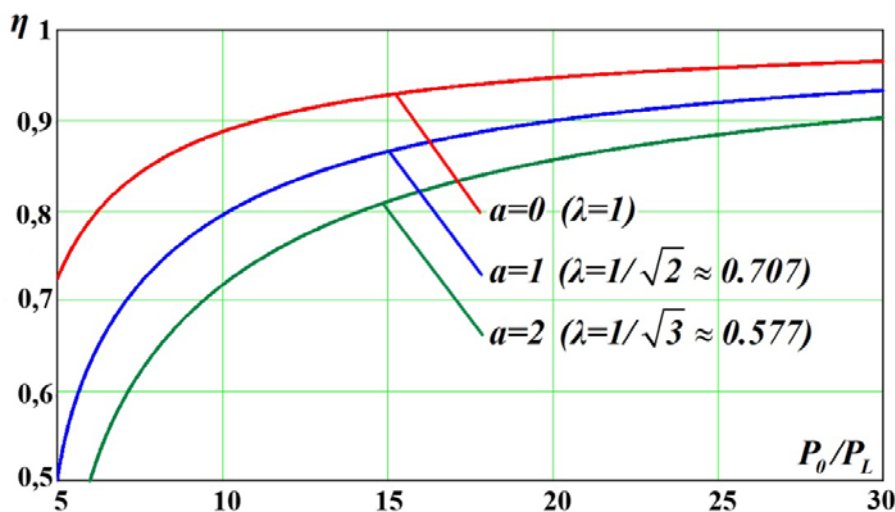


Рис. 4. Графіки залежностей ККД від коефіцієнта навантаження  $k_L$  при різних значеннях параметра  $a$

З його аналізу випливає, що при підвищенні значення коефіцієнта потужності до одиниці за рахунок застосування ПАФ ККД трифазної чотирипровідної системи живлення може бути збільшений на 5-15 відсотків. Зі зменшенням відношення  $P_0 / P_L$  ефективність застосування засобів ПАФ зростає.

Коефіцієнт потужності при визначенні повної потужності за виразом (3) дорівнюватиме одиниці лише за умови формування векторів фазних струмів, пропорційних векторам фазних напруг з частково послабленою складовою нульової послідовності  $\mathbf{u}_\sigma(t)$ :

$$\mathbf{i}(t) = G\mathbf{u}_\sigma(t) = G[\mathbf{u}_\perp(t) + (1 - \sigma_0)\mathbf{u}_0(t)], \quad (9)$$

де  $G$  – довільна дійсна константа, оскільки в цьому випадку в формулі (1)

$$P = P_\perp + P_0 = G[U_\perp^2 + (1 - \sigma_0)U_0^2]; I_\perp^2 + I_0^2 / (1 - \sigma_0) = G^2[U_\perp^2 + (1 - \sigma_0)U_0^2]; \lambda = 1.$$

За наявності ПАФ вектор лінійних струмів трифазного джерела, який у несиметричному несинусоїдному режимі забезпечує постачання енергії в навантаження з одиничним коефіцієнтом потужності, визначається виразом [8]

$$\mathbf{i}_d(t) = G_\sigma \mathbf{u}_\sigma(t),$$

причому значення коефіцієнта пропорційності знаходиться з умови відсутності споживання енергії активним фільтром:

$$G_\sigma = \frac{P}{U_\perp^2 + (1 - \sigma_0)U_0^2}.$$

Звідси випливає оригінальний алгоритм керування ПАФ [9]:

$$\mathbf{i}_\phi(t) = \mathbf{i}_H(t) - G_\sigma \mathbf{u}_\sigma(t), \quad (10)$$

що при значній несиметрії фазних напруг дає переваги за потужністю втрат до 1,8 разів, порівняно зі стратегією S. Fryze, та до 7% у порівнянні зі стратегією P. Salmeron, J. Montano.

Підвищення коефіцієнта потужності та відповідного значення ККД можна досягти шляхом підключення в систему паралельного активного фільтра. Однак функціонування ПАФ супроводжується втратами енергії в силових елементах інвертора, тому економія величини втрат в силовому кабелі за рахунок підвищення коефіцієнта потужності має перевищувати власні втрати енергії ПАФ. Знайдемо аналітичну умову доцільності застосування ПАФ за показником економії електроенергії.

З виразу (8) знайдемо рівняння для відносної потужності втрат  $\chi = (P_s - P_L) / P_L$ :

$$\chi = \frac{1}{\lambda^2(k_L - 2 - \chi)}. \quad (11)$$

Після перетворень (11) маємо квадратне рівняння для визначення відносної потужності втрат

$$\chi^2 - (k_L - 2)\chi + \lambda^{-2} = 0. \quad (12)$$

З двох можливих коренів рівняння (12) фізичному змісту задовольняє така функціональна залежність кореня від коефіцієнта потужності, при якій зі збільшенням  $\lambda$  зменшується  $\chi$ , тобто:

$$\chi = 0.5k_L - 1 - \sqrt{(0.5k_L - 1)^2 - \lambda^{-2}}. \quad (13)$$

Ця величина має перевищувати потужність втрат активного фільтра  $P_F$ , віднесена до активної потужності навантаження:

$$\chi > P_F / P_L. \quad (14)$$

Вважатимемо, що потужність втрат ПАФ пропорційна його встановленій потужності, що відповідає початковому значенню коефіцієнта потужності  $\lambda_1$ :

$$P_F = k_F \sqrt{S^2 - P_L^2} = k_F P_L \sqrt{\lambda_1^{-2} - 1}, \quad (15)$$

де  $k_F$  - коефіцієнт пропорційності. Тоді, підставляючи формули (13) та (15) в вираз (14), отримуємо аналітичну умову доцільності застосування ПАФ за показником економії електроенергії:

$$\sqrt{(0.5k_L - 1)^2 - \lambda_2^{-2}} - \sqrt{(0.5k_L - 1)^2 - \lambda_1^{-2}} > k_F \sqrt{\lambda_1^{-2} - 1}. \quad (16)$$

Якщо значення коефіцієнта потужності внаслідок дії ПАФ підвищується до одиничного ( $\lambda_2 = 1$ ), нерівність (16) після перетворення набуває вигляду

$$k_F < \frac{\sqrt{\lambda_1^{-2} - 1}}{\sqrt{(0.5k_L - 1)^2 - 1} + \sqrt{(0.5k_L - 1)^2 - \lambda_1^{-2}}}. \quad (17)$$

Графіки для граничного значення  $k_F$  за формулою (17) наведені на рис. 5.

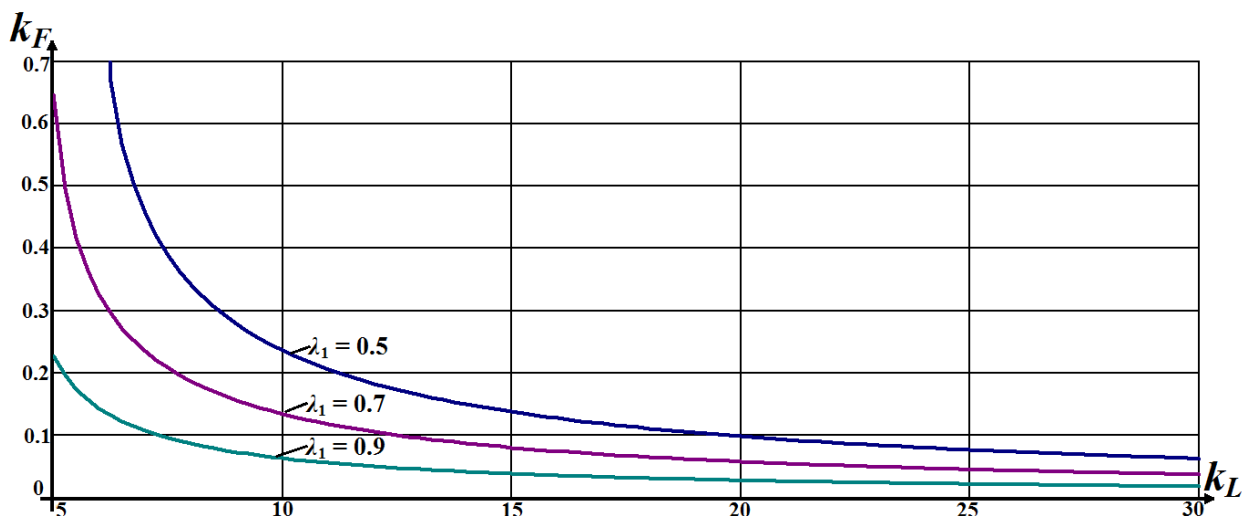


Рис. 5. Графічні залежності для визначення граничних значень співвідношення потужності активного фільтра до активної потужності навантаження

Ці графіки накладають обмеження на обґрунтування вибору елементної бази та частоти комутації силового інвертора на ранніх стадіях проектування ПАФ.

#### Висновки.

1. Встановлено новий фізичний зміст повної потужності – це середнє геометричне потужностей втрат та зворотного короткого замикання системи живлення. Таке визначення повної потужності трифазної системи електроживлення повністю еквівалентне стандартизованому в [7] при виборі в схемі рис.2 для розрахунку еквівалентної фазної напруги  $R_Y = r_N; R_\Delta = r$ . Співвідношення еквівалентності (7) усуває невизначеність коефіцієнта  $\xi$  в зазначеному європейському стандарті.

2. Показано, що інтеграл напруг з виразу (3) є величиною активної потужності, зумовленою фазними напругами навантаження, що розсіюється на активних опорах силового кабелю при короткому замиканні трифазного джерела, а фізичний зміст повної потужності, що задається формулами (3) та (4), формулюється як середнє геометричне потужностей втрат та зворотного короткого замикання системи живлення.

3. Отримано нову аналітичну умову (16) доцільності застосування ПАФ за показником економії електроенергії. Ці співвідношення накладають обмеження на вибір елементної баз та частоту комутації силового інвертора на ранніх стадіях проектування ПАФ.

### Список використаної літератури

1. Управління енергоспоживанням у вищих навчальних закладах: монографія/ Грищенко І.М., Каплун В.В., Дяченко М.В. та ін.; за ред. І.М. Грищенка.—К.: КНУТД, 2013.— 245 с.
2. Fryze S. Moc czynna, bierna i pozorna układu 3-fazowego o odkształconych przebiegach napięć fazowych i prądów przewodowych / Wybrane zagadnienia teoretycznych podstaw elektrotechniki. – Warszawa–Wrocław: PWN, 1966. – Pp. 250–256.
3. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. – Piscataway, NJ: IEEE Press. – 2007. – 379 p.
4. Emanuel A.E. Power definitions and the physical mechanism of power flow. – John Wiley & Sons. IEEE Press.– 2010. – 274 p.
5. Czarniecki L.S., "Currents' Physical Components (CPC) concept: a fundamental of Power Theory," Przegląd Elektrotechniczny, vol. 84, no. 6, pp. 28-37, 2008.
6. Montano J. C., Salmeron P. and Thomas J. P. "Analysis of Power Losses for Instantaneous Compensation of Three-Phase Four-Wire Systems", IEEE Trans. Power Electron., vol. 20, no. 4, pp. 901–907, July 2005.
7. IEEE standart definitions for the measurements of electrical power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced and nonbalanced conditions. IEEE Std 1459-2010.
8. Потужність систем електроживлення та енергоефективність силових фільтрів: монографія / Артеменко М. Ю.—К.: КПІ, 2016.— 214 с.:іл.
9. Патент України на корисну модель UA № 84949 МПК H02P 9/00 (2013.01). Спосіб керування паралельним активним фільтром чотирипровідної трифазної мережі / Поліщук С.Й., Артеменко М.Ю., Михальський В.М., Батрак Л.М.; заявл. 03.04.2013, опубл. 11.11.2013. Бюл. № 21.

### ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ АКТИВНЫХ СИЛОВЫХ ФИЛЬТРОВ ТРЕХФАЗНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

АРТЕМЕНКО М.Е.<sup>\*</sup>, КАПЛУН В.В.<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> *Національний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сикорського»*

<sup>\*\*</sup> *Київський національний університет технологій і дизайну*

**Цель.** Повышение коэффициента мощности и соответствующего значения КПД в трехфазных системах электропитания путем использования активных силовых фильтров.

**Методика.** Энергоэффективность электротехнического комплекса «параллельный активный силовой фильтр - силовой кабель системы электропитания» оценивается соотношением потерь энергии в силовых элементах инвертора и силовом кабеле. Обосновывается аналитические условия целесообразности применения параллельного активного силового фильтра по показателю экономии электроэнергии.

**Результаты.** В работе показан путь решения экстремальных задач обоснования поиска параметров, определяющих энергетические характеристики трехфазной системы питания в несинусоидальных несимметричных режимах: определение полной мощности с учетом соотношения активных сопротивлений силового четырехпроводного кабеля; минимизация мощности потерь и максимизация коэффициента мощности.

**Научная новизна.** Для оценки энергоэффективности трехфазной четырехпроводной системы электропитания предложен метод повышения КПД на основе использования параллельной активной фильтрации, что позволит повысить коэффициент мощности нагрузки с учетом собственных потерь фильтра.

**Практическая значимость.** Получены новые аналитические зависимости целесообразности применения параллельных активных силовых фильтров для повышения



енергоефективности четыре ведущих систем электропитания. Эти соотношения дают возможность обосновать выбор элементной базы и частоты коммутации силовых инверторов параллельных активных силовых фильтров на стадии аванпроектирования.

*Ключевые слова:* коэффициент полезного действия, коэффициент мощности, параллельный активный силовой фильтр, энергоэффективность.

## ENERGY EFFICIENT OF SHUNT ACTIVE FILTER FOR THREE-PHASE POWER SYSTEM

ARTEMENKO M.Yu. \*, KAPLUN V.V.\*\*

\*The National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

\*\* Kyiv National University of Technologies and Design

**Purpose.** Power factor improvement and the corresponding values of the efficiency index through shunt active filter for three-phase power system.

**Methodology.** Energy efficiency of the electrical engineering complex "shunt active filter - Cables for Power Systems" is estimated by ratio of Energy loss from inverters to power cables. It's proved the analytical usefulness of shunt active power filter in terms of energy efficiency.

**Results.** This paper surely contains solutions to extremal problems for parameters that determine the output performance of three-phase power system in the Nonsinusoidal Operation Modes: the full power of a ratio four-resistances of the power cable determination; power loss minimization and maximizing power factor.

**Scientific novelty.** For the first time the method for upgrades to improve efficiency through the use of shunt active filtering for energy efficiency estimation of three-phase four-wire system was proposed and it can improve the load power factor with account of filter's intrinsic losses.

**Practical significance.** The new analytical dependence applicability of shunt active filter for increasing energy efficiency of four-wire major power system was obtained. These correlation functions are capable to substantiate the selection of hardware components and switching frequency of power inverters for shunt active filters at design.

*Key words:* efficiency, power factor, shunt active filter, energy efficiency.