

УДК 621.314

БОБРОВНИК В. М., КАПЛУН В. В., АРТЕМЕНКО М. Ю.
Київський національний університет технологій та дизайну

**МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО
ЕФЕКТУ ВІД ЗАСТОСУВАННЯ ПАРАЛЕЛЬНОГО
АКТИВНОГО ФІЛЬТРА В ТРИФАЗНІЙ ЧОТИРИПРОВІДНІЙ
СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З УРАХУВАННЯМ ЙОГО
ВЛАСНИХ ВТРАТ**

Мета. Виведення розрахункових співвідношень і розробка методики розрахунку енергозберігаючого ефекту від застосування паралельного активного фільтра в трифазній чотирипровідній системі електропостачання та її апробація на прикладі моніторингу параметрів споживання електроенергії гуртожитку №7 КНУТД.

Методика. На основі символічного методу розрахунку трифазних кіл обґрунтовуються формули обчислення електричних опорів фазних та нейтрального проводів трифазної чотирипровідної системи на основі вимірів напруг еталонних навантажень, здійснюваних АСКОВЕ КНУТД. Енергозберігаючий ефект від застосування паралельного активного фільтра в трифазній чотирипровідній системі електроживлення встановлюється з урахуванням його власних втрат, що визначаються на основі моніторингу параметрів споживання електроенергії та обчислених значень опорів проводів.

Результати. У роботі обґрунтована методика розрахунку енергозберігаючого ефекту від застосування паралельного активного фільтра в трифазній чотирипровідній системі електропостачання з урахуванням його власних втрат та на прикладі моніторингу параметрів споживання електроенергії гуртожитку №7 КНУТД продемонстрована можливість зменшення на 10-20% втрат енергії в лінії електропередачі при використанні сучасних паралельних активних фільтрів.

Наукова новизна. Встановлені нові аналітичні залежності діючих напруг еталонних навантажень від електричних опорів фазних та нейтрального проводів трифазної чотирипровідної системи електропостачання, що використовуються для розрахунку значень зазначених опорів за результатами вимірювання фазних напруг.

Практична значимість. Сформульована нова методика розрахунку енергозберігаючого ефекту від застосування паралельного активного фільтра в трифазній чотирипровідній системі електропостачання, яка дозволяє оцінити доцільність застосування паралельних активних силових фільтрів та сформулювати вимоги до їх параметрів з метою отримання бажаного ефекту для конкретного об'єкту електроспоживання.

Ключові слова: потужність втрат, паралельний активний фільтр, трифазна чотирипровідна система електропостачання.

Вступ. Застосування активних силових фільтрів в трифазних системах електропостачання забезпечує відновлення якості електроенергії на клеммах потужних споживачів та є одним із перспективних технічних напрямів енергозбереження шляхом зниження теплових втрат в лінії передачі [1-5]. Найбільшого поширення набули паралельні активні фільтри (ПАФ) з можливістю формування оптимальних вхідних струмів в умовах нестабільності, нелінійності та асиметрії навантаження. Незважаючи на наявність окремих публікацій [6-8], недостатня увага приділена врахуванню власних втрат ПАФ та розрахунку електричних опорів фазних та нейтрального проводів у випадку, коли період зміни навантаження значно перевищує період напруги електромережі. Існуюча методика [7] визначення електричних опорів фазних та нейтрального проводів трифазної чотирипровідної

системи базується на аналітичних розрахунках з використанням паспортних параметрів силового кабелю та його довжини, що можуть бути недоступні чи не відповідати дійсності в реальних умовах експлуатації.

Постановка завдання. Метою даної роботи є виведення формул обчислення електричних опорів фазних та нейтрального проводів трифазної чотирипровідної системи на основі вимірів напруг еталонних навантажень, розробка методики розрахунку енергозберігаючого ефекту від застосування паралельного активного фільтра в трифазній чотирипровідній системі електропостачання та її апробація на прикладі моніторингу параметрів споживання електроенергії гуртожитку №7 КНУТД.

Результати дослідження. Теоретичні засади дослідження втрат енергії в трифазній чотирипровідній системі електроживлення з резистивною моделлю лінії передачі та паралельним активним фільтром (ПАФ) з урахуванням його власних втрат розроблені в [8]. Умовою доцільності застосування ПАФ для економії енергії при періодично змінюваному навантаженні є нерівність:

$$k_F < k_{FW}^{TP}, \quad (1)$$

де $k_F = 1 - \eta_F$ – фактор втрат фільтра; η_F – коефіцієнт корисної дії ПАФ; граничне значення фактора втрат фільтра для періодично змінюваного навантаження визначається виразом:

$$k_F^{TP} = \sum_{n=1}^N P_n^2 (\lambda_n^{-2} - 1) \div \sum_{n=1}^N P_n (P_{0n} + P_n) \sqrt{\lambda_n^{-2} - 1}. \quad (2)$$

В формулі (2) N – кількість інтервалів спостереження на періоді зміни навантаження; P_{0n}, P_n, λ_n – потужність короткого замикання системи електропостачання; активна потужність навантаження та коефіцієнт потужності на n -му інтервалі спостереження ($n=1 \dots N$). За умови дії синусоїдного симетричного джерела значення квадрата коефіцієнта потужності на n -му інтервалі спостереження розраховують за формулою:

$$\lambda_n^2 = P_n^2 / 3U_{\Phi n}^2 (I_{An}^2 + I_{Bn}^2 + I_{Cn}^2 + I_{Nn}^2 r_N / r), \quad (3)$$

де $U_{\Phi n}, I_{An}, I_{Bn}, I_{Cn}, I_{Nn}$ – відповідно, діючі значення фазної напруги, лінійних струмів та струму нейтралі та n -му інтервалі спостереження; r – опір кожного фазного проводу; r_N – опір нейтрального проводу. Потужність короткого замикання системи електропостачання з синусоїдним симетричним джерелом визначається виразом:

$$P_{0n} = 3U_{\Phi n}^2 / r. \quad (4)$$

Якщо умова (1) виконується, коефіцієнт виграшу за енергією втрат, який показує, у скільки разів енергія втрат трифазної чотирипровідної системи без фільтра перевищує енергію втрат за наявності ПАФ, розраховують за формулою:

$$k_W = \sum_{n=1}^N P_n^2 \lambda_n^{-2} \div \sum_{n=1}^N P_n \left[P_n + k_F (P_{0n} + P_n) \sqrt{\lambda_n^{-2} - 1} \right]. \quad (5)$$

Таким чином, для можливості знаходження граничного значення фактора втрат фільтра (2) експериментальним шляхом в конкретній системі електропостачання необхідно розробити методику визначення опорів r та r_N . Оскільки для безпосереднього вимірювання ці опори недоступні, пропонується їх розрахувати на основі вимірів напруг при застосуванні еталонних навантажень. При цьому слід мати на увазі, що падіння напруг на цих опорах значно менші за фазні напруги, а вимірюваними величинами є діючі значення напруг, тобто модулі відповідних комплексних величин, що додаються геометрично [9]. Виведемо співвідношення для зміни модуля комплексної величини $\dot{C} = A + jB = Ce^{j\varphi} = C \cos \varphi + j \sin \varphi$ при геометричному додаванні до неї малої комплексної величини $\dot{\gamma} = \alpha + j\beta$. Запишемо спрощений вираз для модуля алгебраїчної суми зазначених величин за правилами оперування з нескінченно малими:

$$\begin{aligned} |\dot{C} + \dot{\gamma}| &= \sqrt{(A + \alpha)^2 + (B + \beta)^2} \approx \sqrt{A^2 + 2A\alpha + B^2 + 2B\beta} = \\ &= \sqrt{A^2 + B^2} \times \sqrt{1 + 2 \frac{A\alpha + B\beta}{A^2 + B^2}} \approx C \times \left(1 + \frac{A\alpha + B\beta}{C^2} \right) = \\ &= C \times \left(1 + \frac{\alpha \cos \varphi + \beta \sin \varphi}{C} \right) = C + \alpha \cos \varphi + \beta \sin \varphi. \end{aligned} \quad (6)$$

На рис. 1 представлена трифазна чотирипровідна мережа з резистивною моделлю лінії передачі та векторними діаграмами напруг при потрібному навантаженні однієї фази A еталонними опорами $R_H = 1/G$.

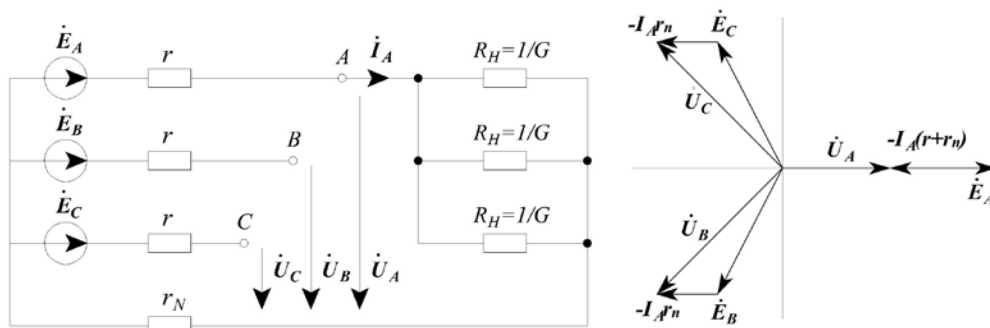


Рис. 1. Схема трифазної чотирипровідної мережі з векторними діаграмами напруг при несиметричному навантаженні

Вектор комплексів діючих значень напруг навантаження за умов симетричного синусоїдного трифазного джерела визначається виразом:

$$\bar{\mathbf{u}}_1 = \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{E}_A - \dot{I}_A(r + r_N) \\ \dot{E}_B - \dot{I}_A r_N \\ \dot{E}_C - \dot{I}_A r_N \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} E - 3EG(r + r_N) \\ \dot{E}_B - 3EGr_N \\ \dot{E}_C - 3EGr_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E - 3EG(r + r_N) \\ Ee^{-j2\pi/3} - 3EGr_N \\ Ee^{j2\pi/3} - 3EGr_N \end{bmatrix},$$

де E – діюче значення ЕРС симетричного трифазного джерела. Відповідно до формули (6) модулі (діючі значення) напруг навантаження визначаються виразами:

$$\mathbf{u}_1 = \begin{Bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} |E - 3EG(r + r_N)| \\ |Ee^{-j2\pi/3} - 3EGr_N| \\ |Ee^{j2\pi/3} - 3EGr_N| \end{Bmatrix} \approx \begin{Bmatrix} E - 3EG(r + r_N) \\ E - 3EGr_N \cos(-2\pi/3) \\ E - 3EGr_N \cos(2\pi/3) \end{Bmatrix} = E \begin{Bmatrix} 1 - 3(r + r_N)G \\ 1 + 1.5r_N G \\ 1 + 1.5r_N G \end{Bmatrix}.$$

Для вимірювання величини ЕРС E необхідно виконати дослід розриву, тобто виміряти величини фазних напруг за відсутності навантаження. У зв'язку з можливим невеликим розкидом величин фазних ЕРС результати вимірювань доречно осереднити за формулою:

$$E = (E_A + E_B + E_C) / 3.$$

За результатами вимірювання напруг U_A, U_B, U_C та ЕРС E_A, E_B, E_C шукані значення опорів фазного та нейтрального проводів визначаються виразами:

$$r = \frac{3E - (U_A + U_B + U_C)}{3EG} = \left(1 - \frac{U_A + U_B + U_C}{E_A + E_B + E_C}\right) R_H; \quad (7)$$

$$r_N = \frac{U_B + U_C - 2E}{3GE} = \left(\frac{U_B + U_C}{E_A + E_B + E_C} - \frac{2}{3}\right) R_H. \quad (8)$$

Для контролю результатів пропонується проаналізувати схему (рис. 2) трифазної чотирипровідної мережі з симетричним навантаженням фаз еталонними опорами та представленими векторними діаграмами напруг.

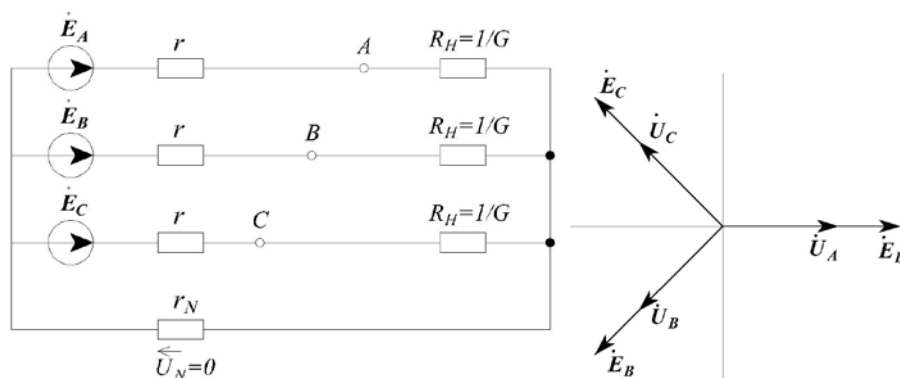


Рис. 2 Схема трифазної чотирипровідної мережі з векторними діаграмами напруг при симетричному навантаженні

Оскільки напруга нейтралі в цьому випадку дорівнює нулю [6],

$$\bar{\mathbf{u}}_2 = \begin{Bmatrix} \dot{E}_A - \dot{I}_A r \\ \dot{E}_B - \dot{I}_B r \\ \dot{E}_C - \dot{I}_C r \end{Bmatrix} \approx \begin{Bmatrix} \dot{E}_A - \dot{E}_A Gr \\ \dot{E}_B - \dot{E}_B Gr \\ \dot{E}_C - \dot{E}_C Gr \end{Bmatrix} = (1 - rG) \begin{Bmatrix} \dot{E}_A \\ \dot{E}_B \\ \dot{E}_C \end{Bmatrix}; \mathbf{u}_2 = \begin{Bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{Bmatrix} = (1 - rG) E \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix},$$

і формула розрахунку опору фазного проводу в цьому досліді збігається з формулою (7).

Формула (3) для визначення поточного значення коефіцієнта потужності містить діюче значення струму нейтралі, що відповідає визначенню повної потужності в стандарті IEEE [10]. Але встановлена в КНУТД автоматизована система комерційного обліку

електроенергії (АСКОЕ) не передбачає можливості вимірювання струму нейтралі. Тому для забезпечення вимірювання параметрів системи електропостачання в повному обсязі використовувався аналізатор С.А 8335 QUALISTAR PLUS виробництва компанії Chauvin-Arnoux Group (Франція) в режимі «Trend», схема підключення якого до системи електропостачання гуртожитку №7 КНУТД наведена на рис. 3.

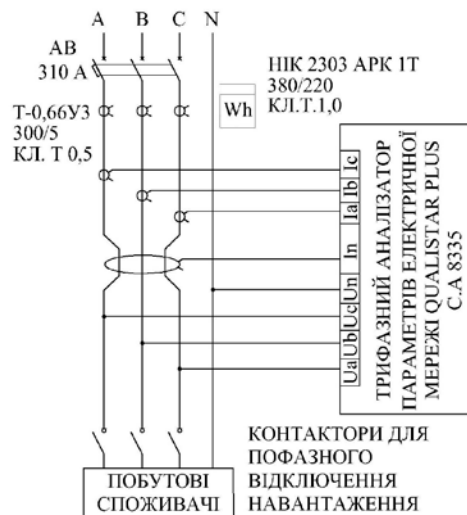


Рис. 3. Схема підключення аналізатора параметрів електричної мережі

Оскільки нейтраль в даній системі є заземленою, а фізичний принцип вимірювання струму базується на використанні поясу Роговського, що охоплює провідник з досліджуваным струмом, то струм нейтралі вимірювався шляхом обробки даних давача, що охоплював усі три фазні проводи, штучно відтворюючи суму миттєвих значень струмів цих проводів. Моніторинг проводився з інтервалом фіксації параметрів 16 хв., що забезпечило $N = 24 \times 60 / 16 = 90$ відліків на добу таких параметрів, як діючі значення фазних струмів та напруг, струму нейтралі, що записувались в оперативну пам'ять приладу. Наприклад, на рис. 4 представлений графік зміни активної потужності (у кВт) гуртожитку №7 КНУТД протягом робочого тижня.

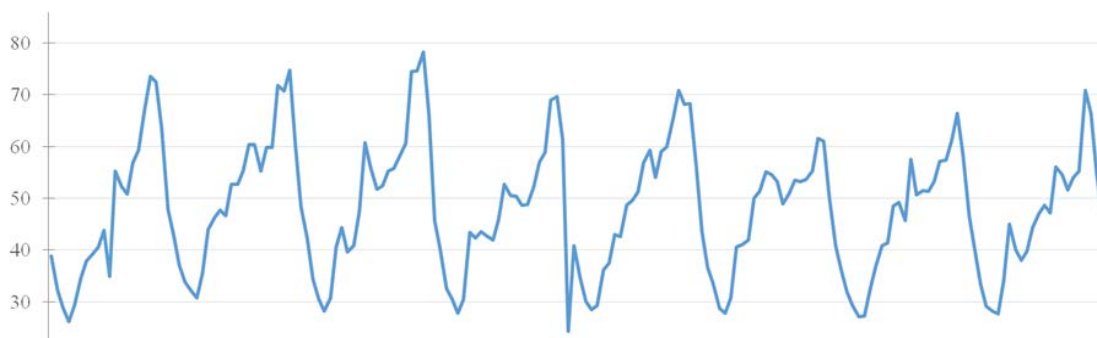


Рис. 4. Графік зміни активної потужності протягом робочого тижня у гуртожитку №7 КНУТД

Спираючись на дані аналізатора, сформулюємо та проілюструємо методику розрахунку енергозберігаючого ефекту від застосування паралельного активного фільтра в трифазній чотирипровідній системі електроживлення з урахуванням його власних втрат.

1. За результатами попередньо проведеного дослідження асиметричного навантаження системи електропостачання еталонними опорами (схема на рис. 1 та дані вимірювання напруг в табл. 1) за формулами (7) та (8) розраховуємо величини опорів фазного та нейтрального проводів. В якості еталонних навантажень використовувались нагрівачі UFO 30 U/26 (напруга живлення 220 В встановлена потужність 2.6 кВт), з'єднані по 2 штуки в паралель, що забезпечило осереднене значення опору навантаження $R_H=9.47$ Ом.

Таблиця 1.

Навантаження	E_A , В	E_B , В	E_C , В	U_A , В	U_B , В	U_C , В
симетричне	215.4	221.9	216.9	210.1	218.7	213.9
несиметричне	214.0	219.1	215.9	196.5	221.6	218.2

За результатами дослідження симетричного навантаження знаходимо значення опору фазного проводу:

$$r_1 = \left(1 - \frac{U_A + U_B + U_C}{E_A + E_B + E_C}\right) R_H = \left(1 - \frac{210,1 + 218,7 + 213,9}{215,4 + 221,9 + 216,9}\right) \times 9,47 = 0,1664 \text{ Ом.}$$

За результатами дослідження асиметричного навантаження розраховуємо

$$r_2 = \left(1 - \frac{U_A + U_B + U_C}{E_A + E_B + E_C}\right) R_H = \left(1 - \frac{196,5 + 221,6 + 218,2}{214 + 219,1 + 215,9}\right) \times 9,47 = 0,1853 \text{ Ом;}$$

$$r_N = \left(\frac{U_B + U_C}{E_A + E_B + E_C} - \frac{2}{3}\right) R_H = \left(\frac{221,6 + 218,2}{214 + 219,1 + 215,9} - \frac{2}{3}\right) \times 9,47 = 0,1041 \text{ Ом.}$$

Для подальших розрахунків приймаємо

$$r = (r_1 + r_2) / 2 = (0.1664 + 0.1853) / 2 = 0.1759 \text{ Ом;}$$

$$r_N / r = 0.1041 / 0.1759 = 0.5918 \text{ Ом.}$$

2. За результатами добового моніторингу параметрів системи електропостачання (90 відліків для кожної доби), частина яких наведена в табл. 2, за формулою (3) розраховуємо поточні значення квадратів коефіцієнта потужності, за формулою (4) поточні значення потужності короткого замикання та заповнюємо останні два стовпці табл. 2.

Таблиця 2.

Дата	n	P_n, Bm	$U_{\phi n} = \frac{U_{An} + U_{Bn} + U_{Cn}}{3}, B$	I_{An}, A	I_{Bn}, A	I_{Cn}, A	I_{Nn}, A	λ_n^2	$P_{0n}, \kappa Bm$
20.06.2017	1	48293,03	233,6	75,7	76,6	92,3	24,2	0,6961	930734,4
	2	45759,32	233,4	67,2	76,7	86,3	20,7	0,7078	929141,4
	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	90	50938,46	232,7	88	85,2	93	15,4	0,6713	923576,5

3. За формулою (2) розраховуємо граничне значення фактора втрат фільтра для даної доби:

$$k_F^{TP} = \sum_{n=1}^{90} P_n^2 (\lambda_n^{-2} - 1) \div \sum_{n=1}^{90} P_n (P_{0n} + P_n) \sqrt{\lambda_n^{-2} - 1} = 0,0318.$$

4. За формулою (5) розраховуємо коефіцієнт виграшу за енергією втрат для даної доби при $k_F = 0.02; 0.01; 0$:

$$k_w(0.02) = \sum_{n=1}^{90} P_n^2 \lambda_n^{-2} \div \sum_{n=1}^{90} P_n \left[P_n + k_F (P_{0n} + P_n) \sqrt{\lambda_n^{-2} - 1} \right] = 1,1009;$$

$$k_w(0.01) = 1,2035; k_w(0) = 1,3272.$$

5. Отримані в п.п. 3,4 дані вносимо до підсумкової табл. 3 в стовпчик, що відповідає даті вимірювання.

6. Розрахунки за п.п. 2-5 повторюємо для усіх днів тижневого моніторингу та заповнюємо усі стовпці табл. 3.

Таблиця 3.

Дата	20.06.2017.	21.06.2017	22.06.2017	23.06.2017	24.06.2017	25.06.2017	26.06.2017
k_F^{TP}	0,0318	0,0314	0,0295	0,0298	0,0295	0,0310	0,0313
$k_w(0.02)$	1,1009	1,0954	1,0858	1,0831	1,0885	1,1076	1,0974
$k_w(0.01)$	1,2035	1,1951	1,1936	1,1828	1,1991	1,2275	1,2136
$k_w(0)$	1,3272	1,3148	1,3251	1,3028	1,3347	1,3764	1,3573

Аналіз даних табл. 3 свідчить, що при використанні сучасних паралельних активних фільтрів з $k_F = 0.02$, що відповідає заявленому ККД фільтра 98% в новій серії фірми Danfoss, втрати енергії в лінії електропередачі гуртожитку №7 КНУТД можуть бути зменшені на 8-10%. В найближчій перспективі при підвищенні ККД фільтра до 99% ($k_F = 0.01$) економія втрат може досягати 20%.

Останній рядок табл. 3 може бути використаний для оцінки осередненого за потужністю та часом спостереження значення коефіцієнта потужності певного споживача (в

даному випадку гуртожитку №7 КНУТД). Якщо позначити середньодобовий коефіцієнт потужності i -ої доби $\bar{\lambda}_i$, то з рівності (5) при $k_F = 0$ випливає, що

$$\bar{\lambda}_i^{-2} = \sum_{n=1}^N P_n^2 \lambda_n^{-2} \div \sum_{n=1}^N P_n^2 = k_{wi}(0).$$

Осереднений протягом усього часу моніторингу, що триває m діб, коефіцієнт потужності $\bar{\lambda}$ визначається з виразу

$$\bar{\lambda}^{-2} = \sum_{i=1}^m \bar{\lambda}_i^{-2} / m = \sum_{i=1}^m k_{wi}(0) / m$$

у вигляді:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{m / \sum_{i=1}^m k_{wi}(0)}.$$

За даними останнього рядка табл. 3 при тривалості моніторингу 7 діб:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{7 / \sum_{i=1}^7 k_{wi}(0)} = 0.86.$$

Отримане значення дещо менше середніх значень вимірних коефіцієнтів потужностей окремих фаз $\lambda_\phi = 0.9 - 0.95$ внаслідок врахування в запропонованій методиці струму нейтралі, викликаного несиметрією навантаження, та кінцевого значення опору нейтралі. Для адекватного відображення можливостей енергозбереження шляхом застосування ПАФ пропонується доповнити АСКОЕ КНУТД функцією періодичного вимірювання діючого значення струму нейтралі.

Висновки. Запропоновані формули розрахунку електричних опорів фазних та нейтрального проводів трифазної чотирипровідної системи електропостачання на основі вимірів напруг еталонних навантажень, здійснюваних АСКОЕ КНУТД.

Розроблена методика розрахунку енергозберігаючого ефекту від застосування паралельного активного фільтра в трифазній чотирипровідній системі електроживлення з урахуванням його власних втрат. Застосування методики проілюстровано розрахунком енергозберігаючого ефекту за результатами тижневого моніторингу споживання електроенергії гуртожитку №7 КНУТД. При використанні сучасних паралельних активних фільтрів втрати енергії в лінії електропередачі гуртожитку №7 КНУТД можуть бути зменшені на 10-20%.

Обґрунтована необхідність доповнити АСКОЕ КНУТД функцією періодичного вимірювання діючого значення струму нейтралі для адекватного відображення можливостей енергозбереження шляхом застосування ПАФ.

Література

1. Akagi H., Watanabe E. H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. – Piscataway, NJ: IEEE Press. – 2007. – 379 p. ISBN:978-0-470-10761-4.
2. Patricio Salmerón Revuelta, Salvador Pérez Litrán, Jaime Prieto Thomas. Active Power Line Conditioners Design, Simulation and Implementation for Improving Power Quality. –

References

1. Akagi H., Watanabe E. H., Aredes M. (2007) Instantaneous power theory and applications to power conditioning, Piscataway, NJ: IEEE Press, p. 379. ISBN: 978-0-470-10761-4.
2. Patricio S. R., Jaime P. T., Salvador P. L. (2016) Active power line conditioners: design, simulation and implementation for improving power quality, London; San Diego: Academic Press. p. 436.

Elsevier Inc., Academic Press. – 2016. – 436 p. ISBN:978-0128032169.

3. Benysek G., Pasko M. Power Theories for Improved Power Quality. Springer. – 2012. – 214 p. ISBN: 978-1-4471-2785-7.

4. Артеменко М. Ю. Потужність систем електроживлення та енергоефективність силових фільтрів [Монографія]. – Київ : Аверс, 2016. – 216 с. ISBN: 978-966-8777-09-7.

5. Артеменко М. Ю. Енергоефективність паралельних активних силових фільтрів трифазних систем електроживлення/ Артеменко М. Ю., Каплун В. В. // «Вісник Київського національного університету технологій та дизайну». – 2016. – № 5 (102). – С. 11 – 19.

6. Дрехслер Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке: Пер. с чешск. А. Окина. / Дрехслер Р.//М.: Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.

7. Жемеров Г. Г., Ильина Н. А., Ильина О. В., Ковальчук О. И., Сокол Е. И. КПД трехфазной четырехпроводной системы электроснабжения с асимметричной нагрузкой // Технічна електродинаміка, тем. випуск, «Силова електроніка та енергоефективність». – 2010. – Ч. 1. – С. 22–31.

8. Артеменко М. Ю. Застосування активних фільтрів для зменшення втрат енергії трифазних систем електропостачання / М. Ю. Артеменко, В. В. Каплун, В. М. Бобровник, С. Й. Поліщук // Технічна електродинаміка. – 2018. – № 4. С. 53 – 56. 241

9. Теоретичні основи електротехніки: Підручник у 3 т. / В. С. Бойко, В. В. Бойко, Ю. Ф. Видолоб та ін.; за заг. ред. І.М. Чиженка, В. С. Бойка. – К.: Видавництво «Політехніка», 2004. Т.1. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – 232 с.

10. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal Nonsinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions. IEEE Standard 1459 – 2010, Sept.2010.doi: 10.1109/IEEESTD.2010.5439063.

ISBN: 978 – 0128032169

3. Benysek G., Pasko M. Power Theories for Improved Power Quality. Springer. – 2012. – 214 p. ISBN: 978-1-4471-2785-7.

4. Artemenko M. Yu. (2016) *Potuzhnist' system elektrozhivlennya ta enerhoefektyvnist' sylovykh fil'triv* [Power of supply systems and energy efficiency of power filters], Kyiv: Avers, p. 216. ISBN: 978-966-8777-09-7 [in Ukrainian].

5. Artemenko M. Yu., Kaplun V. V. (2016) *Enerhoefektyvnist' paralel'nykh aktyvnykh sylovykh fil'triv tryfaznykh system elektrozhivlennya*. : Kyiv National University of Technologies and Design «Technical Science Series» no. 5 (102). P. 11 – 19.

6. Dreksler R. (1985) *Yzmerenye y otsenka kachestva elektroenerhyy pry nesymmetrychnoy y nelyneynoy nahruzke* [Measurement and estimation of electric

power quality with asymmetric and nonlinear load] Per.s cheshsk. A. Okyna. Dreksler R. M.:Enerhoatomyzdat, 112 p.

7. Zhemerov H. H., Yl'yna N. A., Yl'yna O. V., Koval'chuk O. Y., Sokol E. Y. (2010) *KPD trekhfaznoj chetyrekhpovodnoj systemy elektrosnabzheniya s asymmetrychnoy nahruzkoj* [Efficiency of a three-phase four-wire power supply system with asymmetric load]. Kiev: Tekhnichna elektrodynamika. [in Ukrainian].

8. M. Yu. Artemenko, V. V. Kaplun, V. M. Bobrovnyk, S. J. Polischuk (2018) *Zastosuvannia aktyvnykh fil'triv dlia zmeshennia vtrat enerhii tryfaznykh system elektropostachannia* [active filters application for energy losses reduction in three-phase power supply systems] Kiev: Tekhnichna elektrodynamika. [in Ukrainian].

9. Bojko V. S., Bojko V. V., Vydolob Yu. F. et al. (2004) *Teoretychni osnovy elektrotekhniky* [Theoretical foundations of electrical engineering]. I. M. Chyzhenka, V. S. Bojka (Ed); Kiev: Vydavnytstvo «Politehnika», T. 1. Ustaleni rezhymy linijnykh elektrychnykh kil iz zoseredzhenymy parametramy. (Vols. 1 – 3; Vol.1).

10. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal Nonsinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions. IEEE Standard 1459-2010, Sept. 2010. doi: 10.1109/IEEESTD.2010.5439063.

KAPLUN VIKTOR
kaplun.v@knutd.edu.ua
ORCID: 0000-0001-7040-9344
Researcher ID: B-8704-2017
Pro-Rector for Research and Innovation,
Kiev National University of Technologies & Design

BOBROVNIK VLADIMIR
vge@knutd.com.ua
<http://orcid.org/0000-0003-1779-5375>
Kiev National University of Technologies & Design

ARTEMENKO MICHAEL
artemenko_m_ju@ukr.net
<http://orcid.org/0000-0001-9341-9238>
Kiev National University of Technologies & Design

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ЭФФЕКТА ОТ ПРИМЕНЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО АКТИВНОГО ФИЛЬТРА В ТРЕХФАЗНОЙ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С УЧЕТОМ ЕГО СОБСТВЕННЫХ ПОТЕРЬ

КАПЛУН В. В., БОБРОВНИК В. Н., АРТЕМЕНКО М. Е.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Вывод расчетных соотношений и разработка методики расчета энергосберегающего эффекта от применения параллельного активного фильтра в трехфазной четырехпроводной системе электроснабжения и ее апробация на примере мониторинга параметров потребления электроэнергии общежития №7 КНУТД.

Методика. На основе символического метода расчета трехфазных цепей обосновываются формулы вычисления электрических сопротивлений фазных и нейтрального проводов трехфазной четырехпроводной системы на основе измерений напряжений эталонных нагрузок, осуществляемых АСКУЭ КНУТД. Энергосберегающий эффект от применения параллельного активного фильтра в трехфазной четырехпроводной системе электропитания устанавливается с учетом его собственных потерь, определяемых на основе мониторинга параметров потребления электроэнергии и вычисленных значений сопротивлений проводов.

Результаты. В работе обоснована методика расчета энергосберегающего эффекта от применения параллельного активного фильтра в трехфазной четырехпроводной системе электроснабжения с учетом его собственных потерь и на примере мониторинга параметров потребления электроэнергии общежития №7 КНУТД продемонстрирована возможность уменьшения на 10-20% потерь энергии в линии электропередачи при использовании современных параллельных активных фильтров.

Научная новизна. Установлены новые аналитические зависимости действующих напряжений эталонных нагрузок от электрических сопротивлений фазных и нейтрального проводов трехфазной четырехпроводной системы электроснабжения, используемых для расчета значений указанных сопротивлений по результатам измерения фазных напряжений.

Практическая значимость. Сформулирована новая методика расчета энергосберегающего эффекта от применения параллельного активного фильтра в трехфазной четырехпроводной системе электроснабжения, которая позволяет оценить целесообразность применения параллельных активных силовых фильтров и сформулировать требования к их параметрам с целью получения желаемого эффекта для конкретного объекта электропотребления.

Ключевые слова: мощность потерь, параллельный активный фильтр, трехфазная четырехпроводная система электроснабжения.

THE METHOD OF CALCULATING THE ENERGY SAVING EFFECT FROM THE APPLICATION OF THE SHUNT ACTIVE FILTER IN THE THREE-PHASE FOUR-WIRE POWER SYSTEM WITH THE VIOLATION OF ITS OWN LOSSES

KAPLUN V. V., BOBROVNIK V. M., ARTEMENKO M. Yu.

Kyiv National University of Technologies and Design

Purpose. The deduction of settlement ratios and the development of a method for calculating the energy saving effect from the use of a shunt active filter in a three-phase four-wire power supply system and its testing on the example of monitoring the parameters of electricity consumption of the hostel number 7 KNUTD.

Methodology. Based on the symbolic method of calculating three-phase circles, the formulas for calculating the electrical resistances of phase and neutral wires of a three-phase four-wire system based on measurements of stresses of reference loads carried out by AEEAS KNUTD are grounded. The energy saving effect of using a shunt active filter in a three-phase four-wire system of power supply is established taking into account its own losses, which are determined on the basis of monitoring of parameters of electric energy consumption and calculated values of resistance of wires.

Findings. The work substantiates the methodology for calculating the energy saving effect from the use of a parallel active filter in the three-phase four-wire power supply system, taking into account its own losses, and on the example of monitoring the parameters of electricity consumption of the hostel number 7 KNUTD demonstrated the possibility of reducing by 10-20% energy losses in the transmission line with the use of modern shunt active filters.

Originality. The new analytical dependences of the operating voltages of the reference loads on the electrical resistances of phase and neutral wires of the three-phase four-wire power supply system used to calculate the values of the indicated resistances based on the results of phase voltage measurements are established.

Practical value. A new method of calculating the energy saving effect from the use of a shunt active filter in a three-phase four-wire power supply system is formulated, which makes it possible to assess the expediency of using shunt active power filters and formulate requirements for their parameters in order to obtain the desired effect for a particular object of power consumption.

Keywords: power losses, shunt active filter, three-phase four-wire power supply system.