

## Силова електроніка

УДК 621.314

DOI: [10.20535/2312-1807.2017.22.4.103980](https://doi.org/10.20535/2312-1807.2017.22.4.103980)

# Розрахунок енергозберігаючого ефекту від застосування паралельних активних фільтрів в трифазній чотирипровідній системі електропостачання при збільшенні інтервалу осереднення вимірюваних величин

Каплун В. В., д.т.н., проф., ORCID [0000-0001-7040-9344](https://orcid.org/0000-0001-7040-9344)e-mail [kaplun.v@knutd.com.ua](mailto:kaplun.v@knutd.com.ua)Бобровник В. М., ORCID [0000-0003-1779-5375](https://orcid.org/0000-0003-1779-5375)e-mail [vge@knutd.com.ua](mailto:vge@knutd.com.ua)Київський національний університет технологій та дизайну  
Київ, УкраїнаАртеменко М. Ю., д.т.н., проф., ORCID [0000-0001-9341-9238](https://orcid.org/0000-0001-9341-9238)e-mail [artemenko\\_m\\_ju@ukr.net](mailto:artemenko_m_ju@ukr.net)Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» [kpi.ua](http://kpi.ua)  
Київ, УкраїнаПоліщук С. Й., к.т.н., ORCID [0000-0002-6978-2747](https://orcid.org/0000-0002-6978-2747)e-mail [polischuk@ied.org.ua](mailto:polischuk@ied.org.ua)Інститут електродинаміки НАН України  
Київ, Україна

*Реферат*—Запропоновано вдосконалений закон керування струмами джерела трифазної чотирипровідної системи електропостачання паралельним активним фільтром, який відрізняється збільшенням інтервалу осереднення потужності навантаження та напруг живлення. Запропоновано оцінювати енергозберігаючий ефект від застосування паралельних активних фільтрів в системах електропостачання величиною коефіцієнта виграшу за потужністю втрат, для якого виведена розрахункова формула при зазначеному законі керування. Вперше в статті з використанням положень математичного аналізу та векторної алгебри показано, що збільшення інтервалу усереднення до періоду зміни однорідного навантаження при стабільній фазній напрузі збільшує коефіцієнт виграшу за потужністю втрат пропорційно величині, яка названа коефіцієнтом нерівномірності споживання енергії. Отримані значення коефіцієнта нерівномірності споживання енергії для типових графіків зміни активної потужності. Найбільше його значення сягає двох при прямокутній формі зазначеного графіку.

Бібл. 10, рис. 2.

*Ключові слова* — потужність втрат; паралельний активний фільтр чотирипровідної системи електропостачання; коефіцієнт нерівномірності споживання енергії.

### I. ВСТУП

Застосування активних силових фільтрів в трифазних системах електропостачання забезпечує віднов-

лення якості електроенергії на клеммах потужних споживачів та є одним із перспективних технічних напрямів енергозбереження шляхом зниження теплових втрат в лінії передачі [1, 2]. Найбільшого поширення набули паралельні активні фільтри (ПАФ)



з можливістю формування оптимальних вхідних струмів в умовах нестабільності, нелінійності та несиметрії навантаження. Алгоритми керування ПАФ здебільшого ґрунтуються на сучасних теоріях миттєвої та інтегральної потужності. Перша використовує інформацію про миттєві значення струмів та напруг системи електропостачання для позбавлення від неактивної складової миттєвої потужності [1]. В другій теорії складові потужності визначаються інтегруванням добутків струмів та напруг на періоді напруги електромережі. В результаті її застосування покращуються енергетичні показники системи електропостачання [3, 4], але погіршується швидкодія ПАФ. Незважаючи на наявність окремих публікацій [5, 6], недостатня увага приділена побудові алгоритмів керування засобами активної фільтрації у випадку, коли період зміни навантаження перевищує період напруги електромережі.

Метою даної роботи є розробка закону керування ПАФ у зазначеному випадку та виведення розрахункових співвідношень для оцінювання енергозберігаючого ефекту від його застосування в трифазній чотирипровідній системі електропостачання.

II. Декомпозиція повної потужності трифазної чотирипровідної системи електропостачання на квадратичні складові та формула для коефіцієнта потужності

Відповідно до методики [8] визначення енергетичних характеристик трифазної чотирипровідної системи електропостачання (рис. 1) в синусоїдному несиметричному режимі для струмів перейдемо від миттєвих значень фазних напруг та лінійних струмів до тривимірних комплексних векторів діючих значень

$$\underline{\bar{u}} = \frac{\omega}{\pi\sqrt{2}} \int_0^{2\pi/\omega} \begin{pmatrix} U_A(t) \\ U_B(t) \\ U_C(t) \end{pmatrix} e^{-j\omega t} dt = \begin{pmatrix} U_A e^{j\varphi_A} \\ U_B e^{j\varphi_B} \\ U_C e^{j\varphi_C} \end{pmatrix} \varphi = \begin{pmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{pmatrix};$$

$$\underline{\bar{i}} = \frac{\omega}{\pi\sqrt{2}} \int_0^{2\pi/\omega} \begin{pmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{pmatrix} e^{-j\omega t} dt = \begin{pmatrix} I_A e^{j\psi_A} \\ I_B e^{j\psi_B} \\ I_C e^{j\psi_C} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{pmatrix}.$$

Далі перейдемо до комплексних векторів симетричних складових прямої, зворотної та нульової послідовностей (позначені індексами +, -, 0 відповідно), причому складові нульової послідовності модифікуємо відповідно до значення коефіцієнта  $\sigma_0 = 3r_N / (r + 3r_N)$ , який визначається співвідношенням опорів лінійних та нейтрального проводів лінії передачі (рис. 1):

$$\underline{\bar{u}} = \begin{pmatrix} \sqrt{1-\sigma_0} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \underline{\bar{u}} = \begin{pmatrix} \dot{U}_0 \sqrt{1-\sigma_0} \\ \dot{U}_+ \\ \dot{U}_- \end{pmatrix};$$



Рис. 1 Трифазна чотирипровідна система електропостачання з ПАФ та резистивною моделлю лінії передачі

$$\underline{\bar{i}} = \begin{pmatrix} 1/\sqrt{1-\sigma_0} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \underline{\bar{i}} = \begin{pmatrix} I_0 e^{j\psi_0} / \sqrt{1-\sigma_0} \\ I_+ e^{j\psi_+} \\ I_- e^{j\psi_-} \end{pmatrix}.$$

де  $\underline{\bar{F}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \tilde{a} & \tilde{a} \\ 1 & \tilde{a} & \tilde{a} \end{pmatrix}$  – модифікована матриця Фортеск'ю, що задовольняє умовам  $\underline{\bar{F}}^{-1} = \underline{\bar{F}}^*$ ;  $\underline{\bar{F}}^T = \underline{\bar{F}}$ ;

$\tilde{a} = e^{j2\pi/3}$ ;  $\tilde{a} = (\tilde{a})^*$ .

Оцінимо квадрат модуля комплексного вектора фазних напруг з урахуванням обмежень на діючі значення напруг складових нульової та зворотної послідовностей ( $\varepsilon_0 = U_0 / U_+ \leq 0.04$ ;  $\varepsilon_- = U_- / U_+ \leq 0.04$ ), що задає міждержавний стандарт 13109-97:

$$\underline{\bar{u}}^T \underline{\bar{u}}^* = U^2 = U_0^2(1-\sigma_0) + U_+^2 + U_-^2 \leq U_0^2 + U_+^2 + U_-^2 = U_+^2(1 + \varepsilon_0^2 + \varepsilon_-^2) \leq U_+^2(1 + 0.04^2 + 0.04^2) = U_+^2(1.0032) \leq 1.0016^2 U_+^2,$$

тобто з похибкою, що не перевищує 16 сотих відсотка, модуль вектора фазної напруги визначається складовою прямої послідовності:

$$\underline{\bar{u}}^T \underline{\bar{u}}^* \approx U_+^2 = 3U_\phi^2; \underline{\bar{u}} \approx \sqrt{3}U_\phi \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де  $U_\phi$  – діюче значення фазної напруги.

Квадрат модуля комплексного вектора струмів визначається виразом:

$$\underline{\bar{i}}^T \underline{\bar{i}}^* = I^2 = I_0^2 / (1-\sigma_0) + I_+^2 + I_-^2 = I_0^2(1 + 3r_N / r) + I_+^2 + I_-^2 = I_N^2 r_N / r + I_A^2 + I_B^2 + I_C^2, \quad (2)$$

оскільки:



$$I_0^2 + I_+^2 + I_-^2 = (\bar{\mathbf{F}}^{-1}\bar{\mathbf{i}})^T (\bar{\mathbf{F}}^{-1}\bar{\mathbf{i}})^* = \bar{\mathbf{i}}^T \bar{\mathbf{F}}^{-1} \bar{\mathbf{F}} \bar{\mathbf{i}}^* = \bar{\mathbf{i}}^T \bar{\mathbf{i}}^* = \\ = I_A^2 + I_B^2 + I_C^2; 3I_0^2 = (I_A + I_B + I_C)(I_A + I_B + I_C)^* = I_N^2.$$

Для синусоїдного режиму симетричних напруг та несиметричних струмів скалярний добуток отриманих комплексних векторів  $\underline{\mathbf{u}}; \underline{\mathbf{i}}$  визначає активну потужність

$$P = \operatorname{Re}(\underline{\mathbf{u}}^T \underline{\mathbf{i}}^*) = \sqrt{3}U_\phi I_+ \cos\psi_+$$

та реактивну потужність

$$Q = \operatorname{Im}(\underline{\mathbf{u}}^T \underline{\mathbf{i}}^*) = -\sqrt{3}U_\phi I_+ \sin\psi_+,$$

векторний добуток визначає вектор потужності небалансу [8, 9]

$$\underline{\mathbf{n}} = \underline{\mathbf{i}} \times \underline{\mathbf{u}} = \begin{vmatrix} I_0 / \sqrt{1-\sigma_0} \\ I_+ \\ I_- \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 0 \\ \sqrt{3}U_\phi \\ 0 \end{vmatrix} = \\ = \sqrt{3}U_\phi \begin{vmatrix} -I_- \\ 0 \\ I_0 / \sqrt{1-\sigma_0} \end{vmatrix},$$

а добуток модулів – повну потужність  $S = UI$ .

Між зазначеними потужностями має місце квадратичне співвідношення, зумовлене властивостями скалярного та векторного добутків комплексних векторів [8, 9]:

$$S^2 = 3U_\phi^2 (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_N^2 \frac{r}{r}) = P^2 + Q^2 + N^2,$$

де  $N^2 = \underline{\mathbf{n}}^T \underline{\mathbf{n}}^* = \sqrt{3}U_\phi [I_-^2 + I_0^2 / (1-\sigma_0)]$  – квадрат модуля вектора потужності небалансу, який в [5] розділений на суму квадратів потужності пульсацій та так званої прихованої потужності.

Енергозберігаючий ефект від застосування засобів паралельної активної фільтрації проявляється у зменшенні потужності втрат та відповідного теплового навантаження лінії електропередачі внаслідок формування струмів трифазного джерела, яким відповідає тільки активна потужність навантаження, а всі неактивні складові повної потужності, необхідні навантаженню, формуються активним фільтром на його затискачах [4, 7, 10]. Енергоефективність процесу споживання енергії трифазного джерела характеризується коефіцієнтом потужності, що в синусоїдному режимі для симетричного джерела напруги має вигляд:

$$k_P = \frac{P}{S} = k_3 k_H, \quad (3)$$

де  $k_3 = P / \sqrt{P^2 + Q^2} = \cos\psi_+$  – коефіцієнт зсуву,

$$k_H = \sqrt{\frac{P^2 + Q^2}{P^2 + Q^2 + N^2}} = \frac{I_+}{\sqrt{I_0^2 / (1-\sigma_0) + I_+^2 + I_-^2}}$$

коефіцієнт несиметрії.

Для зручності вимірювання коефіцієнта потужності вираз (3) може бути перетворений таким чином:

$$k_P = I_+ \cos\psi_+ / \sqrt{I_0^2 / (1-\sigma_0) + I_+^2 + I_-^2} = \\ = P / \sqrt{3}U_\phi \sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_N^2 r_N / r}. \quad (4)$$

За наявності вищих гармонік струмів та дії синусоїдного симетричного джерела цей вираз для коефіцієнта потужності залишається справедливим, але діючі значення усіх струмів враховують увесь їх спектральний склад.

### III. РОЗРАХУНОК ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО ЕФЕКТУ ВІД ЗАСТОСУВАННЯ ПАФ ПРИ ЗБІЛЬШЕННІ ІНТЕРВАЛУ ОСЕРЕДНЕННЯ ВІМІРЮВАНИХ ВЕЛИЧИН

Алгоритм керування ПАФ на рис. 1, що забезпечує одичне значення коефіцієнта потужності системи електропостачання, формує вектор струмів трифазного джерела відповідно до виразу [7, 10]

$$\underline{\mathbf{i}}_\phi(t) = \underline{\mathbf{g}}\underline{\mathbf{u}}(t), \quad (5)$$

причому величина коефіцієнта пропорційності в останній формулі обирається з умови нульової активної потужності фільтра за період напруги електромережі у вигляді

$$g = \frac{P}{3U_\phi^2}.$$

Для періодичного з таким самим періодом вектору лінійних струмів, зумовлених навантаженням, розраховуємо коефіцієнт виграшу за потужністю втрат, величина якого може слугувати оцінкою енергоефективності застосування ПАФ:

$$k_B = \frac{\Delta P}{\Delta P_\phi} = \frac{(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2)r + I_N^2 r_N}{\frac{g^2 r}{T} \int_0^T \underline{\mathbf{u}}^T(t) \underline{\mathbf{u}}(t) dt} = \\ = \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_N^2 r_N / r}{P^2 / 3U_\phi^2} = \frac{1}{k_P^2}.$$

Таким чином, коефіцієнт виграшу за потужністю втрат при застосуванні алгоритму керування ПАФ, що забезпечує одичне значення коефіцієнта потужності системи електропостачання, є обернено пропорційним квадрату коефіцієнта потужності навантаження, що визначається за формулою (4).

Оцінимо виграш за потужністю втрат, що досягається при збільшенні інтервалу осереднення потужності навантаження та напруг живлення. При цьому вектор струмів трифазного джерела будемо формувати пропорційним вектору  $\underline{\mathbf{u}}(t)$  відповідно до формули (5), але коефіцієнт пропорційності обиратимемо



за умови відсутності споживання енергії активним фільтром протягом усього часу осереднення  $\tau$  :

$$g_\tau = \int_0^\tau p(t)dt / \int_0^\tau \mathbf{u}^T(t)\mathbf{u}(t)dt. \quad (6)$$

Величина виграшу за потужністю втрат в зазначеному інтервалі часу визначається коефіцієнтом

$$k_{B\tau} = \frac{\int_0^\tau \mathbf{i}^T(t)\mathbf{R}\mathbf{i}(t)dt}{g_\tau^2 r \int_0^\tau \mathbf{u}^T(t)\mathbf{u}(t)dt} = \frac{\int_0^\tau \mathbf{i}^T(t)\bar{\mathbf{R}}\mathbf{i}(t)dt \int_0^\tau \mathbf{u}^T(t)\mathbf{u}(t)dt}{\left(\int_0^\tau p(t)dt\right)^2} = \frac{I_\tau^2 U_\tau^2}{P_\tau^2} = \frac{1}{k_\tau^2}, \quad (7)$$

де

$$I_\tau = \sqrt{\int_0^\tau i^2(t)dt / \tau} = \sqrt{\int_0^\tau \mathbf{i}^T(t)\bar{\mathbf{R}}\mathbf{i}(t)dt / \tau} = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^\tau [i_A^2(t) + i_B^2(t) + i_C^2(t) + (r_N / r) i_N^2(t)] dt}$$

середньоквадратичне значення еквівалентного теплового струму  $i(t)$ , що в інтервалі осереднення спричиняє таке саме теплове навантаження лінії електропередачі, що й струми лінійних та нейтрального проводів;

$U_\tau = \sqrt{\int_0^\tau \mathbf{u}^T(t)\mathbf{u}(t)dt / \tau}$  – середньоквадратичне значення фазових напруг;  $P_\tau = \int_0^\tau p(t)dt / \tau$  – середня

активна потужність в часовому інтервалі  $\tau$ ;  $k_\tau = P_\tau / U_\tau I_\tau$  – інтегральний коефіцієнт потужності;  $\bar{\mathbf{R}} = \mathbf{R} / r = \mathbf{E} + (r_N / r) \mathbf{j}\mathbf{j}^T$  – нормована матриця опорів втрат, симетрична відносно головної діагоналі [7,10];  $\mathbf{E}$  – одинична матриця;  $\mathbf{j}^T = \|1 \ 1 \ 1\|$ .

Для цілей вимірювання коефіцієнт виграшу за енергією втрат за формулою (7) може бути поданий наближеною рівністю

$$k_{B\tau} = \frac{3 \left(\sum_{k=1}^N I_k^2\right) \left(\sum_{k=1}^N U_{\Phi k}^2\right)}{\left(\sum_{k=1}^N P_k\right)^2}, \quad (8)$$

де  $N$  – кількість вимірювальних тактів в інтервалі осереднення  $\tau$ ;  $P_k, U_{\Phi k}, I_k^2 = \frac{I_{Ak}^2 + I_{Bk}^2 + I_{Ck}^2 + I_{Nk}^2 r_N}{r}$

– активна потужність, діюче значення фазної напруги та квадрат еквівалентного теплового струму в  $k$  – му вимірювальному такті.

Оцінімо виграш за потужністю втрат при стабільній напрузі трифазного джерела для однорідного змінюваного в часі несиметричного навантаження, що для будь-якого періоду напруги електромережі характеризується однаковою величиною коефіцієнта потужності, який визначається за формулою (4).

Тоді в формулі (8) для тривалості вимірювального такту, що співпадає з періодом напруги електромережі,

$$U_{\Phi k} = U_\Phi; I_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} U_\Phi k_P}.$$

Підставивши в формулу (7) наближений вираз для часової залежності еквівалентного теплового струму

$$i(t) = \frac{p(t)}{\sqrt{3} U_\Phi k_P},$$

та  $U_\tau^2 = 3U_\Phi^2$ , після перетворень матимемо вираз для коефіцієнта виграшу за потужністю втрат:

$$k_{B\tau} = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau p^2(t)dt \times \left[ \frac{1}{\tau} \int_0^\tau p(t)dt \right]^{-2} \times \frac{1}{k_P^2} = k_W k_B, \quad (9)$$

де  $k_W = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau p^2(t)dt \times \left[ \frac{1}{\tau} \int_0^\tau p(t)dt \right]^{-2}$  – коефіцієнт нерівномірності споживання енергії в інтервалі осереднення  $\tau$ .

Якщо інтервал осереднення є періодом зміни активної потужності, наприклад, в певному технологічному циклі, доцільно в її миттєвому значенні виділити змінну складову  $\tilde{p}(t) = p(t) - P_\tau$ , тоді

$$k_W = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau [\tilde{p}(t) + P_\tau]^2 dt / P_\tau^2 = 1 + \frac{P_\sim^2}{P_\tau^2},$$

де  $P_\sim = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^\tau \tilde{p}^2(t)dt}$  – середньоквадратичне значення змінної складової активної потужності за період її зміни.

Знайдемо значення коефіцієнта нерівномірності споживання енергії для типових форм графіків зміни активної потужності (рис. 2).



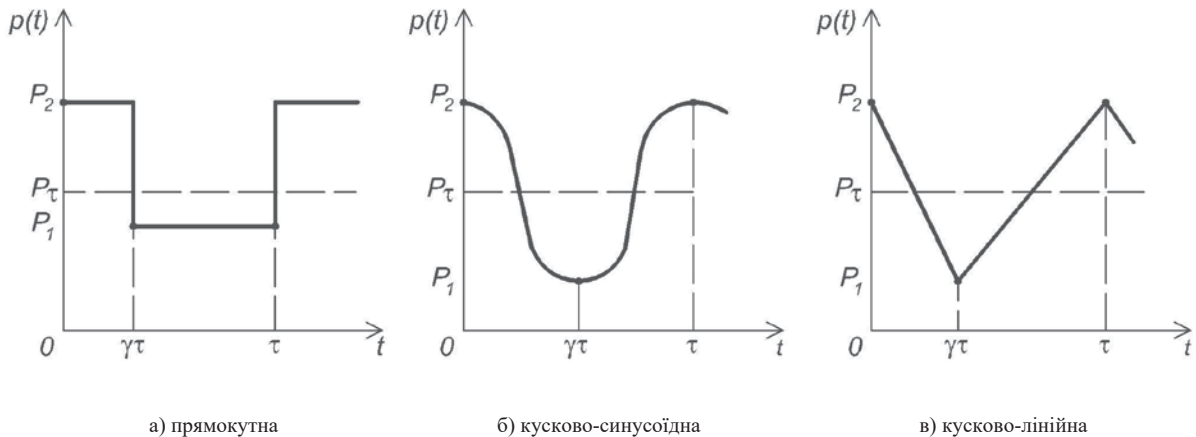


Рис. 2 Типові форми графіків зміни активної потужності

При прямокутній формі зміни графіку активної потужності (рис. 2а) коефіцієнт нерівномірності споживання енергії визначається двома параметрами: коефіцієнтом приросту  $D = (P_2 - P_1) / 2P_\tau$  та коефіцієнтом заповнення  $\gamma$ :

$$k_{W1} = 1 + 4\gamma(1 - \gamma)D^2,$$

сягаючи при обмеженні  $P_1 \geq 0$  максимального значення  $k_{W1MAX} = 2$  за умов  $D = 1$  та  $\gamma = 0,5$ .

Форма графіку з кусково-синусоїдним законом зміни активної потужності (рис. 2б) характеризується коефіцієнтом нерівномірності споживання енергії

$$k_{W2} = 1 + D^2 / 2,$$

що визначається лише одним параметром  $D$  незалежно від  $\gamma$ . Максимальне значення  $k_{W2MAX} = 1,5$  при тому ж самому обмеженні має місце при  $D = 1$ .

Так само не залежить від параметра  $\gamma$  коефіцієнт нерівномірності споживання енергії, якщо графік активної потужності змінюється за кусково-лінійним законом (рис. 2в):

$$k_{W3} = 1 + D^2 / 3,$$

сягаючи максимального значення  $k_{W3MAX} = 4 / 3$  за аналогічної умови  $D = 1$ .

### ВИСНОВКИ

- 1) Запропоновано вдосконалений закон керування струмами джерела трифазної чотирипровідної системи електропостачання паралельним активним фільтром, який відрізняється збільшенням інтервалу осереднення потужності навантаження та напруг живлення в значенні коефіцієнта пропорційності за формулою (6).
- 2) Запропоновано оцінювати енергозберігаючий ефект від застосування паралельних активних фільтрів в системах електропостачання величиною коефіцієнта виграшу за потужністю

вtrat, для якого виведена розрахункова формула (8) при зазначеному законі керування.

- 3) Вперше показано, що збільшення інтервалу усереднення до періоду зміни однорідного навантаження при стабільній фазній напрузі збільшує коефіцієнт виграшу за потужністю втрат пропорційно величині у формулі (9), яка названа коефіцієнтом нерівномірності споживання енергії. Отримані значення коефіцієнта нерівномірності споживання енергії для типових графіків зміни активної потужності. Найбільше його значення сягає двох при прямокутній формі зазначеного графіку.

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] H. Akagi, E. H. Watanabe and M. Aredes, Instantaneous power theory and applications to power conditioning, Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007, p. 379. ISBN: [978-0-470-10761-4](#).
- [2] S. R. Patricio, P. T. Jaime and P. L. Salvador, Active power line conditioners: design, simulation and implementation for improving power quality, London; San Diego: Academic Press, 2016, p. 421. ISBN: [978-0128032169](#)
- [3] L. S. Czarniecki, «Currents' Physical Components (CPC) concept: a fundamental of Power Theory,» *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 84, no. 6, p. 28–37, 2008.
- [4] A. E. Emanuel, Power Definitions and the Physical Mechanism of Power Flow, John Wiley & Sons, Ltd, 2010. DOI: [10.1002/9780470667149](#)
- [5] R. Drechsler, Izmerenie i otsenka kachestva elektroenergii pri nesimmetrichnoy i nelineynoy nagruzke: Per. s cheshsk [Measurement and evaluation of the quality of electric power with asymmetric and non-linear load: translation from Czech], Moscow: Energoatomizdat, 1985, p. 112.
- [6] G. G. Zhemerov, I. F. Domin, O. V. Ilna and D. V. Tugay, «Energoeffektivnost' korrektsii fazy toka i kompensatsii pul'satsiy aktivnoy i reaktivnoy moshchnosti v trekhfaznoy sisteme elektrosnabzheniya [Energy efficiency correction phase current ripple compensation and active and reactive power in a three phase power supply system]» *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 1, pp. 52–57, 2007.
- [7] M. Yu. Artemenko and V. V. Kaplun, «Enerhoefektyvnist' paralel'nykh aktivnykh sylovykh fil'triv tryfaznykh system elektrozhyvlennya [Energy efficient of shunt active filter for three-phase power system]» *Bulletin of the Kyiv National*

- University of Technologies and Design, no. 5 (102), p. 11–19, 2016.*
- [8] M. Yu. Artemenko, L. M. Batrak, V. M. Mykhalskyi and S. Y. Polishchuk, «Optimizatsiya enerhetychnykh kharakterystyk tryfaznoyi chotyryprovodnoyi systemy zhyvlennya z paralel'nym aktyvnym fil'trom u nesymetrychnomu synusoidnomu rezhymy [Energy performance optimization of the three phase four wire power supply system with a parallel active filter in the unbalanced sinusoidal mode],» *Tekhnichna Elektrodynamika*, no. 2, pp. 30-37, 2015.
- [9] Y. A. Sirotin, «Vektornaya mgnovennaya moshchnost' i energeticheskiye rezhimy trekhfaznykh tsepey [Vector instantaneous power and energy regimes of three-phase circuits],» *Tekhnichna Elektrodynamika*, no. 6, p. 57–65, 2013.
- [10] M. Yu. Artemenko, Potuzhnist' system elektrozhylennya ta enerhoefektyvnist' sylovykh fil'triv [Power of supply systems and energy efficiency of power filters], Kyiv: Avers, 2016, p. 216. ISBN: 978-966-8777-09-7

Надійшла до редакції 13 червня 2017 р.

УДК 621.314

## Расчет энергосберегающего эффекта от применения параллельных активных фильтров в трехфазной четырехпроводной системе электроснабжения при увеличении интервала осреднения измеряемых величин

Каплун В. В., д.т.н., проф., ORCID [0000-0001-7040-9344](https://orcid.org/0000-0001-7040-9344)

e-mail [kaplun.v@knutd.com.ua](mailto:kaplun.v@knutd.com.ua)

Бобровник В. Н., ORCID [0000-0003-1779-5375](https://orcid.org/0000-0003-1779-5375)

e-mail [vge@knutd.com.ua](mailto:vge@knutd.com.ua)

Киевский национальный университет технологий и дизайна  
Киев, Украина

Артеменко М. Е., д.т.н., проф., ORCID [0000-0001-9341-9238](https://orcid.org/0000-0001-9341-9238)

e-mail [artemenko\\_m\\_ju@ukr.net](mailto:artemenko_m_ju@ukr.net)

Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» [kpi.ua](http://kpi.ua)  
Киев, Украина

Полищук С. И., к.т.н., с.н.с., ORCID [0000-0002-6978-2747](https://orcid.org/0000-0002-6978-2747)

e-mail [polischuk@ied.org.ua](mailto:polischuk@ied.org.ua)

Институт электродинамики НАН Украины  
Киев, Украина

**Реферат**—Предложен усовершенствованный закон управления токами источника трехфазной четырехпроводной системы электроснабжения параллельным активным фильтром, который отличается увеличением интервала осреднения мощности нагрузки и напряжений питания. Предложено оценивать энергосберегающий эффект от применения параллельных активных фильтров в системах электроснабжения величиной коэффициента выигрыша по мощности потерь, для которого выведена расчетная формула при указанном законе управления. Впервые в статье с использованием положений математического анализа и векторной алгебры показано, что увеличение интервала осреднения до периода изменения однородной нагрузки при стабильном фазном напряжении увеличивает коэффициент выигрыша по мощности потерь пропорционально величине, которая названа коэффициентом неравномерности потребления энергии. Получены значения коэффициента неравномерности потребления энергии для типовых графиков изменения активной мощности. Наибольшее его значение достигает двух при прямоугольной форме указанного графика.



Библ. 10, рис.2.

*Ключевые слова* — мощность потерь; параллельный активный фильтр четырехпроводной системы электропитания; коэффициент неравномерности потребления энергии.

UDC 621.314

## Calculation of energy-saving effect from the use of parallel active filters in a three-phase four-wire power supply system with increasing the interval of averaging of the measured values

V. V. Kaplun, Dr.Sc.(Eng.), Prof., ORCID [0000-0001-7040-9344](https://orcid.org/0000-0001-7040-9344)

e-mail [kaplun.v@knutd.com.ua](mailto:kaplun.v@knutd.com.ua)

V. M. Bobrovnyk, ORCID [0000-0003-1779-5375](https://orcid.org/0000-0003-1779-5375)

e-mail [vge@knutd.com.ua](mailto:vge@knutd.com.ua)

Kyiv National University of Technology and Design  
Kyiv, Ukraine

M. Yu. Artemenko, Dr.Sc.(Eng.), Prof., ORCID [0000-0001-9341-9238](https://orcid.org/0000-0001-9341-9238)

e-mail [artemenko\\_m\\_ju@ukr.net](mailto:artemenko_m_ju@ukr.net)

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" [kpi.ua](http://kpi.ua)  
Kyiv, Ukraine

S. Y. Polishchuk, PhD, Sen.Res., ORCID [0000-0002-6978-2747](https://orcid.org/0000-0002-6978-2747)

e-mail [polischuk@ied.org.ua](mailto:polischuk@ied.org.ua)

The National Academy of Sciences of Ukraine The Institute of Electrodynamics  
Kyiv, Ukraine

*Abstract*—The apparent power of the three-phase four-wire supply system was decomposed into quadratic components under conditions of symmetric sinusoidal phase voltages. It was shown that the power factor for this mode is a product of the shift and asymmetry coefficients, the values of which are determined through the parameters of the symmetrical components of phase voltages and linear currents. The general formulas for calculating of the energy-saving effect from the application of shunt active filters in three-phase four-wire power system for the averaging the load power both on the network period and at any time interval were obtained. It was shown that in a power supply system with a constant in time nonlinear load the gain in the power losses when using shunt active filters is inversely proportional to the square of the power factor determined at the mains voltage period. The improved control law for the shunt active filter of a three-phase four-wire power supply system was proposed, which is distinguished by the increasing of the measured quantities averaging interval. It is shown for the first time that under conditions of stable phase voltage with the increasing of the averaging interval up to the period of the symmetrical load change, the gain coefficient of the power losses increases in comparison with the averaging at the mains voltage period in accordance with the value called the irregular energy consumption coefficient. The values of the irregular energy consumption coefficient for typical curves of the active power changing were obtained. In the case of a rectangular changing of the active power curve, the irregular energy consumption coefficient is determined by two parameters: the growth rate and the duty cycle. Its maximum meaning reaches a value of 2 in the case where the maximum power level is twice the average and the minimum level is zero. For periodic curves of active power, which are approximated by piecewise sinusoidal and piecewise linear dependencies, the irregular energy consumption coefficient is determined by one growth coefficient only regardless of the value of the duty cycle, reaching the maximum values of 3/2 and 4/3, respectively.

Ref. 10, Fig. 2.

*Keywords* — power losses, shunt active filter of a three-phase four-wire power supply system, irregular energy consumption coefficient

