

ЗАСТОСУВАННЯ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ ТРИФАЗНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

М.Ю. Артеменко^{1*}, докт.техн.наук, В.В. Каплун^{2**}, докт.техн.наук, В.М. Бобровник^{2***},
С.Й. Поліщук^{3****}, канд.техн.наук

¹ – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, e-mail: artemenko_m_ju@ukr.net

² – Київський національний університет технологій та дизайну,
вул. Немировича-Данченка, 2, Київ, 01011, Україна, e-mail: kaplun.v@knuud.com.ua

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

Отримано нову аналітичну умову доцільності застосування паралельних активних фільтрів (ПАФ) та формулу оцінювання енергозберігаючого ефекту від їх встановлення в трифазних системах електропостачання при стаціонарному навантаженні. Запропоновано оцінювати енергозберігаючий ефект від застосування ПАФ при періодично змінюваному навантаженні коефіцієнтом вирашу за енергією втрат, для якого наведено методику визначення. Застосування методики проілюстровано розрахунком енергозберігаючого ефекту за результатами тижневого моніторингу споживання електроенергії у гуртожитку №7 КНУТД. Бібл. 9, табл. 1, рис. 2.

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

Вступ. Застосування активних силових фільтрів у трифазних системах електропостачання забезпечує відновлення якості електроенергії на клеммах потужних споживачів та є одним із перспективних технічних напрямів енергозбереження шляхом зниження теплових втрат у лінії передачі [1, 2]. Алгоритми керування паралельними активними фільтрами (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 [3]. У другій теорії складові потужності визначаються інтегруванням добутків струмів та напруг на періоді напруги електромережі [4, 5], в результаті її застосування покращуються енергетичні показники системи електропостачання, але погіршується швидкодія ПАФ. Незважаючи на наявність окремих публікацій [6, 7], недостатня увага приділена побудові алгоритмів керування засобами активної фільтрації у випадку, коли період зміни навантаження суттєво перевищує період напруги електромережі. **Метою** цієї роботи є виведення розрахункових співвідношень для відносних втрат енергії та оцінювання доцільності застосування ПАФ на основі тижневого моніторингу трифазної чотирипровідної системи електропостачання гуртожитку № 7 Київського національного університету технологій та дизайну (КНУТД).

Умова доцільності застосування активних фільтрів для економії втрат енергії при стаціонарному навантаженні. В усталеному режимі системи живлення при стаціонарному навантаженні енергетичні процеси визначаються періодичними векторами лінійних струмів $\mathbf{i}(t)$ та фазних напруг $\mathbf{u}(t)$, період яких дорівнює періоду T напруг трифазного джерела. Для резистивної моделі лінії передачі (рис. 1) відносна потужність втрат визначається виразом [2]

$$\chi = \Delta P / P = 0.5k_L - 1 - \sqrt{(0.5k_L - 1)^2 - \lambda^{-2}}, \quad (1)$$

де $\Delta P = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}^\wedge(t) \mathbf{R} \mathbf{i}(t) dt$ – потужність втрат; $P = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^\wedge(t) \mathbf{i}(t) dt$ – активна потужність навантаження; \wedge – знак транспонування; $\mathbf{R} = r\mathbf{I} + r_N \mathbf{j} \mathbf{j}^\wedge = r\bar{\mathbf{R}}$ – матриця опорів втрат лінії передачі; \mathbf{I} – одинична матриця; $\mathbf{j}^\wedge = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$; r – опір кожного фазного проводу; r_N – опір нейтрального проводу; $k_L = P_0 / P$ – коефіцієнт навантаження трифазної системи; P_0 – потужність короткого замикання системи електропостачання; $\lambda = P/S$ – коефіцієнт потужності; S – повна потужність навантаження, що визначається за формулою

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

Для систем електропостачання, в яких виконується умова $k_L > 20$, вираз (1) може бути наближено перетворений за правилами оперування з нескінченно малими величинами

$$\chi = 0.5k_L - 1 - (0.5k_L - 1) \sqrt{1 - \frac{1}{(0.5k_L - 1)^2 \lambda^2}} \approx (0.5k_L - 1) \left\{ 1 - \left[1 - \frac{1}{2(0.5k_L - 1)^2 \lambda^2} \right] \right\} = \frac{1}{(k_L - 2)\lambda^2} \approx \frac{1}{k_L \lambda^2}. \quad (3)$$

© Артеменко М.Ю., Каплун В.В., Бобровник В.М., Поліщук С.Й., 2018
ORCID ID: *<http://orcid.org/0000-0001-9341-9238>, **<http://orcid.org/0000-0001-7040-9344>,
<http://orcid.org/0000-0003-1779-5375>, *<http://orcid.org/0000-0002-6978-2747>

Єдиними параметрами, що визначають відносну потужність втрат, є коефіцієнт навантаження та коефіцієнт потужності, значення якого для типових навантажень наведені у [8]. Нехай при застосуванні ПАФ з потужністю власних втрат P_F величина коефіцієнта потужності максимально наближена до одиниці. Тоді потужність втрат в лінії передачі за наявності фільтра відповідно до (3) складатиме

$$\chi_F = \frac{1}{P_0/(P+P_F)} = \frac{1+P_F/P}{k_L} \quad (4)$$

Оскільки ПАФ генерує струми, що компенсують неактивні складові потужності навантаження, вважаємо потужність власних втрат фільтра пропорційною величині неактивної потужності навантаження

$$P_F = k_F \sqrt{S^2 - P^2} = k_F P \sqrt{\lambda^2 - 1}, \quad (5)$$

де k_F – коефіцієнт пропорційності, що залежить від елементної бази та частоти комутації транзисторів інвертора ПАФ, який назвемо фактором втрат фільтра. Для наявності енергозберігаючого ефекту в трифазній системі від застосування ПАФ економія відносної потужності втрат в лінії передачі має перевищувати відносну потужність втрат ПАФ

$$\chi - \chi_F > P_F / P. \quad (6)$$

Тоді, підставляючи величини (3)–(5) у вираз (6), після перетворень отримаємо аналітичну умову доцільності застосування ПАФ за показником економії електроенергії

$$k_F < k_F^{IP}, \quad (7)$$

де граничне значення фактора втрат фільтра для стаціонарного навантаження визначається виразом $k_F^{IP} = \sqrt{\lambda^2 - 1} / (k_L + 1)$.

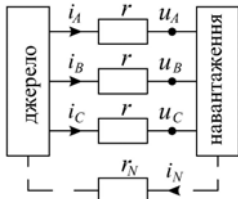


Рис. 1

Енергозберігаючий ефект від застосування ПАФ при стаціонарному навантаженні може бути оцінений коефіцієнтом виграшу за потужністю втрат, що визначається на періоді T

$$k_{\Delta P} = \frac{\chi}{\chi_F + P_F / P} = \frac{1}{k_L \lambda^2} \div \left(\frac{1 + P_F / P}{k_L} + \frac{P_F}{P} \right) = \frac{\lambda^2}{1 + (1 + k_L) k_F \sqrt{\lambda^2 - 1}} = \frac{\lambda^2}{1 + (k_F / k_F^{IP}) \times (\lambda^2 - 1)}. \quad (8)$$

Коефіцієнт виграшу за енергією втрат при періодично змінюваному навантаженні. Розглядатимемо періодично змінюване навантаження з періодом $T_L = NT_S$, де T_S – тривалість інтервалу спостереження, протягом якого енергетичні параметри системи вважаються незмінними, N – кількість інтервалів спостереження. Тоді величини відносних потужностей втрат, що визначаються за формулами (3)–(5), залежатимуть від номера n інтервалу спостереження ($n=1 \dots N$). Величина енергії втрат трифазної системи без фільтра за весь період зміни навантаження

$$W = T_S \sum_{n=1}^N \chi_n P_n = \frac{T_S}{P_0} \sum_{n=1}^N \frac{P_n^2}{\lambda_n^2}, \quad (9)$$

де P_n, λ_n – активна потужність навантаження та коефіцієнт потужності на n -му інтервалі спостереження. За наявності ПАФ, алгоритм керування яким забезпечує коефіцієнт потужності, наближений до одиниці в кожному інтервалі спостереження, величина енергії втрат за період зміни навантаження визначатиметься виразом

$$W_F = T_S \sum_{n=1}^N \chi_{Fn} P_n + T_S \sum_{n=1}^N P_{Fn} = \frac{T_S}{P_0} \sum_{n=1}^N P_n^2 \left(1 + \frac{P_{Fn}}{P_n} \right) + T_S \sum_{n=1}^N P_{Fn} = \frac{T_S}{P_0} \sum_{n=1}^N P_n^2 + T_S k_F \sum_{n=1}^N P_n \sqrt{\lambda_n^2 - 1} \left(1 + \frac{P_n}{P_0} \right), \quad (10)$$

де P_{Fn} – потужність власних втрат фільтра на n -му інтервалі спостереження, що залежить від величин P_n, λ_n відповідно до (5) з незалежним від n значенням k_F . Умову доцільності застосування ПАФ для економії енергії за період зміни навантаження задає нерівність

$$k_F < k_{FW}^{IP}, \quad (11)$$

де граничне значення фактора втрат фільтра для періодично змінюваного навантаження визначається з прирівнювання правих частин (9), (10) у вигляді

$$k_{FW}^{IP} = \sum_{n=1}^N P_n^2 (\lambda_n^2 - 1) \div \sum_{n=1}^N P_n (P_0 + P_n) \sqrt{\lambda_n^2 - 1}. \quad (12)$$

Якщо умова (11) виконується, коефіцієнт виграшу за енергією втрат на періоді зміни навантаження визначатиметься виразом

$$k_W = \frac{W}{W_F} = \sum_{n=1}^N P_n^2 \lambda_n^2 \div \sum_{n=1}^N P_n \left[P_n + k_F (P_0 + P_n) \sqrt{\lambda_n^2 - 1} \right]. \quad (13)$$

Послідовність отримання значень складників формул (12), (13) та обчислення за ними утворюють методику розрахунку енергозберігаючого ефекту від застосування ПАФ у трифазній системі електропостачання при періодично змінюваному навантаженні.

Розрахунок енергозберігаючого ефекту за результатами моніторингу споживання електроенергії гуртожитку № 7 КНУТД. На рис. 2 показано графік зміни активної потужності протягом робочого тижня у гуртожитку №7 КНУТД, отриманий шляхом вимірювання параметрів системи електропостачання аналізатором С.А 8335 QUALISTAR PLUS виробництва компанії Chauvin-Arnoux Group (Франція) в режимі «Trend» [9].



Рис. 2

Моніторинг проводився з інтервалом фіксації параметрів 16 хв, що забезпечило $N = 24 \times 60 / 16 = 90$ відліків параметрів на добу, які записувались в оперативну пам'ять приладу. Для розрахунку поточних значень коефіцієнтів потужності за результатами вимірювань застосовувалась формула, що випливає з (2) при синусоїдних симетричних напругах джерела

$$\lambda_n^2 = P_n^2 / 3U_{\Phi n}^2 (I_{An}^2 + I_{Bn}^2 + I_{Cn}^2 + I_{Nn}^2 r_N / r), \quad (14)$$

де $U_{\Phi n}, I_{An}, I_{Bn}, I_{Cn}, I_{Nn}$ – відповідно діючі значення фазної напруги, лінійних струмів та струму нейтралі на n -му інтервалі спостереження. На відміну від коефіцієнта потужності, визначення якого ґрунтується на формулі повної потужності Бухгольца [4], це дає змогу врахувати втрати енергії в нейтральному проводі. Значення добових коефіцієнтів вирашу за енергією втрат, розраховані за формулами (12)-(14), зведено до таблиці.

Дата	19.06.2017	20.06.2017	21.06.2017	22.06.2017	23.06.2017	24.06.2017	25.06.2017	26.06.2017
$k_{\text{пр}}$	1,3542	1,3520	1,2863	1,3109	1,2967	1,3332	1,3676	1,4485

Висновки. Отримано нову аналітичну умову (7) доцільності застосування ПАФ та формулу оцінювання енергозберігаючого ефекту (8) від його встановлення в трифазних системах електропостачання при стаціонарному навантаженні. Ці співвідношення накладають обмеження на вибір елементної бази та частоту комутації силового інвертора на ранніх стадіях проектування ПАФ.

Запропоновано оцінювати енергозберігаючий ефект від застосування ПАФ при періодично змінюваному навантаженні коефіцієнтом вирашу за енергією втрат (13), для якого наведено методику визначення. Застосування методики проілюстровано розрахунком енергозберігаючого ефекту за результатами тижневого моніторингу споживання електроенергії гуртожитку № 7 КНУТД.

1. Жемеров Г.Г., Тугай Д.В. Составляющие мощности суммарных потерь электрической энергии в пространственных ррқ координатах. *Електротехніка і електромеханіка*. 2016. № 2. С. 11–19.

2. Артеменко М.Ю., Лесик В.О., Поліщук С.Й. Потужність втрат трифазної чотирипровідної системи живлення. *Електроніка та зв'язок*. 2016. № 5. С. 25–30.

3. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007. 379 p.

4. Czarnecki L.S. Currents' Physical Components (CPC) concept: a fundamental of Power Theory. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2008. Vol. 84. No 6. Pp. 28-37.

5. Revuelta P., Salmerón, Litrán S.P., Thomas J.P. Active Power Line Conditioners Design, Simulation and Implementation for Improving Power Quality. Elsevier Inc., Academic Press. 2016. 436 p.

6. Дрехслер Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке. М: Энергоатомиздат, 1985. 112 с.

7. Жемеров Г.Г., Ильина О.В. Расчет параметров емкостного накопителя энергии. *Электричество*. 2008. № 1. С. 54-59.

8. Артеменко М.Ю. Потужність систем електроживлення та енергоефективність силових фільтрів. Київ: Аверс, 2016. 216 с.

9. Каплун В.В., Артеменко М.Ю., Поліщук С.Й., Бобровник В.М. Перспективи застосування паралельних активних фільтрів з накопичувачами енергії для підвищення енергоефективності трифазних чотирипровідних систем електропостачання. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2017. № 5 (114). С. 24–31.

ПРИМЕНЕНИЕ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ТРЕХФАЗНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

М.Е. Артеменко¹, докт.техн.наук, **В.В. Каплун²**, докт.техн.наук, **В.Н. Бобровник²**, **С.И. Полищук³**, канд.техн.наук

¹ – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского», пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина, e-mail: artemenko_m_ju@ukr.net

² – Киевский национальный университет технологий и дизайна, ул. Немировича-Данченка, 2, Киев, 01011, Украина, e-mail: kaplun.v@knutd.com.ua

³ – Институт электродинамики НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина.

Получены новое аналитическое условие целесообразности применения параллельных активных фильтров (ПАФ) и формула оценки энергосберегающего эффекта от их установки в трехфазных системах электро-снабжения при стационарной нагрузке. Предложено оценивать энергосберегающий эффект от применения ПАФ при периодически изменяющейся нагрузке коэффициентом выигрыша по энергии потерь, для которого приведена методика определения. Применению методики проиллюстрировано расчетом энергосберегающего эффекта по результатам недельного мониторинга потребления электроэнергии в общежитии №7 КНУТД. Библ. 9, табл. 1, рис. 2.

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

ACTIVE FILTERS APPLICATION FOR ENERGY LOSSES REDUCTION IN THREE-PHASE POWER SUPPLY SYSTEMS

M.Yu. Artemenko¹, **V.V. Kaplun²**, **V.M. Bobrovnyk²**, **S.Y. Polishchuk³**

¹ – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine, e-mail: artemenko_m_ju@ukr.net

² – Kyiv National University of Technology and Design, Nemirovich-Danchenko Street, 2, Kyiv, 01011, Ukraine, e-mail: kaplun.v@knutd.com.ua

³ – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine, pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

A new analytical condition of expedient application of shunt active filters (SAF) and formula for estimating the energy saving effect from their installation in three-phase power supply systems under stationary load have been obtained. It is proposed to evaluate the energy-saving effect from the use of SAF under periodically varying load by the energy losses gain coefficient, for which the method of determination is given. The application of the method is illustrated by the calculation of the energy-saving effect by the results of weekly monitoring the electricity consumption in the KNUTD hostel number 7. References 9, table 1, figures 2.

Key words: power losses, shunt active filter, three-phase power supply system.

1. Zhemerov, G.G., Tugay, D.V. Components of total electric energy losses power in *pqr* spatial coordinates. *Electrical engineering & Electromechanics*. 2016. No 2. Pp. 11-19. (Rus)

2. Artemenko M., Lesyk V., Polishchuk S. Power losses in three-phase four-wire power system. *Elektronika ta zviazok*. 2016. No 5. Pp. 25–30. (Ukr)

3. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. Piscataway, NJ: IEEE Press. 2007. 379p.

4. Czarnecki L.S. Currents' Physical Components (CPC) concept: a fundamental of Power Theory. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2008. Vol. 84. No 6. Pp. 28-37.

5. Revuelta P. Salmerón, Litrán S.P., Thomas J.P.. Active Power Line Conditioners Design, Simulation and Implementation for Improving Power Quality. Elsevier Inc., Academic Press. 2016. 436 p.

6. Drechsler R. Measurement and evaluation of the quality of electric power with asymmetric and non-linear load. Moskva: Energoatomizdat. 1985. 112 p. (Rus)

7. Zhemerov G.G., Ilyina O.V. Calculation of parameters of capacitive energy storage pulsation instantaneous real power. *Elektrichestvo*. 2008. No 1. Pp. 54–59. (Rus)

8. Artemenko M.Yu. Power of supply systems and energy efficiency of power filters. Kyiv: Avers, 2016. 216 p. (Ukr)

9. Kaplun V.V., Artemenko M.Yu., Bobrovnik V.M., Polishchuk S.Y. Application prospects of shunt active filters with energy storage elements to increase the energy efficiency of three-phase four-wire electrical supply systems. *Visnyk Kyivskoho Natsionalnoho Universytetu Tekhnolohii ta Dyzainu*. 2017. No 5 (114). Pp. 24–31.

Надійшла 05.03.2018
Остаточний варіант 11.04.2018