

## ВИКОРИСТАННЯ ПОНЯТТЯ КОЕФІЦІЄНТУ ПОТУЖНОСТІ ЗАДЛЯ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИСТРОЇВ КОРИГУВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ МЕРЕЖІ

О.І. Чиженко, докт.техн.наук, О.М. Попович\*, докт.техн.наук, І.В. Трач\*\*, канд.техн.наук, О.Б. Рибіна, канд.техн.наук

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

E-mail: [alivchizh@ukr.net](mailto:alivchizh@ukr.net), [popovich1955@ukr.net](mailto:popovich1955@ukr.net), [igor.trach@ied.org.ua](mailto:igor.trach@ied.org.ua), [rybina@i.ua](mailto:rybina@i.ua)

*Обґрунтовано поширення поняття коефіцієнта потужності, який визначено для кіл з періодичними напругою та струмами, на трифазні кола з несиметричними неперіодичними напругою та струмами. Показано, що це поняття є доцільним як у разі розгляду перехідних процесів, що виникають в електричних мережах у режимах пуску потужних асинхронних машин, так і у разі порівняльній оцінці ефективності застосування технічних пристроїв коригування цих режимів. Бібл. 6, рис. 2.*

**Ключові слова:** коефіцієнт потужності, кола несиметричних неперіодичних напруги та струмів, оцінка ефективності засобів корекції режимів електричної мережі

**Вступ.** В промислових трифазних симетричних електричних колах періодичних напруги та струму у разі комутації потужного обладнання, яке входить до їхнього складу, виникають важкі перехідні процеси, котрі супроводжуються виникненням несиметрії за фазами напруги та струмів. Ці напруга і струми, аж до часу встановлення у колі сталого режиму, є неперіодичними. У випадках, коли такі перехідні процеси є тривалими і спроможними нанести шкоду іншому обладнанню кола, з метою проведення технічних заходів щодо їхнього коригування виникає потреба в критеріях, які характеризують протікання цих процесів з енергетичної точки зору, а саме, оцінки супроводжуваних ці процеси втрат електроенергії, перевищень номінальних значень напруги та струму або недопустимих їхніх просідань. Використання з такою метою існуючих критеріїв не надає достатньої інформації для проведення ефективних технічних заходів коригування. Тому розробка та введення у розгляд нових, що більш повно та адекватно характеризують перехідні процеси, критеріїв є актуальною задачею.

Оцінка енергетичних показників перехідного процесу, зокрема, є актуальною у електричних мережах з потужним вузловим комплексним навантаженням, що містить електромеханічну складову, наприклад, потужні асинхронні машини (АМ). Прямий пуск таких машин супроводжується пусковими струмами, які у 5-7 разів перевищують їхні номінальні струми у сталому режимі. Пускові струми, тривалість яких вимірюється десятками періодів живлячої напруги, здатні зашкодити встановленому у мережі обладнанню, а також суттєво ускладнити функціонування суміжних споживачів електроенергії, оскільки ці струми спричиняють значні просідання напруги в місцях підключення споживачів до мережі.

Для оцінки енергетичних показників електромеханічних систем відомі дослідження наведені у роботах [1, 2], а стосовно перехідних режимів в них – у роботах О.М. Поповича, де розроблено методологію розрахунку коефіцієнта потужності у перехідних процесах в припущенні незмінності симетричної синусою живлячої напруги. Таке припущення не відповідає процесам у разі пуску в мережі потужних АМ, тому що не враховує падіння напруги у лінії передачі мережі за таких режимів.

**Мета роботи** – визначення та дослідження нового ефективного критерію для характеристики з енергетичної точки зору перехідних процесів, що відбуваються у трифазних електричних колах, який надає достатньо інформації про енергетичні аспекти цих процесів задля розробки технічних заходів та засобів їхнього коригування, а також передбачає порівняльну оцінку ефективності застосування тих чи інших коригуючих пристроїв.

В електричних колах елементарна робота, що виконується електромагнітним полем, визначається як  $dA=uidt$ , де  $u$  та  $i$  – миттєві значення напруги і струму, які описуються довільними часовими залежностями  $u(t)$  та  $i(t)$ . Тоді робота, яка виконується в колі за деякий проміжок часу  $t_{\text{тек}}$

$$A(t_{\text{тек}}) = \int_0^{t_{\text{тек}}} u(t)i(t)dt. \quad (1)$$

У теоретичній електротехніці розглядають середнє значення роботи за час  $t_{\text{тек}}$

$$A_{\text{срп}}(t_{\text{тек}}) = \frac{A(t_{\text{тек}})}{t_{\text{тек}}} = \frac{1}{t_{\text{тек}}} \int_0^{t_{\text{тек}}} u(t)i(t)dt. \quad (2)$$

У випадку періодичних напруги і струмів, тобто коли мають місце рівності  $u(t)=u(t+nT)$ ,  $i(t)=i(t+nT)$ , де  $n=1,2,3,\dots$ ;  $T$  – період цих часових функцій, величина  $A_{\text{срп}}(nT)=\text{const}$ . Цю величину називають середньою за період потужністю  $P_{\text{срп}}$  чи просто активною потужністю  $P$ . Таким чином, для періодичних напруги та струмів маємо

$$P = P_{\text{срп}} = \frac{A(nT)}{nT} = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} u(t)i(t)dt. \quad (3)$$

Для трифазного кола несиметричних періодичних напруги та струму можемо записати

$$P_{3\phi} = P_{3\phi\text{срп}} = \frac{A_{3\phi}(nT)}{nT} = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} [u_A(t)i_A(t) + u_B(t)i_B(t) + u_C(t)i_C(t)]dt, \quad (4)$$

де літери «A», «B» і «C» у індексах позначень напруги та струмів вказують, що ці напруга і струми відповідають фазам A, B і C трифазного кола.

Подовжуючи логічний ланцюжок приведених вище викладок, можна визначити й середню за інтервал часу  $t_{\text{тек}}$  роботу і для випадку, коли  $u(t)$  та  $i(t)$  неперіодичні функції часу

$$P_{3\phi\text{срп}}(t_{\text{тек}}) = \frac{A_{3\phi}(t_{\text{тек}})}{t_{\text{тек}}} = \frac{1}{t_{\text{тек}}} \int_0^{t_{\text{тек}}} [u_A(t)i_A(t) + u_B(t)i_B(t) + u_C(t)i_C(t)]dt, \quad (5)$$

яка, на відміну від  $P_{3\phi}$  за формулою (4), не є константою, а змінюється в залежності від часу  $t_{\text{тек}}$ .

Для кіл несинусоїдальних періодичних струмів та напруги визначають поняття коефіцієнту потужності [3], щодо якого у прийнятих тут позначеннях справедливо

$$\chi = \frac{P}{UI} = \frac{\int_0^T u(t)i(t)dt}{\sqrt{\int_0^T u^2(t)dt} \sqrt{\int_0^T i^2(t)dt}} = \frac{P_{\text{срп}}(T)}{UI}, \quad (6)$$

де  $U$  та  $I$  – середньоквадратичні значення напруги та струму, звідки за аналогією для трифазних кіл несиметричних періодичних напруги та струмів, з урахуванням викладеного у роботі [4], маємо

$$\chi = \frac{P_{3\phi}}{\sqrt{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2} \sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T [u_A(t)i_A(t) + u_B(t)i_B(t) + u_C(t)i_C(t)]dt}{\sqrt{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2} \sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}}, \quad (7)$$

де  $U_A, U_B, U_C$  та  $I_A, I_B, I_C$  – середньоквадратичні значення відповідних фазних напруги та струмів.

Відповідно до прийнятої тут логіки узагальнень, оснований на розгляді роботи, яка виконується у колах електромагнітним полем, з подальшим її усередненням у часі, поняття  $\chi$ , яке визначено за формулою (7), можна розповсюдити й на випадок неперіодичних напруги і струмів. В цьому випадку коефіцієнт  $\chi$  вже не буде константою, як у формулі (7), а буде функцією часової змінної  $t_{\text{тек}}$ , щодо якої він визначається, тобто буде описуватися часовою залежністю  $\chi_{\text{дин}}(t_{\text{тек}})$

$$\chi_{\text{дин}}(t_{\text{тек}}) = \frac{A_{3\phi\text{срп}}(t_{\text{тек}})}{\sqrt{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2} \sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}} = \frac{\int_0^{t_{\text{тек}}} [u_A(t)i_A(t) + u_B(t)i_B(t) + u_C(t)i_C(t)]dt}{\sqrt{\int_0^{t_{\text{тек}}} (u_A^2(t) + u_B^2(t) + u_C^2(t))dt} \sqrt{\int_0^{t_{\text{тек}}} (i_A^2(t) + i_B^2(t) + i_C^2(t))dt}}, \quad (8)$$

а середньоквадратичні значення фазних напруги і струмів будуть визначаються формулами

$$U_{\phi}(t_{\text{тек}}) = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{тек}}} \int_0^{t_{\text{тек}}} u_{\phi}^2(t)dt}, \quad I_{\phi}(t_{\text{тек}}) = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{тек}}} \int_0^{t_{\text{тек}}} i_{\phi}^2(t)dt}. \quad (9)$$

**Приклад 1.** Розглянемо у трифазній мережі з  $U_{\phi} = 220$  В режим пуску АМ потужністю 110 кВт. Такий режим, коли у мережі для коригування перехідних процесів використовується напівпровідниковий одномостовий тиристорний регульований компенсатор (ТРК) за схемою з діодно-конденсаторною комутацією тиристорів, досліджено у роботі [5]. Було показано, що ТРК у пусково-

му режимі забезпечує стабілізацію напруги (запобігає її просіданню) у точці підключення навантаження, що гарантує успішний запуск АМ, а також мінімізує величину пускового струму в мережі й, тим самим, мінімізує активні втрати електричної енергії у лінії передачі. В цій роботі розроблено комп'ютерну модель системи, за допомогою якої проведено розрахунки та отримано часові діаграми пускових напруги і струмів мережі у точці підключення АМ. Відмінністю мережі, яка тут розглядається, від дослідженої у роботі [5] є те, що сумарна ємність у плечі трикутника силових конденсаторів, підключених паралельно вентильному мосту, збільшена на 400 мкФ. Цим досягається краща фільтрація силовими конденсаторами (основне призначення яких є генерування реактивної потужності задля компенсації індуктивних потужностей, що споживаються стаціонарним навантаженням мережі та АМ) вищих гармонік струму, які генеруються тиристорним мостом.

Використовуючи розроблену у роботі [5] математичну модель мережі, розраховуємо за формулою (8) у точці підключення стаціонарного навантаження та АМ значення  $\chi_{\text{дин}}$  для інтервалу пуску. Розрахунки значень  $\chi_{\text{дин}}(t)$  здійснюємо для двох режимів: 1) коли до мережі підключено ТРК (часові діаграми струму фази  $A$  мережі після його ударного значення наведено на рис. 1,  $a$ ); 2) коли ТРК у мережі відсутній (часові діаграми фази  $A$  струму мережі – на рис 1,  $б$ ). На рис. 1,  $в$  для того ж інтервалу наведено криві залежностей  $\chi_{\text{дин з ТРК}}(t)$ ,  $\chi_{\text{дин без ТРК}}(t)$  та  $\lambda(t) = \chi_{\text{дин з ТРК}}(t)/\chi_{\text{дин без ТРК}}(t)$  – відповідно динамічних коефіцієнтів потужності для мережі з ТРК (верхня перервна лінія) та мережі, де ТРК відсутній (нижня перервна лінія), і для відношення цих коефіцієнтів (безперервна лінія).

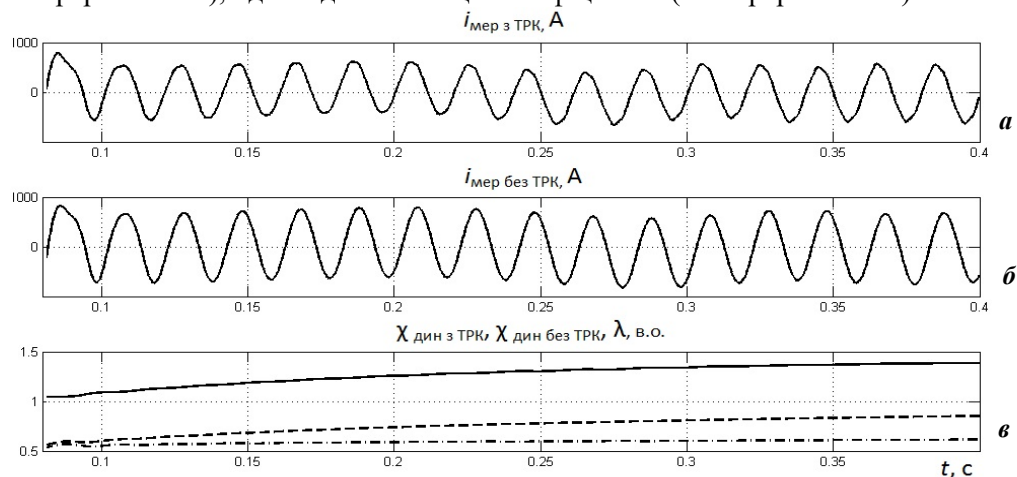


Рис. 1

**Приклад 2.** Аналогічні розрахунки проведено й у випадку, коли в мережі замість одномостового ТРК підключено двохмостовий ТРК, розглянутий у роботі [6]. Відмінністю ТРК у прикладі 2 від розглянутого в роботі [6] є те, що: 1) один вентильний міст підключено безпосередньо до мережі без використання трансформатора, а другий, як і раніше, – через фазозсувний трансформатор; 2) паралельно обом мостам підключено зібрані у трикутник силові конденсатори з сумарною ємністю у плечі 850 мкФ. На рис. 2 для цього випадку побудовано залежності, аналогічні наведеним на рис. 1.

З залежностей  $\lambda(t)$  на рис. 1 і 2 витікає, що використання двохмостового ТРК є більш ефективним.

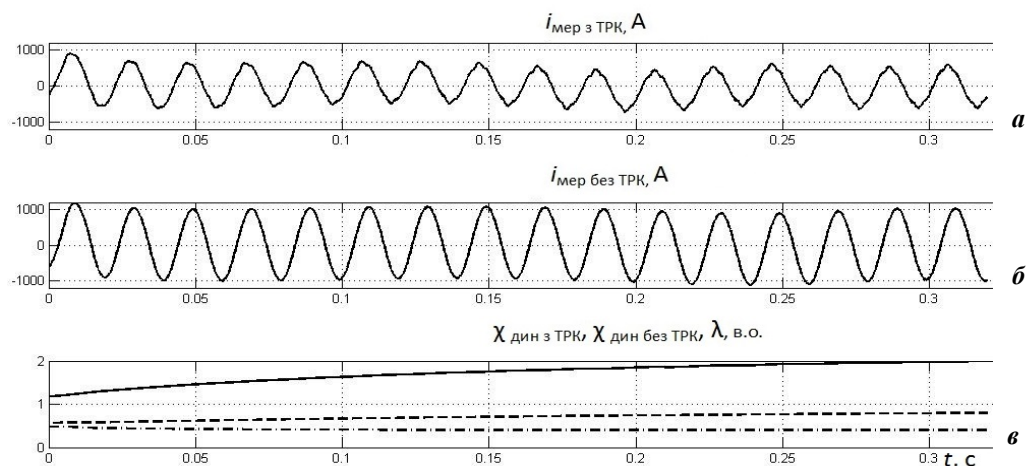


Рис. 2

**Висновки.** Введений у розгляд критерій  $\chi_{\text{дин}}$  для оцінки енергетичних аспектів перехідних процесів стосовно електричних мереж у режимі пуску асинхронних машин з успіхом може застосовуватися для порівняльної оцінки ефективності використання у мережі вентильних компенсаційних перетворювачів, які коригують пускові режими.

*Роботу виконано за рахунок коштів бюджетної програми «Напівпровідникові матеріали, технології і датчики для технічних систем діагностики, контролю та управління» (КПКВК 6541030).*

1. Дрехслер Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке. М.: Энергоатомиздат, 1985. 112 с.
2. Артеменко М.Ю., Каплун В.В., Бобровник В.М., Поліщук С.Й. Застосування активних фільтрів для зменшення втрат енергії трифазних систем електропостачання. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 4. С. 53-56. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.053>
3. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи. Том 1. Москва: Энергия, 1978. 592 с.
4. Schrader H.J. Zur Definition der Scheinleistung in Drehstromnetzen. *Zeitschrift fur Instrumentkunde*. 1965. Sv. 73. Es. 11. Pp. 293-298.
5. Чиженко О.І., Рибіна О.Б., Трач І.В. Напівпровідниковий регулятор для коригування режимами мережі в разі прямого запуску асинхронних двигунів з'являючої потужності. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2019. Вип. 54. С. 95-102. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.095>
6. Буткевич О.Ф., Чиженко О.І., Попович О.М., Трач І.В. Вплив FACTS на режими електричної мережі за прямого пуску потужної асинхронної машини у складі комплексного навантаження. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 6. С. 62-68. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.062>

#### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОНЯТИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТРОЙСТВ КОРРЕКЦИИ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ СЕТИ**

**А.И. Чиженко**, докт.техн. наук, **А.Н. Попович**, докт.техн.наук, **И.В. Трач**, канд.техн.наук, **О.Б. Рыбина**, канд.техн.наук  
**Институт электродинамики НАН Украины,**

**пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина. E-mail: [alivchizh@ukr.net](mailto:alivchizh@ukr.net), [popovich1955@ukr.net](mailto:popovich1955@ukr.net), [igor.trach@ied.org.ua](mailto:igor.trach@ied.org.ua)**

*Обосновано распространение понятия коэффициента мощности, которое определено для цепей с периодическими напряжением и токами, на трехфазные цепи с несимметричными непериодическими напряжением и токами. Показано, что это понятие целесообразно как при рассмотрении переходных процессов, возникающих в электрических сетях в режимах пуска мощных асинхронных машин, так и при сравнительной оценке эффективности применения тех или иных технических устройств корректировки этих режимов.* Бібл. 6, рис. 2.

**Ключевые слова:** коэффициент мощности, несимметричные непериодические напряжения и токи, оценка эффективности средств коррекции режимов электрической сети

#### **USING THE CONCEPT OF POWER FACTOR FOR ESTIMATING THE DEVICES EFFICIENCY FOR CORRECTION OF NETWORKS TRANSITIONAL MODES**

**O.I. Chyzenko, O.M. Popovych, I.V. Trach, O.B. Rybina**

**Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,**

**Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine. E-mail: [alivchizh@ukr.net](mailto:alivchizh@ukr.net), [popovich1955@ukr.net](mailto:popovich1955@ukr.net), [igor.trach@ied.org.ua](mailto:igor.trach@ied.org.ua)**

*The expansion of the concept of power factor, that defined for circuits with periodic voltage and currents, to three-phase circuits with asymmetric non-periodic voltage and currents is justified. It is shown that this concept is advisable both when considering transients these occur in electric networks in the start-up modes of powerful asynchronous machines, and when evaluating the effectiveness of the use of various technical devices for these modes for correcting.* References 6, figures 2.

**Keywords:** power factor, circuits of asymmetrical non-periodic voltages and currents, estimation of efficiency of modes correction means of electric network

1. Drechsler R. Measurement and evaluation of the quality of electric power with asymmetric and non-linear load. Moskva: Energoatomizdat, 1985. 112 p. (Rus)
2. Artemenko M.Yu., Kaplun V.V., Bobrovnyk V.M., Polishchuk S.Y. Active filters application for energy losses reduction in three-phase power supply systems. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 4. Pp. 53-56. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.053> (Ukr)
3. Atabekov G.I. Theoretical foundations of electrical engineering. Linear electrical circuits. Vol. 1. Moskva: Enerhyia, 1978. 592 p. (Rus)
4. Schrader H.J. Zur Definition der Scheinleistung in Drehstromnetzen. *Zeitschrift fur Instrumentkunde*. 1965. Sv. 73. Es. 11. S. 293-298 (Germ)
5. Chyzenko O.I., Rybina O.B., Trach I.V. Semiconductive regulator for managing the network modes running in direct start of the asynchronous machine of the comparable capacity. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2019. No 54. Pp.95-102. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.095> (Ukr)
6. Butkevych O.F., Chyzenko O.I., Popovych O.M., Trach I.V. An influence of the FACTS upon an electrical network's mode during direct start-up asynchronous machine in the complex load's composition. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 6. Pp. 62-68. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.062> (Ukr)

Надійшла 04.03.2020

Остаточний варіант 06.04.2020