

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, popovich1955@ukr.net, igor.trach@ied.org.ua, 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 χ , яке визначено за формулою (7), можна розповсюдити й на випадок неперіодичних напруги і струмів. В цьому випадку коефіцієнт χ 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, b). 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).

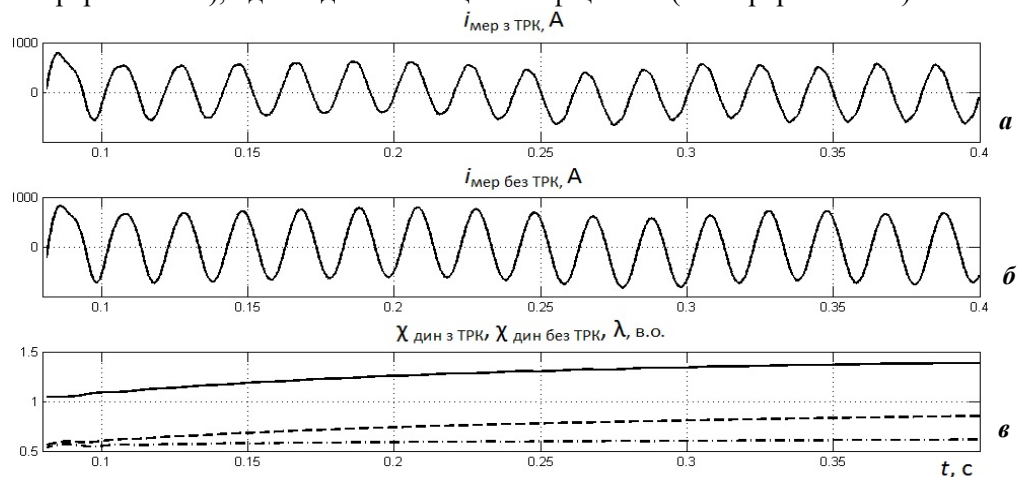


Рис. 1

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.

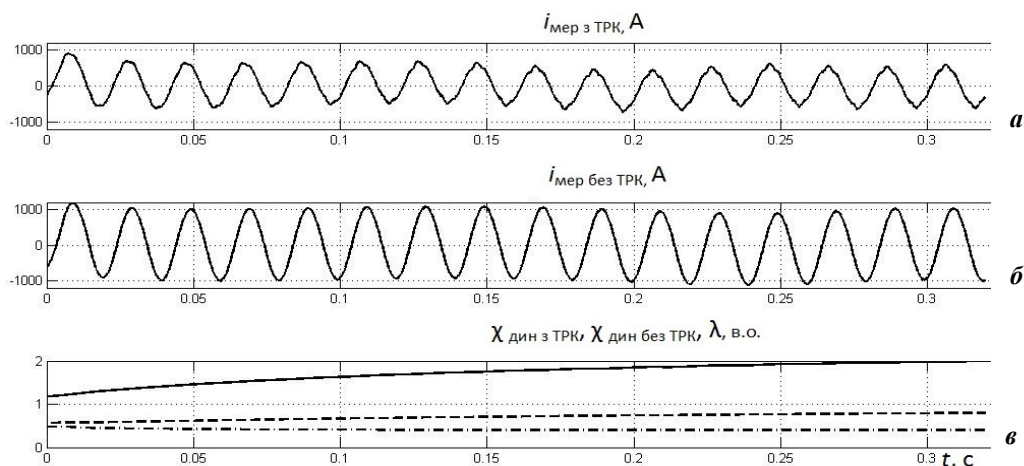


Рис. 2

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 вентиляційних 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 зрівняної 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, popovich1955@ukr.net, 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, popovich1955@ukr.net, 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