

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З РЕГУЛЬОВАНИМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Г.Г. Жемеров^{1*}, докт.техн.наук, Н.О. Ільїна^{1**}, докт.техн.наук, А.В. Машура¹, Д.В. Тугай^{2***}, докт.техн.наук

¹ – Національний технічний університет «ХПІ»,

вул. Кирпичова, 2, 61002, Харків, Україна,

² – Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова,

вул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харків, Україна,

e-mail: tugaydmytro@gmail.com

Отримано аналітичні співвідношення для розрахунку максимально можливого коефіцієнта корисної дії системи електропостачання з регульованим електроприводом для трьох режимів роботи, обумовлених напрямком потоку енергії в системі – прямого, зворотного і двоспрямованого. Показано, що навіть за високих значень ККД системи електропостачання в прямому і зворотному потоках (у разі високих значень коефіцієнта повернення енергії) ККД у двоспрямованому потоці може бути неприйнятно малим. Бібл. 4, рис. 3.

Ключові слова: система електропостачання, коефіцієнт повернення енергії, коефіцієнт корисної дії.

У частотно-регульованих електроприводах змінного струму і чотириквADRANTНИХ електроприводах постійного струму, як правило, використовується рекуперативне гальмування приводного двигуна, коли потік енергії, спрямований від навантаження до джерела, представляє собою промислову мережу трифазної змінної напруги, акумулятор або конденсаторний накопичувач енергії. Прийнято вважати, що режим рекуперації завжди забезпечує енергозбереження [1, 2]. Однак у погано спроектованій і некоректно розрахованій системі можна отримати зворотний ефект – зниження сумарного ККД системи внаслідок додаткових втрат енергії.

Метою статті є отримання аналітичних співвідношень для розрахунку ККД системи електропостачання (СЕ) з рекуперативним гальмуванням, що обумовлює двоспрямований енергетичний потік в елементах системи, з урахуванням коефіцієнта повернення енергії.

Еквівалентна схема системи електропостачання. Відповідно до сучасних тенденцій розвитку енергетики й силової електроніки шляхом створення Smart Grid систем різного рівня при розрахунку ККД необхідно враховувати сумарні втрати енергії у всіх елементах СЕ і у всіх можливих режимах її роботи [3]. Еквівалентна схема системи електроприводу у прямому потоці енергії показана на рис. 1.

Промислова мережа змінної напруги представлена джерелом напруги «Source», кабельна лінія – блоком резисторів «Line», а навантаження – блоком джерел струму «Load». Потужність резистивного короткого замикання на клеммах навантаження P_{SC} , значення якої використовується у розрахунках, визначається після замикання ключів блока « P_{SC} ».

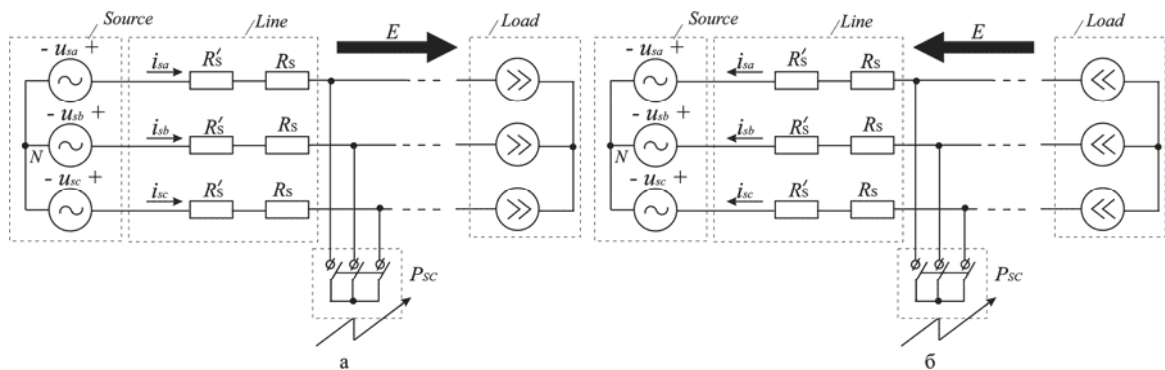


Рис. 1

Еквівалентна схема для прямого потоку енергії (рис. 1, а) відрізняється від еквівалентної схеми для зворотного потоку енергії (рис. 1, б) тільки напрямком потоку енергії й режимом роботи джерел струму і напруги. Резистори R_s відповідають опору трижильного кабелю, а резистори R'_s – опору інших елементів системи, наприклад, перетворювального трансформатора. Паралельно навантаженню може бути підключений силовий активний фільтр (САФ). В обох схемах не враховуються фазні індуктивності кабелів, індуктивності реакторів та індуктивності розсіювання обмоток трансформатора. Вказане припущення обґрунтовується тим, що падіння на-

© Жемеров Г.Г., Ільїна Н.О., Машура А.В., Тугай Д.В., 2018

ORCID: * <http://orcid.org/0000-0002-3469-0121>, ** <http://orcid.org/0000-0001-5644-862X> ;

*** <http://orcid.org/0000-0003-2617-0297>

пруги на індуктивностях є на порядок меншим напруги джерела і практично не впливає на ККД СЕ. Під час розрахунку і моделювання індуктивності можуть бути перенесені до блоку навантаження «Load». Якщо відразу після клем увімкнення блоку навантаження є активні опори (наприклад, опори з'єднувальної кабельної лінії з боку навантаження), то їх можна перенести в резистор R'_S , що дає змогу врахувати втрати енергії у навантаженні.

Як показано у [4], основним параметром розглянутих еквівалентних схем є відношення потужності резистивного короткого замикання на клеммах навантаження до корисної активної потужності навантаження

$$k_{SC} = P_{SC} / P_{usf}, \quad (1)$$

де P_{usf} – середнє значення активної потужності навантаження в інтервалі часу, що дорівнює періоду повторюваності T , обчисленому як відрізок часу, який містить ціле число q періодів повторюваності напруги джерела і число r періодів повторюваності графіка миттєвої активної потужності навантаження; числа q і r взаємно прості. За випадкового характеру процесів у СЕ сумарний період повторюваності визначається приблизно з урахуванням залежності ККД СЕ від змінної складової графіка миттєвої активної потужності.

Відзначимо, що розрахунок P_{SC} в еквівалентній схемі проводиться за відімкненого навантаження.

Потужність резистивного КЗ визначається із співвідношення

$$P_{SC} = 3U_{sm}^2 / 2(R_S + R'_S), \quad (2)$$

де U_{sm} – амплітуда синусоїдальної напруги джерела.

Максимально можливий ККД системи електропостачання з двоспрямованим потоком енергії.

Відповідно до теореми про теоретично можливий мінімум втрат у трифазній СЕ [4] максимально можливий ККД СЕ з односпрямованим потоком енергії однозначно визначається відношенням потужності резистивного КЗ до повної, обчисленої в періоді повторюваності, активної потужності навантаження, тобто співвідношенням (1). Співвідношення для розрахунку максимально можливого ККД трифазної СЕ у прямому потоці $\eta_{\max \rightarrow}$ можна отримати з аналізу рис. 1 [4]

$$\eta_{\max \rightarrow} = 0,5 + \sqrt{0,25 - (k_{SC})^{-1}}. \quad (3)$$

Для врахування частки енергії, що повертається до джерела, введемо коефіцієнт повернення енергії до

$$0 \leq k_E = \frac{P_{S \leftarrow}}{P_{S \rightarrow}} \leq 1, \quad (4)$$

де $P_{S \leftarrow}$, $P_{S \rightarrow}$ – потужності джерела у прямому і зворотному потоках, причому $P_{S \leftarrow} < P_{S \rightarrow}$.

З урахуванням того, що для еквівалентної схеми на рис. 1, б корисна потужність вимірюється на записках джерела

$$P_{S \leftarrow} = P_{usf} \cdot k_E = 3U_{sm} \sqrt{\frac{\Delta P_{\min \leftarrow}}{6(R_S + R'_S)}}. \quad (5)$$

Підставивши (2) у (5), можна визначити мінімально можливу (в долях середньої корисної потужності P_{usf}) потужність втрат $\Delta P_{\min \leftarrow}$ або максимально можливий ККД трифазної СЕ у зворотному потоці

$$\eta_{\max \leftarrow} = \frac{1}{1 + \Delta P_{\min \leftarrow}} = \frac{1}{1 + k_E^2 k_{SC}^{-1}}. \quad (6)$$

На рис. 2, а показано залежність максимально можливого ККД від параметра k_{SC} для односпрямованих прямого і зворотного потоків енергії за $k_E = 1$, а на рис. 2, б – залежності максимально можливого ККД у зворотному потоці від параметра k_{SC} за фіксованих значень коефіцієнта повернення енергії.

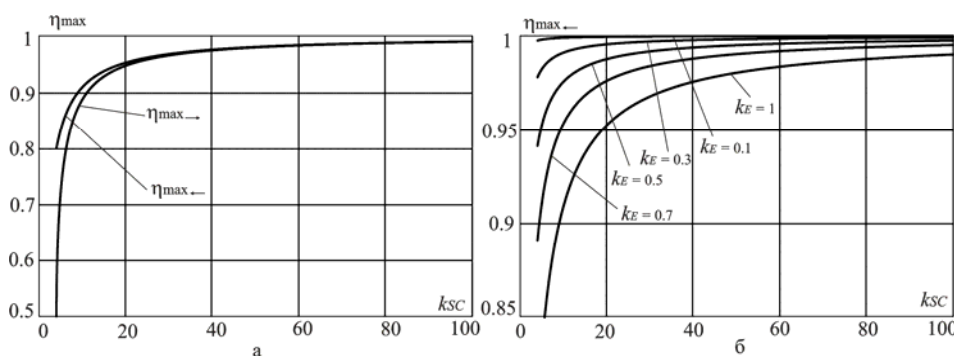


Рис. 2

тужності P_{usf} (що призводить до збільшення параметра k_{SC}) і щільності лінійних струмів у трижильному кабелі.

Аналізуючи СЕ з двоспрямованим потоком енергії, можна вважати, що

З рис. 2 видно, що за інших однакових умов ККД під час передачі енергії у зворотному напрямку вищий, ніж у випадку прямого напрямку. Відмінність у ККД при $k_{SC} > 5$ не перевищує 12%, а при $k_{SC} > 10$ – не перевищує 3.9%. Збільшення максимально можливого ККД у зворотному потоці пояснюється зменшенням розрахункового значення середньої корисної потужності

$$P_{SC \rightarrow} = P_{SC \leftarrow} = P_{SC}. \quad (8)$$

Максимально можливий ККД СЕ у двоспрямованому потоці можна визначити, врахувавши долю енергії, що споживається з мережі з урахуванням частки енергії, що повертається до джерела, і втрат в обох односпрямованих потоках

$$\eta_{\max \leftrightarrow} = \frac{P_{S \rightarrow} - P_{S \leftarrow} - \Delta P_{\min \rightarrow} - \Delta P_{\min \leftarrow}}{P_{S \rightarrow} - P_{S \leftarrow}} = \frac{\eta_{\max \rightarrow} (2 - \eta_{\max \leftarrow}^{-1}) - k_E}{1 - k_E}. \quad (9)$$

На рис. 3, а представлено залежності максимально можливого ККД від параметра k_{SC} для СЕ з двоспрямованим потоком енергії за фіксованих значень коефіцієнта повернення енергії.

З аналізу співвідношення (9) і рис. 3, а видно, що навіть за невеликих втрат енергії в кабелях і джерелі живлення при збільшенні коефіцієнта повернення енергії сумарний ККД різко зменшується. Прирівнюючи (9) до нуля, можна отримати співвідношення, що обумовлює верхні граничні значення коефіцієнта повернення $k_{E \max}$ для кожного k_{SC} , при досягненні якого ККД СЕ дорівнюватиме нулю

$$k_{E \max} = 0.5 k_{SC} \left(\sqrt{\eta_{\max \rightarrow}^{-2} + 4 k_{SC}^{-1}} - \eta_{\max \rightarrow}^{-1} \right). \quad (10)$$

Наприклад, для $k_{SC} = 4$, $k_{E \max} = 0.472$.

Реальний ККД системи електропостачання з двоспрямованим потоком енергії. Реальний ККД трифазної СЕ з регульованим електроприводом буде меншим за максимально можливий за рахунок додаткових втрат, обумовлених миттєвою реактивною потужністю трифазної системи ΔP_Q і пульсаціями миттєвої активної потужності ΔP_{puls} [4].

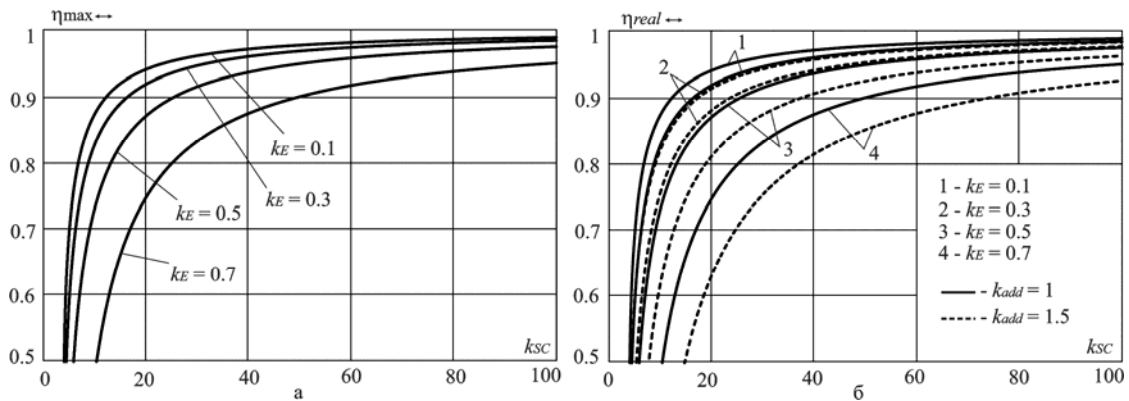


Рис. 3

Враховуючи залежність складових додаткових втрат від мінімально можливої потужності втрат, а також від квадрата середньоквадратичних значень відповідних потужностей [4], реальний ККД СЕ з регульованим електроприводом можна визначити за співвідношенням

$$\eta_{real \leftrightarrow} = \left[\left(1 - k_E^2 k_{SC}^{-1} k_{add \leftarrow} \right) \cdot \left(1 + \left(\left(0.5 + \sqrt{0.25 - k_{SC}^{-1}} \right)^{-1} - 1 \right) k_{add \rightarrow} \right)^{-1} - k_E \right] \cdot (1 - k_E)^{-1}, \quad (11)$$

де $k_{add \rightarrow} = 1 + Q_{RMS* \rightarrow}^2 + P_{puls* \rightarrow}^2$, $k_{add \leftarrow} = 1 + Q_{RMS* \leftarrow}^2 + P_{puls* \leftarrow}^2$ – коефіцієнти, що враховують додаткові втрати в трифазній СЕ у прямому і зворотному потоках; $Q_{RMS* \rightarrow}$, $Q_{RMS* \leftarrow}$, $P_{puls* \rightarrow}$, $P_{puls* \leftarrow}$ – середньоквадратичні значення реактивної потужності та пульсацій миттєвої активної потужності, розраховані у прямому і зворотному потоках відповідно.

На рис. 3, б представлено залежності реального ККД СЕ при двоспрямованому потоці від параметра k_{SC} для різних сполучень коефіцієнтів k_E і k_{add} за умови $k_{add \rightarrow} = k_{add \leftarrow}$. З рисунка видно, що для всіх значень коефіцієнта повернення енергії k_E додаткові складові потужності втрат призводять до зменшення ККД СЕ у цьому режимі. Також відбувається зменшення граничного значення коефіцієнта повернення енергії. Наприклад, для коефіцієнта додаткових втрат $k_{add} = 1.5$ і $k_{SC} = 4$ граничне значення коефіцієнта повернення зменшується до $k_{E \max} = 0.378$.

Висновки. При розрахунку ККД системи електроприводу треба враховувати опір усіх резисторів еквівалентної системи і всі можливі режими обміну енергією в СЕ. Можливі три режими обміну енергією: з прямим потоком енергії від джерела живлення до навантаження, зі зворотним потоком енергії від навантаження до джерела живлення і з двоспрямованим напрямком потоку енергії. У схемі з рекуперацією енергії з навантажен-

ня до джерела живлення навіть при близькому до одиниці ККД в окремо взятих прямому і зворотному потоках енергії сумарний ККД залежить від коефіцієнта повернення і суттєво зменшується. Наприклад, за $\eta_{\max\rightarrow} = 0.947$, $\eta_{\max\leftarrow} = 0.956$, $k_E = 0.7$ і $k_{SC} = 20$ теоретичне значення максимально можливого ККД у двоспрямованому потоці зменшується до 0.678.

1. Никифоров М.М., Каштанов А.Л., Кандаев В.А. Методика оценки потенциала энергоэффективности применения рекуперативного торможения. *Известия Транссиба*. 2012. № 1 (9). С. 72–78.
2. Костин Н.А., Никитенко А.В. Автономность рекуперативного торможения – основа надежной энергоэффективной рекуперации на электроподвижном составе постоянного тока. *Залізничний транспорт України*. 2014. № 3. С. 15–23.
3. Артеменко М.Ю., Батрак Л.М., Михальський В.М., Поліщук С.Й. Аналіз можливості збільшення ККД трифазної чотирипровідної системи живлення засобами паралельної активної фільтрації. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 6. С. 12–18.
4. Zhemerov G., Ilina N., Tugay D. The Theorem of Minimum Energy Losses in Three-Phase Four-Wire Energy Supply System. 2016 2nd IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS-2016). June 07-11, 2016, Kyiv, Ukraine, Pp. 52-54. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2016.7521889>

УДК 621.314

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С РЕГУЛИРУЕМЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Г.Г. Жемеров¹, докт.техн.наук, Н.А. Ильина¹, докт.техн.наук, А.В. Машура¹, Д.В. Тугай², докт.техн.наук
¹ – Национальный технический университет «ХПИ», ул. Кирпичова, 2, Харьков, 61002, Украина,
² – Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова,
ул. Маршала Бажанова, 17, Харьков, 61002, Украина, e-mail: tugaydmytro@gmail.com

Получены аналитические соотношения для расчета максимально возможного коэффициента полезного действия системы электроснабжения с регулируемым электроприводом для трех режимов работы, обусловленных направлением потока энергии в системе – прямого, обратного и двунаправленного. Показано, что даже при высоких значениях КПД системы электроснабжения в прямом и обратном потоках при высоких значениях коэффициента возврата энергии КПД в двунаправленном потоке может быть катастрофически малым. Библ. 4, рис. 3.

Ключевые слова: система электроснабжения, коэффициент возврата энергии, коэффициент полезного действия.

EFFICIENCY OF REGENERATIVE BRAKING IN ENERGY SUPPLY SYSTEMS WITH ELECTRIC REGULATED DRIVES

G.G. Zhemerov¹, N.A. Ilina¹, A.V. Mashura¹, D.V. Tugay²
¹ – National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”, Kirpichova str., 2, Kharkiv, 61002, Ukraine,
² – O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv,
Marshal Bazhanov str., 17, Kharkiv, 61002, Ukraine, e-mail: tugaydmytro@gmail.com

Analytical formulas for calculating the maximum possible efficiency of energy supply system with electric regulated drive for three operating modes due to the direction of the energy flow in the system - direct, reverse and bi-directional are obtained. It is shown that even at high values of the energy supply system efficiency in the direct and reverse flows, at high values of the energy return factor, the efficiency in the bi-directional flow can be catastrophically low. References 4, figures 3.

Key words: power supply system, energy return factor, efficiency.

1. Nykyforov M.M., Kashtanov A.L., Kandaev V.A. Methods for assessing the potential for energy efficiency in the application of regenerative braking. *Izvestiia Transsiba*. 2012. No 1 (9). Pp. 72–78. (Rus)
2. Kostin N.A., Nikitenko A.V. Autonomy of recuperative braking - the basis of reliable energy-efficient recovery on the electromotive force constant current. *Zaliznychnyi transport Ukrainy*. 2014. No 3. Pp. 15–23. (Rus)
3. Artemenko M.Yu., Batrak L.M., Mykhalskyi V.M., Polishchuk S.Y. Analysis of possibility to increase the efficiency of three-phase four-wire power system by means of shunt active filter. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2015. No 6. Pp. 12–18. (Ukr)
4. Zhemerov G., Ilina N., Tugay D. The Theorem of Minimum Energy Losses in Three-Phase Four-Wire Energy Supply System. 2016 2nd IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS-2016). June 07-11, 2016, Kyiv, Ukraine. Pp. 52-54. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2016.7521889>

Надійшла 05.03.2018

Остаточний варіант 17.04.2018