

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ОПТИМІЗАЦІЇ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ В АСИНХРОННОМУ ГЕНЕРАТОРІ

Марчук В.М., магістрант, Приймак Б.І., к.т.н., доц.

НТУУ «КПІ», кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Вступ. На сьогодні короткозамкнені асинхронні генератори (АГ) мають значні перспективи застосування в електростанціях невеликої потужності. За умов значних змін швидкості обертання ротора та навантаження генератора необхідна якість його функціонування досягається шляхом застосування систем векторного керування [1-3]. Поліпшення енергетичних властивостей АГ можливе за рахунок оптимізації втрат потужності у ньому. Як відомо, електромагнітні втрати в усталених процесах електричних машин, як у рушійному, так і в генераторному режимах роботи можна мінімізувати шляхом встановлення оптимального потоку намагнічування. В наш час існує чимало способів побудови систем оптимізації втрат, запропонованих для асинхронних двигунів [4, 5]. За врахування певних особливостей ці способи можна застосовувати і для АГ.

Для проектування високоякісної системи оптимізації втрат треба володіти обґрунтованими вимогами щодо необхідної точності підтримання оптимального потоку (потокозчеплення). Ці вимоги можна сформулювати на основі залежностей помилок оптимізації втрат потужності від розбіжностей між реальним та оптимальним потокозчепленням, які утворюються внаслідок неточного оцінювання та регулювання потокозчеплення. Проте в літературних джерелах такої інформації не викладено. Тому є актуальним проведення дослідження зазначеного питання, чому і присвячена ця стаття.

Метою роботи є дослідження впливу на точність оптимізації втрат потужності в асинхронному генераторі розходжень між реальним та оптимальним значеннями модуля вектора потокозчеплення ротора.

Матеріал дослідження. Опис повних втрат потужності в асинхронному двигуні з метою їх оптимізації представлено в [5]. Оскільки цей опис відповідає як рушійному режиму роботи двигуна, так і режиму рекуперативного гальмування (генераторний режим), то він може бути застосований у даній

статті для дослідження питань оптимізації втрат потужності в АГ.

Електромагнітні втрати потужності в АГ, що охоплюють електричні втрати в активних опорах статора та ротора, магнітні втрати у залізі статора і ротора, а також додаткові втрати, можуть бути враховані за допомогою схеми заміщення фази АГ, що представлена

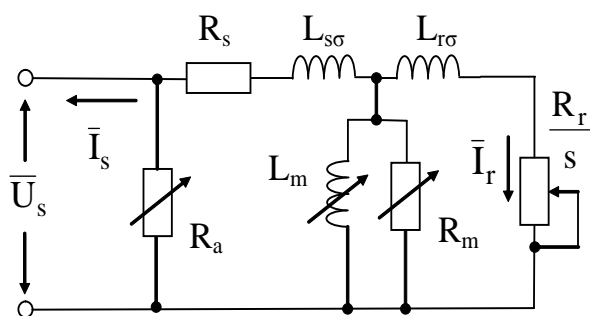


Рисунок 1 – Схема заміщення фази АГ

на рис. 1. У цій схемі позначено: $\overline{U}_s, \overline{I}_s, \overline{I}_r$ – відповідно вектори напруги статора, струму статора та струму ротора; R_s, R_r – відповідно активні опори фаз статора та ротора, зведеного до статора; $L_m, L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$ – відповідно індуктивності намагнічування та розсіювання; R_m – опір, що враховує магнітні втрати; R_a – опір, що враховує додаткові втрати; $s = (\omega_0 - z_p \omega) / \omega_0$ – ковзання двигуна; ω_0 – кутова швидкість (електрична) обертання магнітного поля; z_p – кількість пар полюсів; ω – кутова швидкість обертання ротора генератора.

В [5] записано вираз для обчислення втрат згідно зі схемою заміщення (рис. 1), куди також додані механічні втрати від в'язкого тертя, у вигляді

$$P = \frac{2}{3} \left(\frac{M_e}{z_p \Psi_r} \right)^2 \left(\left| \frac{Z_p + Z_m}{Z_m} \right|^2 R_s + R_r + \frac{|Z_r|^2}{R_m} + R_a \right) + K_\omega \omega^2, \quad (1)$$

де $Z_s = R_s + j2\pi f_0 L_{s\sigma}$; $Z_r = R_r / s + j2\pi f_0 L_{r\sigma}$; $Z_\Sigma = Z_s + (Z_m Z_r) / (Z_m + Z_r)$; $Z_m = j2\pi f_0 L_m R_m / (j2\pi f_0 L_m + R_m)$; $R_a = |Z_\Sigma Z_r|^2 / (|Z_\Sigma - Z_s|^2 K_a \omega^2)$; $f_0 = |\omega_0| / 2\pi$; $\omega_0 = z_p \omega + 2R_r M_e / (3z_p \Psi_r^2)$; $j = \sqrt{-1}$, M_e – електромагнітний момент; Ψ_r – модуль вектора потокозчеплення ротора; K_a, K_ω – коефіцієнти додаткових та механічних втрат відповідно.

Використовуючи (1), оптимальне значення модуля вектора потокозчеплення ротора Ψ_{ro} в сенсі мінімуму втрат потужності для усталених процесів роботи при $M_e = const$, $\omega = const$ можна визначити як

$$\Psi_{ro} = \arg \min_{\Psi_r} P(\Psi_r, M_e, \omega)_{|\omega, M_e}. \quad (2)$$

У виконуваних нижче дослідженнях інтервал допустимих значень Ψ_r задамо як $\Psi_r \in [0, 01, 1] \cdot \Psi_m$, де Ψ_m – номінальне потокозчеплення ротора (індекси “п” та “о” далі означатимуть номінальне та оптимальне значення величин), а множину $\Omega(\omega, M_e)$ визначимо як $\Omega(\omega, M_e) = \{\omega \in [0, 1] \cdot \omega_n; M_e \in [-1, -0, 01] \cdot M_{en}\}$.

У статті для числових досліджень використані дані АГ на основі типового чотириполюсного асинхронного двигуна потужністю 1,5 кВт.

Оцінимо можливий ефект від оптимізації сумарних втрат в АГ. Здійснивши числовим шляхом на множині Ω мінімізацію втрат (1) згідно з (2), отримані сукупності значень оптимального потокозчеплення Ψ_{ro} та оптимальних (мінімальних) втрат потужності $P_o = P(\Psi_{ro})$. Поверхні $\Psi_{ro}(M_e, \omega)$ та $P_o(M_e, \omega)$ зображені на рис. 2,3 відповідно, де M_e та ω нормовані щодо номінальних значень і вимірюються у відносних одиницях (в.о.).

Далі за (1) визначимо втрати потужності в АГ при векторному керуванні з постійним потоком $\Psi_r = const = \Psi_m$ як $P_c = P(\Psi_m)$ і обчислимо економію потужності $\Delta P = P_c - P_o$. Поверхні $P_c(M_e, \omega)$ та $\Delta P(M_e, \omega)$ зображені на рис. 4,5 відповідно. Як видно з рис. 5, завдяки оптимізації втрат в АГ можна отримати суттєву економію потужності, яка зростає при зменшенні M_e та збільшенні ω .

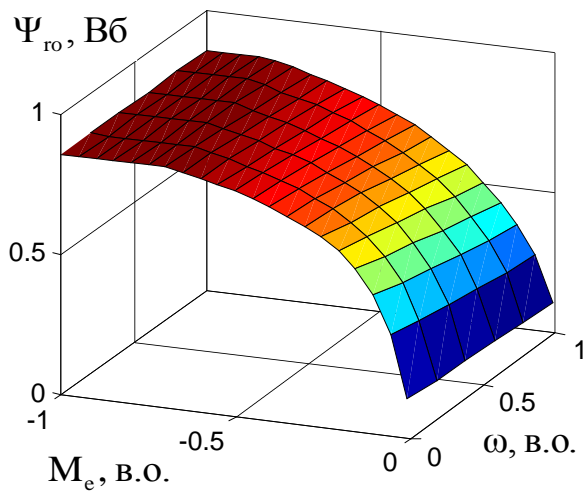


Рисунок 2 – Оптимальне потокозчеплення ротора АГ

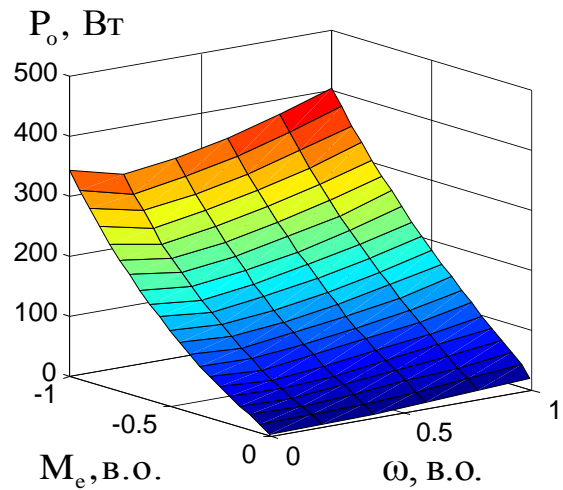


Рисунок 3 – Мінімальні втрати потужності в АГ при $\Psi_r = \Psi_{ro}$

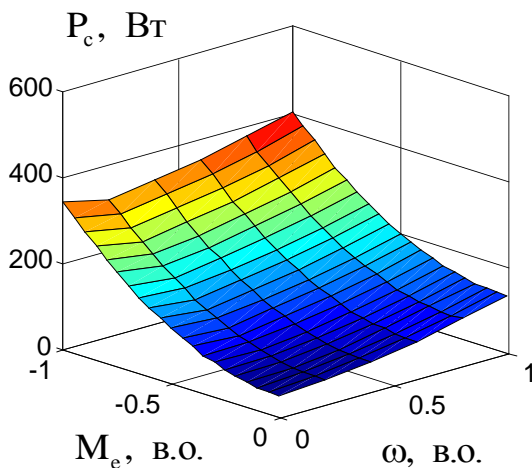


Рисунок 4 – Втрати потужності в АГ при номінальному потоці $\Psi_r = \Psi_m$

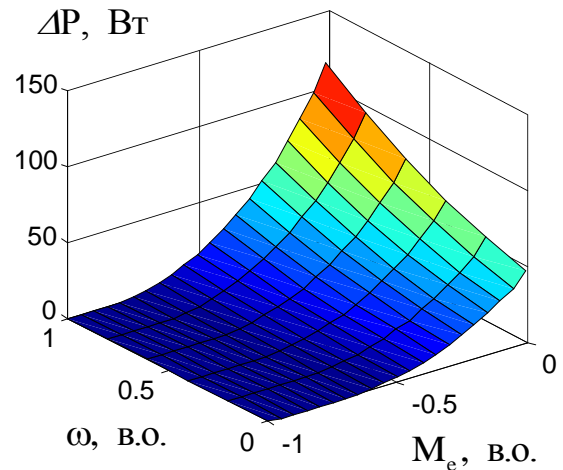


Рисунок 5 – Економія потужності при оптимізації втрат в АГ

Виконаємо дослідження впливу відхилень реального від оптимального потокозчеплення ротора на точність оптимізації втрат потужності в АГ. Для цього пропонується методика у вигляді наступних 5-ти кроків.

1. На множині Ω згідно з (2) обчислюються масиви значень оптимального потокозчеплення $\Psi_{ro}(M_e, \omega)$ та мінімальних втрат $P_o(M_e, \omega)$.

2. Задається відхилення потокозчеплення $\Delta\Psi_r$ і визначається варійоване потокозчеплення $\tilde{\Psi}_r = \Psi_{ro} + \Delta\Psi_r$, для якого за (1) обчислюються варійовані втрати потужності $\tilde{P} = P(\tilde{\Psi}_r)$. У такий спосіб отримується масив $\tilde{P}(M_e, \omega)$.

3. За формулою $\delta P = (\tilde{P} - P_o) / P_n$, де P_n – номінальні втрати, обчислюються відносні помилки оптимізації втрат потужності δP і таким чином отримується масив $\delta P(M_e, \omega)$.

4. У масиві $\delta P(M_e, \omega)$ відшукуються максимальне значення $\delta P_{\max} = \max \{ \delta P(M_e, \omega) \}$ та середнє значення $\delta P_{\text{сеп}} = \text{mean} \{ \delta P(M_e, \omega) \}$ помилок оптимізації втрат потужності.

5. Кроки 2-4 повторюються для інших відхилень потокозчеплення в межах, що задані у дослідженні.

За даною методикою були проведені дослідження для відносних відхилень потокозчеплення ротора $\delta \Psi_r$ в межах $\delta \Psi_r \in [-30\%, 30\%]$, де $\delta \Psi_r = \Delta \Psi_r \Psi_{ro}^{-1} \times 100\%$, $\Delta \Psi_r = \tilde{\Psi}_r - \Psi_{ro}$. Отримані результати занесені в таблицю, у клітинках якої верхні значення відповідають додатним, а нижні – від’ємним значенням $\delta \Psi_r$.

Таблиця – Помилки оптимізації втрат в АГ за відхилень Ψ_r від Ψ_{ro}

$\delta \Psi_r, \%$	± 3	± 6	± 9	± 12	± 15	± 18	± 21	± 24	± 27	± 30
$\delta P, \%$										
δP_{\max}	$\frac{0,3}{2,14}$	$\frac{0,74}{4,9}$	$\frac{1,45}{8,3}$	$\frac{2,23}{12,3}$	$\frac{3}{17}$	$\frac{3,6}{22,5}$	$\frac{4,77}{28,8}$	$\frac{5,12}{36}$	$\frac{6,13}{44,3}$	$\frac{6,37}{53,7}$
$\delta P_{\text{сеп}}$	$\frac{0,05}{0,34}$	$\frac{0,17}{0,96}$	$\frac{0,33}{1,8}$	$\frac{0,5}{3}$	$\frac{0,66}{4,5}$	$\frac{0,82}{6,2}$	$\frac{0,98}{8,3}$	$\frac{1,12}{10,7}$	$\frac{1,27}{13,6}$	$\frac{1,4}{16,9}$

Для виявлення характеру змін помилок оптимізації втрат потужності були побудовані поверхні $\delta P(M_e, \omega)$ за найбільшого додатного $\delta \Psi_r = 30\%$ та найбільшого від’ємного $\delta \Psi_r = -30\%$ відхилень потокозчеплення. Ці поверхні зображені на рис. 6, 7 відповідно.

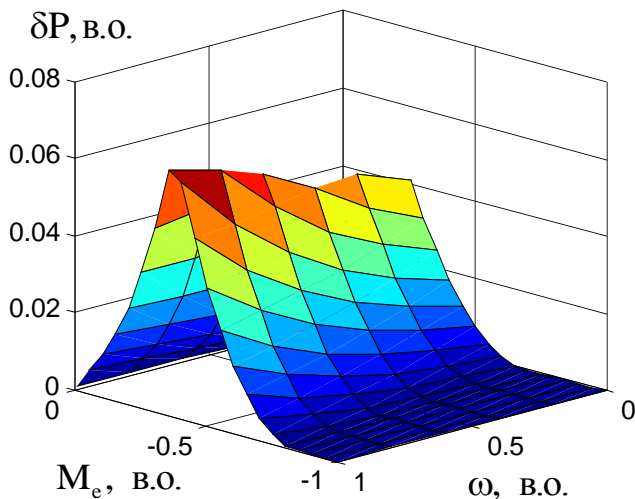


Рисунок 6 – Помилки оптимізації втрат при $\delta \Psi_r = 30\%$

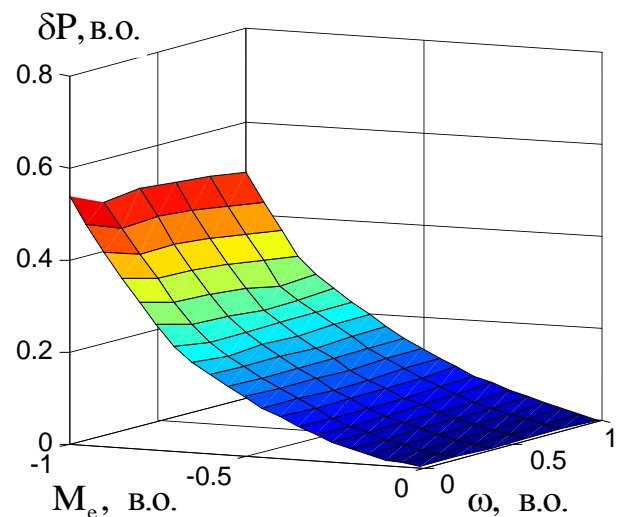


Рисунок 7 – Помилки оптимізації втрат при $\delta \Psi_r = -30\%$

Графіки залежностей максимальних δP_{\max} і середніх $\delta P_{\text{сеп}}$ помилок оптимізації втрат потужності від додатних і від’ємних відхилень потокозчеплення ротора показані відповідно на рис. 8,9.

Аналіз даних таблиці та рис. 6-9 засвідчує суттєву відмінність помилок

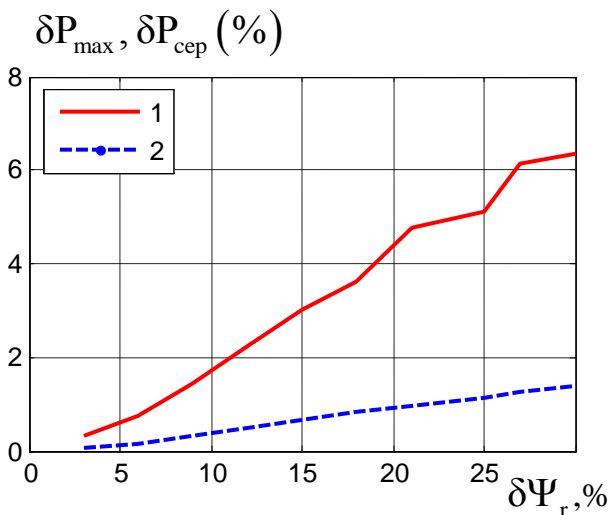


Рисунок 8 – Помилки оптимізації втрат за $\delta\Psi_r > 0$ (1 – δP_{\max} ; 2 – $\delta P_{\text{сеп}}$)

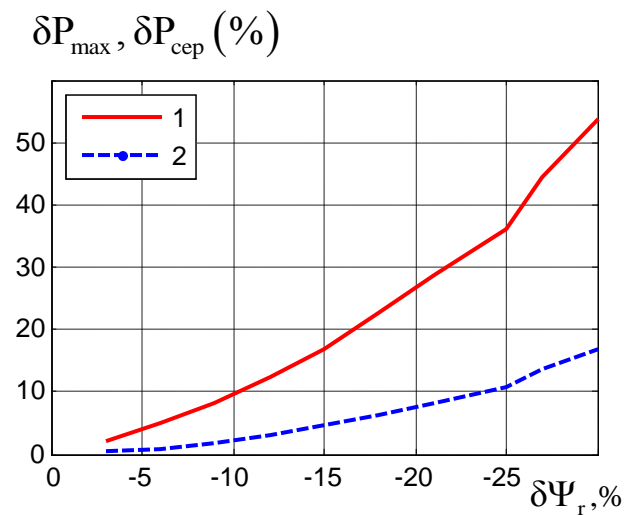


Рисунок 9 – Помилки оптимізації втрат за $\delta\Psi_r < 0$ (1 – δP_{\max} ; 2 – $\delta P_{\text{сеп}}$)

оптимізації втрат для додатних та від'ємних відхилень потокозчеплення ротора. Причиною відмінності є те, що при оптимізації втрат на множині Ω за $\delta\Psi_r > 0$ потокозчеплення $\tilde{\Psi}_r$, як і Ψ_{ro} , обмежується зверху на рівні Ψ_m . Проте за $\delta\Psi_r < 0$ ні Ψ_{ro} ні $\tilde{\Psi}_r$ нижньої межі, рівної $0,01\Psi_m$, не сягають. Саме тому поверхня на рис. 6 має екстремальний характер, де її максимум якраз відповідає умові $\tilde{\Psi}_r = \Psi_m$, а поверхня на рис. 7 має монотонний характер. У кількісному аспекті, як видно з рис. 8,9, помилки оптимізації втрат при $\delta\Psi_r < 0$ у 5-9 разів більші, ніж при $\delta\Psi_r > 0$. Розглядаючи гірший варіант (рис. 9), можна зазначити, що для отримання $\delta P_{\max} \leq 5\%$ та $\delta P_{\text{сеп}} \leq 1\%$, слід забезпечити $-6\% \leq \delta\Psi_r \leq 6\%$.

Висновки. Запропоновано методику і за нею виконано дослідження впливу на точність оптимізації втрат потужності в АГ відхилень реального від оптимального значень модуля вектора потокозчеплення ротора. Результати дослідження засвідчили істотну відмінність помилок оптимізації втрат для додатних та від'ємних відхилень потокозчеплення. Встановлено, що для обмеження максимальної (середньої) помилки оптимізації втрат на рівні 5% (1%), відхилення потокозчеплення ротора має не перевищувати $\pm 6\%$.

Перелік посилань

1. Liao Y.W., Levi E. Modelling and simulation of a stand-alone induction generator with rotor flux oriented control // Electric power sys. research, Vol. 46, No.2, 1998, pp. 141-153.
2. Ahmed T., Nishida K., Nakaoka M. Advanced control of PWM converter with variable-speed induction generator // IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol. 42, No. 4, 2006, pp. 934-945.
3. Chen Z., Guerrero J.M., Blaabjerg F. A review of the state of the art of power electronics for wind turbines // IEEE Trans. Power Elec., Vol. 24, No. 8, 2009, pp. 1859-1875.
4. Bazzi A.M., Krein P.T. Review of Methods for Real-Time Loss Minimization in Induction Machines // IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol. 46, No. 6, 2010, pp. 2319-2328.
5. Приймак Б.І. Векторне керування асинхронним електроприводом з нейромережною оптимізацією енерговитрат // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2008. – № 3 (21). – С. 61-71.