

## ПОЛІПШЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ВЕКТОРНО-КЕРОВАНОГО АВТОНОМНОГО АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

**Б.І. Приймак**, канд. техн. наук

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського",  
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна  
e-mail: b.i.pryumak@gmail.com

*Розглядається задача поліпшення енергоефективності автономного векторно-керованого асинхронного генератора (АГ). Для визначення оптимального значення магнітного потоку за критерієм мінімуму втрат потужності синтезована нейронна мережа. На входи мережі подаються сигнали оцінки моменту та швидкості генератора. При оптимізації втрат та оцінюванні потокозчеплення ротора враховано криву намагнічування генератора. Результати моделювання підтверджують істотне поліпшення енергетичних характеристик АГ при задовільних динамічних показниках контуру стабілізації напруги ланки постійного струму. Бібл. 8, рис. 5.*

**Ключові слова:** асинхронний генератор, векторне керування, оптимізація, енергоефективність.

**Вступ.** Значний інтерес в останні роки викликає проблема побудови якісних систем автоматичного керування (САК) асинхронними генераторами (АГ) із короткозамкненим ротором [1–5]. Векторно-керовані АГ з інвертором напруги (ІН) можуть збуджуватися від батареї і живити автономну мережу постійного струму. Проте енергетичні властивості таких генераторів вимагають свого поліпшення. На сьогодні відомі роботи щодо мінімізації втрат в асинхронному генераторі [1–3]. Ці роботи ґрунтуються на отриманні аналітичного виразу для оптимального потоку, виходячи із моделі втрат. Істотним недоліком такого підходу є те, що він не враховує криву намагнічування, яка має значний вплив на енергетичні властивості АГ.

У цій роботі запропоновано здійснювати оптимізацію сумарних втрат потужності у векторно-керованому автономному АГ на основі штучної нейронної мережі (НМ). Для цього було отримано модель втрат потужності в АГ та синтезовано нейронну мережу, що визначає оптимальне потокозчеплення. Після цього була побудована схема та модель енергоефективної САК АГ і виконано її дослідження.

**Мета роботи** – побудова та дослідження енергоефективної системи векторного керування АГ з оптимізацією сумарних втрат потужності на основі штучної нейронної мережі.

**Математичний опис об'єкта керування.** При синтезі векторного керування АГ базовим є математичний опис ідеалізованої асинхронної машини [6]. У системі рухомих координат  $(d, q)$ , що обертається зі швидкістю  $\omega_0$ , електромагнітні процеси у короткозамкнутому АГ можна описати як:

$$\begin{aligned}
 U_{sd} &= R_s I_{sd} + d\psi_{sd}/dt - \omega_0 \psi_{sq}; \\
 U_{sq} &= R_s I_{sq} + d\psi_{sq}/dt + \omega_0 \psi_{sd}; \\
 0 &= R_r I_{rd} + d\psi_{rd}/dt - (\omega_0 - z_p \omega) \psi_{rq}; \\
 0 &= R_r I_{rq} + d\psi_{rq}/dt + (\omega_0 - z_p \omega) \psi_{rd}; \\
 \psi_{sd} &= L_s I_{sd} + L_m I_{rd}; \quad \psi_{rd} = L_r I_{rd} + L_m I_{sd}; \\
 \psi_{sq} &= L_s I_{sq} + L_m I_{rq}; \quad \psi_{rq} = L_r I_{rq} + L_m I_{sq}; \\
 \psi_{md} &= L_m I_{md}; \quad I_{md} = I_{sd} + I_{rd}; \\
 \psi_{mq} &= L_m I_{mq}; \quad I_{mq} = I_{sq} + I_{rq}; \\
 M_e &= (3z_p/2) K_r (\psi_{rd} I_{sq} - \psi_{rq} I_{sd}); \\
 P_2 &= (3/2) (U_{sd} I_{sd} + U_{sq} I_{sq}),
 \end{aligned} \tag{1}$$

де індексами  $d$  та  $q$  позначено проекції на однойменні координатні осі узагальнених векторів напруги статора  $\bar{U}_s = [U_{sd}, U_{sq}]^T$ , струму статора  $\bar{I}_s = [I_{sd}, I_{sq}]^T$ , струму ротора  $\bar{I}_r = [I_{rd}, I_{rq}]^T$ , струму намагнічування  $\bar{I}_m = [I_{md}, I_{mq}]^T$ , потокозчеплення статора  $\bar{\psi}_s = [\psi_{sd}, \psi_{sq}]^T$ , потокозчеплення ротора  $\bar{\psi}_r = [\psi_{rd}, \psi_{rq}]^T$ ; основного потокозчеплення  $\bar{\psi}_m = [\psi_{md}, \psi_{mq}]^T$ ;  $M_e$  – електромагнітний момент генератора;  $z_p$  – кількість пар полюсів;  $\omega$  – кутова швидкість ротора;  $P_2$  – вихідна активна потужність генератора;  $R_s, R_r$  – відповідно активні опори фаз статора та ротора, зведеного до статора;  $L_m$  – індуктивність намагнічування;  $L_s = L_m + L_{s\sigma}$ ,  $L_r = L_m + L_{r\sigma}$  – повні індуктивності фаз статора та ротора, де  $L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$  – індуктивності від полів розсіювання статора та ротора відповідно;  $K_r = L_m/L_r$ .

Якщо система рухомих координат зорієнтована за вектором потокозчеплення ротора, що математично виражається у вигляді умов

$$\psi_{rq} = 0; \quad d\psi_{rq}/dt = 0; \quad \psi_{rd} = |\bar{\psi}_r|, \quad (2)$$

то з (1) отримуємо модель АГ у вигляді системи диференціальних рівнянь (3)–(5)

$$d\psi_r/dt = -\psi_r/T_r + I_d L_m/T_r; \quad (3)$$

$$dI_d/dt = -I_d R'_s/L' + U_d/L'_s + (\omega_0 L'_s I_q + K_r \psi_r/T_r)/L'_s; \quad (4)$$

$$dI_q/dt = -I_q R'_s/L'_s + U_q/L'_s - (\omega_0 L'_s I_d + K_r \psi_r z_p \omega)/L'_s; \quad (5)$$

$$P_2 = (3/2)(U_d I_d + U_q I_q), \quad (6)$$

де  $\psi_r \equiv \psi_{rd} = |\bar{\psi}_r|$ ;  $I_d \equiv I_{sd}$ ,  $I_q \equiv I_{sq}$ ,  $U_d \equiv U_{sd}$ ,  $U_q \equiv U_{sq}$  – відповідно потокова і моментна компоненти вектора струму та компоненти вектора напруги статора АГ;  $T_r = L_r/R_r$  – стала часу ротора;  $L'_s = L_{s\sigma} + K_r L_{r\sigma}$ ;  $R'_s = R_s + K_r^2 R_r$ . При цьому швидкість обертання  $\bar{\psi}_r$  та момент визначатимуться як

$$\omega_0 = z_p \omega + K_r R_r I_q / \psi_r, \quad M_e = (3/2) z_p K_r I_q \psi_r. \quad (7)$$

Апроксимувавши динаміку інвертора напруги (ІН) аперіодичною ланкою 1-го порядку, отримуємо

$$dU_d/dt = -U_d/T_u + u_d K_u/T_u; \quad (8)$$

$$dU_q/dt = -U_q/T_u + u_q K_u/T_u, \quad (9)$$

де  $K_u, T_u$  – відповідно коефіцієнт передачі та стала часу ІН;  $u_d, u_q$  – сигнали керування. Ланка постійного струму на виході інвертора може бути описана диференціальним рівнянням

$$dU_{dc}/dt = I_c/C_{dc}, \quad (10)$$

де  $U_{dc}$  – напруга ланки постійного струму;  $C_{dc}$  – накопичувальний конденсатор у ланці постійного струму;  $I_c$  – струм заряджання конденсатора. Цей струм дорівнює  $I_c = I_{dc} - I_L$ , де  $I_{dc}$  – струм ланки постійного струму;  $I_L$  – струм навантаження. Нехтуючи втратами в інверторі, на основі балансу потужностей генератора та ланки постійного струму  $-P_2 = U_{dc} I_{dc}$  отримуємо  $I_{dc} = -P_2/U_{dc}$ ;  $I_L = U_{dc}/R_L$ , де  $R_L$  – опір навантаження.

Опис (1)–(10) успішно використовується при розробленні систем традиційного векторного керування, де швидкість ротора змінюється в широкому діапазоні, а потокозчеплення ротора стабілізується на номінальному рівні  $\psi_{rn}$  (індексом  $n$  у статті позначатимуться номінальні значення величин). За цих умов можна прийняти  $L_m = const = L_{mn}$ . Проте при енергетично оптимальному керуванні намагніченість магнітопроводу істотно змінюється, і виникає потреба врахування ефекту насичення заліза АГ. У цьому разі  $L_m$  можна визначити як

$L_m(\psi_m) = \psi_m / I_m(\psi_m)$ , де  $\psi_m = |\bar{\psi}_m|$ ;  $I_m = |\bar{I}_m|$ ;  $I_m(\psi_m)$  – обернена крива намагнічування АГ. Функцію  $L_m(\psi_m)$  зручно апроксимувати поліномом

$$L_m = L_{mn} \sum_{i=0}^p a_i \psi_m^{p-i}, \tag{11}$$

де  $a_i$  – коефіцієнти,  $p$  – степінь полінома,  $\psi_m = \sqrt{\psi_r^2 + (K_r L_{r\sigma} I_q)^2}$ . Індуктивності  $L_{s\sigma}$  та  $L_{r\sigma}$  змінюються мало, а тому вважаються постійними. На рис. 1 наведено залежність  $L_m(\psi_m)$  при

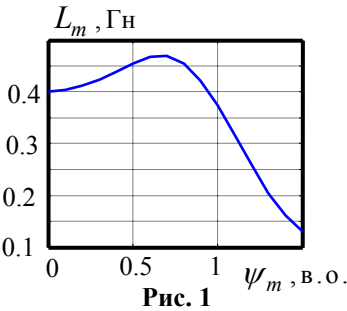


Рис. 1

$p = 5$  для АГ, що застосовується нижче у числових дослідженнях.

За умов істотних варіацій  $L_m$  ускладнюється задача оцінювання  $\bar{\psi}_r$ , яка має важливе значення для забезпечення високої якості векторного керування АГ та точності оптимізації втрат. Застосування в цьому разі оцінювачів (спостерігачів) потокозчеплення ротора, розроблених для  $L_m = const$  [6], призводитиме до значних відхилень між реальним  $\psi_r$  та його оцінкою  $\hat{\psi}_r$ , саме яка є сигналом зворотного зв'язку для регулятора потокозчеплення.

Звідси ясно, що в САК АГ треба використовувати оцінювач  $\bar{\psi}_r$ , що враховує криву намагнічування. Саме такий оцінювач, запропонований в [7], ми застосуємо нижче.

**Модель втрат потужності в АГ.** Як відомо, електромагнітні втрати потужності в АГ включають електричні втрати в активних опорах статора та ротора, магнітні втрати в залізі статора і ротора, а також додаткові втрати. Механічні втрати у генераторі від його магнітного стану не залежать, тому їх не розглядатимемо. Опис (1) щодо відображення енергетичних властивостей реальної машини є досить неточним, оскільки він враховує лише втрати в опорах статора та ротора. Тому для опису втрат у задачах оптимізації доцільно застосовувати Т-подібну схему заміщення фази АГ, де наявні також і магнітні втрати, які складають близько 20 % від номінальних втрат у генераторі. Цю схему зображено на рис. 2, де  $R_m$  – опір, що враховує магнітні втрати в АГ;  $s = (\omega_0 - z_p \omega) / \omega_0$  – ковзання генератора. Додаткові втрати можуть бути враховані шляхом відповідного збільшення навантаження. У [8] на основі Т-подібної схеми заміщення отримана наступна формула для сумарних електромагнітних втрат

$$P_\Sigma = (3/2) \left( (R_s(1 + \alpha_m) + \alpha_m R_m) I_d^2 + (R_s(1 + \beta_m) + \beta_m R_m + K_r^2 R_r + K_r^2 K_a \omega^2) I_q^2 + 2R_s K_r L_m I_d I_q \omega_0 / R_m \right), \tag{12}$$

де  $K_a$  – коефіцієнт додаткових втрат;  $\alpha_m = (\omega_0 L_m / R_m)^2$ ;  $\beta_m = (\omega_0 K_r L_{r\sigma} / R_m)^2$ . Магнітний опір у (12) за нехтування незначною складовою втрат у роторі можна обчислювати як

$$R_m(f_0) \approx (K_h / f_0 + K_e)^{-1}, \tag{13}$$

де  $K_h$  – коефіцієнт втрат від гістерезису;  $K_e$  – коефіцієнт втрат від вихрових струмів;  $f_0 = |\omega_0| / 2\pi$  – частота

напруги статора АГ. Для усталених процесів із (3) та (7) матимемо

$$I_d = \psi_r / L_m; \quad I_q = 2M_e / (3z_p K_r \psi_r); \quad \omega_0 = z_p \omega + 2R_r M_e / (3z_p \psi_r^2). \tag{14}$$

Підставивши вирази (14) у (12), отримаємо формулу для сумарних втрат як функцію  $P_\Sigma = f(\psi_r, \omega, M_e)$ . Шляхом мінімізації цієї функції з урахуванням (11) та (13) оптимальне значення потокозчеплення ротора  $\psi_{r0}$  при  $M_e = const$ ,  $\omega = const$  визначатиметься як

$$\psi_r^0 = \arg \min_{\psi_r} P_\Sigma(\psi_r, \omega, M_e) |_{\omega, M_e}. \tag{15}$$

**Синтез НМ для визначення оптимального потокозчеплення.** Для розроблюваної нами САК АГ треба синтезувати НМ (рис. 3 а), яка б з високою точністю відтворювала нелінійну функціональну залежність

$\psi_r^o(\omega, M_e)$ . Для такої задачі добре надаються мережі з прямими зв'язками (the feedforward networks).

Процедура синтезу НМ полягає у виборі кількості захованих шарів та нейронів у них, тобто шарів, що розташовані між входами мережі та вихідним шаром нейронів; у виборі функцій активації нейронів; у навчанні мережі, завдяки якому отримуються чисельні значення її параметрів. На рис. 3 а представлено архітектуру НМ, яку ми застосовуємо. Мережа має два входи, один захований шар нейронів і один вихідний нейрон. На входи мережі подаються швидкість  $\omega$  та оцінка моменту  $\hat{M}_e$ , а на виході НМ формується оцінка  $\hat{\psi}_r^o$ . На рис. 3 а кружечками умовно позначено нейрони, а стрілками – зв'язки між нейронами та зміщення, що подаються на них.

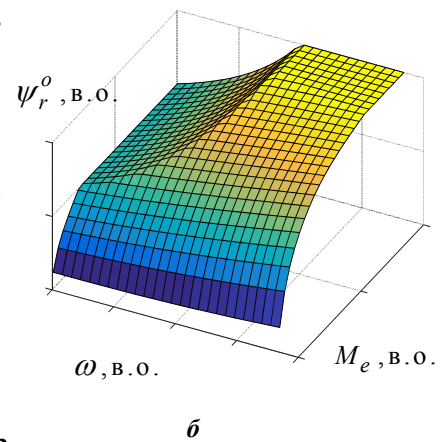
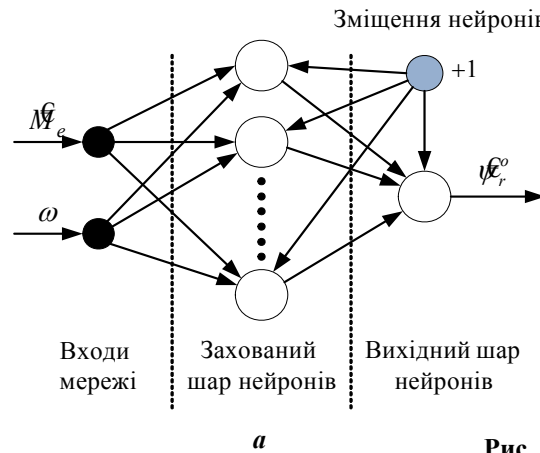


Рис. 3

Процедура синтезу НМ полягає у виборі кількості захованих шарів та нейронів у них, тобто шарів, що розташовані між входами мережі та вихідним шаром нейронів; у виборі функцій активації нейронів; у навчанні мережі, завдяки якому отримуються чисельні значення її параметрів. На рис. 3 а представлено архітектуру НМ, яку ми застосовуємо. Мережа має два входи, один захований шар нейронів і один вихідний нейрон. На входи мережі подаються швидкість  $\omega$  та оцінка моменту  $\hat{M}_e$ , а на виході НМ формується оцінка  $\hat{\psi}_r^o$ . На рис. 3 а кружечками умовно позначено нейрони, а стрілками – зв'язки між нейронами та зміщення, що подаються на них.

При навчанні НМ на множині  $\Omega(\omega, M_e) = \{\omega \in [0.15, 2]\omega_n; M_e \in [-0.01, -1]M_{en}\}$  було вибрано 11 градацій  $\omega$  та 17 градацій  $M_e$ . Далі за (15) для векторів входу  $\bar{X}_k = [M_{ek}/M_{en}, \omega_k/\omega_n]^T$ ,  $k = \overline{1, N}$  було визначено виходи мережі  $\bar{Y}_k = \psi_{rk}^o$ ,  $k = \overline{1, N}$ , де  $N = 187$ . На сформованій навчальній множині за алгоритмом Левенберга-Марквардта була навчена НМ. У захованому шарі мережі використано 4 нейрони, а навчання тривало 1000 епох до досягнення помилки мережі  $E_{net} = 4,837 \cdot 10^{-6}$ . Поверхня  $\psi_r^o(\omega, M_e)$  з обмеженням потокозчеплення представлена на рис. 3 б, де по осях відкладено нормовані змінні, що вимірюються у відносних одиницях (в.о.).

**Система енергоефективного керування АГ.** Для побудови САК АГ було взято за основу класичну систему векторного керування асинхронним двигуном [6], розвинуту за рахунок введення контуру стабілізації напруги ланки постійного струму, оцінювача вектора потокозчеплення ротора, що враховує криву намагнічування генератора, та нейромережного оптимізатора втрат потужності. На рис. 4 наведено функціональну схему запропонованої енергоефективної САК АГ.

Загальним призначенням цієї системи є стабілізація напруги  $U_{dc}$  у ланці постійного струму на рівні завдання  $U_{dc}^*$  за різних швидкостей та навантажень АГ із мінімізацією втрат потужності в усталених режимах роботи. У системі можна умовно виокремити силову частину, частину векторних перетворень, оцінювач потокозчеплення ротора (ОПР), частину регулювання та частину енергетичної оптимізації. До силової частини належать АГ, ІН з ШІМ та ланка постійного струму. У цій ланці розташовані накопичувальний конденсатор  $C_{dc}$ , акумуляторна батарея (АБ) та навантаження з опором  $R_L$ . Частину векторних перетворень системи складають перетворювачі координат і блок компенсування зв'язків БКЗ. У блоках перетворення координат відбуваються перетворення сигналів між рухомими координатами  $(d, q)$  та трифазною системою напруг  $(a, b, c)$ . У БКЗ компенсуються перехресні зв'язки в АГ – вирази в дужках у (4), (5)) з використанням даних  $\gamma = \{I_d, I_q, \hat{\psi}_r, \omega\}$ .

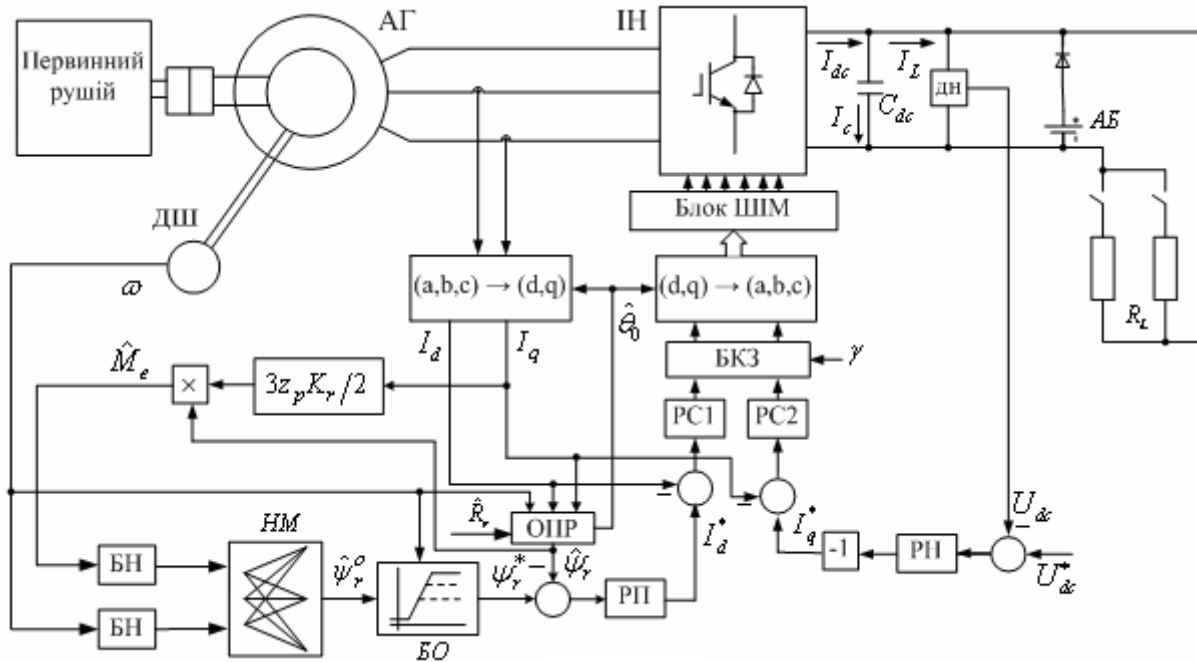


Рис. 4

ОПР визначає оцінки модуля  $\hat{\psi}_r$  та кута повороту  $\hat{\theta}_0$  вектора  $\bar{\psi}_r$ , де  $\theta_0 = \arg(\bar{\psi}_r)$ . На вхід ОПР надходить оцінка  $\hat{R}_r$  опору ротора для адаптування системи до змін теплового стану АГ, що, як відомо, поліпшує якість векторного керування. Для визначення  $\hat{R}_r$  може бути застосовано один із відомих способів [6]. Частина регулювання системи складають пропорційно-інтегральні (ПІ) регулятори напруги (РН), поточозчеплення ротора (РП), компонент вектора струму РС1, РС2, а також давачі струмів фаз статора, давач швидкості (ДШ) і давач напруги (ДН). У САК блоки нормування (БН), ланки визначення оцінки моменту  $\hat{M}_e$ , НМ та блок обмеження (БО) складають підсистему оптимізації втрат. НМ визначає оцінку  $\hat{\psi}_r^o$  оптимального поточозчеплення, яка у БО обмежується зверху на рівні  $\psi_{r,\lim} = \min\{\psi_{rn}, \psi_{rn}\omega_n / \omega\}$  і знизу на допустимому рівні. Сигнал  $\psi_r^*$  є завданням для регулятора  $\psi_r$ .

**Результати моделювання.** При побудові моделі САК АД малося на меті досягти високого ступеня реалістичності, тому вона являла собою відтворену засобами програмного середовища MatLab/Simulink/SimPowerSystem функціональну схему на рис. 4. У моделі було використано дані АГ потужністю 1.3 кВт з номінальними напругою  $U=220$  В та струмом  $I=3.56$  А фази статора (діючі значення), кількістю обертів вала  $N=1452$  об/хв та значеннями параметрів  $R_s = 6.46$  Ом,  $R_r = 3.87$  Ом,  $R_m = 1380$  Ом,  $L_s = 0.389$  Гн,  $L_r = 0.398$  Гн,  $L_m = 0.374$  Гн. Частота ШІМ в інверторі дорівнювала 8 кГц. Ємність конденсатора становила  $C_{dc} = 1$  мФ. Контури регулювання поточозчеплення ротора та напруги ланки постійного струму побудовані за класичною підпорядкованою структурою при налаштуванні ПІ-регуляторів  $I_d, I_q$  та  $\psi_r$  на модульний оптимум, а  $U_{dc}$  – на симетричний оптимум. Струми обмежувались на рівні 1.5 в.о., а період визначення  $\hat{\psi}_r^o$  у НМ складав 3 мс.

Дослідження показників енергоефективної САК АГ здійснювалося при змінах навантаження та швидкості генератора за наступним сценарієм. На інтервалі часу  $t=0\dots1$  с відбувалось збудження АГ від АБ напругою 24 В на швидкості  $\omega = 0.85$  в.о., і система переходила в усталений режим стабілізації напруги на рівні  $U_{dc}^* = 540$  В з навантаженням  $P_L = 250$  Вт. На інтервалі часу  $t=1\dots3$  с досліджувались процеси енергоефективного керування АГ, які зображені на рис. 5. Згідно з рис. 5 а, навантаження, змінюючись стрибкоподібно, послідовно

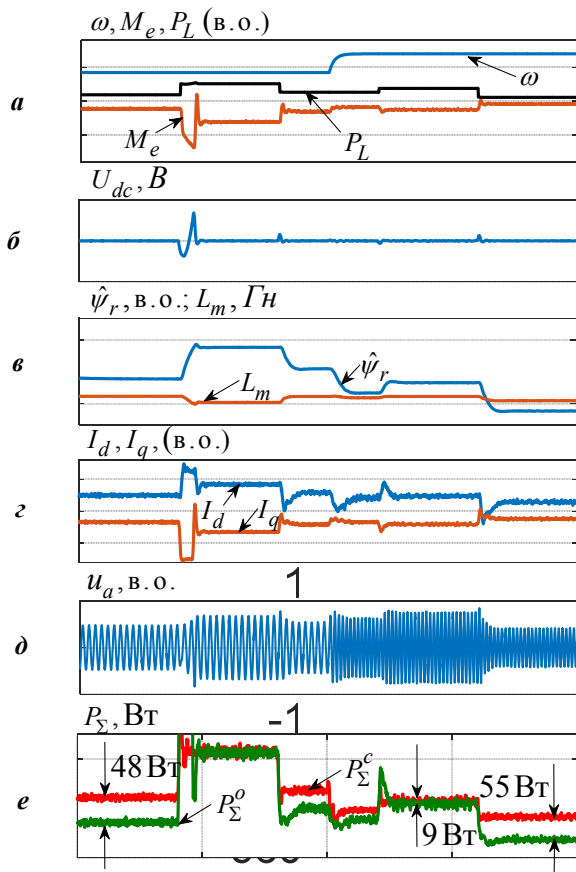


рис. 5

набувало значень 250–680–350–500–150 Вт, а швидкість привідного рушія при  $t=2$  с плавно змінювалася з 0.85 до 1.4 в.о.

З рис. 5 б видно, що тільки накид навантаження, рівний третині від номінального, спричинив певне збурення процесу стабілізації  $U_{dc}(t)$ . Тут напруга відхиляється від номінальної вниз на 7.5 В та вгору на 13.7 В при часі компенсування збурення, рівному 85 мс. Такі динамічні відхилення пов'язані із виходом струму  $I_q$  на рівень обмеження (рис. 4 з) і є помірними, вони сягають лише 2.5 % від номіналу.

Рис. 5 в показує, що при зміні навантаження та швидкості АГ потокозчеплення ротора змінюється відповідно до визначеного в НМ оптимального завдання. В усталених процесах тут підтримується рівність  $\psi_r = \hat{\psi}_r = \hat{\psi}_r^o$ . Рис. 5 д засвідчує, що задання напруги фази генератора  $u_a(t)$ , яке подається на блок ШІМ, не сягає номінального рівня.

На рис. 5 е наведено графік втрат потужності  $P_\Sigma^o(t)$  у разі енергоефективного керування АГ і, для порівняння, графік втрат потужності  $P_\Sigma^c(t)$  у випадку традиційного керування

генератором зі стабілізацією потоку на рівні  $\psi_r^* = \min\{\psi_{rn}, \psi_{rn}\omega_n / \omega\}$ . На цьому рисунку зазначено зменшення втрат у різних режимах роботи, що наочно демонструє чималий позитивний ефект. Отже, можна підсумувати, що запропонована енергоефективна САК АГ має високі енергетичні характеристики та задовільні динамічні показники стабілізації напруги ланки постійного струму.

**Висновки.** 1) Для поліпшення енергетичних характеристик векторно-керованих АГ перспективно застосовувати штучні НМ. 2) У порівнянні з відомими аналогами, НМ забезпечує вищу точність оптимізації втрат на швидкостях як нижчих, так і вищих за номінальну завдяки врахуванню кривої намагнічування. 3) В системах енергоефективного керування АГ при оцінюванні потокозчеплення крім варіацій опору ротора важливо враховувати і нелінійність магнітного кола.

1. Leidhold R., Garcia G., Valla M.I. Field-oriented controlled induction generator with loss minimization. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*. 2002. Vol. 49. No 1. Pp. 147–156.
2. Mesemanolis A., Mademlis C., Kioskeridis I. High-efficiency control for a wind energy conversion system with induction generator. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2012. Vol. 27. No 4. Pp. 958–967.
3. Mesemanolis A., Mademlis C., Kioskeridis I. Optimal Efficiency Control Strategy in Wind Energy Conversion System With Induction Generator. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2013. Vol. 1. No 4. Pp. 238–246.



4. Мазуренко Л. І., Романенко В. І., Джура О. В. Технічна реалізація й експериментальні дослідження асинхронного генератора з вентильним збудженням та векторним керуванням. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2015. № 4. С. 34–40.
5. Peresada S., Kovbasa S., Korol S., Zhelinskyi N. Feedback linearizing field-oriented control of induction generator: theory and experiments. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 4. Pp. 48–56.
6. Novotny D.W., Lipo T.A. Vector control and dynamics of AC drives, Oxford: Clarendon press, 2005, 440 p.
7. Приймак Б.І. Оцінювання потоку ротора асинхронного двигуна з врахуванням нелінійності магнітного кола. *Технічна електродинаміка*. 2005. № 4. С. 51–57.
8. Приймак Б.І. Моделі втрат потужності у керованій асинхронній машині для задач енергозбереження. *Технічна електродинаміка*. 2005. № 1. С. 29–38.

УДК 62-52 : 621.313

## УЛУЧШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВЕКТОРНО-УПРАВЛЯЕМОГО АВТОНОМНОГО АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

**Б.И. Приймак**, канд. техн. наук

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского", пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина

*Рассматривается задача улучшения энергоэффективности автономного векторно-управляемого асинхронного генератора (АГ). Для определения оптимального значения магнитного потока по критерию минимума потерь мощности синтезирована нейронная сеть. На входы сети подаются сигналы оценки момента и скорости генератора. При оптимизации потерь и оценке потокосцепления ротора учтена кривая намагничивания генератора. Результаты моделирования подтверждают существенное улучшение энергетических характеристик АГ при удовлетворительных динамических показателях контура стабилизации напряжения звена постоянного тока.* Библ. 8, рис. 5.

**Ключевые слова:** асинхронный генератор, векторное управление, оптимизация, энергоэффективность.

## IMPROVEMENT OF ENERGY INDICATORS OF VECTOR-CONTROLLED STAND-ALONE INDUCTION GENERATOR

**B.I. Pryymak**

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine

*The problem of improving the energy efficiency of a stand-alone vector-controlled induction generator (IG) is considered. To determine the optimum value of the magnetic flux by the criterion of minimum power loss, a neural network was synthesized. The estimation of the torque and speed of the generator are fed to the inputs of the network. Generator magnetization curve is taken into account when optimizing losses and estimating rotor flux. The simulation results confirm a significant improvement in the energy characteristics of IG with satisfactory dynamic parameters of the DC link voltage stabilization circuit.* References 8, figures 5.

**Key words:** induction generator, vector control, optimization, energy efficiency

1. Leidhold R., Garcia G., Valla M.I. Field-oriented controlled induction generator with loss minimization. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*. 2002. Vol. 49. No 1. Pp. 147–156.
2. Mesemanolis A., Mademlis C., Kioskeridis I. High-efficiency control for a wind energy conversion system with induction generator. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2012. Vol. 27. No 4. Pp. 958–967.
3. Mesemanolis A., Mademlis C., Kioskeridis I. Optimal Efficiency Control Strategy in Wind Energy Conversion System With Induction Generator. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2013. Vol. 1. No 4. Pp. 238–246.
4. Mazurenko L., Romanenko V., Dzura O. Implementation and experimental study of the induction generator with vector control. *Elektromechanical and energy systems. Quarterly research and production journal*. 2015. No 4. Pp. 34–40. (Ukr)
5. Peresada S., Kovbasa S., Korol S., Zhelinskyi N. Feedback linearizing field-oriented control of induction generator: theory and experiments. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 4. Pp. 48–56.
6. Novotny D.W., Lipo T.A. Vector control and dynamics of AC drives, Oxford: Clarendon press, 2005. 440 p.
7. Pryymak B.I. Induction motor rotor flux estimation into account the nonlinearity of magnetic circuit. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2005. No 4. Pp. 51–57. (Ukr)
8. Pryymak B.I. Power loss models in controlled induction machine for the energy saving tasks. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2005. No 1. Pp. 29–38. (Ukr)

Надійшла 27.02.2020

Received 27.02.2020