

УДК 62-526

Б. І. Приймак, О. М. Халімовський, кандидати техн. наук

ПОЛІПШЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ В ЗОНІ ВИСОКИХ ШВИДКОСТЕЙ РОТОРА ШЛЯХОМ МАКСИМІЗАЦІЇ МОМЕНТА ДВИГУНА

Анотація. Для розширеної моделі асинхронного двигуна визначено закон формування потокозчеплення ротора, що максимізує момент двигуна при обмеженні амплітуд напруги та струму статора. Моделювання засвідчило істотне покращення швидкодії векторно-керованого асинхронного електроприводу при високих швидкостях двигуна внаслідок застосування оптимального закону формування потокозчеплення.

Ключові слова: асинхронний електропривод, векторне керування, оптимальне потокозчеплення, генетичний алгоритм, максимізація моменту

B. I. Pryymak, Ph.D., O. M. Khalimovskyy, Ph.D.

IMPROVED CHARACTERISTICS OF INDUCTION MOTOR DRIVE IN AREA OF HIGH SPEED OF ROTOR BY MAXIMIZING MOTOR TORQUE

Abstract. For the extended model of induction motor (IM) is defined law forming the rotor flux linkage, which maximizes the motor torque while limiting amplitude of the stator voltage and current. Simulations showed significant performance improvements vector-controlled induction motor drive at high speeds of IM due to the use of law formation optimum flux.

Keywords: induction motor drive, vector control, optimal flux, genetic algorithm, torque maximizing

Б. И. Приймак, А. М. Халимовский, кандидаты техн. наук

УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В ЗОНЕ ВИСОКИХ СКОРОСТЕЙ РОТОРА ПУТЕМ МАКСИМИЗАЦИИ МОМЕНТА ДВИГАТЕЛЯ

Аннотация. Для расширенной модели асинхронного двигателя определен закон формирования потокосцепления ротора, который максимизирует момент двигателя при ограничении амплитуд напряжения и тока статора. Моделирование подтвердило существенное улучшение быстродействия векторно-управляемого асинхронного электропривода при высоких скоростях двигателя вследствие применения оптимального закона формирования потокосцепления.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, векторное управление, оптимальное потокозчепление, генетический алгоритм, максимизация момента

Вступ. Асинхронні електроприводи (АЕП) з векторним керуванням металообробних верстатів, трамваїв, тролейбусів, електромобілів тощо повинні працювати як у зоні нижчих від номінальної швидкостей, так і в зоні швидкостей, що перевищують номінальну. У зоні високих швидкостей, де обмежується амплітуда напруги живлення асинхронного двигуна (АД), потокозчеплення ротора зазвичай змінюється за стандартним законом – зворотно пропорційно до швидкості двигуна [1]. Проте цей закон не дозволяє досягти екстремальних властивостей електропривода.

Відома низка робіт [2 – 7], де пропонуються варіанти розв'язання задачі поліпшення характеристик АЕП у зоні високих швидкостей двигуна. Недоліком цих робіт є використання моделі АД без врахування насичення магнітопроводу та (або) втрат потужності у залізі. У [8] на основі розширеної моделі АД досліджено статичні характеристики двигуна при оптимальному законі формування магнітного потоку. В даній праці вивчаються динамічні властивості АЕП при максимізації моменту двигуна.

Мета роботи – дослідження динамічних характеристик АЕП з оптимальним щодо максимізації моменту АД законом формування потокозчеплення ротора в зоні високих швидкостей двигуна за умов обмеження напруги та струму статора.

© Приймак Б.І., Халімовський О.М., 2014

Максимізація моменту АД. Короткозамкнений АД у зорієнтованих за вектором потокозчеплення ротора $\bar{\Psi}_r$ координатах (d, q) при врахуванні втрат у залізі можна описати системою диференціальних рівнянь [9, 10]:

$$\begin{aligned} dI_{sd}/dt &= L_{\sigma}^{-1} \left[-(R_s + R_z) I_{sd} - R_z L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{rd} + \right. \\ &\quad \left. + T_z^{-1} L_r L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{md} + U_{sd} \right] + \omega_0 I_{sq}; \\ dI_{sq}/dt &= L_{\sigma}^{-1} \left[-(R_s + R_z) I_{sq} + T_z^{-1} L_r L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{mq} + U_{sq} \right] - \\ &\quad - \omega_0 I_{sd}; \\ d\Psi_{rd}/dt &= T_{r\sigma}^{-1} (-\Psi_{rd} + \Psi_{md}); \\ d\Psi_{md}/dt &= R_z \left(I_{sd} + \Psi_{rd}/L_{r\sigma} - L_r L_m^{-1} L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{md} \right) + \omega_0 \Psi_{mq}; \\ d\Psi_{mq}/dt &= R_z \left(I_{sq} - L_r L_m^{-1} L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{mq} \right) - \omega_0 \Psi_{md}; \\ d\omega/dt &= J^{-1} (M_E - M_L), \end{aligned} \quad (1)$$

де змінними є компоненти узагальнених векторів напруги статора $U_s = [U_{sd}, U_{sq}]^T$, струму статора $I_s = [I_{sd}, I_{sq}]^T$, потокозчеплення ротора $\Psi_r = [\Psi_{rd}, \Psi_{rq}]^T$; головного потокозчеплення $\bar{\Psi}_m = [\Psi_{md}, \Psi_{mq}]^T$; ω_0 – кутова швидкість обертан-

ня координат (d, q) ; z_p – кількість пар полюсів двигуна; ω – кутова швидкість обертання ротора; R_s, R_r – відповідно активні опори фаз статора та ротора; $R_z = R_z(\omega_0, \omega)$ – еквівалентний активний опір, що відображає магнітні втрати потужності у залізі двигуна; L_m – взаємна індуктивність між статором та ротором; $L_s = L_m + L_{s\sigma}, L_r = L_m + L_{r\sigma}$ – повні індуктивності фаз, а $L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$ – індуктивності від полів розсіювання статора та ротора відповідно; $T_{r\sigma} = L_{r\sigma}/R_r, T_z = L_m/R_z$; M_E, M_L – моменти двигуна та навантаження відповідно. Враховуючи, що в зорієнтованих координатах $\Psi_{rd} = |\bar{\Psi}_r| \equiv \Psi_r$, в (1) електромагнітний момент двигуна та швидкість координат обчислюються як $M_E = 1.5z_p L_{r\sigma}^{-1} (\Psi_r \Psi_{mq})$, $\omega_0 = z_p \omega + \Psi_{mq}/(T_{r\sigma} \Psi_r)$.

Для врахування насичення магнітопроводу в описі (1) використано отриману на основі кривої намагнічування двигуна та апроксимовану поліноміальним виразом нелінійну функцію $L_m = L_m(\Psi_m)$. Систему (1) слід доповнити реально існуючими в АЕП обмеженнями модуля вектора напруги статора $U_s = |\bar{U}_s|$ на рівні номінальної напруги живлення двигуна U_{sn} (індексом “n” позначатимуться номінальні значення величин) та модуля вектора струму статора $I_s = |\bar{I}_s|$ на рівні I_{max} у вигляді

$$0 \leq U_s \leq U_{sn}; \quad 0 \leq I_s \leq I_{max}. \quad (2)$$

Стандартний закон формування модуля вектора потокозчеплення ротора має вигляд

$$F_{st}(\omega) = \begin{cases} \Psi_n & \text{при } |\omega| \leq \omega_n, \\ \Psi_n \omega_n / |\omega| & \text{при } |\omega| > \omega_n. \end{cases} \quad (3)$$

Пошук для опису (1, 2) оптимального потокозчеплення ротора за критерієм $M_E \Rightarrow \max$ в статті здійснено за допомогою генетичного алгоритму (ГА), одного з найкращих сучасних методів параметричної оптимізації.

У чисельних дослідженнях використано дані типового АД потужністю 1,5 кВт з $M_n = 10$ Н·м. Результати чисельної оптимізації статичних характеристик АЕП на високих швидкостях ротора при $I_{max} = 1,5I_{sn}$ наведено на рис. 1 та рис. 2, де змінні нормовані відносно своїх номінальних значень і вимірюються у відносних одиницях (в.о.).

Як видно із рис.2, при оптимальному законі формування Ψ_r момент АД суттєво більший.

Результати моделювання. Дослідження впливу максимізації моменту АД на динамічні властивості привода було здійснено за допомогою математичного моделювання в системі MATLAB/SIMULINK.

В моделі АЕП двигун описувався згідно з (1). Модель керуючої частини побудована за принципами класичного прямого векторного керування АД [1].

Для регулювання компонент вектора струму статора, модуля вектора потокозчеплення ротора та швидкості двигуна застосовано пропорційно-інтегральні регулятори з підпорядкованою структурною побудовою підсистем регулювання потокозчеплення та швидкості.

Ψ_r , в.о.

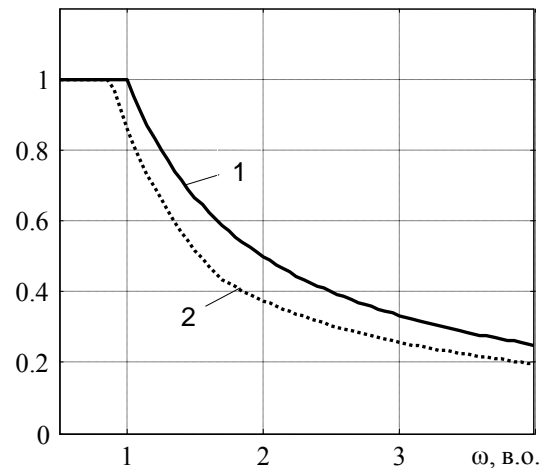


Рис. 1. Стандартний $\Psi_r = F_{st}(\omega)$ (крива 1) та оптимальний $\Psi_r = F_{opt}(\omega)$ (крива 2) закони формування потокозчеплення ротора двигуна

M_E , в.о.

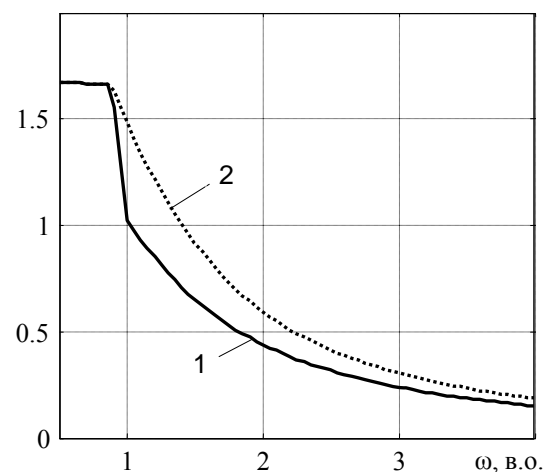


Рис. 2. Максимальний момент АД при стандартному (крива 1) та оптимальному (крива 2) законах формування Ψ_r

Стандартний $\Psi_r = F_{st}(\omega)$ та оптимальний $\Psi_r = F_{opt}(\omega)$ закони формування потокозчеплення були реалізовані в табличному вигляді з інтерполяцією даних.

Сценарій моделювання полягав у тому, що у працюючому в усталеному режимі АЕП з номінальною швидкістю та моментом навантаження $M_L = 0,2M_n$ завдання швидкості ω^* в момент часу $t=0,2$ с змінювалося за лінійною залежністю від ω_n до $3\omega_n$. Результати моделювання представлені на рисунках 3 та 4: на рисунках (а) – зображені графіки завдання швидкості ω^* (крива 1) та швидкості ротора ω (крива 2); на рисунках (б) – зо-

бражені графіки модулів векторів струму I_s (крива 1) та напруги U_s (крива 2) статора; а на рисунках (в) – зображені графіки компоненти $\Psi_{r\alpha}$ вектора потокозчеплення ротора $\bar{\Psi}_r$ в нерухомих відносно статора АД координатах (α, β) .

Аналіз рис. 3, а та рис. 4, а показує, що час розгону привода в першому випадку дорівнює 0,5 с, а в другому – 0,3 с. Отже результати моделювання засвідчують, що у порівнянні зі стандартним, оптимальний закон формування потокозчеплення ротора призвів до зростання швидкості АЕП на $(0,5 - 0,3)100\%/0,5 = 40\%$.

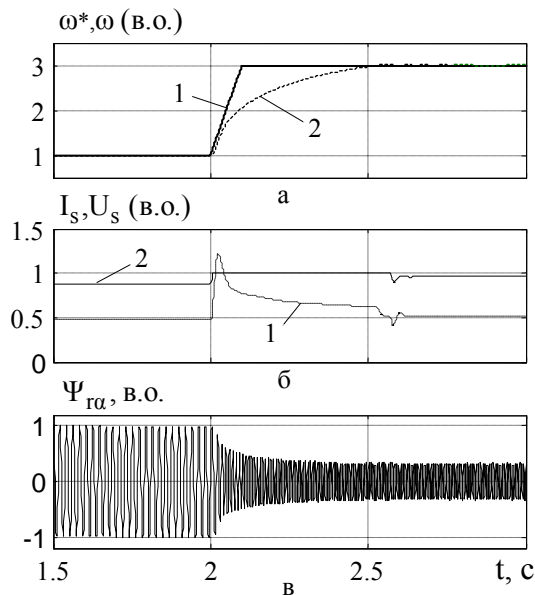


Рис. 3. Перехідні процеси в АЕП із стандартним законом формування потокозчеплення $\Psi_r = F_{st}(\omega)$

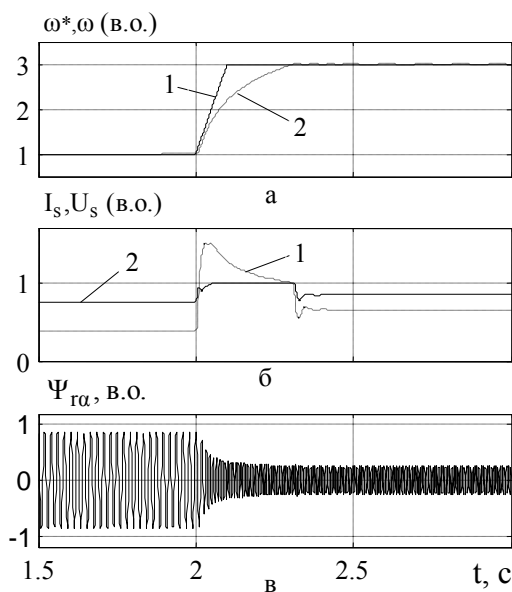


Рис. 4. Перехідні процеси в АЕП з оптимальним законом формування потокозчеплення $\Psi_r = F_{opt}(\omega)$

Висновки. Застосування оптимального в сенсі максимізації моменту АД закону формування потокозчеплення ротора уможливило істотне поліпшення динамічних властивостей векторно-керованих АЕП в зоні високих швидкостей двигуна. Згідно з дослідженнями, при розгоні двигуна від номінальної до втричі більшої швидкості час розгону привода зменшується на 40% за умови, що допускається короткочасне перевищення струмом статора свого номінального значення у півтора рази.

Список використаної літератури

1. Leonhard W., (1985), Control of Electrical Drives, *Springer Verlag*, 346 p.
2. Bodson M., Chiasson J.N., and Novotnak R.T., (1995), A Systematic Approach to Selecting flux References for Torque Maximization in Induction Motors, *IEEE Trans. on Control Sys. Technol.*, Vol. 3, No. 4, Dec. 1995, pp. 388 – 397.
3. Kerkman R.J., Rowan T.M., and Leggate D., (1992), Indirect Field-Oriented Control of an Induction Motor in the Field-Weakening Region, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 28, No. 4, July-Aug. 1992, pp. 850 – 857.
4. Kim S.-H., Sul, S.-K., and Park M.-H., (1993), Maximum Torque Control of an Induction Machine in the Field Weakening Region, *Proc. IEEE Ind. Applicat. Soc. Annu. Meeting IAS*, Vol. 1, pp. 401 – 407.
5. Grotstollen H., and Wiesing J., (1995), Torque Capability and Control of a Saturated Induction Motor Over a Wide Range of Flux Weakening, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 42, No. 4, August, 1995, pp. 374 – 381.
6. Wieser R.S., (1997), Optimal Rotor flux Regulation for fast Accelerating Induction Machines in the Field Weakening Region, *Proc. IEEE Ind. Applicat. Soc. Annu. Meeting IAS*, Vol. 1, pp. 401 – 409.
7. Harnefors L., Pietilainen K., and Gertmar L., (2001), Torque-Maximizing Field-Weakening Control: Design, Analysis, and Parameter Selection, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 48, No. 1, Feb. 2001, pp. 161 – 168.
8. Приймак Б. І. Максимізація моменту асинхронного двигуна в зоні високих швидкостей ротора за допомогою генетичного алгоритму [Текст] / Б. І. Приймак // Вісник Нац. техн. ун-ту «Харківський політехн. ін-т». Темат. вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика». – 2013. – № 36. – С. 493 – 494.
9. Harnefors L., Pietilainen K., and Gertmar L., (2001), Torque-Maximizing Field-Weakening Control: Design, Analysis, and Parameter Selection, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 48, No. 1, Feb. 2001, pp. 161 – 168.
10. Приймак Б. І. Математичні моделі асинхронної машини з врахуванням втрат у залізі [Текст] / Б. І. Приймак // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2005. – № 3 (12). – С. 60 – 66.
11. Levi E., (1995), Impact of Iron Losses on Behaviour of Vector Controlled Induction Machines, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 31, No.6, pp. 1287 – 1296.

Отримано 17.07.2014

References

1. Leonhard W., (1985), Control of Electrical Drives, *Springer Verlag*, 346 p. (In English).
2. Bodson M., Chiasson J.N., and Novotnak R.T., (1995), A Systematic Approach to Selecting flux References for Torque Maximization in Induction Motors, *IEEE Trans. on Control Sys. Technol.*, Vol. 3, No. 4, Dec. 1995, pp. 388 – 397 (In English).
3. Kerkman R.J., Rowan T.M., and Leggate D., (1992), Indirect Field-Oriented Control of an Induction Motor in the Field-Weakening Region, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 28, No. 4, July-Aug. 1992, pp. 850 – 857 (In English).
4. Kim S.-H., Sul, S.-K., and Park M.-H., (1993), Maximum Torque Control of an Induction Machine in the field Weakening Region, *Proc. IEEE Ind. Applicat. Soc. Annu. Meeting IAS*, Vol. 1, pp. 401 – 407 (In English).
5. Grotstollen H., and Wiesing J., (1995), Torque Capability and Control of a Saturated Induction Motor Over a Wide Range of Flux Weakening, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 42, No. 4, August, 1995, pp. 374 – 381 (In English).
6. Wieser R.S., (1997), Optimal Rotor flux Regulation for fast Accelerating Induction Machines in the field Weakening Region, *Proc. IEEE Ind. Applicat. Soc. Annu. Meeting IAS*, Vol. 1, pp. 401 – 409 (In English).
7. Harnefors L., Pietilainen K., and Gertmar L., (2001), Torque-Maximizing Field-Weakening Control: Design, Analysis, and Parameter Selection, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 48, No. 1, Feb. 2001, pp. 161 – 168 (In English).
8. Pryymak B.I. Maksimizatsiya momenta asinhronnogo dviguna v zoni visokih shvidkostey rotora za dopomogoyu genetichnogo algoritmu [Maximization of Torque of Induction Motor in the Zone of High-Speed of Rotor by Means of Genetic Algorithm], (2013), *Visnik Nats. Tehn. Un-tu "Harkivskiy Politehn. In-tut". Temat. Vip. "Problemi Avtomatizovanogo Elektroprivoda. Teoriya i praktika"*, Kharkov, Ukraine, No. 36, pp. 493 – 494 (In Ukrainian).
9. Harnefors L., Pietilainen K., and Gertmar L., (2001), Torque-Maximizing Field-Weakening Control: Design, Analysis, and Parameter Selection, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 48, No. 1, Feb. 2001, pp. 161 – 168. (In English).
10. Pryymak B.I. Matematichni modeli asinhronnoyi mashini z vrahuvannyam vtrat u zalizi [Mathematical Models of Induction Machine are Taking into Account Losses in iron], (2005), *Pratsi In-tu Rlektrodinamiki NAN Ukrayini*, Kiev, Ukraine, No. 3 (12), pp. 60 – 66 (In Ukrainian).
11. Levi E., (1995), Impact of Iron Losses on Behaviour of Vector Controlled Induction Machines, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 31, No.6, pp. 1287 – 1296.



Приймак

Богдан Іванович, канд. техн. наук, доц. каф. автоматизації електромеханічних систем та електроприводу факультету електроенерготехніки та автоматики Нац. техніч. ун-ту України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ-56 03056 каф. АЕМС-ЕП, ФЕА, НТУУ «КПІ».
Тел.: +(38-044)-4068356.
E-mail: bp-08@ukr.net



Халімовський

Олексій Модестович, канд. техн. наук, доц. каф. автоматизації електромеханічних систем та електроприводу НТУУ «КПІ», пр. Перемоги, 37, м. Київ-56, каф. АЕМС-ЕП, ФЕА, НТУУ «КПІ» 03056.
Тел.: +(38-044)-4068356.
E-mail: o.khalimovskyy@ukr.net