

УДК 621.313:32-83

<https://doi.org/10.31713/vt220262>

Надточій А.В. [1; ORCID:0000-0003-1905-0895]

К. Т. Н., доцент

Надточій В. А. [1; ORCID: 0000-0003-3869-3546]

К. Т. Н., доцент,

¹Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон

СИНТЕЗ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ З ПРИТАМАННИМИ НЕЛІНІЙНОСТЯМИ

У роботі досліджено проблему підвищення якості керування асинхронним електроприводом в умовах гармонічно спотвореного живлення та притаманних нелінійностей асинхронної машини, що є актуальним для сучасних систем автоматизації та промислових електроприводів. Використано математичну модель асинхронної машини в dq-системі координат, яка враховує залежність активного опору та індуктивності ротора від ковзання, зумовлену ефектом витіснення струму, що дозволяє адекватно описати реальні електромеханічні процеси. Показано, що класичний алгоритм Field-Oriented Control базується на припущенні сталості параметрів ротора, внаслідок чого виникають похибки оцінювання потокозчеплення, порушення орієнтації поля та зростання пульсацій електромагнітного моменту. Запропоновано метод компенсації, який передбачає адаптивну зміну параметрів ротора в контурі керування залежно від ковзання, що дозволяє врахувати нелінійні властивості машини в процесі роботи електропривода. Проведено моделювання лінійної та нелінійної моделей електропривода, а також системи з компенсацією нелінійностей, результати якого підтвердили зменшення пульсацій електромагнітного моменту з 20% до 8–10%, покращення стабільності роботи та зниження похибки орієнтації поля. Встановлено, що врахування параметричної нелінійності ротора та гармонічного складу живлення дозволяє суттєво підвищити точність і динамічні характеристики системи векторного

керування. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованого підходу при розробці сучасних систем керування асинхронними електроприводами в умовах параметричної невизначеності та гармонічних спотворень живлення.

Ключові слова: електропривод, асинхронна машина, нелінійності, векторне керування, компенсація, ковзання, гармоніки.

Актуальність напрямку дослідження. Сучасні асинхронні електроприводи широко застосовуються у промисловості, транспорті та енергетиці завдяки високій надійності, простоті конструкції та ефективності. Особливої актуальності набуває використання таких приводів у складі автоматизованих систем керування, де висуваються підвищені вимоги до точності регулювання швидкості та моменту [1], [2]. У зв'язку з цим широкого розповсюдження набули методи векторного керування, зокрема Field-Oriented Control (FOC), які забезпечують високі динамічні характеристики електроприводів за номінальних умов роботи [2], [10].

Разом з тим, у реальних умовах експлуатації асинхронні електроприводи працюють від силових перетворювачів частоти, що формують напругу з вираженим гармонічним складом. Наявність вищих гармонік призводить до появи додаткових втрат енергії, пульсацій електромагнітного моменту та погіршення якості керування [3], [4]. Крім того, важливим фактором є притаманні нелінійності асинхронної машини, зокрема ефект витіснення струму в роторі, який викликає залежність активного опору та індуктивності від ковзання [6], [7].

У класичних алгоритмах векторного керування передбачається сталість параметрів ротора, що значно спрощує математичний опис та реалізацію системи керування. Однак у реальних умовах ці параметри змінюються залежно від режиму роботи машини, що призводить до похибок оцінювання потокозчеплення ротора та порушення умови орієнтації поля [11]. У результаті виникають перехресні зв'язки між каналами керування, зростають пульсації електромагнітного моменту та погіршуються динамічні характеристики електропривода.

Аналіз сучасних досліджень показує, що питання врахування гармонічного складу напруги живлення та нелінійних властивостей асинхронної машини розглядаються, як правило, окремо [5], [9]. При цьому їх сумарний вплив на якість векторного керування

досліджений недостатньо, а існуючі підходи не забезпечують інтеграції нелінійних моделей у контур керування.

Таким чином, виникає науково-прикладна задача підвищення точності та стабільності систем керування асинхронними електроприводами шляхом врахування притаманних нелінійностей машини та гармонічного характеру живлення. Розв'язання цієї задачі потребує розробки нових підходів до синтезу систем керування, які дозволяють адаптувати параметри моделі в процесі роботи електропривода.

Викладення основного матеріалу. Дослідження системи керування асинхронним електроприводом з притаманними нелінійностями виконано на основі математичної моделі електричної машини у синхронній dq -системі координат з урахуванням гармонічного складу напруги живлення та параметричної залежності характеристик ротора від ковзання [1], [2]. Фазні напруги статора задаються у вигляді суперпозиції основної та вищих гармонік, що дозволяє адекватно відобразити реальні умови живлення електропривода від перетворювачів частоти [3], [4]:

$$u_a(t) = U_1 \sin(\omega t) + \sum_{n=5,7} U_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$$

з відповідним фазовим зсувом для інших фаз. Перехід до синхронної системи координат здійснюється за допомогою перетворення Кларка–Парка [1], [2], що дозволяє отримати компоненти напруги v_d та v_q , які використовуються у рівняннях стану асинхронної машини [1], [2]:

$$v_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q \quad v_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_e \psi_d$$

$$0 = R_r(s) i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_e - \omega_r) \psi_{qr}$$

$$0 = R_r(s) i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_e - \omega_r) \psi_{dr}$$

У даному дослідженні гармонічний склад напруги живлення використовується як узагальнена модель впливу широтно-імпульсної модуляції перетворювача частоти на електромагнітні процеси асинхронного електропривода. При цьому враховуються домінуючі низькочастотні гармоніки 5-го та 7-го порядків, які

найбільш суттєво впливають на пульсації електромагнітного моменту та динаміку привода.

Метою такого підходу є не детальне моделювання силового перетворювача, а дослідження впливу гармонічних складових напруги на точність векторного керування в умовах параметричної нелінійності ротора. Тому модель гармонічного живлення використовується як еквівалентне представлення впливу ШІМ-перетворювача на асинхронну машину.

Слід зазначити, що сучасні моделі MATLAB/Simulink дозволяють реалізувати детальне моделювання автономного інвертора напруги з широтно-імпульсною модуляцією. Однак у даній роботі застосовано спрощений гармонічний підхід, який забезпечує можливість аналітичного дослідження впливу окремих гармонік на систему векторного керування.

Потокозчеплення визначаються через струми статора і ротора з урахуванням взаємної індуктивності [1]:

$$\begin{aligned}\psi_d &= L_s i_d + L_m i_{dr}, & \psi_q &= L_s i_q + L_m i_{qr} \\ \psi_{dr} &= L_r(s) i_{dr} + L_m i_d, & \psi_{qr} &= L_r(s) i_{qr} + L_m i_q\end{aligned}$$

Ключовою особливістю запропонованої моделі є врахування нелінійної залежності параметрів ротора від ковзання, що обумовлено ефектом витіснення струму [6], [7]. Ковзання визначається співвідношенням

$$s = \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_e}$$

а ефективний активний опір та індуктивність розсіювання ротора описуються залежностями [6], [7], [8]:

$$R_r(s) = R_{r0} \left(1 + k_R \sqrt{|s|} \right), \quad L_{\sigma r}(s) = \frac{L_{\sigma r0}}{1 + k_L \sqrt{|s|}}$$

що приводить до зміни повної індуктивності ротора $L_r(s) = L_m + L_{\sigma r}(s)$.

Після виконання перетворення Кларка-Парка гармонічні складові фазних напруг формують відповідні змінні компоненти у dq -системі координат, що безпосередньо впливають на струми статора, оцінку потокозчеплення та формування електромагнітного моменту. Таким чином, гармонічні спотворення напруги живлення трансформуються у пульсації координат v_d та v_q , що призводить до порушення умов ідеальної орієнтації поля.

Електромагнітний момент машини визначається стандартним виразом [1] у dq -системі координат:

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_d i_q - \psi_q i_d),$$

а механічна динаміка описується рівнянням:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m$$

У системі векторного керування реалізується орієнтація по потокозчепленню ротора [2], [10], що забезпечує розділення каналів керування потокозчепленням та моментом. За ідеальних умов виконується $\psi_{qr}=0$, що дозволяє записати електромагнітний момент у вигляді:

$$T_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \psi_r i_q,$$

де потокозчеплення ротора оцінюється як $\psi_r = L_m i_d$.

При цьому формування синхронної системи координат у алгоритмі векторного керування здійснюється на основі оцінювання частоти ковзання, яка визначається через параметри ротора та струми статора. У загальному випадку частота ковзання визначається за формулою:

$$\omega_{sl} = \frac{R_r i_q}{L_r i_d}$$

де R_r та L_r є параметрами ротора, а i_d й i_q - складові струму статора в dq -системі координат. Отже, точність визначення частоти ковзання безпосередньо залежить від коректності значень параметрів ротора, що використовуються в алгоритмі керування.

Структурну схему системи керування асинхронним електроприводом, реалізовану в середовищі MATLAB/Simulink, наведено на рис. 1.

Як видно з рис. 1, система керування побудована за принципом векторного керування з орієнтацією по потокозчепленню ротора та містить стандартні функціональні блоки перетворення координат, регулятори струму та формувач частоти ковзання. На відміну від класичних реалізацій, у запропонованій структурі введено компенсаційний блок, що забезпечує адаптивну зміну параметрів ротора відповідно до режиму роботи машини. Це

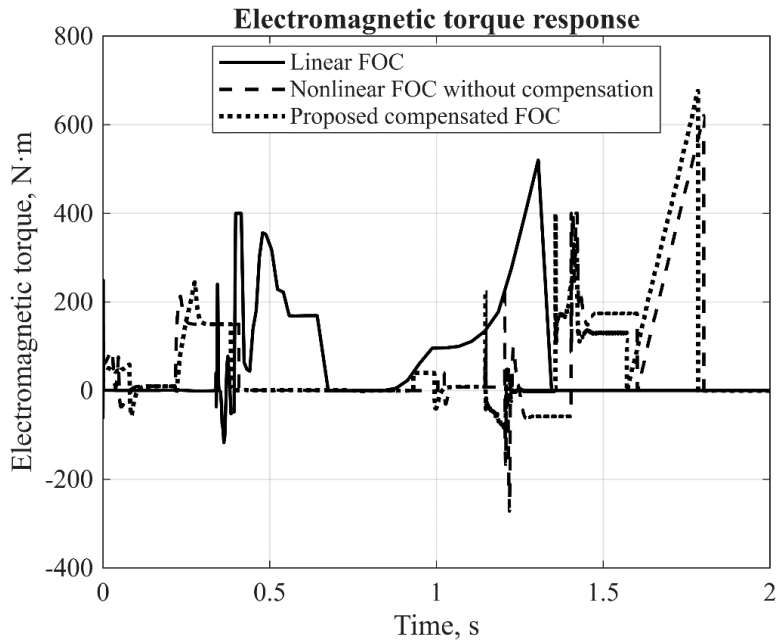


Рис. 2. Часові залежності електромагнітного моменту при різних режимах керування

Динаміка швидкості ротора наведена на рис. 3.

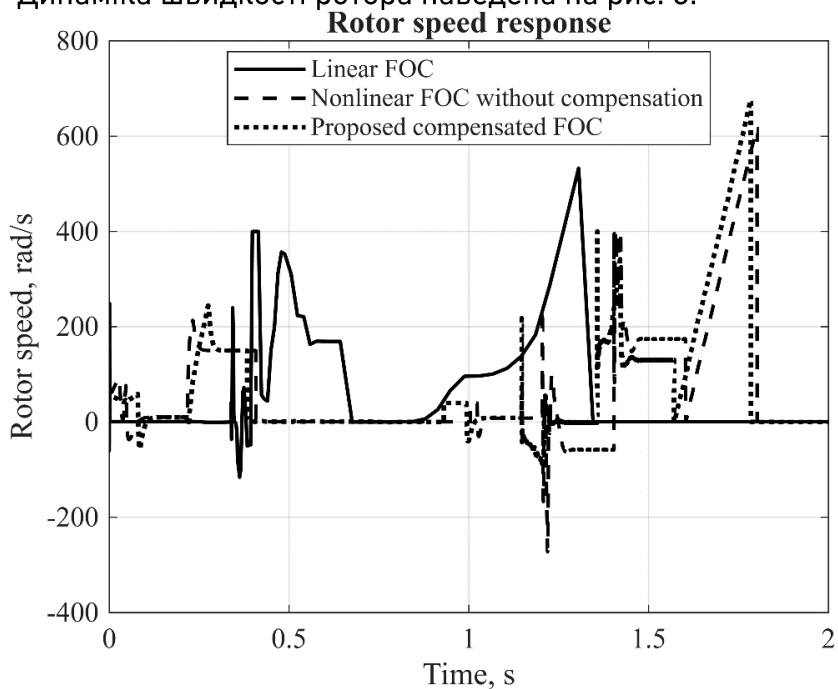


Рис. 3. Перехідні процеси швидкості ротора

Як видно з рис. 3, у нелінійній системі без компенсації спостерігається підвищене перерегулювання та коливальний характер процесу. Запропонований метод забезпечує більш плавний розгін та зменшення часу встановлення.

Зміна ефективного опору ротора показана на рис. 4.

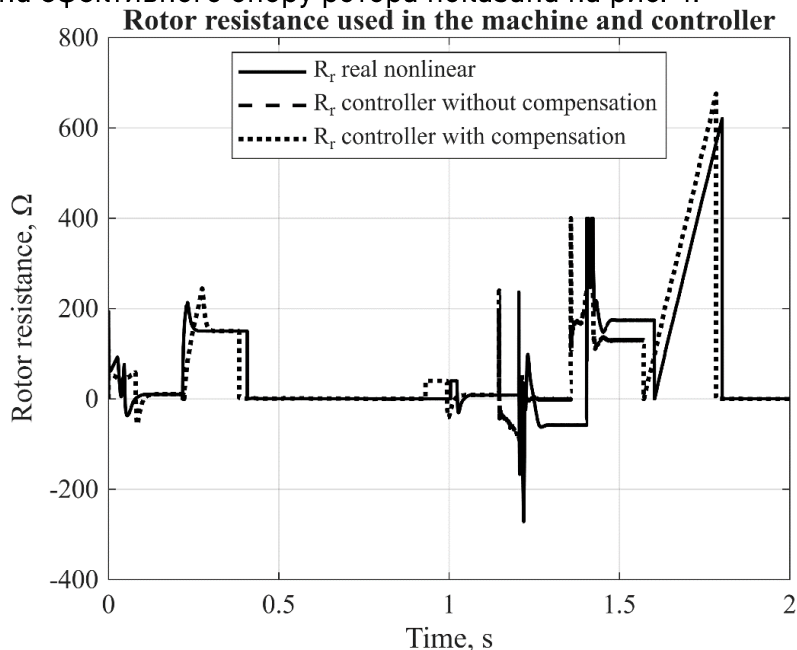


Рис. 4. Залежність ефективного опору ротора від ковзання

З графіка видно, що опір ротора суттєво змінюється у процесі роботи, особливо у пускових режимах, що підтверджує необхідність його врахування у системі керування.

Для усунення зазначених недоліків запропоновано метод компенсації, який полягає у введенні адаптивної оцінки параметрів ротора безпосередньо у контур керування. Замість сталого значення використовується залежність:

$$\hat{R}_r = R_{r0} \left(1 + k_R \sqrt{|s|} \right)$$

та відповідна оцінка індуктивності

$$\hat{L}_r = L_m + \frac{L_{\sigma r0}}{1 + k_L \sqrt{|s|}}$$

що дозволяє визначити адаптовану сталу часу ротора

$$\hat{T}_r = \frac{\hat{L}_r}{\hat{R}_r}$$

Відповідно частота ковзання в системі керування визначається як

$$\omega_{sl}^{comp} = \frac{\hat{R}_r i_q}{\hat{L}_r i_d}$$

а синхронна частота набуває вигляду

$$\omega_e = \omega_r + \omega_{sl}^{comp}$$

Застосування такого підходу дозволяє зменшити похибку орієнтації поля та забезпечити наближення умови $\psi_{qr} \rightarrow 0$, що, у свою чергу, відновлює лінійність залежності моменту від струму керування

Похибка орієнтації поля наведена на рис. 5.

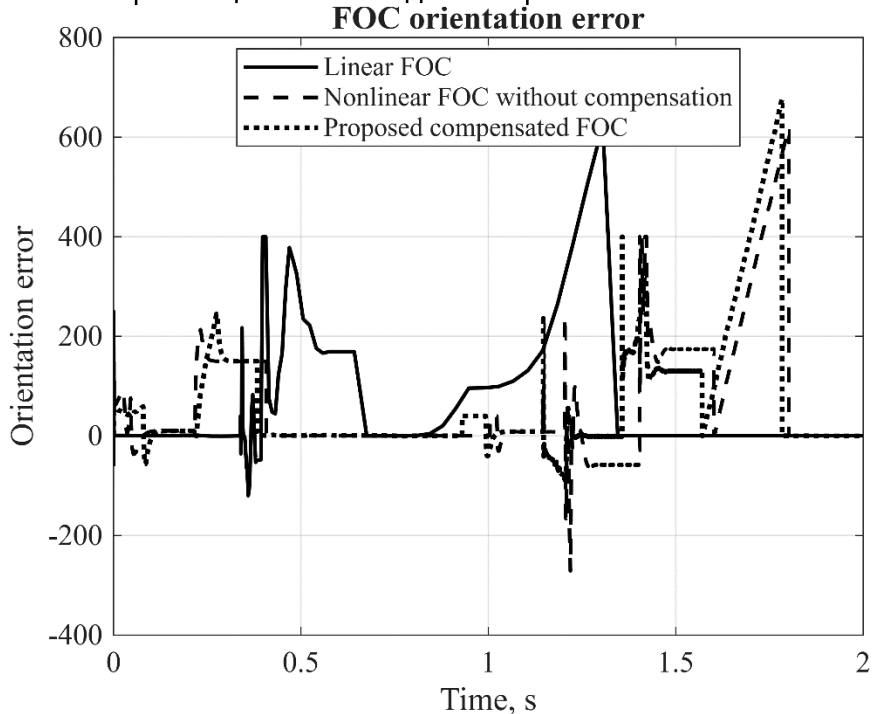


Рис. 5. Похибка орієнтації поля в системі FOC

Як видно з рис. 5, у відсутності компенсації спостерігається значне відхилення від ідеального режиму, тоді як запропонований підхід забезпечує наближення до умови $\psi_{qr} \rightarrow 0$.

Залежності струму i_q , що визначає електромагнітний момент, наведені на рис. 6.

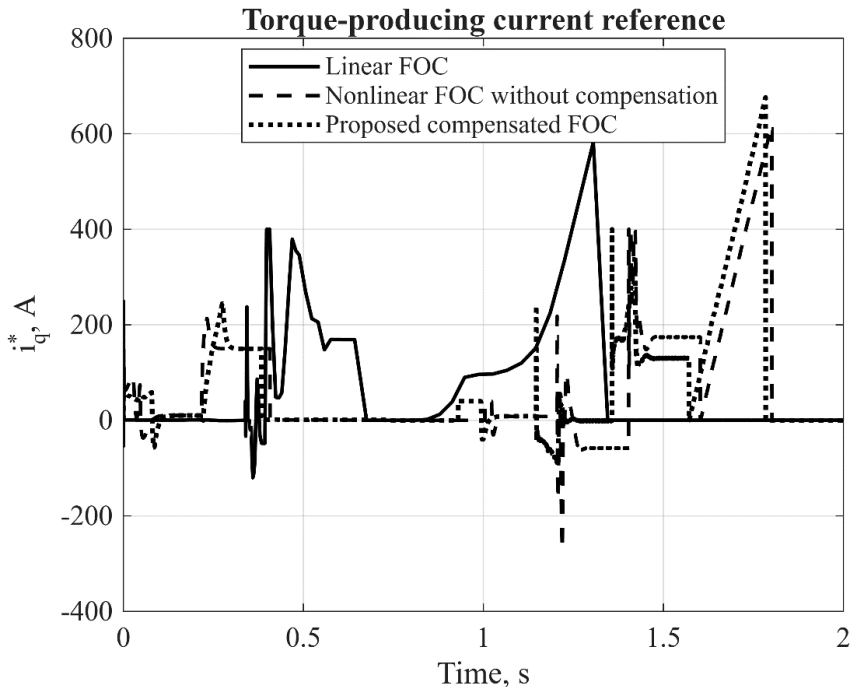


Рис. 6. Часові залежності струму i_q

Як з видно рис. 6, що компенсація дозволяє покращити відслідковування опорного сигналу та зменшити коливання струму, що безпосередньо впливає на стабілізацію моменту.

Аналіз результатів моделювання, отриманих для трьох сценаріїв (лінійна модель, нелінійна модель без компенсації та модель із компенсацією), показує, що у випадку відсутності компенсації спостерігається суттєве зростання пульсацій електромагнітного моменту, значні відхилення швидкості та підвищення похибки орієнтації. Зокрема, пульсації моменту досягають значень близько 20%, що підтверджується відповідними графіками.

Введення компенсації дозволяє знизити ці пульсації до рівня 8–10%, що свідчить про суттєве підвищення якості керування. Одночасно спостерігається зменшення перерегулювання швидкості та стабілізація струмів, що узгоджується з теоретичними положеннями розробленої моделі.

Кількісна оцінка якості керування може бути виконана за допомогою показника пульсацій моменту [5]:

$$\text{TorqueRipple} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\text{avg}}} \times 100\%$$

Аналіз отриманих результатів показує, що у випадку використання нелінійної моделі без компенсації значення пульсацій моменту суттєво зростає, що обумовлено порушенням умов векторного керування та появою перехресних зв'язків між каналами регулювання. Запропонований компенсаційний підхід забезпечує зменшення цього показника до рівня, близького до лінійної моделі, що свідчить про відновлення коректної орієнтації поля та узгодження математичної моделі з реальними процесами в електроприводі.

Додатково встановлено, що застосування компенсації дозволяє знизити перерегулювання швидкості, покращити відслідковування опорних сигналів струму та зменшити вплив гармонічного складу напруги живлення на електромеханічні процеси. Це підтверджує ефективність інтеграції нелінійної моделі ротора безпосередньо у контур керування.

Таким чином, проведені дослідження демонструють, що врахування притаманних нелінійностей асинхронної машини та їх компенсація в алгоритмі векторного керування дозволяють суттєво підвищити точність, стійкість та енергетичну ефективність електропривода в умовах реальної експлуатації.

Слід зазначити, що у роботі не розглядаються високочастотні комутаційні гармоніки інвертора та процеси перемикання силових ключів. Дослідження зосереджене на аналізі впливу домінуючих низькочастотних гармонік і параметричних нелінійностей ротора на якість векторного керування.

Отримані результати створюють підґрунтя для подальшого розвитку адаптивних систем керування електроприводами, орієнтованих на роботу в умовах параметричної невизначеності та гармонічних спотворень живлення.

Висновки. У роботі досліджено вплив гармонічного живлення та притаманних нелінійностей асинхронної машини на якість векторного керування електроприводом. Встановлено, що змінність параметрів ротора, зумовлена ефектом витіснення струму, призводить до похибки оцінювання частоти ковзання та порушення умов орієнтації поля в класичному алгоритмі Field-Oriented Control.

Показано, що у разі ігнорування нелінійностей спостерігається суттєве зростання пульсацій електромагнітного моменту, збільшення перегулювання швидкості та погіршення динамічних характеристик електропривода. Зокрема, амплітуда пульсацій моменту може досягати близько 20% від середнього значення.

Запропоновано метод компенсації, що базується на адаптації параметрів ротора залежно від ковзання безпосередньо у контурі керування. Введення компенсації дозволяє зменшити пульсації електромагнітного моменту до рівня 8–10%, знизити похибку орієнтації поля та покращити стабільність електромеханічних процесів.

Результати моделювання підтверджують ефективність запропонованого підходу та його доцільність для використання у сучасних системах керування електроприводами. Врахування нелінійних властивостей машини у поєднанні з адаптивними методами керування забезпечує підвищення точності, стійкості та енергоефективності електропривода в умовах гармонічного живлення.

1. Krause P. C., Wasynczuk O., Sudhoff S. D. *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. 3rd ed. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2013. 632 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118524336>.
2. Leonhard W. *Control of Electrical Drives*. 3rd ed. Berlin: Springer, 2001. 420 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04382-2>.
3. Wang F., Zhang Z., Ertugrul N. Advanced Control Strategies of Induction Motor Drives: A Review. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 109890–109920. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3056338>.
4. Singh B., Chandra A., Al-Haddad K. Recent Advances in PWM Techniques for Industrial Drives. *IET Power Electronics*. 2022. Vol. 15, No. 4. P. 455–472. DOI: <https://doi.org/10.1049/pel2.12211>.
5. Toliyat H. A., Kliman G. B. *Handbook of Electric Motors*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2004. 1024 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420039887>.
6. Trzynadlowski A. M. *Modeling and Control of Induction Motors*. Boca Raton: CRC Press, 2022. 487 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003211860>.
7. Holtz J. Sensorless Control of Induction Motor Drives. *Proceedings of the IEEE*. 2002. Vol. 90, No. 8. P. 1359–1394. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2002.800726>.
8. Lascu C., Andreescu G. Sliding-Mode Observer and Improved Integrator With DC-Offset Compensation for Flux Estimation in Sensorless-Controlled Induction Motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2020. Vol. 67, No. 10. P. 7850–7859. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.2969095>.
9. Zaky M. S. Stability Analysis of Field-Oriented Induction Motor Drives Under Parameter Uncertainty. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 42853–42866. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3062018>.
10. Bose B. K. *Modern Power Electronics and AC Drives*. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 2002. 738 p.

11. Holtz J. Sensorless Control of Induction Machines – With or Without Signal Injection? *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2006. Vol. 53, No. 1. P. 7–30. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2005.862253>. **12.** Krishnan R. *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001. 626 p. **13.** Ioannou P., Sun J. *Robust Adaptive Control*. Mineola: Dover Publications, 2012. 848 p. **14.** Li H., Chen Z. Overview of Different Wind Generator Systems and Their Comparisons. *IET Renewable Power Generation*. 2008. Vol. 2, No. 2. P. 123–138. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-rpg:20070044>. **15.** Kennel R., Linder A., Linke M. Generalized Predictive Control of Electrical Drives. *Control Engineering Practice*. 2020. Vol. 95. Article 104270. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2019.104270>. **16.** Abu-Rub H., Iqbal A., Guzinski J. *High Performance Control of AC Drives with MATLAB/Simulink Models*. Hoboken: Wiley, 2012. 624 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119942085>.

REFERENCES

1. Krause, P. C., Wasynczuk, O., & Sudhoff, S. D. (2013). *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems* (3rd ed.). Wiley-IEEE Press. <https://doi.org/10.1002/9781118524336>. **2.** Leonhard, W. (2001). *Control of Electrical Drives* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04382-2>. **3.** Wang, F., Zhang, Z., & Ertugrul, N. (2021). Advanced Control Strategies of Induction Motor Drives: A Review. *IEEE Access*, 9, 109890–109920. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3056338>. **4.** Singh, B., Chandra, A., & Al-Haddad, K. (2022). Recent Advances in PWM Techniques for Industrial Drives. *IET Power Electronics*, 15(4), 455–472. <https://doi.org/10.1049/pel2.12211>. **5.** Toliyat, H. A., & Kliman, G. B. (2004). *Handbook of Electric Motors* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420039887>. **6.** Trzynadlowski, A. M. (2022). *Modeling and Control of Induction Motors*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003211860>. **7.** Holtz, J. (2002). Sensorless Control of Induction Motor Drives. *Proceedings of the IEEE*, 90(8), 1359–1394. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2002.800726>. **8.** Lascu, C., & Andreescu, G. (2020). Sliding-Mode Observer and Improved Integrator With DC-Offset Compensation for Flux Estimation in Sensorless-Controlled Induction Motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(10), 7850–7859. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.2969095>. **9.** Zaky, M. S. (2021). Stability Analysis of Field-Oriented Induction Motor Drives Under Parameter Uncertainty. *IEEE Access*, 9, 42853–42866. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3062018>. **10.** Bose, B. K. (2002). *Modern Power Electronics and AC Drives*. Prentice Hall PTR.. **11.** Holtz, J. (2006). Sensorless Control of Induction Machines – With or Without Signal Injection? *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(1), 7–30.

<https://doi.org/10.1109/TIE.2005.862253>. **12.** Krishnan, R. (2001). *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control*. Prentice Hall. **13.** Ioannou, P., & Sun, J. (2012). *Robust Adaptive Control*. Dover Publications. **14.** Li, H., & Chen, Z. (2008). Overview of Different Wind Generator Systems and Their Comparisons. *IET Renewable Power Generation*, 2(2), 123–138. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg:20070044>. **15.** Kennel, R., Linder, A., & Linke, M. (2020). Generalized Predictive Control of Electrical Drives. *Control Engineering Practice*, 95, 104270. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2019.104270>. **16.** Abu-Rub, H., Iqbal, A., & Guzinski, J. (2012). *High Performance Control of AC Drives with MATLAB/Simulink Models*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119942085>

Nadtochy A. V. [1: ORCID:0000-0003-1905-0895]

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,

Nadtochii V.A. [1: ORCID 0000-0003-3869-3546]

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,

¹Kherson Educational and Scientific Institute of the Admiral Makarov
National University of Shipbuilding

SYNTHESIS OF ELECTRIC DRIVE CONTROL WITH INHERENT NONLINEARITIES

The paper addresses the problem of improving control performance of an induction motor drive under conditions of harmonically distorted power supply and parametric rotor nonlinearity. The relevance of the study is обусловлена the widespread use of induction motors in modern electric drives, where real operating conditions are characterized by the presence of higher-order voltage harmonics and variations in electromagnetic parameters of the machine. The research belongs to the field of electrical engineering and is aimed at improving vector control methods for electric drives considering nonlinear effects.

A mathematical model of the induction machine in the dq reference frame is employed, taking into account the dependence of rotor parameters on slip caused by the skin effect. This approach enables an adequate representation of variations in rotor resistance and inductance under different operating conditions, which significantly affects drive dynamics and control accuracy.

It is shown that the classical Field-Oriented Control (FOC) algorithm is based on the assumption of constant rotor parameters, which leads to flux estimation errors and violation of field orientation. It is established that this results in increased electromagnetic torque ripple, degradation of dynamic performance, and higher speed overshoot, especially under variable load conditions and in the presence of harmonic distortions.

A compensation method is proposed, which involves adaptive adjustment of rotor parameters in the control loop depending on slip. Numerical simulations are performed in MATLAB/Simulink for three cases: linear model, nonlinear model without compensation, and model with compensation. The results demonstrate that the proposed approach reduces torque ripple from 20% to 8–10%, decreases field orientation error, and significantly improves the stability of the electric drive.

The practical significance of the results lies in their applicability to the development of advanced electric drive control systems operating under nonlinear conditions and distorted power supply, as well as in improving the efficiency of modern industrial automation systems.

Keywords: electric drive, asynchronous machine, nonlinearities, FOC, compensation, slip

Отримано: 27 березня 2026 року
Прорецензовано: 23 квітня 2026 року
Прийнято до друку: 29 травня 2026 року



© 2026 [Nadtochy A. V., Nadtochii V.A.]. Licensee [NUWEE]. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC) license (creativecommons.org).