

DOI: 10.31319/2519-2884.43.2023.7

УДК 62-83

**Дерець О.Л.**, к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0001-6432-2592, e-mail: ald\_dstu@i.ua

**Садовой О.В.**, д.т.н., професор, ORCID: 0000-0001-9739-3661, e-mail: sadovoyav@ukr.net

**Дерець Г.О.**, здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

**Derets Oleksandr**, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics

**Sadovoi Oleksandr**, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics

**Derets Hanna**, master's degree student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

## ДВОЗОННЕ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ В УМОВАХ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПРИСКОРЕННЯ

*Актуальність роботи зумовлена необхідністю адаптації методів параметричної та структурної оптимізації систем керування до можливостей сучасної технічної реалізації асинхронних електроприводів. Метою дослідження є приведення перехідних процесів релейних систем керування у відповідність вимогам до прецизійних електроприводів за допомогою метода N–i перемикачів. Посадання принципів двозонного регулювання швидкості, векторного керування машиною змінного струму, функціонування у ковзних режимах, оптимізації за швидкодією та застосування спостерігача похідної для отримання зворотного зв'язку за прискоренням надають системі керування виключно високої функціональності. Перспектива практичного застосування результатів роботи полягає в їх інтеграції до систем оптимального керування позиційними електроприводами.*

**Ключові слова:** ковзний режим; метод N–i перемикачів; спостерігач прискорення; векторне керування.

*The relevance of the work is determined by the need to adapt the methods of parametric and structural optimization of control systems to the possibilities of modern technical implementation of induction electric drives. The purpose of the study is to bring the transients of relay control systems into compliance with the requirements for precision electric drives using the N–i switching method. The combination of the principles of dual-zone speed control, vector control of an alternating current machine, operation in sliding modes, optimization by speed and the use of a derivative observer to obtain feedback on acceleration provide the control system with exceptionally high functionality. The prospect of practical application of the work results lies in their integration into systems of optimal control of positional electric drives.*

**Keywords:** sliding mode; N–i switching method; acceleration observer; vector control.

### Постановка проблеми

Короткозамкнуті асинхронні двигуни (КЗ АД) у силу своїх конструктивних особливостей [1], таких, як безконтактність, підвищена навантажувальна спроможність і відсутність характерних для двигунів постійного струму комутаційних обмежень на максимальні струм і швидкість [2], є найбільш перспективними з погляду роботи в системах із двозонним регулюванням швидкості [3]. При використанні принципу векторного полеорієнтованого керування [4] асинхронні машини не тільки дозволяють реалізувати двозонне регулювання [3, 5], але й забезпечують показники якості перехідних процесів [6, 7], досить високі для реалізації на їхній основі оптимальних за різними критеріями електромеханічних систем [8, 9]. У свою чергу, алгоритми оптимального керування [10, 11] демонструють максимальну ефективність [12, 13] у системах із гнучкими зворотними зв'язками [13–15]. Це робить актуальним синтез та дослі-

дження систем керування, які поєднують названі концепції їх побудови, з метою пошуку сучасних структурних рішень для електромеханічних систем.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Двобазне регулювання швидкості [3] сприяє більш повному використанню електричних машин у глибокорегульованих електроприводах [2], зокрема, в оптимізованих за швидкодією [13]. При векторному керуванні асинхронними електроприводами [2, 4], яке передбачає стабілізацію потокозчеплення машини відповідним контуром регулювання [6, 7], застосування алгоритму ослаблення поля не вимагає відчутного ускладнення системи керування [8], тому що в ній обчислюються всі необхідні для цього сигнали. При ослабленні поля істотно змінюється як сам потік [3], так й обумовлені ступенем насичення магнітного кола машини величини індуктивностей [1]. Найбільш ефективними в таких умовах є алгоритми розривного керування [4] полем і швидкістю КЗ АД. На протигагу системам з безперервними регуляторами [1], у яких налаштування контурів визначається параметрами об'єкта керування й величиною потокозчеплення [3], релейні системи [14] векторного полеорієнтованого керування мають низьку чутливість до координатних і параметричних збурень [7]. Вони забезпечують повну взаємну незалежність підсистем регулювання активної й реактивної потужності асинхронного двигуна [7], що принципово неможливо в безперервних системах [1] при несталості параметрів електропривода, яка підсилюється цілеспрямованою зміною магнітного потоку [3].

Застосування короткозамкнутих асинхронних двигунів [5], які мають порівняно малі моменти інерції [1], максимально сприяє розв'язанню задачі мінімізації тривалості перехідних процесів. Разом з тим, більшість методів оптимізації електроприводів за швидкодією [9, 10] основана на прогнозованості руху. Сталість прискорення на окремих інтервалах регулювання швидкості є неодмінною умовою прогнозованості перехідних траєкторій [11, 12]. Такий підхід характерний як для позиційних електроприводів [13], так і для більш складних систем [14]. Для його реалізації система повинна бути оснащена засобами обчислення сигналу зворотного зв'язку за прискоренням [13]. При цьому спостерігачі прискорення повинні повною мірою враховувати специфіку режимів функціонування релейних систем [14, 15].

### Формулювання мети дослідження

Метод N-і перемикань [13] є ефективним засобом оптимізації за швидкодією релейних систем підпорядкованого регулювання з гнучким зворотним зв'язками [10]. Він дозволяє синтезувати не лише каскад регуляторів вихідної координати та її похідних [11, 12], але й релейні регулятори спостерігачів прискорення [15], використовуючи вкрай простий математичний апарат. Метою роботи є застосування цього методу для параметричного синтезу релейної системи керування асинхронним електроприводом з двобазним регулюванням швидкості та порівняльне дослідження перехідних процесів при різних варіантах зворотних зв'язків з метою визначення найбільш ефективного структурного рішення.

### Виклад основного матеріалу

Система диференціальних рівнянь динаміки асинхронної машини з фазним ротором, записана в нерухомій системі координат з осями  $\alpha, \beta$ , має вигляд [6]

$$\left. \begin{aligned} U_{s\alpha} &= I_{s\alpha} R_s + p\Psi_{s\alpha} \\ U_{s\beta} &= I_{s\beta} R_s + p\Psi_{s\beta} \\ 0 &= I_{r\alpha} R_r + p\Psi_{r\alpha} + \omega\Psi_{r\beta} \\ 0 &= I_{r\beta} R_r + p\Psi_{r\beta} - \omega\Psi_{r\alpha} \\ M &= z_p \frac{m}{2} L_m (I_{s\beta} I_{r\alpha} - I_{s\alpha} I_{r\beta}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де  $m$  — число фаз реальної машини при двофазній моделі,  $z_p$  — число пар полюсів машини,  $\Psi_r$  — вектор потокозчеплення ротора,  $I_s$  — вектор струму статора,  $U_s$  — вектор напруги статора,  $p$  — оператор диференціювання за часом,  $L_m$  — взаємна індуктивність,  $R_s, R_r$  — активні опори обмоток статора й ротора.

Основою для синтезу системи векторного керування є диференціальні рівняння в системі координат, що обертається зі швидкістю поля. Вісь  $u$  такої системи орієнтована за напрямком вектора потоку, тому  $|\Psi_r| = \Psi_r = \Psi_{rv}$ , а вісь  $v$  випереджає її на  $90^\circ$ , і проекція потоку на цю вісь дорівнює нулю. Ці рівняння мають вигляд

$$\left. \begin{aligned} p\Psi_r &= -\frac{R_r}{L_r}\Psi_r + \frac{R_r L_m}{L_r} I_{su} \\ pI_{su} &= \frac{L_m R_r}{L_r L_s'} \Psi_r - \frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{L_r L_s'} I_{su} + \frac{1}{L_s'} U_{su} + I_{sv} \omega_k \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} p\omega &= \frac{3z_p L_m}{2J L_r} I_{sv} \Psi_r - \frac{M_c}{J} \\ pI_{sv} &= -\frac{L_m}{L_r L_s'} \Psi_r \omega - \frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{L_r L_s'} I_{sv} + \frac{1}{L_s'} U_{sv} - I_{su} \omega_k \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де  $J$  — момент інерції,  $M_c$  — момент опору,  $L_s'$  — перехідна індуктивність статора,  $L_s, L_r$  — індуктивності статора й ротора,  $\omega$  — кутова швидкість ротора,  $\omega_k = \frac{R_r L_m}{L_r} I_{sv} + \omega$  — кутова швидкість системи координат.

В рівняннях (2), (3) проекції векторів напруги й струму статора на координатну вісь  $u$  належать до каналу регулювання поточозчеплення (2), або каналу реактивної потужності, а проекції на вісь  $v$  — до каналу регулювання моменту й швидкості двигуна (3), або каналу активної потужності. У випадку оптимізації систем розривного керування [13] система рівнянь асинхронної машини не просто піддається декомпозиції на дві підсистеми рівнянь [6], що описують динаміку підсистем регулювання частоти обертання й магнітного поля. На додачу до власне поділу рівнянь як такого, ці підсистеми розглядаються як повністю незалежні, по-перше, завдяки тому, що частина перехресних зв'язків, вважається повністю компенсованою релейними регуляторами в ковзних режимах, а саме, доданок  $+I_{sv}\omega_k$  в (2) і доданок  $-I_{su}\omega_k$  в (3), і по-друге, величина модуля вектора поточозчеплення ротора  $\Psi_r$ , яка присутня у підсистемі регулювання частоти обертання, вважається постійною. Останнє допущення абсолютно обґрунтоване в системах зі стабілізацією поля, а в системах з ослабленням поля його застосування може бути виправдане порівняно низьким темпом цього процесу.

У рівняннях (1)—(3) електрорушійна сила обертання представлена доданками  $\Psi_r \omega$ . Розглянемо релейну систему оптимального керування асинхронним електроприводом, у яку для реалізації відомого принципу підтримки сталості ЕРС обертання введений функціональний перетворювач, який формує завдання на поточозчеплення машини  $\Psi_r^*$  з умови стабілізації ЕРС на номінальному рівні  $|\Psi_r \cdot \omega| = \Psi_{r nom} \cdot \omega_{nom} = const$ :

$$\Psi_r^* = \frac{\Psi_{r nom} \cdot \omega_{nom}}{|\omega|}, \quad \Psi_r^* \leq \Psi_{r nom}. \quad (4)$$

Алгоритмічний синтез системи регулювання поточозчеплення (СРП) і системи регулювання швидкості (СРШ) із гнучкими зворотними зв'язками, побудованих за принципом каскадно-підпорядкованого з'єднання регуляторів основної й проміжної координат [6], здійснимо із застосуванням методу N-ї перемикачів [13]. Алгоритми оптимального керування потоком і швидкістю при жорстких зворотних зв'язках за проміжними координатами мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} u_{R\psi} &= I_{su}^* = I_{max} \text{sign}(\Psi_r^* - \Psi_r - K_{\psi i} I_{su}) \\ u_{Rir} &= U_{su}^* = U_{max} \text{sign}(I_{su}^* - I_{su}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} u_{R\omega} &= I_{sv}^* = I_{max} \text{sign}(\omega^* - \omega - K_{\omega i} I_{sv}) \\ u_{Ria} &= U_{sv}^* = U_{max} \text{sign}(I_{sv}^* - I_{sv}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

де  $u_{R\psi}, u_{R\omega}$  — вихідні напруги регуляторів потокозчеплення й швидкості, які мають зміст заданих значень реактивного і активного струмів,  $u_{Rir}, u_{Ria}$  — вихідні напруги регуляторів реактивного й активного струмів, які задають відповідні складові напруги статора асинхронної машини,  $K_{\psi i}, K_{\omega i}$  — коефіцієнти зворотних зв'язків регуляторів потоку й швидкості за струмом; символом «\*» позначено задані величини, а індексом «max» — рівні обмежень координат.

На рис. 1 наведено перехідні процеси системи двозонного керування швидкістю асинхронного електропривода із регуляторами (5), (6) та формувачем заданого потоку (4). Зауважимо, що практична реалізація такої системи вимагає застосування ідентифікатора координат асинхронної машини, робота якого в цьому дослідженні не розглядається.

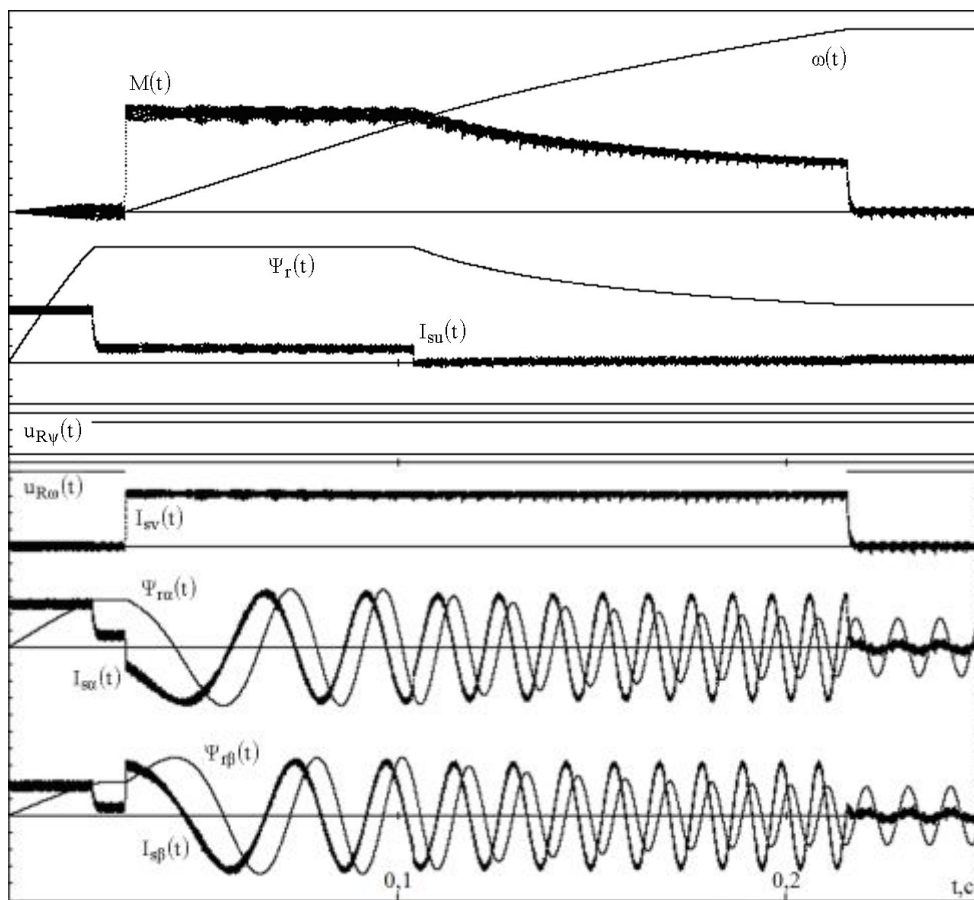


Рис. 1. Динаміки електропривода з обмеженням активного струму АД

Діаграми сигналів регуляторів свідчать про існування ковзних режимів в обох підсистемах керування та про оптимальність за швидкодією, забезпечену застосуванням методу N-і перемикачів. Досліджувана структура забезпечує ослаблення поля, обернено пропорційне частоті обертання, згідно з алгоритмом (4). Це дозволяє здійснити розгін до швидкості  $\omega^* = 2\omega_{nom}$  без перевищення допустимої напруги статорних обмоток.

Алгоритми керування (5), (6) забезпечують високочастотні ковзні режими завдяки введенню проміжних зв'язків за реактивною й активною складовими струму статора, які пропорційні похідним потоку й швидкості згідно з системами рівнянь (2), (3). Але вони не вимагають безпосереднього обчислення величин цих похідних, тому допускають порівняно просту техніч-

ну реалізацію. У ковзному режимі регуляторів потокозчеплення й швидкості СРП і СРШ описуються диференціальними рівняннями зниженого порядку:

$$\begin{aligned}\Psi_r^* - \Psi_r - K_{\Psi i} \cdot I_{su} &= 0; \\ \omega^* - \omega - K_{\omega i} \cdot I_{sv} &= 0,\end{aligned}$$

для яких, на відміну від (2), (3), перехресний зв'язок СРП і СРШ явно виражений тільки рівнянням (4). Завдяки цьому головною особливістю алгоритмічного синтезу релейної системи двозонного регулювання є можливість розгляду сполучених підсистем керування активною й реактивною потужністю як повністю незалежних. Оскільки взаємний зв'язок СРП і СРШ каналом  $\Psi_r^*$  згідно (4) здійснюється за допомогою «повільної» координати  $\omega$ , темп зміни якої значно нижче темпу зміни потокозчеплення (рис. 1), похідною заданого потокозчеплення  $p\Psi_r^*$  в алгоритмі (5) можна знехтувати без шкоди для точності й стійкості СРП. Загалом до динаміки системи регулювання потоку, яка є допоміжною, не висувуються жорсткі вимоги, тому її перехідні процеси є задовільними для двозонної системи навіть при жорсткому зворотному зв'язку за струмом намагнічування  $I_{su}$ .

Разом з тим, отриманий вигляд діаграм моменту та швидкості є вкрай небажаним для побудови систем, що вимагають рівноприскореного руху, зокрема, позиційних електроприводів. Перехідні процеси, що протікають в умовах обмежень активної та реактивної складових струму (рис. 1), демонструють опосередковане струмообмеження у статорному колі двигуна в динамічних режимах. Але саме з цієї причини темп розгону не залишається постійним в другій зоні регулювання швидкості через зменшення електромагнітного моменту, зумовлене ослабленням поля. Це робить актуальною побудову підсистеми регулювання швидкості із гнучким зворотним зв'язком [13], алгоритм керування якої має вигляд

$$\left. \begin{aligned}u_{R\omega} = \varepsilon^* &= \varepsilon_{max} \operatorname{sign}(\omega^* - \omega - K_{\omega\varepsilon} \varepsilon) \\ u_{R\varepsilon} = U_{sv}^* &= U_{max} \operatorname{sign}(\varepsilon^* - \varepsilon)\end{aligned} \right\} \quad (7)$$

де  $\varepsilon$  — кутове прискорення валу двигуна,  $K_{\omega\varepsilon}$  — коефіцієнт зворотного зв'язку.

Алгоритм керування (7) у поєднанні з (4), (5) повинен забезпечити електроприводу астатизм й інваріантність до моменту опору, а також стабілізацію прискорення й прогнозовану тривалість динамічних режимів. Однак, для реалізації алгоритму (7) потрібен спостерігач похідної швидкості [4]. Алгоритмічний синтез релейної системи керування диференціатором можливо здійснити з використанням методу N-і перемикачів, забезпечивши частоту ковзного режиму, яка на порядок перевищує частоту комутації в силовій частині електропривода [15].

Об'єкт керування спостерігача першої похідної є послідовним з'єднанням двох інтеграторів, який описується системою рівнянь

$$\left. \begin{aligned}p\omega &= \varepsilon \\ p\varepsilon &= a\end{aligned} \right\} \quad (8)$$

а його релейна система керування, яка відслідковує безперервну величину  $\omega(t)$ , є одноконтурною і реалізує алгоритм

$$u_R = a^* = a_{max} \operatorname{sign}(\omega - \omega - K_{\omega\varepsilon} (c \cdot I_{sv} - \varepsilon)), \quad (9)$$

де параметричний коефіцієнт при активному струмі  $c$  дорівнює  $\Psi_{rnom} 3z_p L_m / (2JL_r)$ .

У рівняннях (8), (9) позначка «^» вказує на приналежність величин і параметрів до спостерігача. Підсистема регулювання швидкості із гнучким зворотним зв'язком (7), яка використовує обчислений спостерігачем (8), (9) сигнал зворотного зв'язку  $\varepsilon(t)$ , має вигляд

$$\left. \begin{aligned}u_{R\omega} = \varepsilon^* &= \varepsilon_{max} \operatorname{sign}(\omega^* - \omega - K_{\omega\varepsilon} \varepsilon) \\ u_{R\varepsilon} = U_{sv}^* &= U_{max} \operatorname{sign}(\varepsilon^* - \varepsilon)\end{aligned} \right\} \quad (10)$$

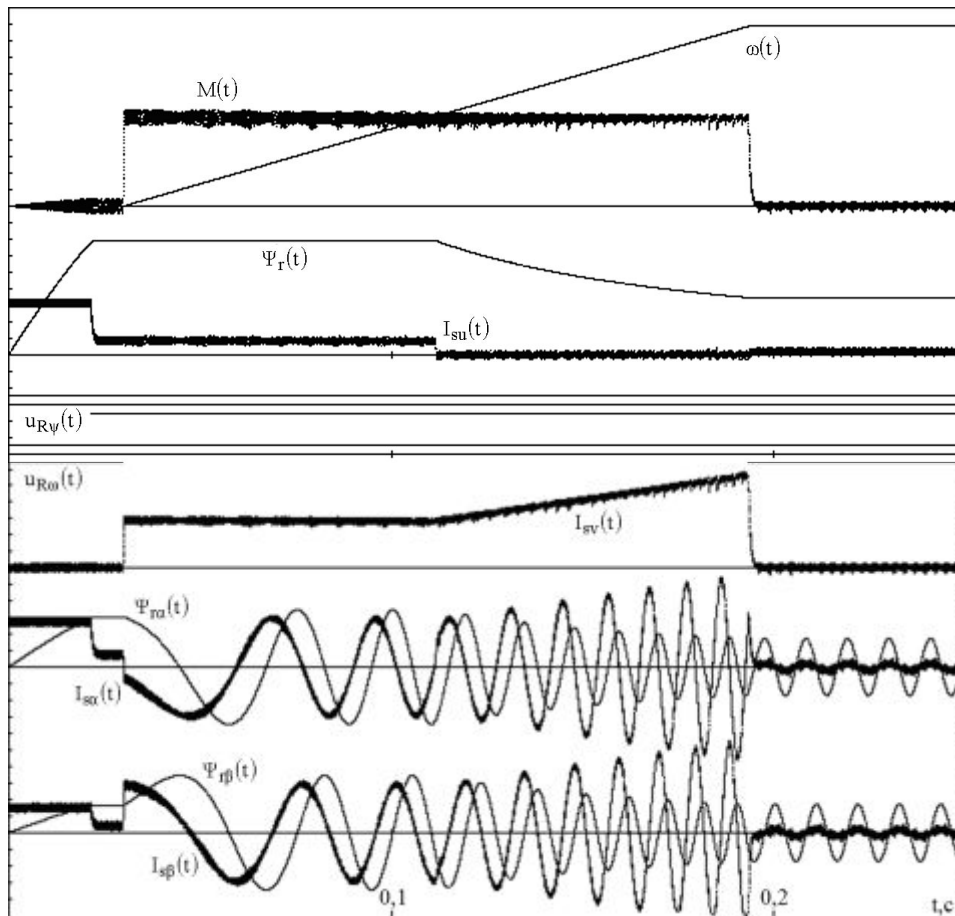


Рис. 2. Динаміка електропривода з регулятором прискорення

На рис. 2. представлено перехідні процеси для режимів намагнічування й розгону до швидкості  $\omega = 2\omega_{nom}$  при ослабленні поля асинхронного електропривода з алгоритмами керування (5), (10). Слід зазначити збільшення струму, створюване регулятором прискорення, необхідне для стабілізації динамічного моменту машини при роботі зі зменшеним магнітним потоком. Несталий характер діаграми струму є типовим для досліджуваної структури систем керування незалежно від типу електропривода і має бути врахований при оцінці теплового режиму двигуна.

#### Висновки

Результати досліджень типових динамічних режимів, проведених на моделях двозонних систем векторного полеорієнтованого керування швидкістю, підтверджують високу ефективність застосування методу N-і перемикань [6, 13, 15], використаного для синтезу алгоритмів розривного керування як власне асинхронним електроприводом, так і спостерігачем прискорення, який входить до його складу. Отримана якість перехідних процесів свідчить про обґрунтованість запропонованої структурної реалізації системи керування, яку можна вважати перспективною для новітніх систем керування.

#### Список використаної літератури

1. Boldea I., Nasar S. A. Induction Machines Handbook. Boca Raton : CRC Press, 2002. 950 p.
2. Bose B.K. Modern power electronics and AC drives. Prentice Hall PTR, 2002. 738 p.
3. Кулагін Д.О., Качур О.С., Андрієнко П.Д. Двобонне квазівекторне регулювання швидкості обертання тягового двигуна дизель-поїзда ДЕЛ-02. Вісник КДУ ім. М. Остроградського. Кременчук, 2010. Вип. 4 (63). С. 15–18.

4. Ключев О.В., Садовой О.В., Сохіна Ю.В. Спостерігач швидкості обертання і потокозчеплення ротора в системі векторного керування асинхронним електроприводом. *Збірник наукових праць ДДТУ*. Кам'янське, 2022. Вип. 2 (41). С. 89–97.
5. Zagirnyak M., Kalinov A., Melnykov V. Variable-frequency electric drive with a function of compensation for induction motor asymmetry. 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). Kyiv, P.338–344.
6. Садовой О.В., Дерещ О.Л. Спеціальні питання математичного опису і моделювання динаміки складних систем. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2014. 206 с.
7. Ключев О.В., Садовой О.В., Сохіна Ю.В. Дослідження чутливості спостерігача потокозчеплення ротора до зміни параметрів асинхронної машини. *Збірник наукових праць ДДТУ*. Кам'янське, 2021. Вип. 1 (38). С. 57–67.
8. Crowder R. *Electric Drives and Electromechanical Systems : Applications and Control*. Butterworth-Heinemann, 2019. 307 p.
9. Waschl H., Kolmanovsky I., Steinbuch M., Re L. *Optimization and Optimal Control in Automotive Systems*. Springer, 2014. 326 p.
10. Derets O., Derets H. Adaptive Algorithm for optimization in Speed of Third Order Sliding Mode Control Systems. *2020 IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine, 2020*. P.1–4.
11. Derets O., Sadovoi O., Derets H. Performance Optimization Algorithm for Electric Drive Control Systems Based on Acceleration Constraint. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2021*. P.1–4.
12. Дерещ О.Л., Садовой О.В., Дерещ Г.О. Алгоритм синтезу квазіоптимальних за швидкістю систем третього порядку із аперіодичним ковзним режимом. *Збірник наукових праць ДДТУ*. Кам'янське, 2021. Вип. 1 (38). С. 48–56.
13. Дерещ О. Л., Садовой О. В. Метод N–i перемикачів у задачах оптимізації за швидкістю : монографія. Кам'янське : ДДТУ, 2021. 252 с.
14. Shtessel Y., Edwards C., Fridman L., Levant A. *Sliding Mode Control and Observation*. Control Engineering. Birkhäuser, New York, 2014. 353 p.
15. Derets O., Sadovoi O. Structural Synthesis of an Acceleration Observer with Sliding Mode Control for Precision Electric Drives. *2020 IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine, 2020*. P.1–4.

## DUAL-ZONE VELOCITY CONTROL OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVES UNDER ACCELERATION STABILIZATION CONDITIONS

### Abstract

The relevance of the work is due to the further development of the theory of optimal control, the methods of which require adaptation to AC electric drives. The use of electric drives based on squirrel-cage asynchronous motors, which have relatively low moments of inertia, contributes as much as possible to solving the problem of speed optimization. Design features such as non-contact, increased overload capacity and the absence of switching restrictions on maximum current and velocity are the most promising from the point of view of working in systems with dual-zone velocity control. The purpose of this work is to synthesize and study an optimal control system based on relay controllers. When using the principle of vector field-oriented control, asynchronous machines not only make it possible to effectively implement dual-zone operating, but also provide performance rate of transients that are high enough for the implementation of electromechanical systems that are optimal according to various criteria. To achieve this goal, the following problems were solved: decomposition of the mathematical model of the induction machine, taking into account simplifying assumptions based on the structural properties of relay systems; synthesis of optimal control algorithms using the N–i switching method; study of a mathematical model of an electric drive. An assessment of the system's ability to stabilize intermediate coordinates was also carried out. The result of the study is algorithms for optimal control of an asynchronous motor, providing speed control upward from the main

one under conditions of limited acceleration of the electric drive. The implementation of the research results requires the use of coordinate observers. A promising direction of this research is the use of its results in the design of positional electric drives with high performance.

### References

- [1] Boldea I., Nasar S. A. (2002). *Induction Machines Handbook*. Boca Raton : CRC Press.
- [2] Bose B. K. (2002). *Modern power electronics and AC drives*. Prentice Hall PTR.
- [3] Kulagin D.O., Kachur O.S., Andrienko P.D. (2010). Dvozonne kvazivektorne rehulyuvannya shvydkosti obertannya tyahovoho dvyhuna dyzel-poyizda DEL-02. [Dual-zone quasi-vector control of the traction engine of the DEL-02 diesel train]. *Visnyk KDU – Bulletin of the KSU*, 4/2010 (63). P.15–18. Kremenchuk: KSU [in Ukrainian].
- [4] Klyuev O.V., Sadovoi O.V., Sokhina Yu.V. (2022). Sposterihach shvydkosti obertannya i potokozcheplyennya rotora v systemi vektornoho keruvannya asynkhronnym elektropryvodom. [Observer of the speed and flux linkage in the system of vector control of asynchronous electric drive]. *Zbirnyk naukovykh prats DDTU – Collection of scholarly papers of DSTU*. 2/2022 (41). P. 89–97. Kamianske: DSTU [in Ukrainian].
- [5] Zagirnyak M., Kalinov A., Melnykov V. (2017). Variable-frequency electric drive with a function of compensation for induction motor asymmetry. *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. Kyiv, P.338–344.
- [6] Sadovoy O.V., Derets O.L. (2014). *Spetsialni pytannya matematychnoho opysu i modelyuvannya dynamiky skladnykh system [Special issues of mathematical description and modeling of the dynamics of complex systems]*. Dniprodzerzhynsk: DSTU [in Ukrainian].
- [7] Klyuev O. V., Sadovoi O. V., Sokhina Yu. V. (2021). Doslidzhennya chutlyvosti sposterihacha potokozcheplyennya rotora do zminy parametriv asynkhronnoyi mashyny [Study of the sensitivity of the rotor flux linkage observer to changes in the parameters of an asynchronous machine]. *Zbirnyk naukovykh prats DDTU – Collection of scholarly papers of DSTU*. 1/2021 (38). P. 57–67. Kamianske: DSTU [in Ukrainian].
- [8] Crowder R. (2019). *Electric Drives and Electromechanical Systems : Applications and Control*. Butterworth-Heinemann.
- [9] Waschl H., Kolmanovsky I., Steinbuch M., Re L. (2014). *Optimization and Optimal Control in Automotive Systems*. Springer.
- [10] Derets O., Derets H. (2020). Adaptive Algorithm for optimization in Speed of Third Order Sliding Mode Control Systems. *2020 IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine*.
- [11] Derets O., Sadovoi O., Derets H. (2021). Performance Optimization Algorithm for Electric Drive Control Systems Based on Acceleration Constraint. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine*.
- [12] Derets O.L., Sadovoy O.V., Derets H.O. (2021). Alhorytm syntezy kvazioptymalnykh za shvydkodiyeyu system tretioho poryadku iz aperiodychnym kovznym rezhymom [Algorithm for the synthesis of quasi-optimal third-order systems with an aperiodic sliding mode]. *Zbirnyk naukovykh prats DDTU – Collection of scholarly papers of DSTU*. 1/2021 (38). P. 48–56. Kamianske: DSTU [in Ukrainian].
- [13] Derets O.L., Sadovoy O.V. (2021) *Metod N–i peremykan u zadachakh optymizatsiyi za shvydkodiyeyu [N–i switching method in speed optimization tasks]*. Kamyanske: DSTU [in Ukrainian].
- [14] Shtessel Y., Edwards C., Fridman L., Levant A. (2014). *Sliding Mode Control and Observation. Control Engineering*. Birkhäuser, New York.
- [15] Derets O., Sadovoi O. (2020). Structural Synthesis of an Acceleration Observer with Sliding Mode Control for Precision Electric Drives. *2020 IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine*.