

DOI: 10.31319/2519-2884.47.2025.9

УДК 62-503.55:681.513

Аніщенко М.В., к.т.н., професор, ORCID: 0000-0002-2720-3671,

e-mail: Mykola.Anishchenko@khpі.edu.ua

Пиленко А.В., здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти,

e-mail: andrii.pylenko@ieee.khpі.edu.ua

Семіков О.В., к.т.н., старший викладач, ORCID: 0009-0006-9807-3612,

e-mail: oleksii.semikov@khpі.edu.ua

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків

Anishchenko Mykola, Candidate of technical sciences, Professor of the Department of Automated Electromechanical Systems

Pylenko Andrii, master's degree student

Semikov Oleksii, Candidate of technical sciences, Senior lecturer of the Department of Automated Electromechanical Systems

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv

СИНТЕЗ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНІЗМУ ПОДАЧІ МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ З КОМБІНОВАНИМ КЕРУВАННЯМ

У роботі представлено синтез системи комбінованого керування слідкувального електропривода механізму подачі токарного верстата та результати комп'ютерного моделювання системи. Виконано розрахунок параметрів системи векторного керування асинхронним електроприводом з перетворювачем частоти. Розраховані параметри контуру регулювання положення слідкувального електропривода і параметри пристрою корекції для реалізації комбінованого керування за керуючим впливом. Підтверджено працездатність та ефективність розробленої системи керування. За рахунок використання комбінованого керування забезпечується часткова інваріантність системи, а величина швидкісної похибки зменшується у 4 рази.

Ключові слова: асинхронний двигун; електропривод; векторне керування; комбіноване керування; моделювання; графіки перехідних процесів.

The paper presents the synthesis of a combined control system for a servo drive of a lathe feed mechanism, along with the results of computer simulation. The parameters of the field-oriented vector control system for an asynchronous electric drive with a frequency converter are calculated. The position control loop parameters of the servo drive were determined, as well as the correction device parameters for implementing combined control based on the control input. The operability and efficiency of the developed control system are confirmed. The use of combined control ensures partial invariance of the system and results in a reduction of the speed error by four times.

Keywords: asynchronous motor; electric drive; field-oriented vector control; combined control; simulation; transient process graphs.

Постановка проблеми

Розвиток мікропроцесорних систем керування асинхронними двигунами (АД) призвів до широкого застосування в металорізальних верстатах комплектих електроприводів (ЕП) з векторним керуванням (ВК) [1].

АД з короткозамкненим ротором (АДКЗР) є більш простим, дешевим і надійним порівняно з двигуном постійного струму. Система ВК з частотно-регульованим асинхронним ЕП ґрунтується на регулюванні складових вектору струму обмотки статора, що орієнтовані за вектором потокозчеплення ротора. Завдяки регулюванню амплітудних значень змінних і кутів між їхніми векторами, забезпечується керування АД як в статичних, так і в динамічних режимах, що, порівняно із АДКЗР зі скалярним керуванням, призводить до суттєвого поліпшення якості перехідних процесів і розширення діапазону регулювання швидкості у високоточних ЕП [2, 3, 4].

В якості ЕП механізму подачі в металорізальних верстатах використовується слідкувальний електропривод (СЕП), однією із основних характеристик якого є похибка відпрацювання траєкторії переміщення. Стандартні налаштування всіх регуляторів забезпечують задані показники якості керування. Однак точність відпрацювання траєкторії переміщення залежить, крім того, від величини вхідних керувальних і збурювальних сигналів. Тому в багатьох випадках потрібні додаткові заходи для зменшення величини похибки (розузгодження).

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Підвищення точності відпрацювання траєкторії переміщення різального інструменту верстатів може відбуватися різними методами [5, 6, 7]: підвищення коефіцієнта передачі розімкнутої системи, підвищення порядку астатизму, комбіноване керування, багатоканальне керування, ковзне (релейне) керування, адаптивне керування. Наприклад, в роботі [5] наведені приклади побудови систем комбінованого і багатоканального керування. Розглянуті методи надані без ілюстрації результатів дослідження і без аналізу кількісних показників підвищення точності переміщення. Синтез системи комбінованого керування з використанням ЕП постійного струму і результати моделювання розглянуті в [1].

Формулювання мети дослідження

У роботі ставиться завдання синтезу системи комбінованого керування з використанням асинхронного ЕП з ВК для компенсації похибки за керуючим впливом і підтвердження правильності розрахунків шляхом комп'ютерного моделювання.

Виклад основного матеріалу

СЕП механізму подачі металорізальних верстатів, зазвичай, реалізується як трьохконтурна система підпорядкованого регулювання положення із зовнішнім контуром регулювання положення і внутрішніми контурами регулювання швидкості та струму [1, 5]. Контур регулювання швидкості з внутрішнім контуром регулювання струму є об'єктом контуру регулювання положення з передавальною функцією $W_{об}(s)$ (рис. 1). На рисунку прийнято позначення: Θ_z — заданий кут переміщення; Θ — фактичний кут переміщення, Δ — величина розузгодження; M_l — момент статичного навантаження; $K_{рп}$ — коефіцієнт передачі пропорційного регулятора положення; $K_{дп}$ — коефіцієнт передачі датчика положення; $W_l(s)$ — передавальна функція каналу моменту навантаження. Основною характеристикою СЕП є похибка відпрацювання траєкторії переміщення $\Delta = \Theta_z - \Theta$.

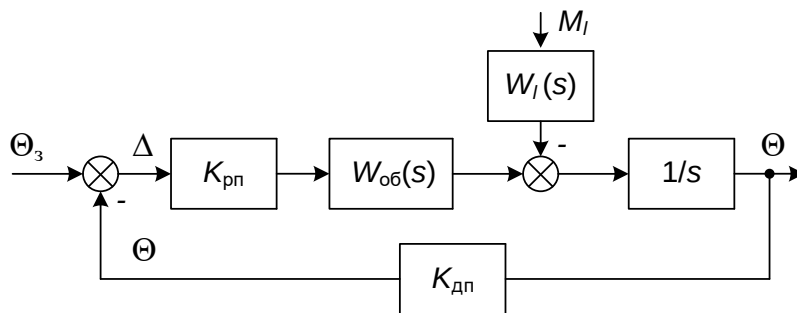


Рис. 1. Структурна схема СЕП

Як об'єкт керування розглянемо асинхронний ЕП механізму поперечної подачі для токарного верстата 16К20Ф3. Потужність двигуна постійного струму механізму поперечної подачі верстата 16К20Ф3 становить 1,1—1,2 кВт. На жаль, у літературі деякі технічні характеристики АД загально-промислового виконання серій 4А, 5А, АІР або не наведені, або мають значні помилки. Тому в роботі використовуються технічні характеристики (табл. 1) АД типу МТКФ 011-6 [2].

Для побудови системи ВК використовується симетрична модель АД у двофазній ортогональній системі координат. У теорії електромагнітних процесів для електричних машин у двофазних ортогональних осях зазвичай використовують три координатні системи [2, 3, 4]. Вони є окремим випадком системи координат, яка обертається з довільною частотою ω_k :

Таблиця 1. Технічні характеристики АД типу МТКФ 011-6

Найменування	Значення
Номинальна потужність, P_N , кВт	1,7
Момент інерції ротора, J_p , кг·м ²	0,02
Номинальний струм, I_N , А	5,8
Струм неробочого ходу, I_0 , А	4,17
$\cos \varphi_0$	0,166
Активний опір статора, R_s , Ом	5,78
Реактивний опір розсіювання статора, X_{sl} , Ом	3,6
Активний зведений опір ротора, R_r' , Ом	7,45
Реактивний зведений опір розсіювання ротора, X_{rl}' , Ом	3,17

- нерухома система координат α, β ($\omega_k = 0$);
- система координат d, q , що обертається відносно статора з кутовою частотою обертання ротора $\omega_k = \omega_r$;
- система координат x, y , яка обертається відносно статора з синхронною частотою магнітного поля статора $\omega_k = \omega_{0e}$.

Основою розробки системи ВК є модель АДКЗР у системі координат x, y . У системах ВК АД потрібно вирішувати задачу орієнтації системи координат x, y щодо вектору будь-якого параметра АД. У роботі розглядається орієнтація системи координат за вектором потокозчеплення ротора Ψ_r [2, 4]. При живленні обмоток статора АД від джерела напруги система ВК має два зворотних зв'язки за електрорушійною силою (ЕРС) АД, які залежать від складових струму статора i_{sx}, i_{sy} і потокозчеплення ротора Ψ_{rx}, Ψ_{ry} .

Структурна схема АДКЗР у обертовій системі координат x, y , яка орієнтована за вектором потокозчеплення ротору наведена на рис. 2. На схемі прийнято позначення: Ω — механічна кутова швидкість обертання ротора; p — число пар полюсів АД; M — електромагнітний момент АД; Ψ_s і Ψ_r — потокозчеплення обмоток статора і ротора; U_s, i_s — напруга і струм обмотки статора; U_r, i_r — напруга та струм обмотки ротору; L_μ — індуктивність від головного (основного) потоку АД; L_{sl}, L'_{rl} — індуктивності розсіювання фазних обмоток статора і ротора; $L_r = L'_{rl} + L_\mu$; $L_s = L_{sl} + L_\mu$; $T_r = L_r / R'_r$; $T_{sr} = \sigma L_s / R_{sr}$; k_s, k_r — безрозмірні коефіцієнти ($k_s = L_\mu / L_s$, $k_r = L_\mu / L_r$), $\sigma = 1 - L_\mu^2 / (L_s L_r)$ — коефіцієнт розсіювання АД; J — зведений момент інерції механізму подачі; M_l — момент навантаження.

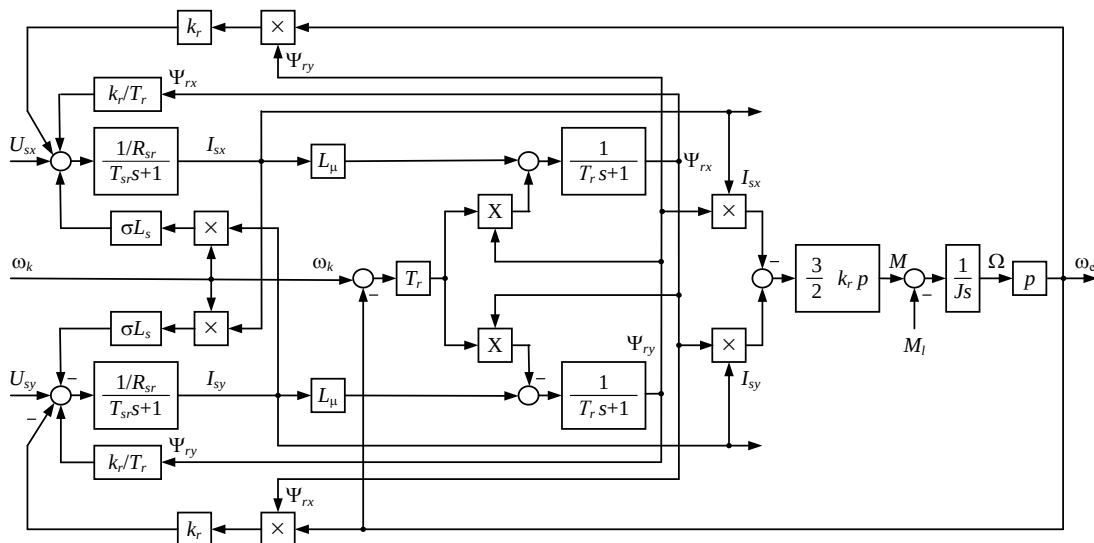


Рис. 2. Структурна схема АДКЗР у обертовій системі координат x, y , яка орієнтована за вектором потокозчеплення ротору

На підставі структурної схеми (рис. 2) на рис. 3 наведені графіки перехідних процесів $\Omega(t)$, $M(t)$ і $\Psi_r(t)$ для режиму розгону АД на холостому ході і накидання навантаження в установившому режимі, що отримані в програмі «Matlab» [8—10]. Графіки підтверджують достовірність моделі АД в системі координат x, y .

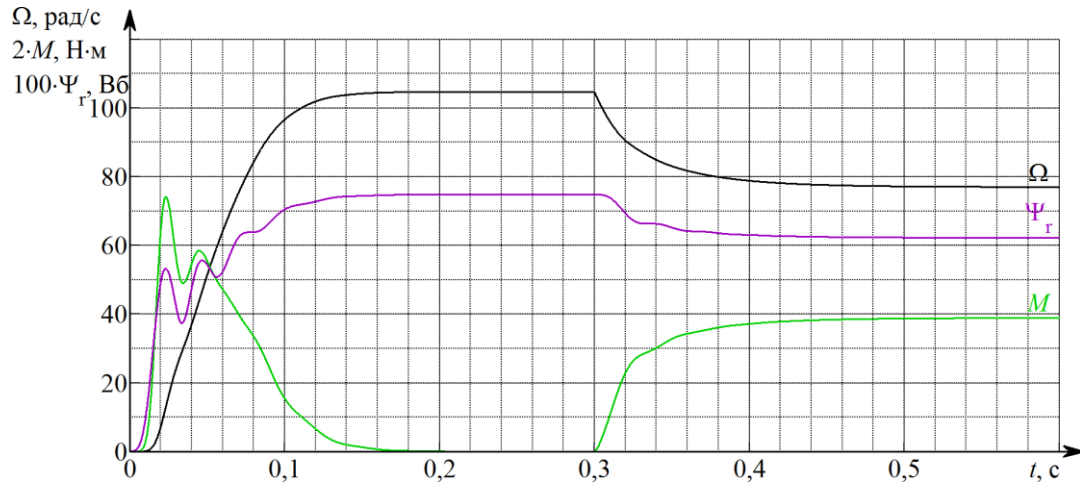


Рис. 3. Перехідні процеси в АД при накиданні номінального навантаження

Для побудови системи ВК структурна схема АД (рис. 2) перетворена з врахуванням того, що вектор потокозчеплення ротора має тільки дійсну складову $\Psi_{rx} = |\tilde{\Psi}_r| = \Psi_r$, а проекція цього вектору на уявну перпендикулярну вісь дорівнюватиме нулю $\Psi_{ry} = 0$ [2, 4]. Відповідна структурна схема системи ВК з компенсацією перехресних зворотних зв'язків в АД наведена на рис. 4 [2].

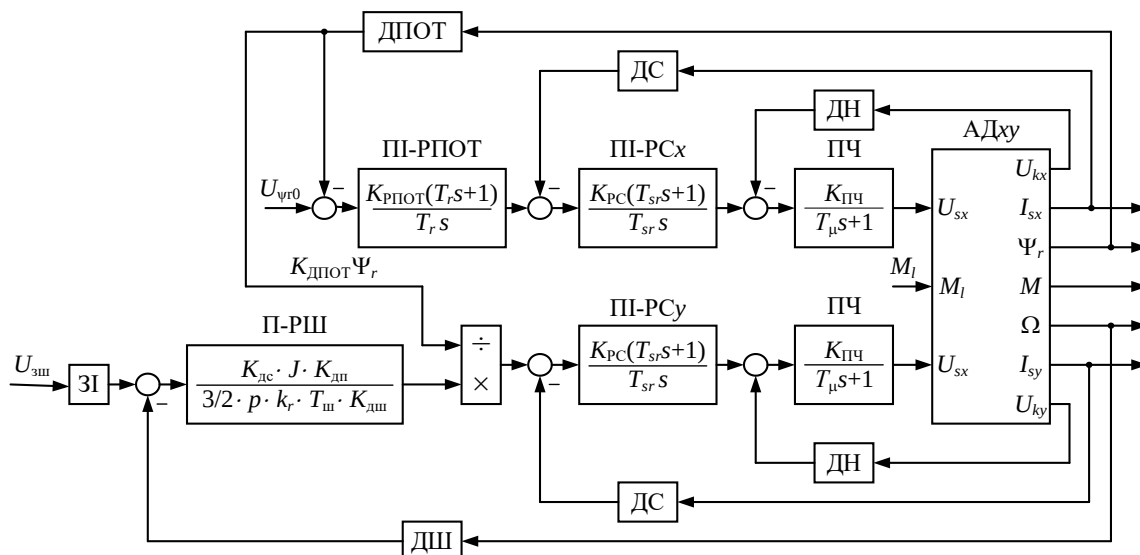


Рис. 4. Структурна схема системи ВК

На схемі (рис. 4) прийняті позначення: $U_{зш}$ — сигнал задання кутової швидкості; $U_{\Psi r0}$ — сигнал задання потокозчеплення ротора; ЗІ — задатчик інтенсивності; РШ — регулятор швидкості; ДШ — датчик швидкості; РПОТ — регулятор потокозчеплення; ДПОТ — датчик потокозчеплення; РС — регулятор струму; ДС — датчик струму; ДН — датчик напруги; ПЧ — перетворювач частоти; U_{kx} та U_{ky} — напруга перехресного зв'язку по каналах реактивного та активного струмів (для компенсації).

Розрахунок параметрів регуляторів і датчиків зворотного зв'язку виконано відповідно джерела [2]. На підставі структурної схеми (рис. 4) на рис. 5 наведені результати комп'ютерного моделювання системи ВК. Графіки перехідних процесів ілюструють режим розгону на неробочому ході з урахуванням усіх перехресних та зворотних зв'язків за ЕРС в обмотках АД з накиданням номінального навантаження в усталеному режимі.

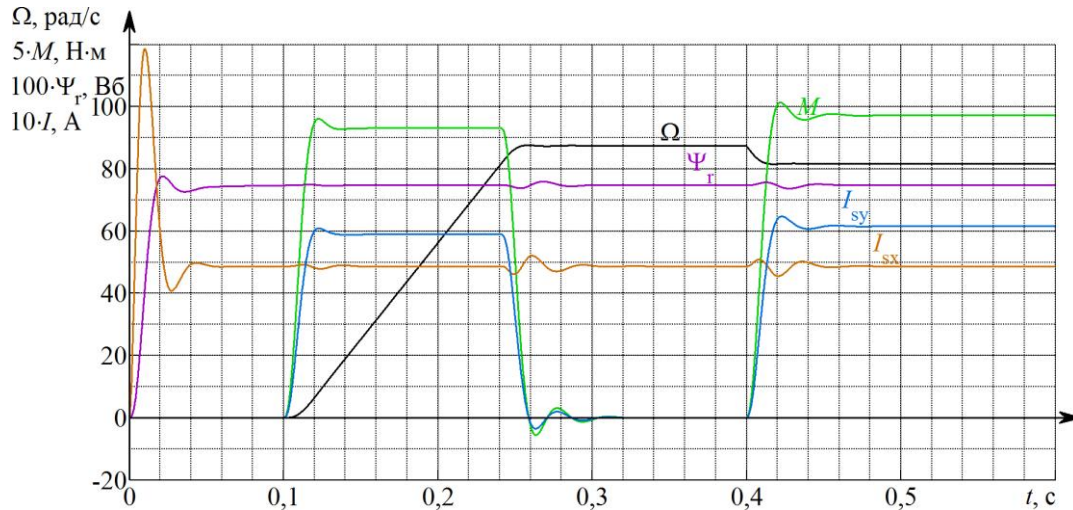


Рис. 5. Розгін на неробочому ході з накиданням навантаження при $t = 0,4$ с

Синтез СЕП відбувається за умови, що вхідний сигнал визначається змістом керуючої програми пристрою ЧПК і закон переміщення робочого органу відомий та має обмеження швидкості та прискорення. Цей режим характерний для приводів подачі в режимі контурної обробки.

Передавальна функція пропорційного регулятора положення:

$$K_{\text{рп}} = \frac{K_{\text{дш}}}{K_{\text{дп}} a_{\text{п}} a_{\text{ш}} a_{\text{с}} T_{\mu}}, \quad (1)$$

де $K_{\text{дш}}$ — коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю; $K_{\text{дп}}$ — коефіцієнт зворотного зв'язку за положенням; $a_{\text{п}}$, $a_{\text{ш}}$, $a_{\text{с}}$ — коефіцієнти відношення сталих часу інтегрування контуру положення, швидкості та струму відповідно до сталих часу даних контурів, що не компенсуються; T_{μ} — розрахункова стала часу перетворювача напруги, що не компенсується. Аперіодичний перехідний процес в контурі положення СЕП забезпечується вибором $a_{\text{п}} = 4$, якщо $a_{\text{с}} = 2$ та $a_{\text{ш}} = 2$.

На рис. 6 наведені графіки перехідних процесів в СЕП (рис. 1) при відпрацюванні вхідного ступінчатого сигналу 0,5 рад. У структурній схемі на рис. 1 передавальною функцією $W_{\text{об}}(s)$ позначено структурну схему системи ВК (рис. 4).

Одним з найбільш розповсюджених вхідних сигналів СЕП є сигнал, що змінюється з постійною швидкістю. При відпрацюванні такого керуючого сигналу $\Omega_3 = \text{const}$ у системі з астатизмом першого порядку похибка $\Delta_{\text{ст}}$ у сталому режимі стеження визначається виразом:

$$\Delta_{\text{ст}} = \Delta_{\text{шв}} = \frac{\Omega_3}{K} = \frac{\Omega_3}{Q_{\Omega}}, \quad (2)$$

де $\Delta_{\text{шв}}$ — швидкісна похибка; $Q_{\Omega} = K$ — добротність слідкувальної системи за кутовою швидкістю; K — коефіцієнт передачі розімкнутої системи каналом керування.

Тобто величина сталої похибки має тільки швидкісну складову, яка залежить від швидкості зміни вхідного сигналу та величини добротності СЕП. Швидкісна похибка визначається відставанням робочого органу від заданого положення під час руху механізму з постійною швидкістю.

Значення добротності визначається:

$$Q_{\Omega} = \omega_3 = \frac{1}{a_{\text{п}} a_{\text{ш}} a_{\text{с}} T_{\mu}}, \quad (3)$$

де ω_3 — частота зрізу ЛАЧХ розімкнутої системи.

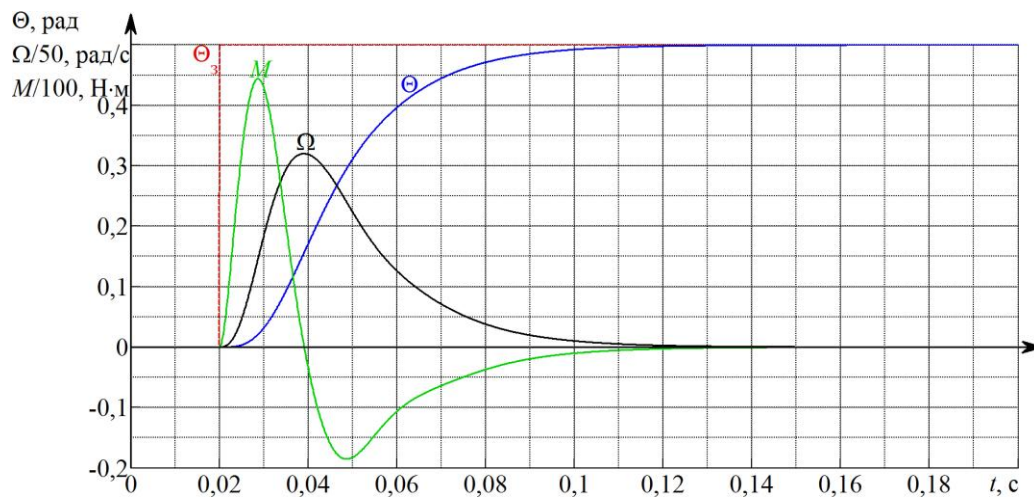
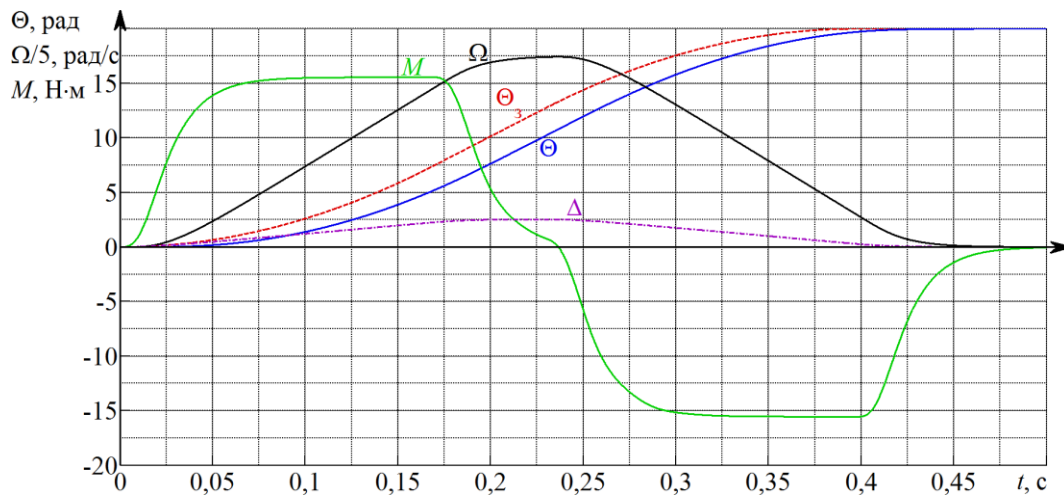


Рис. 6. Відпрацювання переміщення на холостому ході

Рис. 7. Відпрацювання переміщення $\Theta_3 = 20$ рад при номінальній швидкості обертання

На рис. 7 наведені графіки перехідних процесів в СЕП при відпрацюванні вхідного сигналу, що змінюється лінійно з обмеженням швидкості на рівні номінального значення та обмеженням прискорення, що створює динамічний момент сили, рівний $0,8M_N$. Аналіз графіків показує, що при відпрацюванні величини переміщення $\Theta_3 = 20$ рад величина швидкісної похибки Δ становить 2,5 рад на інтервалі $0,2 \dots 0,25$ с.

Для компенсації впливу величини керуючого сигналу на величину швидкісної похибки потрібно визначити передавальну функцію пристрою корекції. Передавальна функція пристрою корекції буде найбільш простою, коли сигнал корекції подавати на вхід регулятора швидкості.

$$W_{\text{пк}}(s) = \frac{s}{W_{\text{зкш}}(s)}, \quad (4)$$

де $W_{\text{зкш}}(s)$ — передавальна функція замкнутого контуру регулювання швидкості.

Система ВК з перетворювачем частоти має значну швидкодію і тому інерційністю в контурі регулювання швидкості можна знехтувати. Тоді передавальна функція замкнутого контуру регулювання швидкості

$$W_{\text{зкш}}(s) = \frac{1}{K_{\text{дш}}}. \quad (5)$$

Передавальна функція пристрою корекції для забезпечення часткової інваріантності системи буде мати вигляд:

$$W_{\text{пк}}(s) = s \cdot K_{\text{дш}}. \quad (6)$$

Структурну схему системи комбінованого керування з компенсацією помилки за керуючим впливом при подачі сигналу корекції на вхід регулятора швидкості відповідно до (6) наведено на рис. 8.

На рис. 9 наведені графіки перехідних процесів в СЕП з пристроєм корекції при відпрацюванні вхідного сигналу, що змінюється з номінальною швидкістю з обмеженням прискорення, що створює динамічний момент сили, рівний $0,8M_N$.

Пристрій корекції забезпечує нульове середнє значення швидкісної похибки, але значно зростає (пропорційно прискоренню) величина перерегулювання. Тому в канал комбінованого керування (рис. 8) введений масштабний коефіцієнт 0,75.

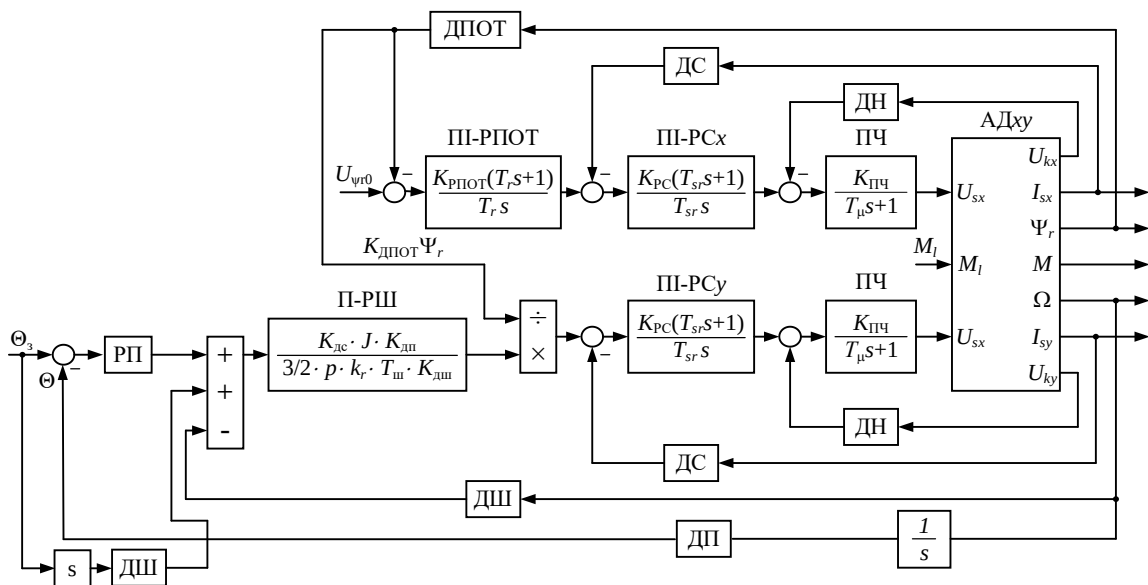


Рис. 8. Структурна схема системи комбінованого керування

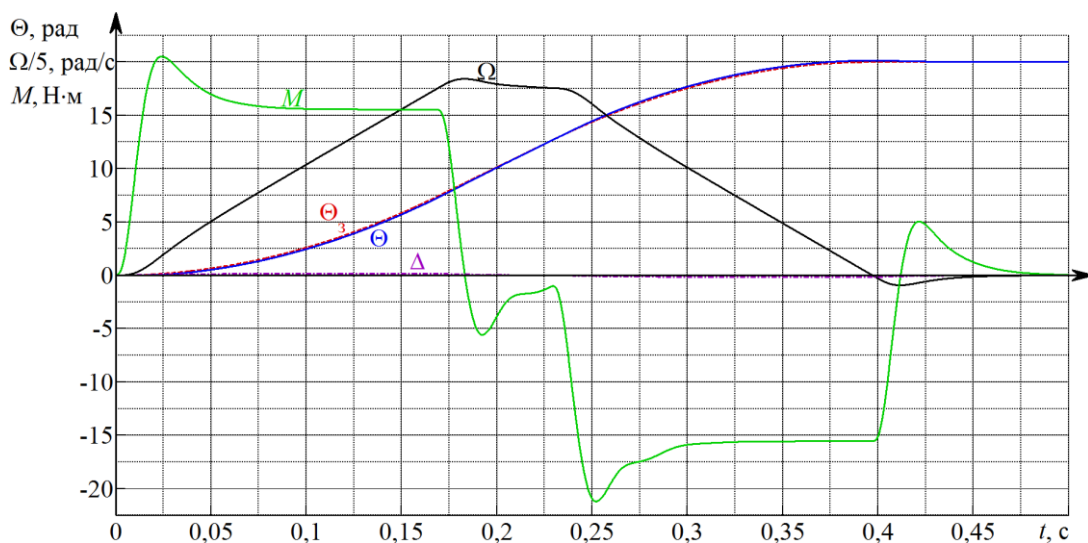


Рис. 9. Відпрацювання переміщення $\Theta_3 = 20$ рад при номінальній швидкості обертання з пристроєм корекції

Графіки перехідних процесів на рис. 10 показують, що величина перерегулювання за швидкістю зменшилась до незначного рівня, а за положенням перерегулювання взагалі відсутнє. Максимальне значення похибки з пристроєм корекції в 4 рази менше, ніж без пристрою корекції.

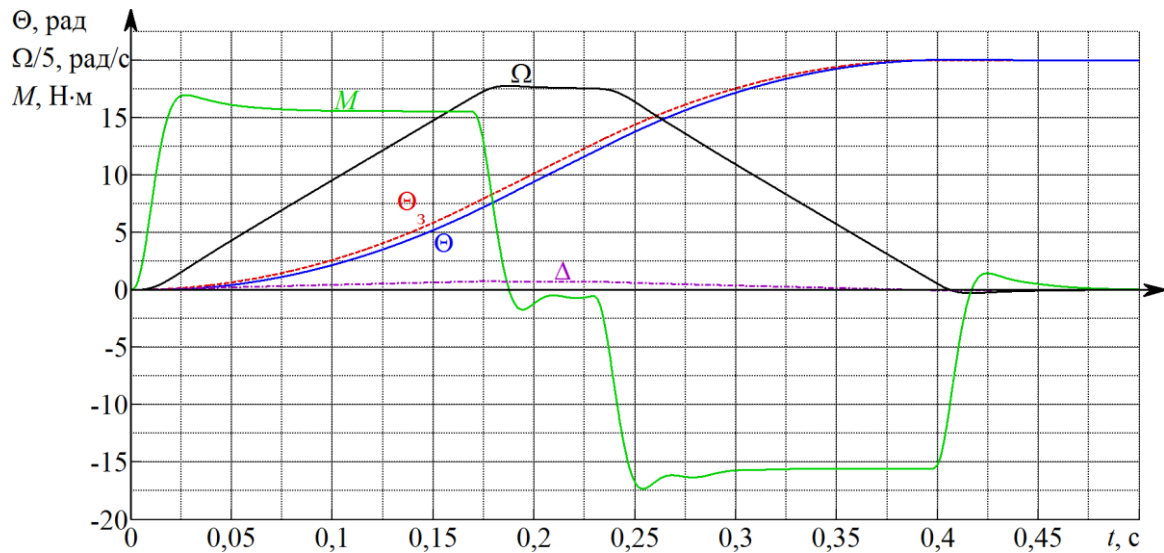


Рис. 10. Відпрацювання переміщення $\Theta_z = 20$ рад при номінальній швидкості обертання з пристроєм корекції і масштабним коефіцієнтом

На рис. 11 наведені графіки перехідних процесів в СЕП без пристрою корекції при відпрацюванні переміщення $\Theta_z = 200$ рад при номінальній швидкості обертання. Величина швидкісної похибки становить 2,5 рад. Введення пристрою корекції дозволило зменшити максимальне значення швидкісної похибки (рис. 12) також у 4 рази.

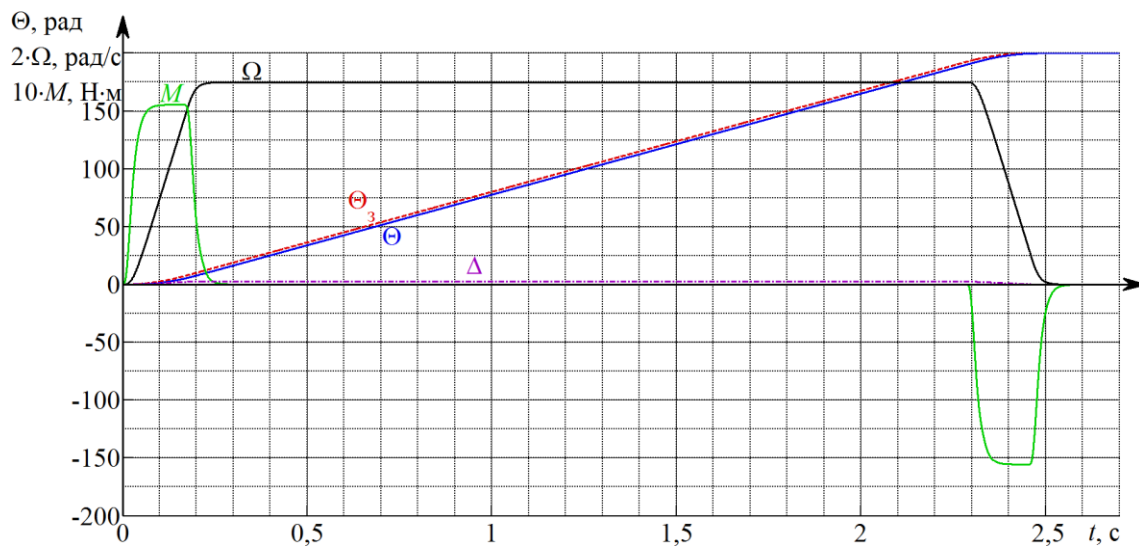


Рис. 11. Відпрацювання переміщення $\Theta_z = 200$ рад при номінальній швидкості без пристрою корекції

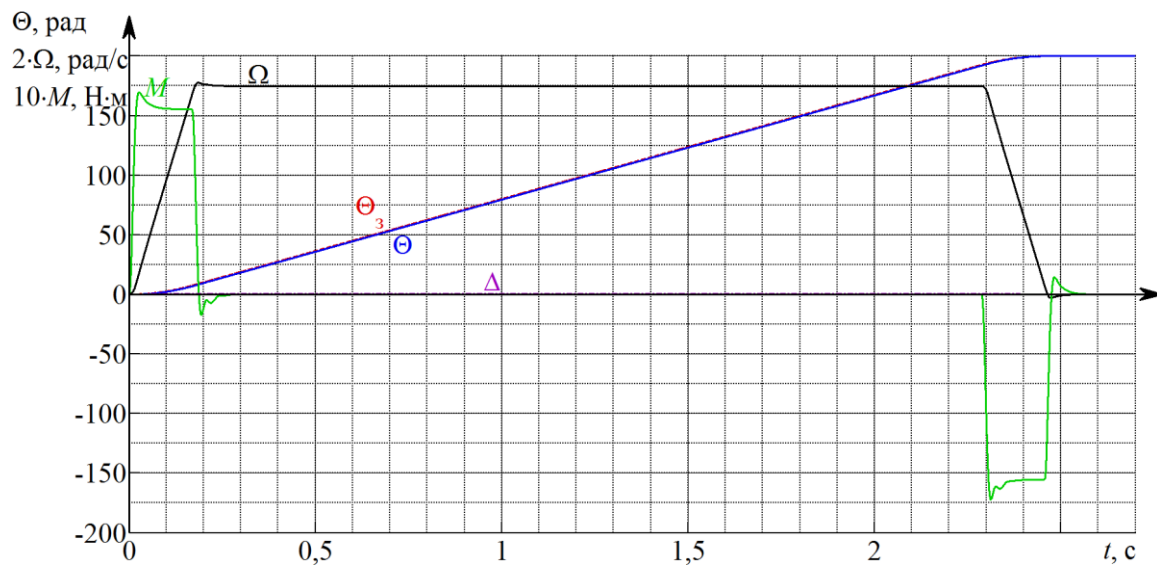


Рис. 12. Відпрацювання переміщення $\Theta_3 = 200$ рад при номінальній швидкості обертання з коригуючим пристроєм

В останньому експерименті величина та швидкість переміщення розраховані на основі технічних характеристик верстата 16K20Ф3. На рис. 13 наведені графіки перехідних процесів в СЕП без пристрою корекції при відпрацюванні переміщення $\Theta = 100\pi$ рад та швидкості обертання $\Omega = 20\pi/3$ рад/с. Величина швидкісної похибки становить 0,6 рад. Введення пристрою корекції дозволило зменшити максимальне значення швидкісної похибки (рис. 14) у 4 рази.

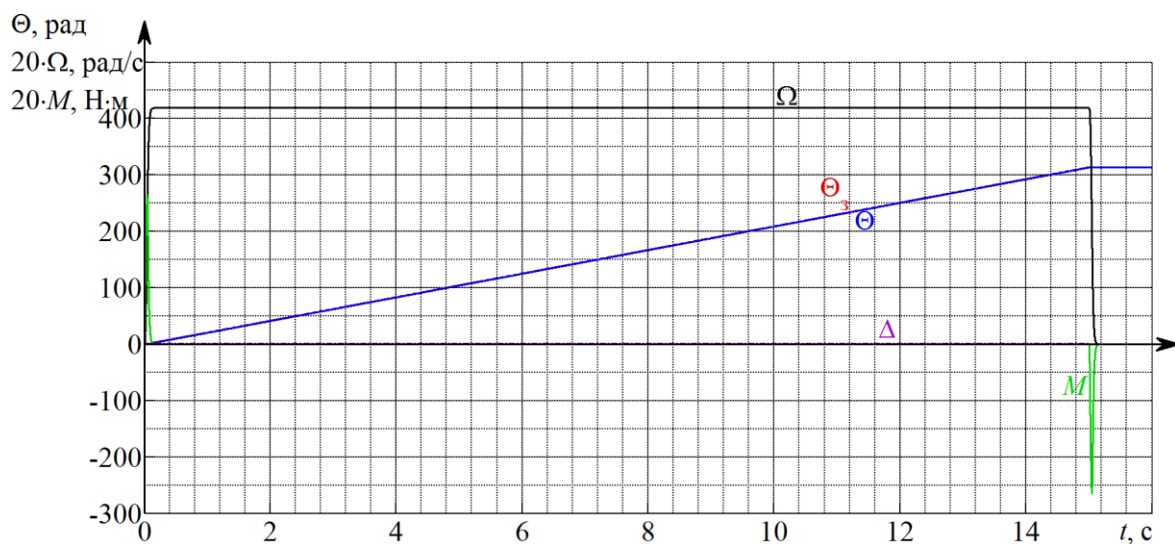


Рис. 13. Відпрацювання переміщення $\Theta = 100\pi$ рад при швидкості обертання $\Omega = 20\pi/3$ рад/с без пристрою корекції

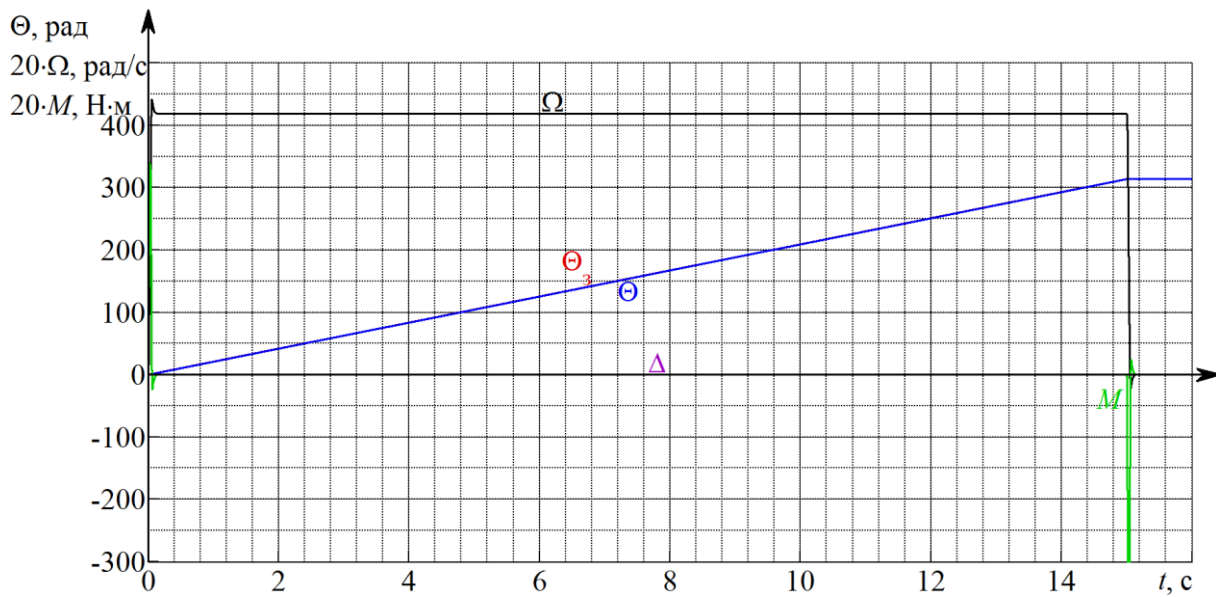


Рис. 14. Відпрацювання переміщення $\Theta = 100\pi$ рад при швидкості обертання $\Omega = 20\pi/3$ рад/с з пристроєм корекції

Висновки

У ході експериментальних досліджень з використанням комп'ютерного моделювання асинхронного слідкувального ЕП механізму подачі токарного верстата з системою ВК підтверджено працездатність розробленої системи комбінованого керування. При проведенні моделювання було визначено, що введення каналу комбінованого керування навіть зі спрощеною передавальною функцією пристрою корекції забезпечує часткову компенсацію швидкісної похибки. Для зменшення величини швидкісної похибки потрібно враховувати інерційність об'єкта в передавальній функції пристрою корекції.

Список використаної літератури

1. Аніщенко М.В. Системи числового програмного керування : підручник. Харків : Факт, 2024. 416 с.
2. Дослідження системи векторного керування частотно-регульованим асинхронним електроприводом [Електронний ресурс] : метод. вказівки до виконання курсового проєкту за курсами: «Сучасні методи керування електроприводами змінного струму», «Сучасні методи керування приводами мехатронних систем» : для студентів освітньої програми: «Електропривод, мехатроніка та роботехніка» спец. 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / уклад.: М.В. Аніщенко, І.В. Обруч ; Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». Електрон. текст. дані. Харків, 2023. 60 с.
URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/64090>.
3. Плахтина О.Г., Мазепа С.С., Куцук А.С. Частотно-керовані асинхронні та синхронні електроприводи. Львів: Видавництво НУ «ЛП», 2002. 228 с.
4. Перельмутер В.М. Пряме керування моментом і струмом двигунів змінного струму. Харків: Основа, 2004. 210 с.
5. Системи програмного та слідкуючого керування рухом [Електронний ресурс]: підручник для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізації «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» / В.І. Теряєв, С.В. Король; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,54 Мбайт). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 50 с.
URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/8aa2239e-ee07-451d-a648-486123e2ebfa/content>

6. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. Київ : Либідь, 2007. 656 с.
7. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами : в 3 т. : підручник / Є.Є. Александров, Е.П. Козлов, Б.І. Кузнецов ; НТУ "ХПІ". Т. 1 : Теорія автоматичного керування. Харків : НТУ «ХПІ», 2002. 490 с.
8. Лозинський А., Мороз В., Паранчук Я. Розв'язування задач електромеханіки в середовищах пакетів MathCAD і MATLAB : навч. посіб. Львів : Видавництво НУ «ЛП», 2000. 166 с.
9. Чорний О.П., Толочко О.І., Титюк В.К. Математичні моделі та особливості чисельних розрахунків динаміки електроприводів з асинхронними двигунами: монографія. Кременчук: ПП Щербатих О.В, 2016. 302 с.
10. Толочко О.І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навч. посіб. Київ, НТУУ «КПІ», 2016. 150 с.

SYNTHESIS OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF FEED MECHANISM OF METAL-CUTTING MACHINES WITH COMBINED CONTROL

Abstract

This study addresses the synthesis of a combined control system using an asynchronous electric drive with vector control to compensate for control error and confirm the correctness of calculations using computer modeling.

The advancement of microprocessor control systems for asynchronous motors has led to the widespread use of complete electric drives with vector control in metal-cutting machines. The vector control system of a frequency-controlled asynchronous electric drive significantly enhances transient response quality and expands the speed control range in high-precision electric drives.

The synthesis of a servo tracking electric drive occurs under the condition that the input signal is determined by the content of the control program of the numerical control device and the law of movement of the working element is known. This mode is typical for feed drives in the contour processing mode. For a servo tracking electric drive of a lathe feed mechanism, one of the most common input signals is a signal changing at a constant speed. The value of the error in processing the input signal in the steady-state servo tracking mode has only a speed component, which depends on the rate of change of the input signal and the quality factor of the servo tracking electric drive. At a high rate of change of the input signal, the value of the speed error is significant.

To compensate for the influence of the control signal magnitude on the value of the speed error, a combined control system must be implemented, and the transfer function of the correction device in the auxiliary control channel must be defined. The correction device transfer function calculated in the work ensures partial invariance of the system.

The paper presents computer simulation results that confirming the operability and efficiency of the control system. Due to the use of combined control, partial invariance of the system is ensured and the value of the speed error is reduced by four times.

References

- [1] Anishhenko M.V. (2024). *Systemy chyslovogo programnogo keruvannya [Computer numerical control systems]*. Xarkiv : Fakt [in Ukrainian].
- [2] Anishhenko M.V., Obruch I.V. (2023). *Doslidzhennya systemy vektornogo keruvannya chastotno-regulovanyim asynkronnym elektropyvodom : metod. vkazivky do vykonannya kursovogo proyektu. [Research of vector control system of frequency-controlled asynchronous electric drive]*. Xarkiv: Nacz. texn. un-t «Xarkiv. politexn. in-t». Retrieved from: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/64090> [in Ukrainian].
- [3] Plaxtyna O.G., Mazepa S.S., Kucyk A.S. (2002). *Chastotno-kerovani asynkronni ta synkronni elektropyvody. [Frequency-controlled asynchronous and synchronous electric drives]*. Lviv: Vydavnyctvo NU «LP» [in Ukrainian].

- [4] Perelmuter V.M. (2004). *Pryame keruvannya momentom i strumom dvyguniv zminnogo strumu.* [Direct control of torque and current of AC motors]. Xarkiv: Osnova [in Ukrainian].
- [5] Teryayev V.I., Korol' S.V. (2021). *Systemy prohramnoho ta slidkuyuchoho keruvannya rukhom: pidruchnyk dlya studentiv spetsial'nosti 141 «Elektroenerhetyka, elektrotekhnika ta elektromekhanika».* [Program and servo motion control systems]. Kyiv: KPI im. Ihorya Sikors'koho. Retrieved from: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/8aa2239e-ee07-451d-a648-486123e2ebfa/content> [in Ukrainian].
- [6] Popovych M.H., Koval'chuk O.V. (2007) *Teoriya avtomatychnoho keruvannya: Pidruchnyk.* [Theory of automatic control]. Kyiv : Lybid'. [in Ukrainian].
- [7] Aleksandrov Ye.Ye., Kozlov E.P., Kuznyeczov B.I. (2002). *Avtomatychne keruvannya ruxomymy ob'ektamy i texnologichnymy procesamy* [Automatic control of moving objects and technological processes]. (Vols 1–3) Xarkiv : NTU «XPI» [in Ukrainian].
- [8] Lozynskiy A., Moroz V., Paranchuk Ya. (2000). *Rozvazuvannya zadach elektromexaniky v seredovyshhax paketiv MathCAD i MATLAB.* [Solving Electromechanical Problems in Package Environments MathCAD and MATLAB]. Lviv: Vydavnytstvo NU «LP» [in Ukrainian].
- [9] Chornyj O.P., Tolochko O.I., Tytyuk V.K. (2016). *Matematychni modeli ta osoblyvosti chyselnykh rozraxunkiv dynamiky` elektropryvodiv z asynxronnymy dvygunamy.* [Mathematical models and features of numerical calculations of the dynamics of electric drives with asynchronous motors]. Kremenichuk: PP Shherbatyx O.V. [in Ukrainian].
- [10] Tolochko O.I. (2016). *Modelyuvannya elektromexanichnykh system. Matematychni modeliuvannya system asynxronnogo elektropryvodu.* [Modeling of electromechanical systems. Mathematical modeling of asynchronous electric drive systems]. Kyiv, NTUU «KPI». [in Ukrainian].

Надійшла до редколегії 27.05.2025

Прийнята після рецензування 05.10.25

Опублікована 23.10.2025