

УДК 621.797:621.664

Бурик М. П., Островерхов М. Я.

## РЕГУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМИ КООРДИНАТАМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА З ЗАДАНОЮ ЯКІСТЮ НА ОСНОВІ КОНЦЕПЦІЇ ЗВОРОТНИХ ЗАДАЧ ДИНАМІКИ

Найбільш поширеним принципом керування електромеханічними координатами електроприводів є принцип підпорядкованого регулювання. Його основні переваги полягають в простій реалізації обмеження регулюючих координат, отриманні високих динамічних характеристик електроприводів, простому налагодженні і експлуатації, а також в широкій уніфікації схем і конструкцій елементів. Проте передаточні функції регуляторів струму, швидкості, положення електропривода тощо, що налаштовані на поширений модульний або симетричний оптимум компенсують відповідні ланки об'єкта керування з метою отримання необхідної передаточної функції контуру керування. У результаті для забезпечення заданої якості керування потрібно знати точні значення параметрів об'єкта, а при їхній зміні – застосовувати додаткові алгоритми ідентифікації або адаптації, що підвищує складність і громіздкість системи керування.

Слабку чутливість до параметричних збурень забезпечують методи з великими коефіцієнтами підсилення, релейні чи згладжені методи зі змінною структурою, комбіновані методи із спостерігачами невизначеності та методи на основі зворотних задач динаміки [2].

Методи з великими коефіцієнтами підсилення розімкненої системи мають підвищену точність і робастну стійкість стосовно невизначеності параметрів і зовнішніх низькочастотних впливів. Однак при великих коефіцієнтах підсилення можлива поява нестійкості високочастотної неврахованої динаміки, а також поява похибок через високочастотні завади. Крім того, не всі системи керування допускають необмежене збільшення коефіцієнта передачі.

Релейні методи зі зміною структурою використовуються для підвищення робастності та обмеження керуючих впливів. Вони працюють в релейному режимі без зони нечутливості. Ця особливість, крім збільшення робастності та точності, обумовлює появу ковзних режимів роботи, які можуть призводити до нестійкості неврахованої динаміки, збільшення споживання енергії на керування та зношування механізмів, зменшення завадостійкості системи. Для зменшення цих недоліків у згладжених методах релейні елементи замінено на лінійні з насиченням, проте це призводить до обмеження керуючої дії, що обумовлює зниження точності та робастності.

Комбіновані методи із спостерігачами невизначеності дозволяють розділити систему на лінійну частину та частину з невизначеностями, в яку можуть входити нелінійні та нестаціонарні елементи, зовнішні збурення тощо. Це дозволяє окремо синтезувати закони керування лінійною частиною та розробити спостерігачі невизначеності, складний синтез яких є недоліком методу.

Адаптивні методи з ідентифікацією параметрів в реальному часі в основному призначені для лінійних систем. Із збільшенням кількості параметрів для ідентифікації можливості цих методів скорочуються, що може погіршити якість керування. В адаптивних методах з моделлю рівняння руху системи записуються у вигляді двох складових – для моделі та руху відносно неї. Для складних систем виникають складнощі при дослідженні стійкості системи та синтезу законів керування [1–4].

Розвиток зворотної задачі динаміки обумовлений сучасною проблемою керування складними об'єктами, у ході якого необхідно знайти керуючу дію по математичній моделі об'єкта, його початковому стану й заданій траєкторії руху. Пошук керуючих функцій здійснюється при мінімізації локальних функціоналів миттєвих значень енергій руху, у ролі

яких виступають різні види механічної та електромагнітної енергії, а також їхні похідні, що представляються поняттям «узагальнена енергія». Характерною рисою оптимізації є досягнення не абсолютного мінімуму функціонала якості, що характерно для традиційних систем, а деякого мінімального значення, яке відповідає допустимій за технічними умовами динамічній похибці системи.

Мета роботи – підвищення якості системи підпорядкованого регулювання кутовою швидкістю електропривода в умовах параметричних збурень шляхом синтезу закону керування на основі концепції зворотних задач динаміки при мінімізації локальних функціоналів миттєвих значень енергій.

Методика синтезу законів керування координатами електроприводу викладається на прикладі відомої системи підпорядкованого регулювання кутовою швидкістю двигуна постійного струму з незалежним збудженням [1, 4]. Об'єкт керування контуру швидкістю після оптимізації контуру струму на модульний оптимум з урахуванням співвідношення  $2T\mu^2 \ll 2T\mu$  описується передаточною функцією другого порядку:

$$W_o(p) = \frac{cF / k_{zz\omega}}{Jk_I p(2T\mu p + 1)}, \quad (1)$$

де  $cF$  – коефіцієнт кола збудження двигуна;

$k_I$  – коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом;

$J$  – сумарний момент інерції;

$T\mu$  – стала часу тиристорного перетворювача;

$k_{zz\omega}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку за кутовою швидкістю.

Для забезпечення контуру швидкості астатизму другого порядку за керуючою дією з заданою добротністю  $D^3\omega_z = \alpha_0$  диференціальне рівняння, яким задається бажана якість керування швидкістю, вибирається другого порядку:

$$\ddot{z}_z + \alpha_1 \dot{z}_z + \alpha_0 z_z = \alpha_0 \omega_z^* + \alpha_1 \dot{\omega}_z^*, \quad (2)$$

де  $\alpha_0$  та  $\alpha_1$  – коефіцієнти, якими задається тривалість та вид перехідного процесу швидкості.

Ступінь наближення реального процесу в контурі швидкості до бажаного оцінюється функціоналом, який характеризує нормовану за моментом інерції енергію першої похідної кінетичної енергії:

$$G(I_z^*) = \frac{1}{2} [\dot{z}_z(t) - \dot{\omega}_z(t, I_z^*)]^2, \quad (3)$$

де  $I_z^*$  – заданий струм якоря двигуна.

Мінімізація функціоналу здійснюється за градієнтним законом першого порядку:

$$\frac{dI_z^*(t)}{dt} = -\lambda_\omega \frac{dG(I_z^*)}{dI_z^*}, \quad (4)$$

де  $\lambda_\omega > 0$  – константа.

В результаті мінімізації остаточний закон керування швидкістю приймає вигляд:

$$\begin{aligned} I_z^*(t) &= k_\omega [z_z - \omega_z] \\ z_z &= \int f_0 dt \\ f_0 &= \alpha_0 (\omega_z^* - \omega_z) dt + \alpha_1 (\omega_z^* - \omega_z) \end{aligned} \quad (5)$$

де  $k_\omega$  – коефіцієнт підсилення регулятора швидкості.

Після підстановки закону керування кутовою швидкістю (5) в рівняння об'єкта (1) отримується диференціальне рівняння замкнутого контуру кутової швидкості:

$$2T_{\mu}p^4 + p^3 + bk_{\omega}p^2 + \alpha_1bk_{\omega}p + \alpha_0bk_{\omega} = \alpha_1bk_{\omega}p + \alpha_0bk_{\omega}, \tag{6}$$

де  $b = cFk_{z\omega}/(k_kJ)$ .

Усталений рух замкнутого контуру буде асимптотично стійким, якщо для його характеристичного рівняння:

$$2T_{\mu}p^4 + p^3 + bk_{\omega}p^2 + \alpha_1bk_{\omega}p + \alpha_0bk_{\omega} = 0, \tag{7}$$

виконуються наступні нерівності згідно до критерію Гурвиця:

$$\alpha_1 < \frac{1}{2T_{\mu}}; \quad \alpha_1bk_{\omega}(1 - 2T_{\mu}\alpha_1) > \alpha_0. \tag{8}$$

Система підпорядкованого регулювання двигуном постійного струму з незалежним збудженням, яка має регулятор кутової швидкості нетрадиційної структури відповідно до (5), зображена на рис. 1. Зі збільшенням коефіцієнта підсилення регулятора швидкості динамічні процеси в контурі наближається до бажаних, заданих рівнянням (2). Передаточна функція розімкнутого контуру швидкості:

$$Wp(p) = \frac{\alpha_1bk_{\omega}p + \alpha_0bk_{\omega}}{p^2(2T_{\mu}p^2 + p + bk_{\omega})}, \tag{9}$$

показує, що система володіє астатизмом другого порядку та має добротністю по швидкості, рівну заданій  $D_{\omega} = \alpha_0$  при помірних коефіцієнтах підсилення регулятора швидкості  $k_{\omega}$ .

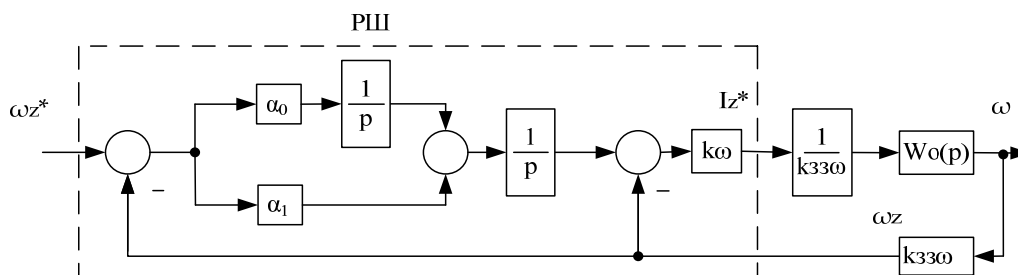


Рис. 1. Структурна схема електропривода регулятором кутової швидкості нетрадиційної структури

Дослідження представленої системи підпорядкованого керування кутовою швидкістю проведено шляхом математичного моделювання. Двигун типу МІ-42 має наступні дані:  $P_n = 1,1$  кВт,  $\omega_n = 104,72$  рад/с,  $U_n = 220$  В,  $I_n = 6,3$  А – номінальна потужність, номінальна кутова швидкість ротора, номінальна напруга, номінальний струм якоря;  $R_{75\text{я}\Sigma} = 3,867$  Ом – опір якорного ланцюга;  $M_n = 11,938$  Нм – номінальний момент;  $J = 0,065$  кгм<sup>2</sup> – момент інерції двигуна;  $c\Phi = 1,895$  Вс – коефіцієнт кола збудження двигуна.

Силивий перетворювач характеризується коефіцієнтом передачі  $k_{np} = 23$  та сталою часу  $T_{\mu} = 0,01$  с.

Традиційні ПІ-регулятори струму та швидкості, що налаштовані на модульний і симетричний модулі відповідно, мають наступні параметри: пропорційна складова регулятора струму  $k_{ni} = 0,097$ ; інтегральна складова регулятора струму  $k_{ii} = 10,593$ ; пропорційна складова

регулятора кутової швидкості  $k_{n\omega} = 10,964$ ; інтегральна складова регулятора кутової швидкості  $k_{i\omega} = 137,056$ . Параметри нетрадиційного регулятора кутової швидкості дорівнюють  $\alpha_0 = 100$ ,  $\alpha_1 = 20$ ,  $k_w = 21,929$ . Коефіцієнти підсилення регулятора визначають ступінь наближення реальних процесів до бажаних і визначаються допустимими динамічними похибками за технічними умовами роботи системи.

Під час виконання дослідження використовувався стандартний тест, який включає відпрацювання заданої траєкторії зміни кутової швидкості ротору з наступним накиданням ступінчатого навантаження під час руху з постійною кутовою швидкістю.

З метою порівняння динамічних та статичних характеристик, кожний з тестів проводиться для двох законів керування: традиційного алгоритму та алгоритму на основі концепції зворотних задач динаміки при мінімізації локальних функціоналів миттєвих значень енергій.

Під час моделювання використовувалась черговість операцій керування:

1) в початковий момент часу  $t = 0$  с двигун без навантаження лінійно прискорюється по заданій траєкторії кутової швидкості, яка має нульове початкове значення та досягає 34,557 рад/с (траєкторія кутової швидкості задавалась таким чином, щоб сигнали регулятора кутової швидкості не входили в насичення);

2) в момент часу  $t = 2,5$  с до валу двигуна прикладається постійний момент навантаження, який дорівнює номінальному значенню;

3) моделювання при зменшеному вдвоє коефіцієнті кола збудження двигуна проводиться із зменшеним моментом навантаження також у 2 рази.

Завдані траєкторії кутової швидкості  $\omega^*$  та моменту навантаження  $M_c$  зображено на рис. 2.

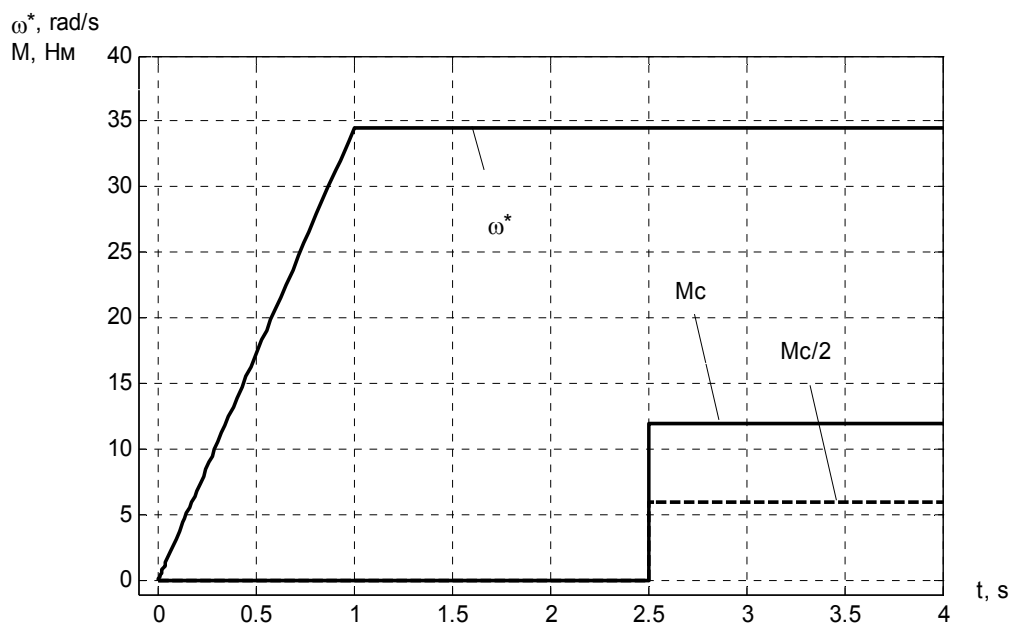


Рис. 2. Графіки заданої траєкторії кутової швидкості та моментів навантаження

На рис. 3, а та рис. 3, в представлено графіки перехідних процесів струму та напруги запропонованої системи при двох значеннях коефіцієнта кола збудження двигуна. Суцільною лінією показано перехідні процеси електромеханічних координат при номінальному коефіцієнті кола збудження двигуна, а пунктирною лінією – при зменшеному у 2 рази.

Як видно з графіків, система чутлива до параметричного та координатного збурення, яке призводить до збільшення динамічної похибки кутової швидкості на 42,3 % при відпрацьованні заданої траєкторії, тривалості перехідного процесу кутової швидкості під час прискорення до номінального (усталеного) значення та при накиданні моменту навантаження.

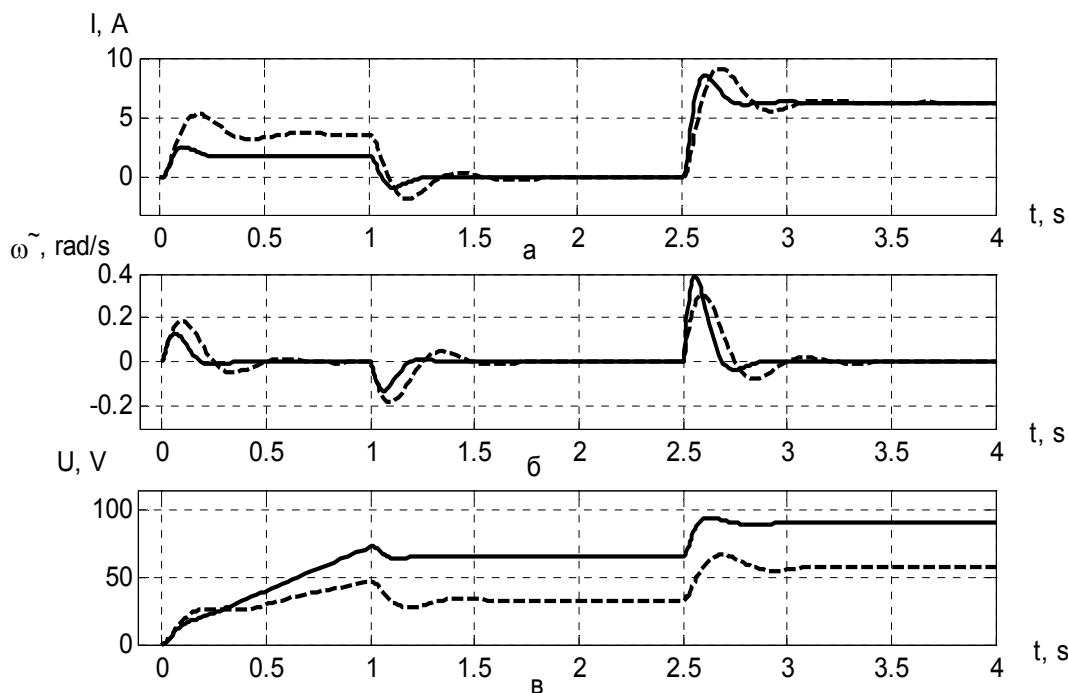


Рис. 3. Графіки перехідних процесів електромеханічних координат електропривода при роботі традиційних ПІ-регуляторів струму та кутової швидкості:

а – струм якоря; б – похибки кутової швидкості; в – напруга перетворювача

На рис. 4, а–в представлено графіки перехідних процесів струму, похибки кутової швидкості та напруги запропонованої системи при двох значеннях коефіцієнта кола збудження двигуна при роботі нетрадиційного регулятора кутової швидкості.

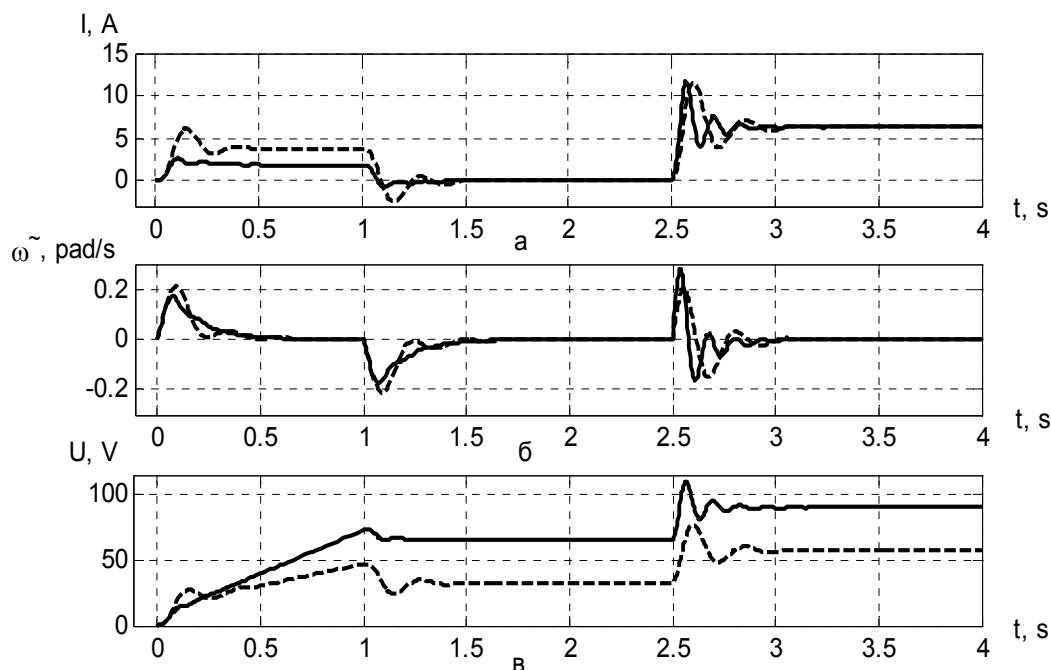


Рис. 4. Графіки перехідних процесів електромеханічних координат електропривода при роботі нетрадиційного регулятора кутової швидкості:

а – струм якоря; б – похибки кутової швидкості; в – напруга перетворювача

З рис. 4, б видно, що зменшення в 2 рази коефіцієнта кола збудження двигуна електропривода не призводить до збільшення тривалості перехідних процесів. Динамічна похибка кутової швидкості підвищується на 23,5 % відносно динамічної помилки при номінальних параметрах об'єкту керування. Система з нетрадиційним регулятором кутової швидкості менше чутлива до параметричного та координатного збурення. Показники якості систем керування наведено в табл. 1.

Таблиця 1

## Показники якості систем керування

Коефіцієнт ланцюга збудження двигуна $cF, \text{Вс}$	Тип регулятора	Максимальна напруга перетворювача $U, \text{В}$	Показники керування			
			при відпрацюванні завдання	при компенсуванні системою змін навантаження		
				динамічна помилка $\Delta\omega, \text{рад/с}$	час компенсування $t_k, \text{с}$	динамічна помилка
					$\Delta\omega_k, \text{рад/}$	$\Delta I_k, \text{А}$
1,895	ПІ	94,23	0,13	0,5	0,387	2,29
	Н	109,62	0,17	0,5	0,278	5,35
0,947	ПІ	66,54	0,185	1	0,305	2,82
	Н	77,08	0,21	0,5	0,2	5,2

де ПІ – пропорційно-інтегральний регулятор; Н – регулятор з нетрадиційною структурою.

## ВИСНОВКИ

На прикладі широко розповсюдженої системи підпорядкованого керування швидкістю двигуна постійного струму викладена методика синтезу законів керування регуляторів на основі концепції зворотних задач динаміки при мінімізації локальних функціоналів миттєвих значень енергії. Запропонований метод синтезу алгоритмів керування координатами електроприводу забезпечує високу якість керування в статичному режимі та під час перехідних процесів в умовах дії параметричних та координатних збурень. Важливим є те, що для побудови структури регуляторів непотрібна детальна математична модель об'єкту керування.

Результати моделювання підтверджують ефективність розроблених законів керування та показують їх переваги в порівнянні з традиційними законами керування регуляторів, налаштованих на симетричний оптимум. Зменшення вдвічі коефіцієнта кола збудження двигуна практично не впливає на вид перехідних процесів запропонованої системи керування кутовою швидкістю.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Островерхов Н. Я. Управление координатами электроприводов на основании концепции обратных задач динамики при минимизации локальных функционалов мгновенных значений энергий / Н. Я. Островерхов, Н. П. Бурик // *Электротехника и электроэнергетика. Научный журнал*. – Запорожье : ЗНТУ, 1'2011. – С. 41–49.
2. Krut'ko P. D. Adaptive control of electromechanical executive systems / P. D. Krut'ko // *ISSN 1052-6188, journal of machinery manufacture and reliability*. – 2008. – Vol. 37. – №. 5. – P. 493–500.
3. Островерхов М. Я. Дослідження стійкості систем керування, розроблених на основі концепції зворотних задач динаміки / М. Я. Островерхов, М. П. Бурик // *Електротехнічні та комп'ютерні системи : Тематичний випуск : Проблеми автоматизованого електропривода : науково-технічного журналу*. – Одеса : ОНПУ, 2011. – № 3/79. – С. 17–18.
4. Островерхов М. Я. Підпорядкована система керування координатами електропривода на основі концепції зворотних задач динаміки / М. Я. Островерхов, В. М. Пижов, М. П. Бурик // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи : науково-виробничий журнал*. – Кременчук : КрНУ, 2011. – Вип. 3/2011(15). – С. 21–25.