

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ КЕРУВАННЯ КООРДИНАТАМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З РОБАСТНИМИ АЛГОРИТМАМИ КЕРУВАННЯ

Бурик М.П. к.т.н., ст. викл.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Вступ. Традиційні алгоритми керування нелінійними об'єктами не забезпечують заданої якості керування під час дії параметричних та координатних збурень та вимагають застосування додаткових алгоритмів ідентифікації, адаптації або компенсації, що підвищує складність системи керування. Тому необхідно застосовувати робастні алгоритми керування, які забезпечують слабку чутливість до дії різних дестабілізуючих факторів.

Алгоритми керування на концепції зворотної задачі динаміки в поєднанні з мінімізацією миттєвих функціоналів енергії руху надають замкнутій системі властивості стійкості в цілому по відношенню до стану рівноваги або до незбуреного руху. Це дозволяє вирішувати задачу керування нелінійними багатовимірними системами як і для лінійних одновимірних систем.

Запропонована концепція відповідає ідеї зворотності прямого метода Ляпунова по дослідженню стійкості та полягає в знаходженні керуючої дії, при якій замкнута система має наперед задану функцію Ляпунова. Характерною рисою оптимізації є досягнення не абсолютного мінімуму функціонала якості, що характерно для класичних систем, а деякого мінімального значення, яке відповідає допустимій за технічними умовами динамічній похибці системи [1-3]. Рівняння за допомогою яких описуються запропоновані регулятори мають [4-5] наступний вигляд

$$u = k \left[\sum_{j=0}^{(m-1)} \beta_j x^{*(j)} - \sum_{i=0}^{(n-2)} \gamma_i x^{(i)} - x^{(h-1)} \right], \quad (1)$$

де u – керуюча функція; k – коефіцієнт підсилення регулятора; γ_i, β_j – коефіцієнти, які визначають характер та тривалість аперіодичного перехідного процесу; x^* – завдання координати; m – порядок правої частини рівняння ($n \geq m$), за допомогою якого задається бажана якість регулювання координати замкнутого контуру; x – регульована координата; h – порядок лівої частини рівняння локального контуру об'єкта керування; n – порядок лівої частини рівняння, за допомогою якого задається бажана якість регулювання координати замкнутого контуру.

Перевага запропонованого методу полягає у тому, що алгоритм керування записується безпосередньо по диференціальному рівнянню об'єкту керування та диференціальному рівнянню, яким задається бажана якість керування.

Мета роботи. Дослідження показників якості керування координатами системи з підпорядкованим регулюванням під час дії дестабілізуючих факторів за допомогою математичного моделювання у програмному середовищі Matlab (Simulink).

Результати досліджень. Електропривод постійного струму з напівпровідниковим перетворювачем є нелінійною та складною електромеханічною системою, для математичного опису якої використовують різні рівні ідеалізації [6]: напівпровідниковий перетворювач розглядається як керуючий еквівалент генератора електрорушійної сили (ЕРС) з внутрішнім активним опором та індуктивністю, які не залежать від навантаження перетворювача; струм навантаження вважається неперервним, пульсуючі складові ЕРС та струму навантаження перетворювача не враховуються; двигун постійного струму з незалежним збудженням (ДПС з НЗ) представляється у вигляді генератора проти-ЕРС з внутрішнім активним опором та індуктивністю, які не залежать від навантаження; вплив реакції якоря на збудження двигуна не враховується; механічна частина розглядається як абсолютно жорстка та приведена до одномасової системи з постійною величиною моменту інерції.

При цих припущеннях математична модель системи «ДПС НЗ – ТП (тиристорний перетворювач)» керування описується наступними рівняннями

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{\mu} \frac{dU_n}{dt} + U_n = U_{\kappa} k_n; \\ I_{\text{я}} + T_{\text{я}} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} = (U_n - E) \frac{1}{R_{\text{я}}}; \\ J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, J = \frac{T_M (c\Phi)^2}{R_{\text{я}}}; \\ M = c\Phi I_{\text{я}}, E = c\Phi \omega, c\Phi = I_3 k_{c\Phi}, k_{c\Phi} = \frac{c\Phi_n}{I_{3н}}; \\ I_3 + T_3 \frac{dI_3}{dt} = U_3 \frac{1}{R_3}; \end{array} \right. \quad (2)$$

де T_{μ} - стала часу перетворювача (0,005÷0,01 с); U_n – ЕРС силового перетворювача; U_{κ} – керуючий сигнал на вході силового перетворювача; k_n – коефіцієнт підсилення тиристорного перетворювача за напругою; $E, I_{\text{я}}$ – проти-ЕРС якоря двигуна та струм обмотки якоря; $T_{\text{я}} = L_{\text{я}} / R_{\text{я}}$, $R_{\text{я}}$ – електромагнітна стала часу та опір якірної кола двигуна ($L_{\text{я}}$ - індуктивність якірної обмотки); J – сумарний момент інерції механічної системи; ω – кутова швидкість обертання якоря двигуна; M, M_c – рушійний момент та момент опору на валу двигуна; T_M – електромеханічна стала часу; $c\Phi$ – коефіцієнт кола збудження двигуна; I_3 – струму обмотки збудження; $k_{c\Phi}$ – коефіцієнт, яким лінеаризується крива намагнічування; $c\Phi_n$ – значення коефіцієнту кола збудження двигуна при номінальному значенні струму обмотки збудження $I_{3н}$; U_3 – напруга обмотки збудження; $T_3 = L_3 / R_3$, R_3 – стала часу та опір кола збудження двигуна (L_3 - індуктивність обмотки збудження).

У дослідженні використано ДПС з НЗ типорозміру “МИ-42”, що має наступні параметри: $P_n=1.1$ кВт – номінальна потужність; $\omega_n=104.72$ рад/с – номінальна кутова швидкість ротора двигуна; $U_n=220$ В – номінальна напруга; $I_n=6.3$ А – номінальний струм якоря; $R_{75я\Sigma}=3.867$ Ом – опір якірного кола; $L_{я}=0.03842$ Гн – індуктивність якірного кола; $M_n=11.938$ Нм – номінальний момент; $J=0.065$ кгм² – момент інерції двигуна; $c\Phi=1.895$ Вс – коефіцієнт кола збудження двигуна; $U_{нз}=220$ В – номінальна напруга кола збудження; $I_{нз}=0.25$ А – номінальний струм кола збудження; $L_3=16.04$ Гн – індуктивність кола збудження; $ККД=76$ % – коефіцієнт корисної дії двигуна.

Силовий перетворювач характеризується коефіцієнтом передачі $k_{np}=23$ та сталою часу $T_\mu=0.01$ с. Кратність перевантаження по струму $\lambda=2.5$. Коефіцієнт запасу по кутовій швидкості $k_3=1$.

Регулятори струму та кутової швидкості, що налаштовані відповідно до представленої концепції мають наступні параметри: пропорційна складова регулятора струму $k_{ni}=1.32$; інтегральна складова регулятора струму $k_{ii}=100$; пропорційна складова регулятора кутової швидкості $k_{n\omega}=11.4$; інтегральна складова регулятора кутової швидкості $k_{i\omega}=10$.

Послідовність операцій дослідження за допомогою математичного моделювання системи підпорядкованого регулювання проведено, без врахування обмеження регульованих координат, є наступною:

- в початковий момент часу $t=0$ с подається сигнал завдання кутової швидкості 10 рад/с у вигляді стрибка та на 1.5 с знімається;
- з 0.5 с до валу двигуна прикладається постійний момент навантаження M_C (номінальний) та скидається на 1 с.

Завдані траєкторії кутової швидкості ω^* та моменту навантаження M_C зображено на рис. 1.

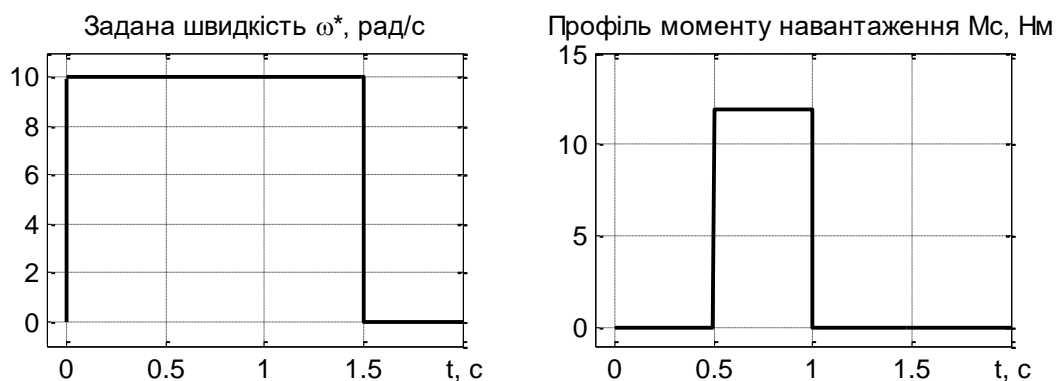


Рисунок 1 – Задані траєкторії кутової швидкості та профілю моменту навантаження

На рис. 2 представлено графіки перехідних процесів похибок кутової швидкості, струмів якоря, активної потужності та напруги якірного кола. Суцільною лінією показано перехідні процеси при номінальних параметрах ДПС з НЗ, а пунктирною лінією – під час дії параметричних збурень, а саме:

при збільшеному у 2 рази активному електричному опорі якоря та моменті інерції.

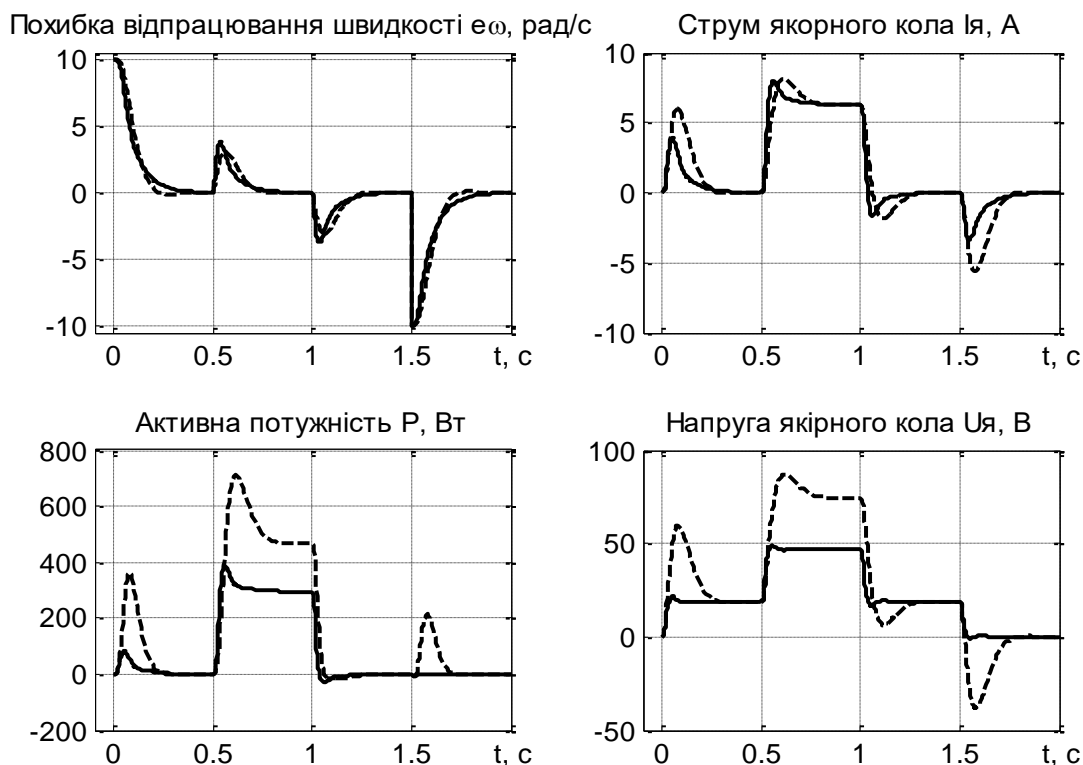


Рисунок 2 – Перехідні процеси системи керування з підпорядкованою структурою

Показники якості системи підпорядкованого регулювання кутової швидкості, струму якоря, активної потужності та напруги якорного кола приведено в таблицях 1-4 відповідно. Прийняті позначення: (ном.) – номінальні параметри об'єкта керування; (зб.) – вплив параметричних збурень; t_n – час наростання; t_p – час регулювання при 2%; σ – перерегулювання; μ – коливальність; t_k – час компенсування та $\Delta\omega_{max}$ – максимальне відхилення кутової швидкості ротора.

Таблиця 1 – Показники якості кутової швидкості при $\omega^*=10$ рад/с

Регулятор	t_n , с	t_p , с	σ , %	μ , %	Навантаження	
					t_k , с	$\Delta\omega_{max}$, рад/с
ном.	0,16	0,32	0	без коливань	0,25	3,8
зб.	0,12	0,21	1,1	без коливань	0,22	3,1

Таблиця 2 – Показники якості струму якоря I_a

Регулятор	при відпрацюванні завдання	при компенсуванні змін навантаження
	<i>max</i> значення $I_{a\max}$, А	<i>max</i> відхилення ΔI_a , А
ном.	3,9	1,7
зб.	6,1	1,9

Таблиця 3 – Показники якості активної потужності P

Регулятор	при відпрацюванні завдання	при компенсуванні змін навантаження	
	<i>max</i> значення P_{\max} , Вт	усталене значення P , Вт	<i>max</i> відхилення ΔP , Вт
ном.	82	296	85
зб.	362	470	241

Таблиця 4 – Показники якості напруги якірною кола U_a

Регулятор	при відпрацюванні завдання	при компенсуванні змін навантаження	
	<i>max</i> значення $U_{a\max}$, В	усталене значення U_a , В	<i>max</i> відхилення ΔU_a , В
ном.	22	47	2
зб.	60	75	12

Висновки. Розроблені алгоритми керування забезпечують слабку чутливість системи до дії параметричних збурень (збільшення $2J$ та $2R_a$) та астатичне керування кутовою швидкістю при накиданні номінального навантаження (стрибок).

Робастна система підпорядкованого регулювання без врахування обмеження координат забезпечує високі показники якості керування при відпрацюванні завдання кутової швидкості 10 рад/с у вигляді стрибка: коливальність відсутня; перерегулювання $\sigma=1.1\%$; час наростання зменшується на 0.04 с; час регулювання зменшується на 0.11 с; час компенсування зміни навантаження зменшується на 0.03 с; максимальне відхилення кутової швидкості зменшується на 0.7 рад/с.

Результати математичного моделювання (динамічні та статичні характеристики) підтверджують ефективність розроблених алгоритмів

керування та показують що запропонована система має задовільні енергетичні показники.

Перелік посилань

1. Krut'ko P. D. Stabilizing Equilibrium States of Double Pendulum Loaded by Follower and Conservative Forces / P. D. Krut'ko, V. E. Palosh // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, Moscow, 2009, Vol. 48, No. 2, pp. 165–178.

2. Черноусько Ф.Л. Методы управления нелинейными механическими системами / Ф.Л. Черноусько, И.М. Ананьевский, С.А. Решмин // . – М.: Физматлит, 2006 – 328 с.

3. Крутько П.Д. Робастно устойчивые структуры управляемых систем высокой динамической точности. Алгоритмы и динамика управления движением модельных объектов / П.Д. Крутько // Изв. РАН. ТИСУ. – 2005. – № 2. – С. 120-140.

4. Островерхов М.Я. Робастне керування кутовою швидкістю ротора синхронного двигуна з постійними магнітами / М.Я. Островерхов, М.П. Бурик // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія та практика: зб. наук. пр. / Нац. Техн. ун-т «Харків. політехн. ін.-т». – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. №16 (1341). – С. 24 -27. Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Problems of automated electrodrive. Theory and practice. “Robust control the rotor mechanical angular speed of surface mounted permanent magnet synchronous motor”.

5. Бурик М.П. Вентильно-індукторний електропривод / М.П. Бурик // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України". – Харків: ХНТУСГ, 2019. – Вип. 203. – С 124-126.

6. Шрейнер Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов. [Текст]: учеб. пособие / Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: Изд-во ГОУВПО « Рос. гос. Проф.- пед. ун-т», 2008. – 279 с.