

## РОБАСТНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ЛІФТОВОЇ ПІДЙОМНОЇ УСТАНОВКИ

*М. Г. Попович, д.т.н., проф., О. В. Сергієнко, здобувач  
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"  
пр. Перемоги, 37, 03056, м. Київ, Україна  
E-mail: osergienko@list.ru*

Робастна система автоматичного керування швидкістю ліфту забезпечує астатичне керування в умовах параметричних збурень у вигляді чотирикратної зміни моменту інерції електропривода.

**Ключові слова:** робастність, система автоматичного керування, швидкість ліфту.

**Вступ.** Підвищення якості керування складними об'єктами, що мають розподілені маси, пружні зв'язки й не лінійності, є одним з основних напрямків розвитку в електромеханіці [1]. В останній час намітилася стійка тенденція впровадження векторно-керованого електропривода в підйомно-транспортних механізмах, зокрема в ліфтових установках [2]. Це забезпечує плавні перехідні процеси та точне позиціонування кабіни ліфту, підвищує термін служби канатів, гальмівних колодок, редуктора тощо. Проте практичне застосування законів керування координатами електропривода, отриманих на основі класичних методів теорії автоматичного керування, пов'язано з необхідністю мати достовірну інформацію про параметри об'єкту керування, тому що ці закони є компенсаційного типу.

**Аналіз попередніх досліджень.** Слабка чутливість систем до параметричних та координатних збурень забезпечується робастними законами керування, зокрема на основі концепції зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій [3, 4]. Отримані закони керування забезпечують динамічну декомпозицію взаємозв'язаної системи та надають їй властивостей слабкої чутливості до збурень, що обумовлює їх практичне впровадження, проте в електроприводі ліфтової підйомної установки можуть змінюватися електричні опори обмотки асинхронного двигуна внаслідок нагрівання, а також сумарний момент інерції в залежності від завантаження кабіни ліфту.

**Мета роботи.** Підвищення якості керування швидкістю векторно-керованого асинхронного електропривода ліфтової підйомної установки в умовах параметричних та координатних збурень шляхом синтезу законів керування на основі концепції зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій.

**Матеріал і результати дослідження.** Для досягнення вказаної мети розроблено закони керування регуляторів компонентів струму статора, регулятора потокозчеплення ротора та регулятора швидкості; шляхом моделювання проведено дослідження якості керування в умовах параметричних збурень, зокрема при зміні вчетверо сумарного моменту інерції електропривода.

Модель асинхронного електродвигуна в синхронній системі координат, що ідеально зорієнтована за

вектором потокозчеплення ротора [5], описується системою рівнянь (1):

$$\begin{aligned} \frac{di_{1d}}{dt} &= -\frac{R_1}{\sigma} i_{1d} - \alpha\beta L_m i_{1d} + \omega_0 i_{1q} + \\ &\quad + \alpha\beta |\psi_2| + \frac{U_{1d}}{\sigma}; \\ \frac{d|\psi_2|}{dt} &= -\alpha |\psi_2| + \alpha L_m i_{1d}; \\ \frac{di_{1q}}{dt} &= -\frac{R_1}{\sigma} i_{1q} - \alpha\beta L_m i_{1q} - \omega_0 i_{1d} - \\ &\quad - \alpha\beta p_n |\psi_2| + \frac{U_{1q}}{\sigma}; \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} \left[ \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} |\psi_2| i_{1q} - M_c \right], \end{aligned} \quad (1)$$

де  $i_{1d}$ ,  $i_{1q}$  – компоненти вектора струму статора;  $U_{1d}$ ,  $U_{1q}$  – компоненти вектора напруги статора;  $|\psi_2|$  – модуль вектора потокозчеплення ротора;  $\omega$  – кутова швидкість двигуна;  $M_c$  – момент навантаження;  $J$  – сумарний момент інерції електропривода;  $p_n$  – число пар полюсів;  $L_m$  – індуктивність намагнічуючого контуру;  $R_1$ ,  $L_1$  – активний електричний опір та індуктивність обмотки статора;  $R_2$ ,  $L_2$  – активний електричний опір та індуктивність обмотки ротора;  $\alpha = R_2 / L_2$ ,  $\sigma = L_1 - L_m^2 / L_2$ ,  $\beta = L_m / \sigma L_2$  – параметри моделі.

Синтез законів керування проводиться згідно методики [3, 4]. Розробка регуляторів каналу потокозчеплення ротора починається з закону керування внутрішнього контуру складовою струму статора  $i_{1d}$ . Згідно першого рівняння системи (1) об'єкт керування описується рівнянням першого порядку, на який діють координатні збурення, обумовлені складовою струму  $i_{1q}$  та модулем потокозчеплення  $|\psi_2|$ . Завдання бажаної якості керування струмом  $i_{1d}$  здійснюється за допомогою бажаного рівняння замкнутого контуру струму, порядок якого відповідає порядку рівняння об'єкта керування

$$\dot{z} + \gamma_{0id} z = \beta_{0id} i_{1d}^*, \quad (2)$$

де  $i_{1d}^*$  – сигнал завдання струму.

Для забезпечення стійкості замкнутого контуру коефіцієнт рівняння, відповідно до критерію Гурвиця, повинен бути додатним  $\gamma_{0id} > 0$ , а для отримання астатизму 1-го порядку за керуючою дією цей коефіцієнт повинен бути рівним коефіцієнту правої

частини рівняння  $\gamma_{0id} = \beta_{0id}$ . Таким чином, за допомогою рівняння (2) задається перехідний процес без перерегулювання складової струму  $i_{1d}$ . Необхідний час перехідного процесу  $t_n = 3 / \gamma_{0id}$ , який визначає швидкодію контуру струму, задається величиною коефіцієнта  $\gamma_{0id}$ .

Ступінь наближення реального процесу в контурі струму до бажаного оцінюється функціоналом, який характеризує нормовану за індуктивністю енергію першої похідної магнітного поля:

$$G(u) = \frac{1}{2} [\dot{z}(t) - \dot{i}_{1d}(t)]^2. \quad (3)$$

Мінімізація функціонала здійснюється за градієнтним законом першого порядку:

$$\frac{du(t)}{dt} = -\lambda \frac{dG(u)}{du}, \quad (4)$$

де  $\lambda$  – константа.

У результаті мінімізації закон керування струмом  $i_{1d}$  має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} u(t) &= k_{id}(z - i_{1d}); \\ z &= \gamma_{0id} \int_0^t (i_{1d}^* - i_{1d}) dt. \end{aligned} \quad (5)$$

Як видно з (5), параметри регулятора не залежать від параметрів об'єкту керування, що характерно для класичних законів керування, а визначаються лише параметром  $\gamma_{0id}$  рівняння бажаної якості керування. Це надає системі керування властивості слабкої чутливості до параметричних збурень. Ідеальна нечутливість має місце при коефіцієнті підсилення регулятора  $k_{id} \rightarrow \infty$ , що забезпечує повне співпадіння реальної та бажаної якості керування. Звичайно, при допустимому з точки зору технічної реалізації коефіцієнті підсилення існує похибка керування, максимально допустима величина якої встановлюється технічними вимогами.

Аналогічно здійснюється синтез закону керування зовнішнього контуру поточозчеплення. Відповідно до другого рівняння системи (1) об'єкт керування описується диференціальним рівнянням першого порядку. Рівняння бажаної якості керування замкнутого контуру модуля поточозчеплення ротору  $|\psi_2|$  також задається першого порядку із забезпеченням астатизму 1-го порядку:

$$\dot{z} + \gamma_{0\psi} z = \gamma_{0\psi} |\psi_2^*| \quad (6)$$

Рівнянням (6) задається аперіодичний перехідний процес поточозчеплення. Для забезпечення стійкості замкнутого контуру коефіцієнт рівняння  $\gamma_{0\psi} > 0$  повинен бути додатним, а для зменшення впливу динаміки внутрішнього контуру струму його значення вибирається за умови  $\gamma_{0id} > 5\gamma_{0\psi}$ .

Знаходження керуючої функції регулятора потоку  $u = i_{1d}^*$ , у ролі якої виступає завдання складової струму  $i_{1d}$ , здійснюється за умови, щоб якість керування модулем поточозчеплення ротора наближалася до бажаної, заданої рівнянням (6). Ступінь наближення реального процесу до бажаного оцінюється

функціоналом, що характеризує нормовану за інверсною індуктивністю енергію першої похідної магнітного поля:

$$G(u) = \frac{1}{2} [\dot{z}(t) - |\dot{\psi}_2|(t)]^2. \quad (7)$$

Після мінімізації функціонала (7) за градієнтним законом першого порядку знаходиться закон керування поточозчепленням:

$$\begin{aligned} u(t) &= k_{\psi}(z - |\psi_2|); \\ z &= \gamma_{0\psi} \int_0^t (|\psi_2^*| - |\psi_2|) dt. \end{aligned} \quad (8)$$

Розробка регуляторів каналу швидкості двигуна також починається із закону керування внутрішнього контуру складовою струму статора  $i_{1q}$ , синтез якого здійснюється аналогічно до синтезу закону для  $i_{1d}$  на основі третього рівняння системи (1). У результаті закон керування струмом приймає вид:

$$\begin{aligned} u(t) &= k_{iq}(z - i_{1q}); \\ z &= \gamma_{0iq} \int_0^t (i_{1q}^* - i_{1q}) dt. \end{aligned} \quad (9)$$

Синтез закону керування зовнішнього контуру швидкості проходить на підставі четвертого рівняння системи (1). Рівняння бажаної якості керування замкнутого контуру швидкості  $\omega$  задається першого порядку із забезпеченням астатизму 1-го порядку:

$$\dot{z} + \gamma_{0\omega} z = \gamma_{0\omega} \omega^*. \quad (10)$$

Для забезпечення стійкості замкнутого контуру швидкості коефіцієнт рівняння  $\gamma_{0\omega} > 0$  повинен бути додатним, а для зменшення впливу динаміки внутрішнього контуру струму його значення вибирається за умови  $\gamma_{0iq} > 5\gamma_{0\omega}$ . Знаходження керуючої функції регулятора швидкості  $u = i_{1q}^*$  здійснюється при

мінімізації функціонала, що характеризує нормовану за масою енергію прискорення:

$$G(u) = \frac{1}{2} [\dot{z}(t) - \dot{\omega}(t)]^2. \quad (11)$$

Закон керування швидкістю двигуна має вид:

$$\begin{aligned} u(t) &= k_{\omega}(z - \omega); \\ z &= \gamma_{0\omega} \int_0^t (\omega^* - \omega) dt. \end{aligned} \quad (12)$$

Дослідження представленої робастної системи векторного керування швидкістю асинхронного електропривода ліфтової установки потужністю 3,5 кВт проведено шляхом моделювання при дії параметричного збурення у вигляді збільшення й зменшення вдвоє сумарного моменту інерції. Параметри регуляторів електропривода задаються у відповідності з вимогами до рівнянь (2), (6), (10): регулятор потоку:  $\gamma_{0\psi}=50$ ,  $k_{\psi}=100$ ; регулятор струму  $i_{1d}$ :  $\gamma_{0id}=1000$ ,  $k_{id}=500$ ; регулятор швидкості:  $\gamma_{0\omega}=100$ ,  $k_{\omega}=10$ ; регулятор струму  $i_{1q}$ :  $\gamma_{0iq}=1000$ ,  $k_{iq}=500$ . На рис. 1 представлено похибки керування швидкістю при трьох різних значеннях моменту інерції: розрахунковому, вдвічі більшому та вдвічі меншому.

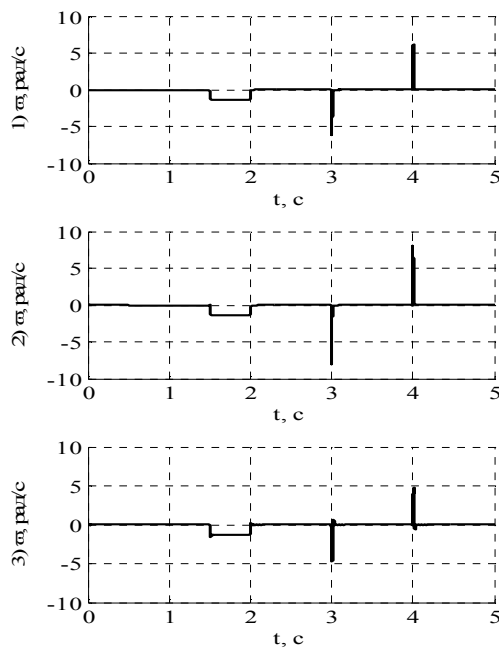


Рисунок 1 – Похибки керування швидкості:  
 1) розрахунковий момент інерції;  
 2) момент інерції вдвічі більший;  
 3) момент інерції вдвічі менший.

Через 1,5 с після запуску контуру керування поточозчепленням здійснюється плавний пуск електропривода до швидкості 314 рад/с за час 0,5 с з динамічною похибкою 1,3 рад/с незалежно від величини моменту інерції. Оцінка динамічних властивостей електропривода проводиться накиданням на 3 с та скиданням на 4 с номінального навантаження. При цьому динамічні похибки складають 6, 8 та 5 рад/с відповідно. Як видно з рис. 1, система забезпечує астатичне керування швидкістю в усталеному режимі.

**Висновки.** Представлена робастна система автоматичного керування швидкістю електропривода

## РОБАСТНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ЛИФТОВОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ

*Н. Г. Попович, д.т.н., проф., О. В. Сергиенко, соискатель  
 Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт"  
 пр. Победы, 37, 03056, г. Киев, Украина  
 E-mail: osergienko@list.ru*

Робастная система автоматического управления скоростью лифта обеспечивает астатическое управление в условиях параметрических возмущений в виде четырехкратного изменения момента инерции электропривода.

**Ключевые слова:** робастность, система автоматического управления, скорость лифта.

## ROBASTIC SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL IN THE SPEED OF THE LIFT

*M. Popovich, D.Sc. (Eng.), Prof., O. Sergienko, competitor  
 National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute"  
 pr. Peremohy, 37, 03056, Kyiv, Ukraine  
 E-mail: osergienko@list.ru*

Robastic the system of automatic control provides with speed of the lift astatic control in conditions of parametrical indignations in the form of quadruple change of the moment of inertia of the electric drive.

**Key words:** robastic, system of automatic control, speed of the lift.

ліфтової установки в умовах параметричного збурення у вигляді зміни моменту інерції механічної частини. Закони керування координатами системи векторного керування швидкістю асинхронного двигуна синтезовано на основі концепції зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів енергій, що дозволило отримати високу якість керування в статичному режимі та під час перехідних процесів без застосування традиційних алгоритмів адаптивного керування.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Попович М.Г., Сергиенко О.В. Математичні моделі підйомних установок як об'єктів електромеханічних систем автоматичного керування // Вісник НТУ "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ", 2010. – № 28. – С. 55–56.
2. Виноградов А., Сибирцев А., Журавлев С. Бездатчиковый электропривод подъемно-транспортных механизмов // Силовая электроника. – 2007. – № 1. – С. 23–27.
3. Крутько П.Д. Робастно устойчивые структуры управляемых систем динамической точности. Алгоритмы и динамика управления движением модельных объектов // Изв. РАН. ТиСУ. – 2005. – № 2. – С. 120–140.
4. Островерхов М.Я. Метод синтеза регуляторов електромеханічних систем на основі концепції зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергії / Вісник НТУ "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ", 2008. – № 30. – С. 105–110.
5. Пересада С.М., Ковбаса С.Н., Бовкунович В.С. Грубое векторное управление моментом и потоком асинхронного двигателя: теория и экспериментальное тестирование // Вісник НТУ "Львівська політехніка". – Львів: НТУ "ЛПІ", 2009. – № 19. – С. 69–73.

Стаття надійшла 12.06.2011 р.  
 Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
 Чорним О.П.