

Г.І. Канюк¹, Т.Ю. Василець¹, О.О. Варфоломієв², О.М. Близниченко¹, О.Т. Толсторебров¹

¹Українська інженерно – педагогічна академія, Харків

²Університет DeVry, Нью-Йорк, США

НЕЧІТКЕ УПРАВЛІННЯ ТРЬОХМАСОВОЮ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЮ СИСТЕМОЮ

Виконано синтез нечіткої системи управління електроприводом механізму підйому промислової установки на основі Fuzzy регулятора, що забезпечує високоякісне регулювання з урахуванням пружинних властивостей підйомного канату. Розроблено математичну модель динаміки об'єкту управління системи з урахуванням пружинних властивостей підйомного канату у вигляді трьохмасової електромеханічної системи. Показано, що переходні процеси в трьохмасовій системі мають незадовільний характер. Для забезпечення бажаних динамічних характеристик трьохмасової системи застосовано технологію нечіткого моделювання. Розроблено структурну схему трьохмасової електромеханічної системи з Fuzzy регулятором. В операційному середовищі системи MATLAB з використанням пакету прикладних програм Fuzzy Logic Toolbox виконано синтез і моделювання нечіткої системи управління. Як показали дослідження, графіки переходних процесів в системі з Fuzzy регулятором мають високі показники якості.

Ключові слова: нечіткі технології, системи нечіткого висновку, нечітка система, нечітке управління, трьохмасова електромеханічна система, Fuzzy регулятор.

Вступ

Постановка проблеми. У сучасній теорії автоматичного управління методи побудови систем управління, засновані на нечіткій логіці, набувають все більшого поширення. Для синтезу регуляторів систем класичними методами необхідна наявність точної математичної моделі системи. В реальних системах визначення характеристик всіх елементів системи і факторів, що впливають на її динаміку, є дуже складною задачею. Крім того, параметри системи можуть змінюватись в процесі її експлуатації. При адаптивному управлінні часто використовуються спрощені лінійні моделі, що призводить до зниження точності управління. При застосуванні нечітких методів, наявність точних математичних моделей системи не є необхідною умовою. Синтез регулятора виконується на основі загальних знань експерта про умови функціонування і характеристики об'єкту управління.

В процесі синтезу регуляторів багатомасових електромеханічних систем необхідно у повній мірі враховувати взаємодію електропривода і механізму з урахуванням пружинних елементів, зазорів і кінематичних похибок передач.

Побудова математичної моделі такої системи представляє значні складнощі, оскільки на практиці не завжди можна визначити характеристики всіх елементів системи. У зв'язку з цим актуальною задачею є застосування апарату нечіткої логіки для управління електромеханічними системами із складними кінематичними зв'язками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нечіткі методи управління інтенсивно розвиваються в багатьох країнах світу, що підтверджується великою кількістю публікацій. В роботах наводяться результати теоретичних досліджень і даються рекомендації щодо практичного застосування нечітких регуляторів для управління складними технологічними процесами і об'єктами. Аналіз сучасного стану і перспектив розвитку нечітких систем наведено в [1–2]. В цих роботах розглядаються основні задачі нечіткого управління та аналізуються різні шляхи їх розв'язання. В [3] запропоновано методику побудови нечітких систем з використанням еволюційних алгоритмів. Новий підхід до розробки нечіткого регулятора з меншою кількістю правил, що призводить до скорочення обчислювального часу, розглядається в [4]. Методику синтезу нечіткого регулятора для нелінійної динамічної системи та рекомендації щодо раціонального вибору параметрів регулятора наведено в [5].

У якості прикладів практичного застосування методів нечіткого управління можна навести роботи [15–26]. В цих роботах аналізуються особливості побудови нечітких систем та даються рекомендації щодо синтезу нечітких регуляторів для управління технологічними установками і процесами: електроприводом ескалатора метрополітену [6], асинхронним електроприводом роликів рольганга [7], технологічним процесом спікання агломерату [8], температури в системах вентиляції [9], системи наведення ракети на ціль [10]. Нечіткі і нейро-нечіткі методи регулювання пропонується застосовувати для вияв-

лення несправності теплових електростанцій [11], гасіння частот і коливань потужності в енергосистемі [12], проектування систем контролю температури [13], контролю вологості всередині теплиці [14], синтезу регулятора для автоматичної гальмівної системи [15]. Нечіткі методи можна застосовувати спільно з традиційними алгоритмами управління, використовуючи найкращі риси різних підходів [16–27]. Є значний потенціал поліпшення багатьох існуючих керуючих систем за рахунок використання нечітких методів. Таким чином, в даний час є актуальну задачу по застосуванню існуючих, а також по розробці нових методів управління на основі нечітких регуляторів, як для побудови нових систем управління, так і для поліпшення існуючих.

Мета статті. Розробка системи управління трьохмасовою електромеханічною системою з використанням інтелектуального методу управління на основі Fuzzy регулятора, що забезпечує високі показники якості функціонування системи.

Виклад основного матеріалу

1. Рівняння стану трьохмасової електромеханічної системи

У даній роботі пропонується використання нечіткого регулятора для побудови системи управління механізмом підйому промислової установки, яка може розглядатись як трьохмасова електромеханічна система.

Вибір цієї системи обумовлений тим, що, більшість об'єктів управління є складними багатомасовими електромеханічними системами з пружними елементами. Через кінцеву жорсткість цих зв'язків механічна частина електроприводів є пружною системою, прикладання до якої управлюючої дії (моменту двигуна), або збурюючої дії (моменту статичного навантаження) викликає коливання зв'язаних мас. Це призводить до збільшення максимальних навантажень зв'язків і ускладнення точності відпрацювання необхідних рухів і переміщень.

Застосування нечітких методів управління багатомасовими електромеханічними системами дозволяє використовувати всі переваги, що надаються нечіткими регуляторами. Застосовані для цих систем керуючі алгоритми можуть бути використані для багатьох інших об'єктів управління. Електропривод механізму підйому виконано за системою тиристорний перетворювач – двигун постійного струму (ТП-Д). Система управління має зворотні зв'язки за струмом і за швидкістю.

У якості регуляторів струму і швидкості застосовані пропорційно-інтегральні регулятори. Параметри регуляторів вибрані таким чином, що контур струму оптимізовано за модульним критерієм, а контур швидкості – за симетричним критерієм.

Перша маса представляє собою якір двигуна і

жорстко пов'язаних з ним елементів електроприводу, що обертаються зі швидкістю двигуна. У якості другої маси прийнято приведену до швидкості двигуна зосереджену масу канату. Третью масою є приведена маса вантажу, що піднімається, яку узагальнено називають масою механізму. Моменти інерції цих мас: $J_{\partial\Sigma}$, J_k і J_m , їх кутові швидкості: ω_∂ , ω_k і ω_m відповідно.

Маси пов'язані еквівалентними пружними зв'язками з коефіцієнтами жорсткості c_1 і c_2 . В розрахунках необхідно також враховувати коефіцієнти внутрішнього в'язкого тертя ділянок каната між масами β_1 і β_2 .

Рівняння стану трьохмасової електромеханічної системи управління механізмом підйому промислової установки мають вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_m}{dt} &= \frac{1}{J_m} M_{np2} + \frac{\beta_2}{J_m} \omega_k - \frac{\beta_2}{J_m} \omega_m - \frac{1}{J_m} M_{cm}; \\ \frac{dM_{np1}}{dt} &= c_1 \omega_\partial - c_1 \omega_k; \\ \frac{d\omega_k}{dt} &= \frac{1}{J_k} M_{np1} - \frac{\beta_1}{J_k} \omega_\partial + \frac{\beta_1}{J_k} \omega_m - \frac{1}{J_k} M_{np2} - \frac{\beta_2}{J_k} \omega_k + \\ &+ \frac{\beta_2}{J_k} \omega_m; \\ \frac{dM_{np2}}{dt} &= c_2 \omega_k - c_2 \omega_m; \\ \frac{d\omega_\partial}{dt} &= \frac{k\Phi_h}{J_{\partial\Sigma}} I_\partial - \frac{1}{J_{\partial\Sigma}} M_{np1} - \frac{\beta_1}{J_{\partial\Sigma}} \omega_\partial + \frac{\beta_1}{J_{\partial\Sigma}} \omega_k; \\ \frac{dI_\partial}{dt} &= -\frac{k\Phi_h}{R_\Sigma T_e} \omega_\partial - \frac{1}{T_e} I_\partial + \frac{1}{R_\Sigma T_e} U_{mn}; \\ \frac{dU_{mn}}{dt} &= -\frac{k_{mu} k_{nm} k_{mn} k_{uu}}{T_{\mu m}} \omega_\partial - \frac{k_m k_{nm} k_{mn}}{T_{\mu m}} I_\partial - \frac{1}{T_{\mu m}} U_{mn} - \\ &- \frac{k_{mn}}{T_{\mu m}} U_{pm} - \frac{k_{mn} k_{nm}}{T_{\mu m}} U_{puu} + \frac{k_{nu} k_{nm} k_{mn}}{T_{\mu m}} U_3; \\ \frac{dU_{pm}}{dt} &= -k_{ul} k_{nu} k_{im} \omega_\partial - k_{im} k_m I_\partial + k_{im} U_{puu} + k_{nu} k_{im} U_3; \\ \frac{dU_{puu}}{dt} &= -k_{uu} k_{iuu} \omega_\partial + k_{iuu} U_3, \end{aligned}$$

де M_{np1} , M_{np2} – моменти пружної взаємодії між масами; M_{cm} – момент статичного навантаження механізму; I_∂ – струм якірного кола двигуна; k – коефіцієнт, що залежить від конструктивних даних двигуна; Φ_h – номінальний магнітний потік двигуна; U_{mn} – напруга тиристорного перетворювача; U_{pm} , U_{puu} – напруги на виході інтегральної частини

ни ПІ-регуляторів струму і швидкості відповідно; U_3 – напруга завдання; T_e – електромагнітна постійна часу електроприводу; R_Σ – сумарний актив-

ний опір якірного кола; k_{mn} – коефіцієнт посилення тиристорного перетворювача;

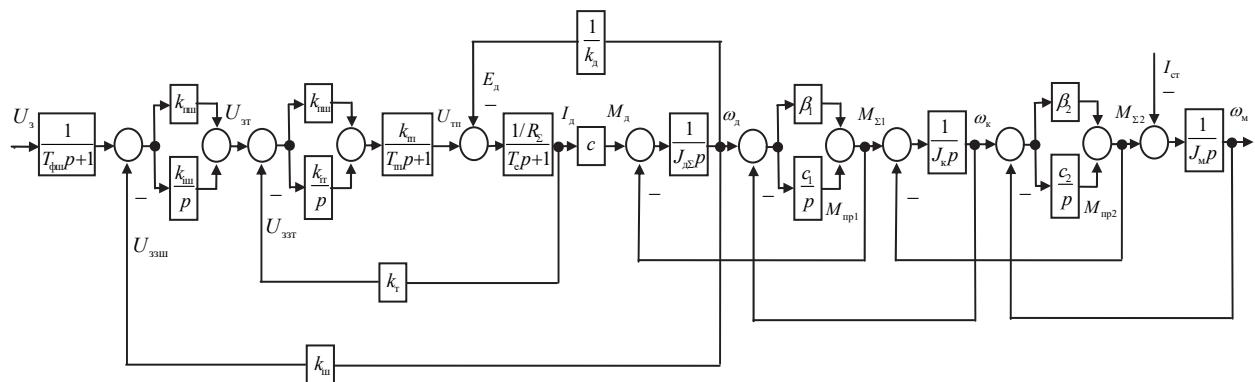


Рис. 1. Структурна схема трьохмасової електромеханічної системи

k_∂ – коефіцієнт посилення двигуна; k_{uu} , k_m – коефіцієнт посилення зворотного зв'язку за швидкістю і струмом; $T_{\mu m}$ – мала, що не компенсується, постійна часу контуру струму; k_{nuu} , k_{iuu} , k_{nm} , k_{im} – коефіцієнти підсилення пропорційної та інтегральної частин регулятора швидкості і струму відповідно:

$$k_{nuu} = \frac{4T_{\mu uu}T_m k_m}{8T_{\mu uu}^2 k_{uu} k_\partial R_\Sigma}, \quad k_{iuu} = \frac{T_m k_m}{8T_{\mu uu}^2 k_{uu} k_\partial R_\Sigma},$$

$$k_{nm} = \frac{R_\Sigma T_e}{2T_{\mu um} k_{mn} k_m}, \quad k_{im} = \frac{R_\Sigma}{2T_{\mu um} k_{mn} k_m},$$

де T_m – електромеханічна постійна часу електроприводу; $T_{\mu uu}$ – мала, що не компенсується, постійна часу контуру швидкості.

Структурна схема трьохмасової системи показана на рис. 1.

На схемі замість M_{cm} показаний струм статичного навантаження $I_{cm} = M_{cm} / (k\Phi_h)$.

2. Переходні процеси в трьохмасовій електромеханічній системі

Розрахунок переходних процесів виконано для системи з наступними параметрами: номінальний струм двигуна:

$$I_h = 3180 A; \quad T_{\mu m} = 0,005 s;$$

$$k\Phi_h = 165; \quad R_\Sigma = 0,0044 \Omega \text{m};$$

$$k_m = 0,00685 B/A;$$

$$c_1 = c_2 = 298800 Hm; \quad T_e = 0,069 s; \quad k_{uu} = 6,7 Bc;$$

$$\beta_1 = \beta_2 = 2988 m^2 / s; \quad k_{mn} = 66;$$

$$J_{\partial\Sigma} = 532864 \text{ кг}\cdot\text{м}^2; \quad J_\kappa = 5109 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$$

$$J_m = 145990 \text{ кг}\cdot\text{м}^2, \quad T_{\mu uu} = 2T_{\mu c}.$$

Для розрахунку використано схему моделі трьохмасової системи, побудовану в Simulink системи MATLAB (рис. 2). Для формування вхідного сигналу U_3 і сигналу збурення M_{cm} використані блоки Uniform Random, які формують ступінчастий сигнал з випадковою амплітудою, що знаходиться в заданих межах. Інтервал, впродовж якого сигнал залишається незмінним, встановлено 20 с. В результаті моделювання встановлено, що переходні процеси змінних стану трьохмасової системи (рис. 3) мають незадовільні показники якості.

3. Розробка структурної схеми трьохмасової електромеханічної системи з Fuzzy регулятором

З метою покращення динамічних характеристик трьохмасової електромеханічної системи застосовано технологію нечіткого моделювання, що в даний час є однією з найбільш ефективних технологій проектування систем управління. Fuzzy регулятором, який є реалізацією алгоритму нечіткого висновку. Для функціонування Fuzzy регулятора необхідно визначити вхідні лінгвістичні змінні, визначити лінгвістичну змінну на вихіді регулятора, задати множини їх значень, сформувати правила нечіткого висновку. Структурна схема трьохмасової електромеханічної системи з Fuzzy регулятором показана на рис. 4. У якості вхідних сигналів Fuzzy регулятора вибрано помилку регулювання ϵ і момент пружності M_{np2} . Вихідним сигналом є напруга U . На вхід трьохмасової системи подається алгебраїчна сума сигналу завдання U_3 і сигналу з виходу Fuzzy регулятора U , тобто відбувається корекція вхідного

сигналу трьохмасової електромеханічної системи, що забезпечує бажані показники якості перехідних процесів. При синтезі Fuzzy регулятора для кожної лінгвістичної змінної задаються функції приналеж-

ності. Шляхом багатократного моделювання визначається їх тип, параметри і діапазон зміни. Побудуємо структурну схему системи управління трьохмасовою електромеханічною системою.

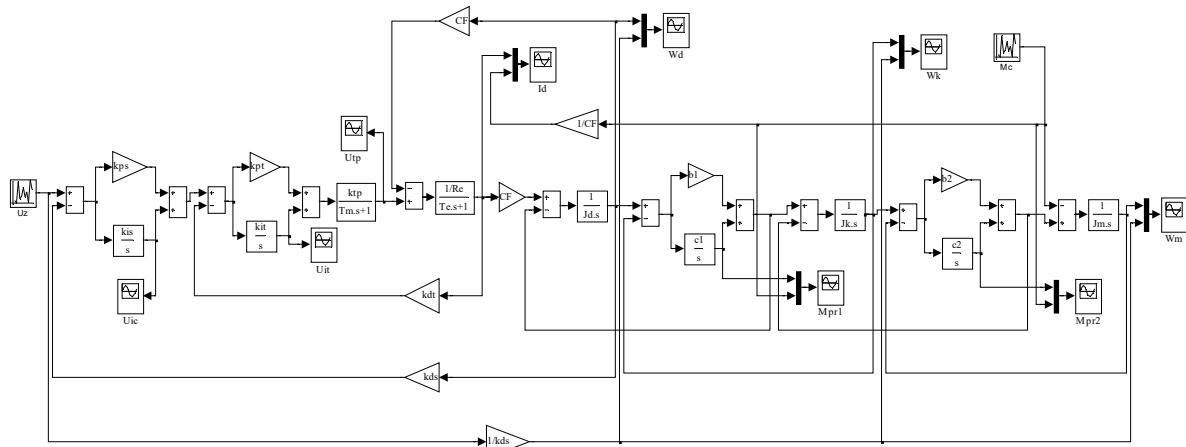


Рис. 2. Модель Simulink трьохмасової електромеханічної системи

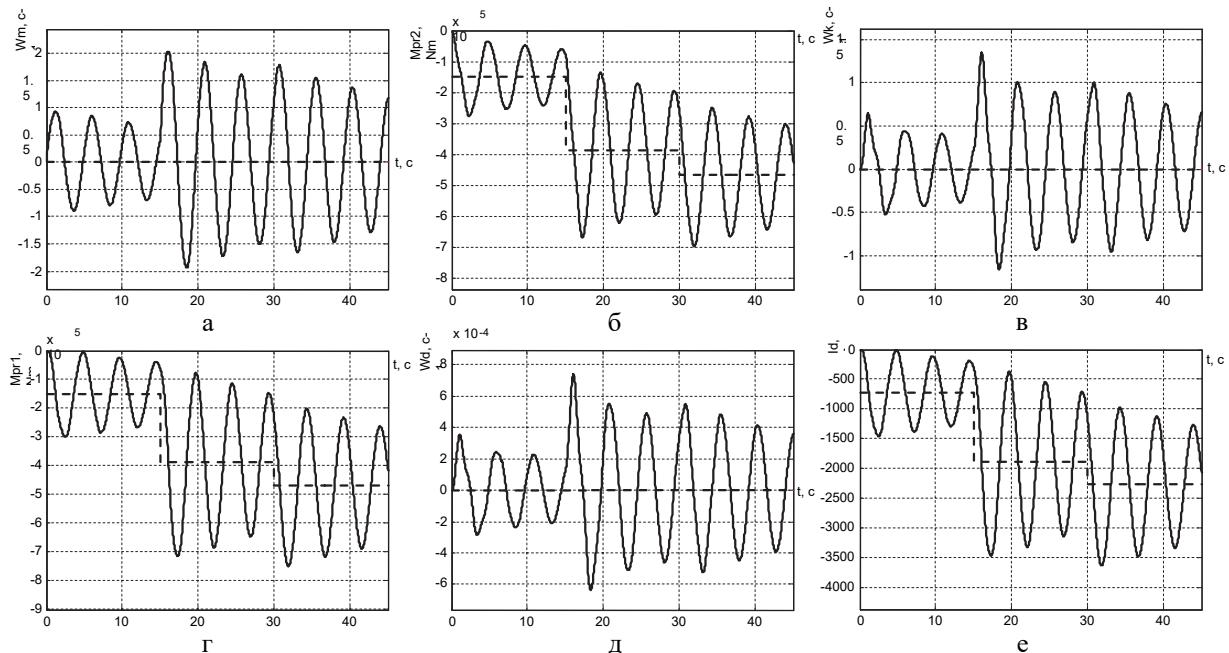


Рис. 3. Перехідні процеси змінних стану трьохмасової електромеханічної системи по збурюючій дії:
а – швидкість механізму ω_m ; б – другий момент пружності M_{np2} ; в – швидкість каната ω_k ;
г – перший момент пружності M_{np1} ; д – швидкість двигуна ω_d ; е – струм двигуна I_d

Кількість правил нечіткого висновку і їх структура визначаються на основі апріорних знань про умови функціонування і характеристики багатомасової електромеханічної системи.

4. Моделювання нечіткої системи управління

Синтез Fuzzy регулятора виконано за допомогою пакету Fuzzy Logic Toolbox системи MATLAB. При синтезі Fuzzy регулятора задано терм-множини всіх лінгвістичних змінних, визначено тип і параметри функцій приналежності, сформовано базу правил нечіткого висновку типу “if ... then”. У якості

алгоритму нечіткого висновку застосовано алгоритм Mamdani. Схема моделі Simulink нечіткої трьохмасової системи, показана на рис. 5.

Графіки перехідних процесів змінних стану системи з Fuzzy регулятором по збурюючій дії – моменту статичного навантаження M_{cm} , приведені на рис. 6. Аналіз результатів моделювання показує що нечітка система має високі динамічні характеристики.

Схема моделі Simulink нечіткої трьохмасової системи, показана на рис. 5.

Графіки перехідних процесів змінних стану си-

стеми з Fuzzy регулятором по збурюючій дії – моменту статичного навантаження M_{cm} , приведені на рис. 6.

Аналіз результатів моделювання показує, що нечітка система має високі динамічні характеристики.

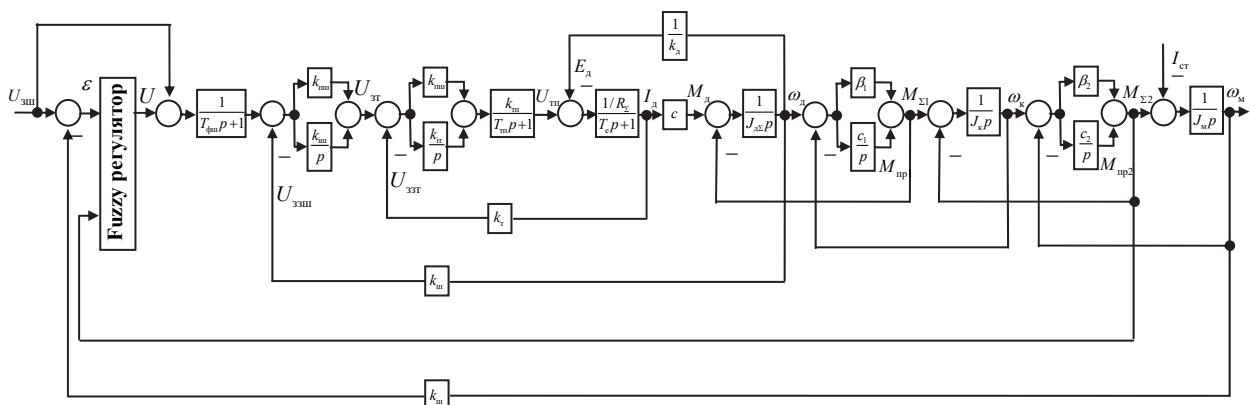


Рис. 4. Структурна схема трьохмасової електромеханічної системи з Fuzzy регулятором

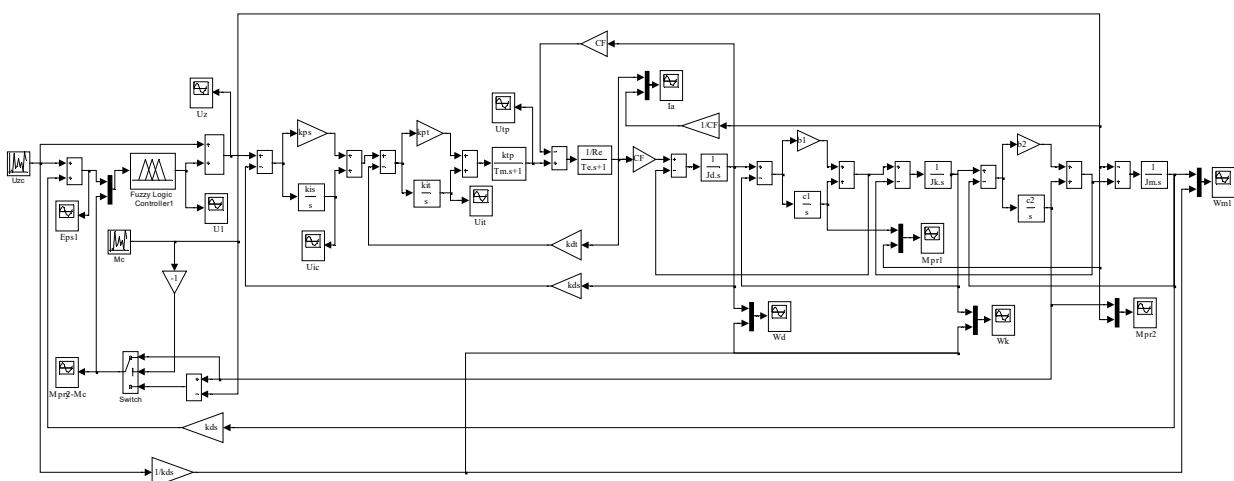


Рис. 5. Схема моделі Simulink нечіткої трьохмасової системи

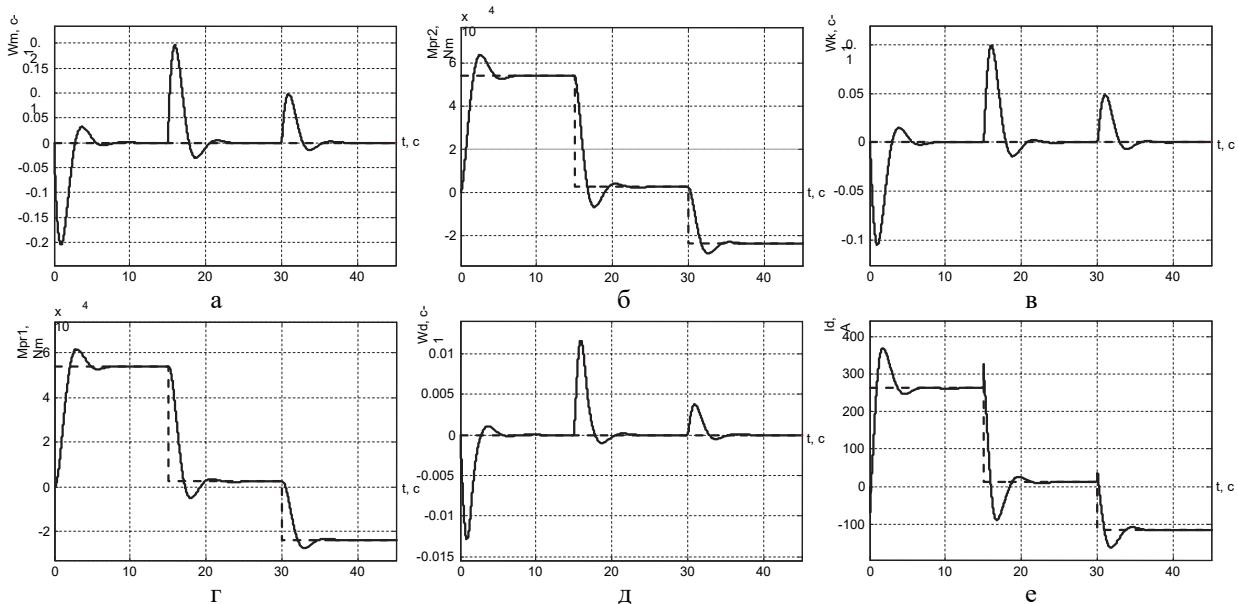


Рис. 6. Графіки переходних процесів змінних стану нечіткої системи Fuzzy регулятором по збурюючій дії:
а – швидкість механізму ω_m ; б – другий момент пружності M_{np2} ; в – швидкість каната ω_k ;
г – перший момент пружності M_{np1} ; д – швидкість двигуна ω_d ; е – струм двигуна I_d

Висновки

Наукова новизна і практична цінність роботи полягає в розробці нової нечіткої системи управління електроприводом механізму підйому промислової установки на основі Fuzzy регулятора, що забезпечує високоякісне регулювання з урахуванням пружинних властивостей підйомального канату.

Розроблена математична модель динаміки об'єкту управління системи з урахуванням пружинних властивостей підйомного канату у вигляді трьохмасової електромеханічної системи. Проведено моделювання трьохмасової системи на ЕОМ. Показано, що переходні процеси в трьохмасовій системі мають нездовільний характер.

Для забезпечення бажаних динамічних характеристик трьохмасової системи запропоновано застосувати Fuzzy регулятор.

Розроблено структурну схему трьохмасової електромеханічної системи з Fuzzy регулятором. Визначено вхідні і вихідну лінгвістичні змінні регулятора.

Виконано синтез нечіткої системи з використанням пакету прикладних програм Fuzzy Logic Toolbox системи MATLAB. Проведено моделювання нечіткої системи з синтезованим регулятором. Як показали дослідження, графіки перехідних процесів в системі з Fuzzy регулятором мають високі показники якості. Застосування нечітких методів управління багатомасовими електромеханічними системами дозволяє використовувати всі переваги, що надаються нечіткими регуляторами. Застосовані для цих систем керуючі алгоритми можуть бути використані для управління системами із складними кінематичними зв'язками за відсутності кількісних характеристик всіх елементів і зв'язків.

Список літератури

1. Герман Э.Е. Современное состояние и перспективы развития систем нечеткого управления / Э.Е. Герман // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ". – 2008. – № 57. – С. 37-44.
2. Герман Э.Е. Проектирование нечетких моделей интеллектуальных промышленных регуляторов и систем управления / Э.Е. Герман, Л.А. Клименко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2015. – № 3. – С. 24-31.
3. Sharma D. Designing and Modeling Fuzzy Control Systems / D. Sharma // International Journal of Computer Applications. – 2011. – Vol. 16. – № 1. – P. 46-53. <https://doi.org/10.5120/1973-2644>.
4. Chopra S. Fuzzy Controller: Choosing an Appropriate and Smallest Rule Set / S. Chopra, R. Mitra, V. Kumar // International Journal of Computational Cognition. – 2005. – Vol. 3. – № 4. – P. 73-79.
5. Filo G. Modelling of fuzzy logic control system using the MATLAB SIMULINK program / G. Filo // Technical Transactions. – 2010. – Vol. R. 107, z. 2-M. – No. 8. – P. 73-81.
6. Клепиков В.Б. Энергосберегающее fuzzy управление электроприводом эскалатора метрополитена системы ТПН-АД / В.Б. Клепиков, Е.Ф. Банев, С.А. Мехович // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ". – 2010. – № 28. – С. 579-582.
7. Черевко Е.А. Управление электроприводом роликов рольгантов ТЛС с использованием фаззи-логики / Е.А. Черевко // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2014. – № 28. – С. 179-183.
8. Щокін В.П. Інтелектуальна система управління з нечітким адаптивним емулятором / В.П. Щокін, О.О. Сушенцев, Г.В. Коломіц // Автоматика. Автоматизація. Електротехнічні комплекси та системи. – 2009. – № 1. – С. 177-181.
9. Степанець О.В. Розробка нечіткого регулятора для задачі забезпечення температурної складової комфортного мікроклімату / О.В. Степанець, А.В. Каракой // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – № 1(2). – С. 50-55.
10. Федин С.С. Моделирование fuzzy-системы наведения ракеты на цель / С.С. Федин // Системи озброєння і військова техніка. – 2016. – № 1(45). – С. 190-195.
11. Priya R. Design of an adaptive constrained based neuro-fuzzy controller for fault detection of a power plant system / R. Priya, E. Sherly // Indian journal of computer Science and Engineering. – 2016. – Vol. 7. – № 5. – P. 208-218.
12. Khaksar M. Simulation of novel hybrid method to improve dynamic responses with PSS and UPFC by fuzzy logic controller / M. Khaksar, A. Rezvani, M.H. Moradi // Neural Computing and Applications. – 2016. – Vol. 29. – Issue 3. – P. 837-853. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2487-1>.
13. Singhala P. Temperature Control using Fuzzy Logic / P. Singhala, D.N. Shah, B. Patel // International Journal of Instrumentation and Control Systems (IJICS). – 2014. – Vol. 4. – No. 1. – P. 1-10. <https://doi.org/10.5121/ijics.2014.41011>.
14. Saudagar P.A. Design of Fuzzy Logic Controller for Humidity Control in Greenhouse / P.A. Saudagar, D.S. Dhote, K.D. Chinchkhede // International Journal of Engineering Inventions. – 2012. – Vol. 1. – Issue 11. – P. 45-49.
15. Solanke D.R. Design & Implementation of Fuzzy Inference System For Automatic Braking System / D.R. Solanke, K.D. Chinchkhede, A.B. Manwar // International journal of Research in Science and Engineering. – 2017. – Vol. 6. – Issue 9. – P. 1242-1255.
16. Vichuzhanin V. Realization of a fuzzy controller with fuzzy dynamic correction / V. Vichuzhanin // Central European Journal of Engineering. – 2012. – № 2(3). – P. 392-398. <https://doi.org/10.2478/s13531-012-0003-7>.
17. Герман Е.Є. Синтез системи управління сушильною установкою з використанням нечіткого контролера з самоналаштуванням / Е.Є. Герман, І.Г. Лисаченко, К.І. Беспалов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2015. – № 1. – С. 71-74.
18. Харченко Р.Ю. Сравнительный анализ методов активной адаптации ПИ-регуляторов и нечетких регуляторов для систем кондиционирования и вентиляции (СКВ) морских судов / Р.Ю.Харченко // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2012. – № 2(7). – С. 276-286.

19. Ісаєв Є.О. Аналіз систем нечіткого керування судновими електро-енергетичними комплексами на прикладі автоматичних регуляторів температури / Є.О. Ісаєв, А.Л. Сіманенков // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2013. – № 2(9). – С. 35-40.
20. Almatheel Y.A. Speed control of DC motor using Fuzzy Logic Controller / Y.A. Almatheel, A. Abdelrahman // International Conference on Communication, Control, Computing and Electronics Engineering (ICCCCEE). – 2017. – P. 586-594. <https://doi.org/10.1109/ICCCCEE.2017.7867673>.
21. Ramjug-Ballgobin R. Load frequency control of a nonlinear two-area power system / R. Ramjug-Ballgobin, S.Z. Sayed Hassen, S. Veerapen // International Conference on Computing. – 2015. – P. 54-55. <https://doi.org/10.1109/CCCS.2015.7374172>.
22. Chaudhary H. ANFIS based speed control of DC motor / H. Chaudhary, S. Khatoon, R. Singh // Second International Innovative Applications of Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with their Impact on Humanity (CIPECH). – 2016. – P. 63-68. <https://doi.org/10.1109/CIPECH.2016.7918738>.
23. Carvajal J. Fuzzy PID controller: Design, performance evaluation, and stability analysis / J. Carvajal, G. Chen, H. Ongmen // Information Sciences. – 2000. – Vol. 123. – P. 249-270. [https://doi.org/10.1016/S0020-0255\(99\)00127-9](https://doi.org/10.1016/S0020-0255(99)00127-9).
24. An optimal fuzzy PID controller / K.S. Tang, K.F. Man, G. Chen, S. Kwong // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2001. – Vol. 48. – P. 757-765. <https://doi.org/10.1109/41.937407>.
25. Xie X. Fuzzy PID Temperature Control System Design Based on Single Chip Microcomputer / X. Xie, Z. Long // International Journal of Online and Biometrical Engineering. – 2015. – Vol. 11. – P. 29-33. <https://doi.org/10.3991/ijoe.v11i8.4881>.
26. Jigang H. An anti-windup self-tuning fuzzy PID controller for speed control of brushless DC motor / H. Jigang, W. Jie, F. Hui // Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications. – 2017. – Vol. 58. – P. 321-336. <https://doi.org/10.1080/00051144.2018.1423724>.
27. Kim J. Fuzzy PID controller design using time-delay estimation / J. Kim, P. Chang, M. Jin // Transactions of the Institute of Measurement and Control. – 2016. – Vol. 39. – P. 1329-1338. <https://doi.org/10.1177/0142331216634833>.

References

1. German, E.E. (2008), “Sovremennoe sostoyanie i perspektiviya razvitiya sistem nechetkogo upravleniya” [The current state and development prospects of fuzzy control systems], *Bulletin of the National Technical University “KhPI”*, No. 57, pp. 37-44.
2. German, E.E. and Klimenko, L.A. (2015), “Proektirovanie nechetkikh modeley intellektualnyih promyshlennyyih regulatorov i sistem upravleniya” [Design of fuzzy models of intelligent industrial regulators and control systems], *Information and Control Systems on the Railway Transport*, No. 3, pp. 24-31.
3. Sharma, D. (2011), Designing and Modeling Fuzzy Control Systems, *International Journal of Computer Applications*, Vol. 16, No. 1, pp. 46-53. <https://doi.org/10.5120/1973-2644>.
4. Chopra, S., Mitra, R. and Kumar, V. (2005), Fuzzy Controller: Choosing an Appropriate and Smallest Rule Set, *International Journal of Computational Cognition*, Vol. 3, No. 4, pp. 73-79.
5. Filo, G. (2010), Modelling of fuzzy logic control system using the MATLAB SIMULINK program, *Technical Transactions*, Vol. R. 107, z. 2-M, No. 8, pp. 73-81.
6. Klepikov, V.B., Baney, E.F. and Mehovich, S.A. (2010), “Energosberegayuschee fuzzy upravlenie elektroprivodom eskalatora metropolitena sistemyi TPN-AD” [Energy-saving fuzzy control of the electric drive of the metropolitan escalator of the TPN-AD system], *Bulletin of the National Technical University “KhPI”*, No. 28, pp. 579-582.
7. Cherevko, E.A. (2014), “Upravlenie elektroprivodom rolkov rolgangov TLS s ispolzovaniem fazzi-logiki” [Control of the electric drive of the rollers of the TLS roller tables using fuzzy logic], *Bulletin of the Priazov State Technical University*, No. 28, pp. 179-183.
8. Shchokin, V.P., Sushentsev, O.O. and Kolomits, G.V. (2009), “Intelektualna sistema upravlinnia z nechitkym adaptivnym emuliatorom” [Intelligent control system with fuzzy adaptive emulator], *Automatics. Automation. Electrical Complexes and Systems*, No. 1, pp. 177-181.
9. Stepanets, O.V. and Karakoy, A.V. (2016), “Rozrobka nechetkoho rehuliatora dlia zadachi zabezpechennia temperaturnoi skladovoi komfortnoho mikroklimatu” [Development of a fuzzy controller for the task of providing a temperature component of a comfortable microclimate], *Technological Audit and Production Reserves*, No. 1(2), pp. 50-55.
10. Fedin, S.S. (2016), “Modelirovaniye fuzzy-sistemyi navedeniya raketyi na tsel” [Modeling of a fuzzy-missile guidance system on a target], *Systems of Arms and Military Equipment*, No. 1(45), pp. 190-195.
11. Priya, R. and Sherly, E. (2016), Design of an adaptive constrained based neuro-fuzzy controller for fault detection of a power plant system, *Indian journal of computer Science and Engeneering*, Vol. 7, No. 5, pp. 208-218.
12. Khaksar, M., Rezvani, A. and Moradi, M.H. (2016), Simulation of novel hybrid method to improve dynamic responses with PSS and UPFC by fuzzy logic controller, *Neural Computing and Applications*, Vol. 29, No. 3, pp. 837-85. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2487-1>.
13. Singhala, P., Shah, D.N. and Patel, B. (2014), Temperature Control using Fuzzy Logic, *International Journal of Instrumentation and Control Systems (IJICS)*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-10. <https://doi.org/10.5121/ijics.2014.41011>.
14. Saudagar, P.A., Dhote, D.S. and Chinchkhede, K.D. (2012), Design of Fuzzy Logic Controller for Humidity Control in Greenhouse, *International Journal of Engineering Inventions*, Vol. 1, No. 11, pp. 45-49.
15. Solanke, D.R., Chinchkhede, K.D. and Manwar, A.B. (2017), Design & Implementation of Fuzzy Inference System For Automatic Braking System, *International Journal of Research in Science and Engineering*, Vol. 6, No. 9, pp. 1242-1255.
16. Vichuzhanin, V. (2012), Realization of a fuzzy controller with fuzzy dynamic correction, *Central European Journal of Engineering*, No. 2(3), pp. 392-398. <https://doi.org/10.2478/s13531-012-0003-7>.

Толсторебров Олександр Тімурович

бакалавр

Української інженерно-педагогічної академії,
Харків, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-0550-5492>

Oleksandr Tolstorebров

Bachelor

of Ukrainian Engineering Pedagogical Academy,
Kharkiv, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-0550-5492>

НЕЧЕТКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТРЕХМАССОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

Г.И. Каниук, Т.Е. Васильтц, А.А. Варфоломеев, Е.Н. Близниченко, А.Т. Толсторебров

Выполнен синтез нечеткой системы управления электроприводом механизма подъема промышленной установки на основе Fuzzy регулятора, обеспечивающего высококачественное регулирование с учетом упругих свойств подъемного каната. Разработана математическая модель динамики объекта управления системы с учетом упругих свойств подъемного каната в виде трёхмассовой электромеханической системы. Показано, что переходные процессы в трёхмассовой системе имеют неудовлетворительный характер. Для обеспечения желаемых динамических характеристик трёхмассовой системы применена технология нечеткого моделирования. Разработана структурная схема трёхмассовой электромеханической системы с Fuzzy регулятором. В операционной среде системы MATLAB с использованием пакета прикладных программ Fuzzy Logic Toolbox выполнен синтез и моделирование нечеткой системы управления. Как показали исследования, графики переходных процессов в системе с Fuzzy регулятором имеют высокие показатели качества.

Ключевые слова: нечеткие технологии, системы нечеткого вывода, нечеткие системы, нечеткое управление, трёхмассовая электромеханическая система, Fuzzy регулятор.

FUZZY CONTROL OF THE THREE-MASS ELECTROMECHANICAL SYSTEM

G. Kaniuk, T. Vasilets, O. Varfolomiyev, O. Blyznychenko, O. Tolstorebrov

The synthesis of the fuzzy control system of the electric drive of the lifting mechanism of the industrial plant on the basis of the Fuzzy regulator, which provides high-quality adjustment, taking into account the elastic properties of the lifting rope, is performed. As a result of the analysis of the dynamic characteristics of multi-mass electromechanical systems and taking into account the requirements for modern control systems, the prospect of the use of fuzzy approximating systems for controlling a three-mass electromechanical system of the lifting mechanism of an industrial plant. The mathematical model of the dynamics of the object of control of the system is developed, taking into account the elastic properties of the lifting rope in the form of a three-mass electromechanical system. It is shown that the transients in the three-mass system are unsatisfactory. To provide the desired dynamic characteristics of the three-mass system, fuzzy modeling technology is used, which is currently one of the most effective technologies for designing control systems. The structural scheme of a three-mass electromechanical system with a Fuzzy regulator is developed, which is the implementation of the fuzzy logic algorithm. Input and output linguistic variables of the regulator are defined. In the operating system environment of the MATLAB system using the Fuzzy Logic Toolbox application package, fuzzy system synthesis was performed. In SIMULINK mode, a schematic diagram of a control system with a Fuzzy controller is developed that includes a controlled object block and a Fuzzy Logic Controller block. Simulated fuzzy system with synthesized regulator is executed. Studies have shown that transient graphs in a system with a Fuzzy controller have high quality performance. Thus, the use of fuzzy control methods for multi-mass electromechanical systems makes it possible to use all the advantages provided by fuzzy controllers. The control algorithms used for these systems can be used to control systems with complex kinematic bonds in the absence of quantitative characteristics of all elements and bonds.

Keywords: fuzzy technologies, fuzzy inference systems, fuzzy systems, fuzzy control, three-mass electromechanical system, Fuzzy controller.