

УДК 519.711.3 : 621.34 : 621.879.2

Ярослав Паранчук,

Національний університет «Львівська політехніка» кафедра ЕКС
e-mail:

Роман Паранчук,

Національний університет «Львівська політехніка» кафедра ЕКС
e-mail:

Тарас Рудий,

Національний університет «Львівська політехніка» кафедра ЕКС
e-mail:

Володимир Цяпа

Національний університет «Львівська політехніка» кафедра ЕКС
e-mail:

ПОКРАЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ДИНАМІКИ ПРИВОДУ ПІДЙМАННЯ КІВША ЕКСКАВАТОРА-ДРАГЛАЙНА ЕШ-15/90А НА ОСНОВІ НЕЧІТКОГО КОРЕКТОРА

<https://doi.org/10.23939/sepes2025.01.052>

© Я.Паранчук, Р.Паранчук, Т. Рудий, В.Цяпа, 2025

System engineering solutions for improving the dynamics of the electric drive of the excavator-dragline based on the fuzzy control model have been substantiated. The design of a fuzzy corrector of the speed regulator of the slave control system of the lifting drive of the excavator-dragline type ESH-15/90 has been carried out. A Simulink model of the proposed electromechanical lifting drive system has been compiled and computer efficiency of the proposed solutions has been carried out. Analysis of the obtained results confirmed the comprehensive improvement of the dynamics of the excavator lifting drive.

Keywords – dragline excavator, electric lifting drive, fuzzy corrector, computer modeling, dynamics indicators.

Обґрунтовано системотехнічні рішення для покращення показників динаміки електроприводу екскаватора-драглайна на основі моделі нечіткого керування. Виконано проєктування нечіткого коректора регулятора швидкості системи підлеглого керування приводом підймання екскаватора-драглайна типу ЕШ-15/90А. Складено Simulink-модель запропонованої електромеханічної системи приводу підймання та проведено комп'ютерні дослідження ефективності запропонованих рішень. Аналіз отриманих результатів підтвердив комплексне покращення показників динаміки приводу підймання ківша екскаватора.

Ключові слова – екскаватор-драглайн, електропривод підймання, нечіткий коректор, комп'ютерне моделювання, показники динаміки.

Вступ

Постановка проблеми. Функціональна надійність та продуктивність екскаваторів-драглайнів справляє визначальний вплив на продуктивність та ефективність підприємств гірничо-видобувної галузі, зокрема тих, що експлуатують родовища корисних копалин відкритим способом. На цих розробках широко використовуються екскаватори-драглайни. Основними їх складовими є механізми повертання платформи екскаватора, підймання та тяги ківша-драглайна.

Одним із доцільних підходів покращення вказаних вище показників екскаваторів-драглайнів є удосконалення системи автоматичного керування (САК) підймального, тягового та поворотного механізмів. Їх модернізація, у першу чергу, повинна передбачати точне приведення їх функціональних та експлуатаційних можливостей до вимог відповідних механізмів екскаватора. Зокрема зниження динамічних навантажень в елементах металоконструкцій їх механізмів та зниження коливань в траєкторіях руху ківша-драглайна у відповідних площинах [1-4].

У роботах [1,5,6] акцентується увага на важливості покращення показників динаміки руху ківша-драглайна, зокрема зменшення амплітуди коливань ківша-драглайна у площині стріли. Успішне вирішення задачі демпфування коливань ківша-драглайна системою керування механізму підймання дасть змогу знизити втому металоконструкції стріли, підвищити її функційну надійність та термін служби, і, як результат, підвищити продуктивність екскаватора-драглайна.

Тому у вказаному аспекті задача комплексного покращення показників динаміки приводу підймання екскаватора-драглайна у напрямі демпфування коливань у площині стріли та зниження динамічних зусиль (амплітуди моменту) є важливою та актуальною.

Аналіз попередніх досліджень та публікацій

Задача ґрунтовного дослідження динаміки електроприводу підймання ківша екскаватора-драглайна, зокрема з врахування ефекту провисання каната, виконана в [6]. У цій роботі створено комп'ютерну Simulink-модель механічної частини цього приводу та наводяться результати досліджень з та без врахування ефекту провисання линви ківша, тобто нелінійності коефіцієнта пружності. Результатами дослідження доведено, що у приводі підймання ківша екскаватора ЕШ-15/90А внаслідок використання в САК інерційних магнітних підсилювачів, показники динаміки не у повній мірі відповідають бажаним. Перехідній характеристиці властиві значні коливання, проте у випадку провисання линви фактор наявної інерційності позитивно сприяє плавному вибору її слабину.

Задача підвищення ефективності електроприводу підймання ківша-драглайна розглядається в рамках автоматизованого моніторингу технологічного процесу екскавації [7]. В цій роботі сформульовано основні задачі системи автоматичного керування приводом підймання екскаватора і для їх реалізації розроблено логічні моделі для системи автоматизованого оперативного керування транспортним рухом ківша-драглайна. Для цього використано моделі теорії нечіткого керування, що дало змогу точніше імітувати керування рухом ківша-драглайна на всьому робочому просторі драглайна.

У роботах [2, 8] для покращення ефективності підймального механізму використано стохастичні моделі відмов механічного обладнання і на основі цього отримано рішення для підвищення експлуатаційної надійності та ефективності цього екскаваторного механізму.

У дослідженнях [9-11] опрацьовано нечіткі моделі керування для покращення показників динаміки електромеханічної системи механізму підймання із складною механічною системою з пружностями для придушення коливань та зниження амплітуди перерегулювань при відпрацюванні заданих переміщень ківша-драглана. Отримані результати комп'ютерних досліджень підтвердили доцільність використання нечітких коректорів для реалізації дозованих переміщень без перерегулювань та режимів дотягування.

Приймаючи до уваги наведений вище аналіз відомих підходів для покращення показників динаміки руху ківша-драглайна у площині стріли ставиться задача структурного та параметричного

синтезу системи автоматичного керування (САК) механізмом підймання ківша екскаватора-драглайна у процесі відпрацювання задаючих та збурюючих впливів з врахуванням реальних параметричних збурюючих впливів та пружності канатів.

Метою дослідження є удосконалення системи автоматичного керування приводом механізму підймання ківша на основі принципів теорії нечіткого керування та проведення досліджень їх ефективності.

Новизною дослідження є структура інтелектуальної системи автоматичного керування траєкторією руху ківша-драглайна у площині стріли з мінімізацією коливань швидкості та пікових навантажень з урахуванням реальних параметричних збурень.

Постановка задачі дослідження

Одним із доцільних підходів підвищення ефективності та функційної надійності екскаваторів-драглайнів є удосконалення системи автоматичного керування технологічним процесом екскавації. Одною з основних складових цієї системи автоматичного керування є підсистема керування транспортним переміщенням завантаженого ківша на розвантаження у відвал та рухом порожнього ківша у розріз на завантаження [7].

Виконання вказаних транспортних операцій в оптимізованому автоматичному режимі дасть змогу підвищити продуктивність екскаватора та створити умови для безаварійної його роботи.

Однією з підзадач на шляху реалізації вказаного вище підходу є оптимізація траєкторії руху ківша у площині стріли, яка вимагає придушення його пружних коливань при максимально можливій швидкодії приводу його підймання. Доцільним підходом для цього є використання в структурі системи керування цього приводу принципів нечіткого керування [2-5].

Зважаючи на це, основною задачею даної статті є розроблення системотехнічних рішень для зниження амплітуди (в ідеалі повного придушення) коливань ківша у вертикальній площині та виконання комп'ютерних досліджень їх ефективності.

Виклад основного матеріалу

У багатьох сучасних дослідженнях для вирішення окресленої вище задачі реалізації оптимальної траєкторії руху ківша-драглайна та придушення його коливань використовують підходи інтелектуального керування, зокрема моделі керування на основі принципів нечіткої логіки [7-9]. У цих роботах пропонується та досліджується ефективність використання системотехнічних рішень з різними моделями нечітких регуляторів для покращення показників динаміки руху ківша-драглайна.

Для покращення показників динаміки механізмів екскаватора-драглайна у [9-11] запропоновано низку моделей нечіткого керування з використанням генетичного алгоритму.

У [6] розроблено комп'ютерну модель електромеханічної системи механізму підймання ківша драглайна, на якій проведено дослідження доцільності врахування в алгоритмі керування цим механізмом ефекту провисання каната, а також впливу цього фактора на точність відтворення реальних перехідних процесів. На основі отриманих на моделі результатів досліджень доведено, що за причини використання в системі автоматичного керування механізму підймання ківша-драглайна магнітних підсилювачів, які характеризуються значною інерційністю, які зменшують швидкодію приводу, проте їхня інерційність спричинює позитивний вплив на швидке та плавне вибирання слабину канатів. Завдяки цьому коливання в перехідній характеристиці цього приводу додатково не зростають.

Отримані у цій роботі результати досліджень показали наявність значних коливань координат електроприводу підйимального механізму і значних динамічних навантажень.

Одним з доцільних підходів для зменшення амплітуди коливань координат приводу у перехідних процесах є використання різних типів нечітких регуляторів та схем їх включення.

У даному дослідженні ставиться задача проєктування та дослідження ефективності використання нечіткого коректора ПІ-регулятора для зменшення коливань швидкості в існуючій електромеханічній системі підймання ківша екскаватора-драглайна.

Структурна схема розробленої електромеханічної САК підймання ківша екскаватора-драглайна ЕШ-15/95А з нечітким коректором (НК) ПІ-регулятора швидкості наведена на рис.1.

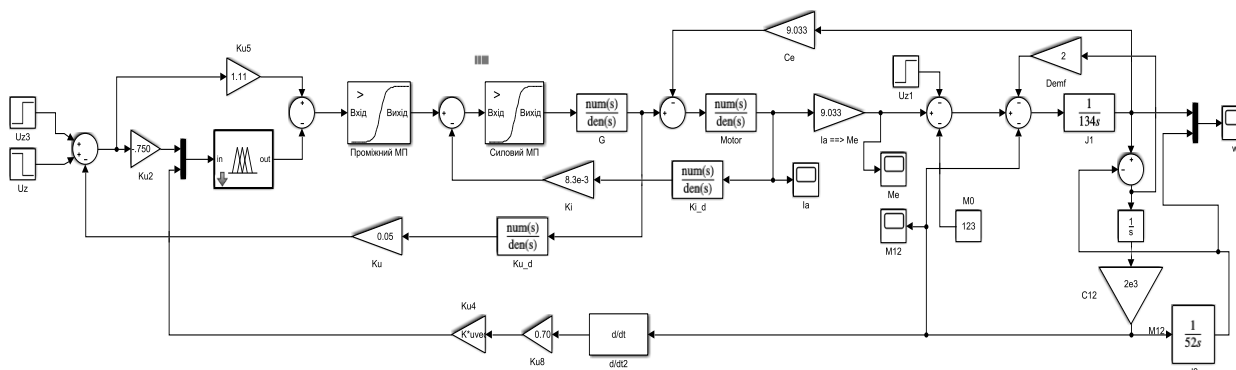


Рис.1. Структурна схема електромеханічної системи підймання ківша екскаватора ЕШ-15/95А

Нечіткий коректор реалізований на основі системи нечіткого висновку Mamdani, алгоритмічні та параметричні степені свободи якого отримані на основі співставлення фактичних та бажаних реакцій (траєкторії руху) системи керування рухом ківша у площині стріли при різних задаючих та .

Алгоритмічні та параметричні степені свободи нечіткого коректора отримані на основі аналізу фактичних та бажаних траєкторій руху (реакцій САК) при зміні керуючих та збурюючих впливів.

Вхідними лінгвістичними змінними запропонованої нечіткої САК є похибка регулювання вихідної напруги магнітного підсилювача та $\varepsilon = U_3 - U$ та похідна пружного M'_{12} , а вихідною лінгвістичною змінною є коригуючий сигнал U_K , який формується на виході нечіткого коректора регулятора швидкості.

На основі співставлення реальних та бажаних перехідних процесів при підніманні та опусканні драглайна складено базу правил нечітких продукцій НК типу “якщо ... то”, яку представлено у табл.1.

Таблиця 1

База правил нечіткого коректора

		Похибка регулювання ε				
		PL	P	Z	N	NL
Похідна моменту пружності M'_{12}	PL	NL	NM	NS	N	Z
	P	NS	N	Z	P	NM
	Z	Z	Z	Z	Z	Z
	N	N	Z	PS	PM	P
	NL	Z	P	PS	PM	PL

Кожна вхідна лінгвістична змінна (ε , M'_{12}) описується п'ятьма функціями приналежності: NL, N, Z, P і PL, а вихідна U_K – дев'ятьма: NL, NM, NS, N, Z, P, PS, PM, PL.

Коректор реалізовано на основі моделі нечіткого висновку Mamdani, проектування та тестування якого проведено з використанням графічних засобів Fuzzy Logic Toolbox застосунку MatLAB.

Для опису лінгвістичних змінних використовувалися функції приналежності трикутної форми *trimf* (симетричні для центральних) та несиметричні типу *trapmf* для граничних піддіапазонів зміни вхідних сигналів. Графічні залежності вхідних (ε та M'_{12}) та вихідної (коригуючого сигналу U_K) лінгвістичних змінних нечіткого коректора показано на рис.2, рис.3 та рис.4 відповідно.

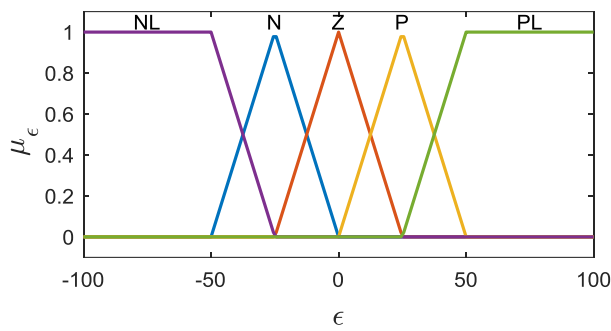


Рис. 2. Функції приналежності змінної ϵ

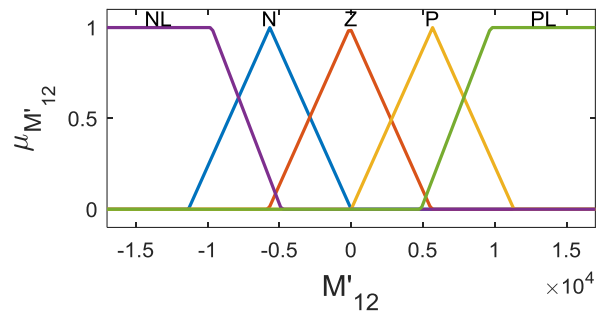


Рис. 3. Функції приналежності змінної M'_{12}

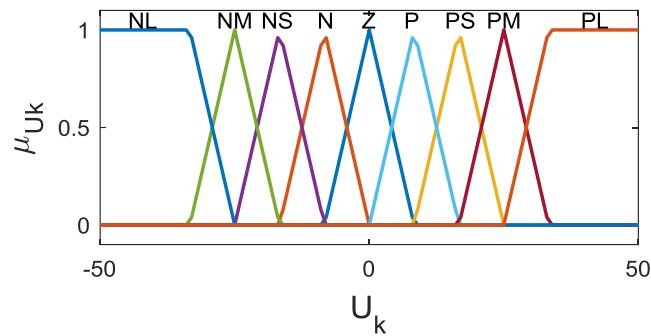


Рис.4. Функції приналежності корегуючого сигналу U_k

Діапазони зміни лінгвістичних змінних та параметри їх функцій приналежності уточнялися у процесі модельних досліджень за інтегральним критерієм мінімуму похибки регулювання швидкості руху ківша та мінімізації амплітуди динамічного моменту.

На рис.5 показано 3-D поверхню відгуку спроектованого нечіткого коректора.

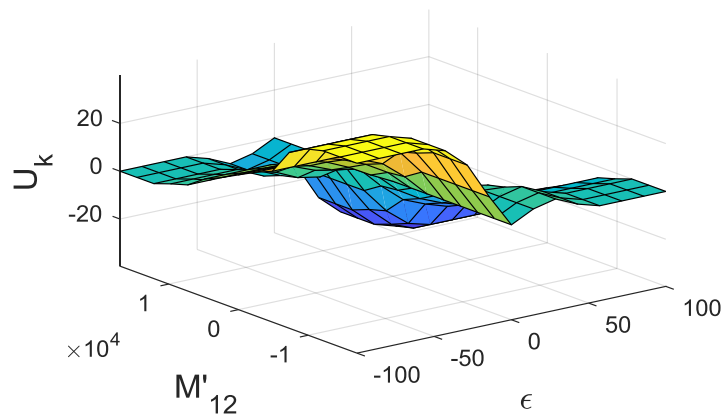


Рис.5. 3-D поверхня відгуку спроектованого нечіткого коректора

Спроекована нечітка модель коректора регулятора швидкості була імплементована у Simulink-модель двомасової електромеханічної системи механізму підймання ківша екскаватора-драглайна ЕШ-15/90А (рис.1). На цій комп'ютерній моделі було проведено низку математичних експериментів з дослідження показників динаміки руху ківша у площині стріли екскаватора-драглайна при використанні нечіткого коректора і, для порівняння, без нього (існуюча електромеханічна система підймання ківша).

На рис.6 зображено отримані на комп'ютерній моделі часові залежності швидкості першої (—) та другої (----) маси (рис.6,а) та пружного моменту (рис.6,б) механізму підймання ківша-драглайна при використанні нечіткого коректора, і, для порівняння, на рис.7 зміна цих же координат в існуючій

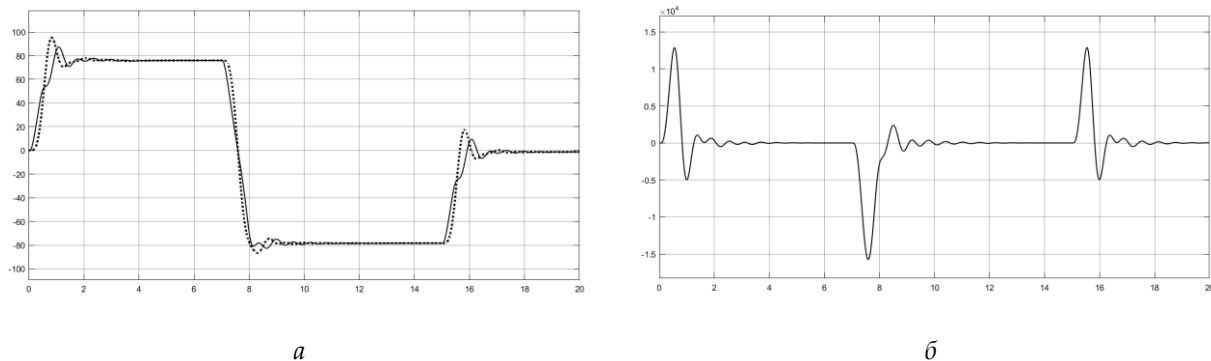


Рис.6. Часові залежності швидкості а) та пружного моменту б) у спроектованій електромеханічній системі механізму підймання ківша екскаватора-драглайна з нечітким коректором

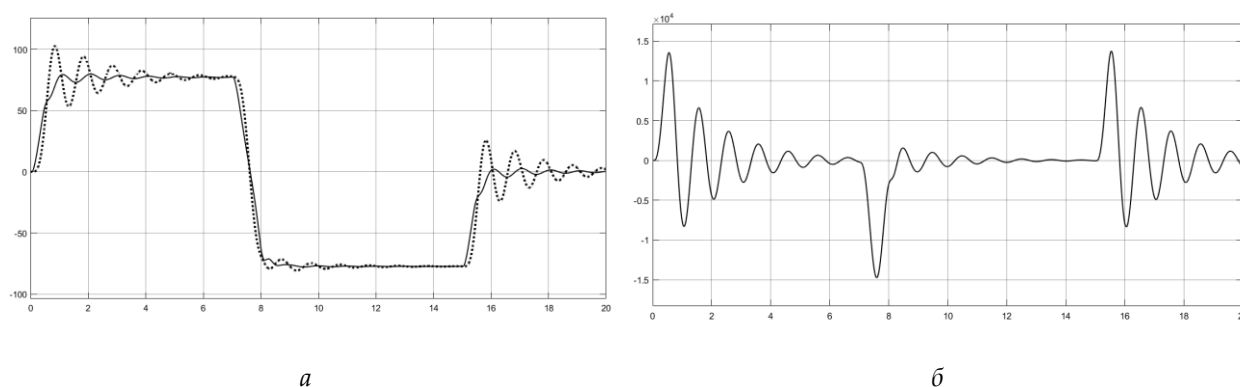


Рис.7. Часові залежності швидкості а) та пружного моменту б) в існуючій електромеханічній системі механізму підймання ківша екскаватора-драглайна

Електромеханічній системі підймання ківша-драглайна, тобто без нечіткого коректора. Порівняльний аналіз отриманих часових залежностей показав зниження амплітуди коливань швидкості підймання ківша-драглайна та інтенсивне їх затухання у запропонованій електромеханічній системі з нечітким коректором регулятора швидкості. При цьому зменшується також і амплітуда та час існування коливань моменту у порівнянні з цими показниками в існуючій електромеханічній системі підймального механізму. Очевидно, що у результаті цього відповідно підвищиться продуктивності екскаватора-драглайна.

Висновки

Комп'ютерне моделювання динамічних процесів зміни основних координат запропонованої електромеханічної систем підймання ківша екскаватора-драглайна з нечітким коректором регулятора швидкості показало комплексне покращення показників динаміки руху ківша-драглайна: знижується амплітуда та час існування коливань як швидкості, так і моменту. Це призводить до зменшення амплітуди динамічних навантажень підймального електропривода, що позитивно впливає на функційну надійність механізму надання руху

ківша та призводить збільшення часу безвідмовної роботи основних елементів механічної частини електроприводу підймання ківша-драглайна (редуктора, стріли, канатів) і, як наслідок, до відповідного підвищення його продуктивності.

Список використаної літератури

1. Weiwei Liu, Xuan Luo, Jingwen Zhang, Jie Kang. Review on control systems and control strategies for excavators.. Journal of Physics Conference Series 2301(1):012023. July 2022. DOI: 10.1088/1742-6596/2301/1/012023. 2. Jun Zhang, Shengjie Jiao, Xiaoming Liao, Penglong Yin, Yulin Wang, et al.. Design of Intelligent Hydraulic Excavator Control System Based on PID Method. Third IFIP TC 12 International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture III (CCTA), Oct 2009, Beijing, China. pp.207-215, <10.1007/978-3-642-12220-0_31>. <hal-01061733>. 3. Ma, W.; Ma, S.; Qiao, W.; Cao, D.; Yin, C. Research on PID Controller of Excavator Electro-Hydraulic System Based on Improved Differential Evolution. Machines **2023**, *11*, 143. <https://doi.org/10.3390/machines11020143>. 4. Hao Feng a.e, Jinye Jiang b, Xiaodan Chang a, Chenbo Yin c, Donghui Caod, Hongfu Yu d, Chunbiao Li a, Jiaxue Xie . Adaptive sliding mode controller based on fuzzy rules for a typical excavator electro-hydraulic position control system. Engineering Applications of Artificial Intelligence. Volume 126, Part C, November 2023, 107008. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107008>. 5. Xin Dai, Chengning Zhang and Siguang Li, "Fuzzy PID control for boom energy recovery on hybrid hydraulic excavator," 2011 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering, Shanghai, 2011, pp. 154-157, doi: 10.1109/CSAE.2011.5952444. 6. В. Волошина, Володимир Мороз, Володимир Цяпа, Л. Ф. Карплюк. Дослідження динаміки приводу підймання екскаватора-драглайна ЕПН-15/90А. Вісник Електроенергетичні та електромеханічні системи". І. Випуск 900. 2018;: С. 3 – 9. 7. Zhang J., et.al. Design of Intelligent Hydraulic Excavator Control System Based on PID Method. , in Computer & Computing Technologies in Agriculture. 2009. <https://www.researchgate.net/publication/220828715>. 8. Lisheng. J., et al., Research on adaptive fuzzy PID controller for energy-saving parameters of hydraulic excavators. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003(06): p. 87-90. 9. Lai. X.L. C. Guan. and X Lin. Fuzzy Logical Control Algorithm Based on Engine on/off State Switch for Hybrid Hydraulic Excavator. Advanced Materials Research. 2011 228-229: p. 447-452. 10. Wang. D., X. Lin. and Y. Zhang. Fuzzy logic control for a parallel hybrid hydraulic excavator using genetic algorithm. Automation in Construction, 2011. 20(5): p. 581-587. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.11.024>. 11. Zhou, H., P.-Y. Zhao, and Y.-L. Chen. Fuzzy logic control for a hydraulic hybrid excavator based on torque prediction and genetic algorithm optimization. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D: Journal of Automobile Engineering. 2017. 232(8): p. 983-994. DOI:10.1177/0954407017724590.

ЦЕЙ ТЕКСТ МАЄ БУТИ НА АНГЛІЙСЬКІЙ МОВІ

Ярослав Паранчук,

Національний університет «Львівська політехніка» кафедра ЕКС

e-mail:

Роман Паранчук,

Національний університет «Львівська політехніка» кафедра ЕКС

e-mail:

Тарас Рудий,

Національний університет «Львівська політехніка» кафедра ЕКС

e-mail:

Володимир Цяпа

Національний університет «Львівська політехніка» кафедра ЕКС

e-mail:

ПОКРАЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ДИНАМІКИ ПРИВОДУ ПІДЙМАННЯ КІВША ЕКСКАВАТОРА-

ДРАГЛАЙНА ЕШ-15/90А НА ОСНОВІ НЕЧІТКОГО КОРЕКТОРА

© Я.Паранчук, Р.Паранчук, Т. Рудий, В.Цяпа, 2025

System engineering solutions for improving the dynamics of the electric drive of the excavator-dragline based on the fuzzy control model have been substantiated. The design of a fuzzy corrector of the speed regulator of the slave control system of the lifting drive of the excavator-dragline type ESH-15/90 has been carried out. A Simulink model of the proposed electromechanical lifting drive system has been compiled and computer efficiency of the proposed solutions has been carried out. Analysis of the obtained results confirmed the comprehensive improvement of the dynamics of the excavator lifting drive.

Keywords – dragline excavator, electric lifting drive, fuzzy corrector, computer modeling, dynamics indicators.

Обґрунтовано системотехнічні рішення для покращення показників динаміки електроприводу екскаватора-драглайна на основі моделі нечіткого керування. Виконано проєктування нечіткого коректора регулятора швидкості системи підлеглого керування приводом підймання екскаватора-драглайна типу ЕШ-15/90А. Складено Simulink-модель запропонованої електромеханічної системи приводу підймання та проведено комп'ютерні дослідження ефективності запропонованих рішень. Аналіз отриманих результатів підтвердив комплексне покращення показників динаміки приводу підймання ківша екскаватора.

Ключові слова – екскаватор-драглайн, електропривод підймання, нечіткий коректор, комп'ютерне моделювання, показники динаміки.