

УДК 519.711.3 : 621.34 : 621.879.2

Я. С. Паранчук

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих
електромеханічних систем,
e-mail: yaroslav.s.paranchuk@lpnu.ua

Р. Я. Паранчук

Львівський національний університет ім. І. Франка,
кафедра радіофізики та комп’ютерних технологій,
e-mail: roman.paranchuk@lnu.edu.ua

Т. В. Рудий

Львівський державний університет внутрішніх справ,
кафедра інформаційних технологій,
e-mail: Tarasrudyy@gmail.com

В. Б. Цяпа

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих
електромеханічних систем,
e-mail: volodymyr.b.tsiapa@lpnu.ua

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

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

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

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 виконано комп’ютерні дослідження ефективності запропонованих рішень. Аналіз отриманих результатів підтвердив комплексне поліпшення 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 на родовищах корисних копалин відкритим способом. На цих розробках широко використовують екскаватори-драглайни. Основними їх складовими є механізми повертання платформи екскаватора, підймання та тяги ківша-драглайна.

Одним із підходів, доцільних для покращення вказаних вище показників екскаваторів-драглайнів, є удосконалення системи автоматичного керування (САК) підймального, тягового та поворотного механізмів. Їх модернізація, передусім, повинна передбачати точне узгодження їхніх функціональних та експлуатаційних можливостей із вимогами відповідних механізмів екскаватора. Це, зокрема, зменшення динамічних навантажень в елементах металоконструкцій їх механізмів та зниження коливань у траєкторіях руху ківша-драглайна у відповідних площинах [1–4].

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

Тому у вказаному аспекті завдання комплексного покращення показників динаміки приводу підймання екскаватора-драглайна у напрямі демпфування коливань у площині стріли та зниження динамічних зусиль (амплітуди моменту) важливе та актуальне.

Аналіз попередніх досліджень та публікацій

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

Завдання підвищення ефективності електроприводу підймання ківша-драглайна розглянуто в межах автоматизованого моніторингу технологічного процесу екскавації [7]. У цій роботі сформульовано основні завдання 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 підвищення ефективності підймального механізму використано стохастичні моделі відмов механічного обладнання і на основі цього отримано рішення для збільшення експлуатаційної надійності та ефективності цього екскаваторного механізму.

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

Ураховуючи наведений вище аналіз відомих підходів для покращення показників динаміки руху ківша-драглайна у площині стріли, ми поставили завдання структурного та параметричного синтезу системи автоматичного керування (САК) механізмом підймання ківша екскаватора-драг-

лайн під час відпрацювання задавальних та збурювальних впливів із урахуванням реальних параметричних збурювальних впливів та пружності канатів.

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

Новизна дослідження – 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 завдання дослідження

Одним із підходів, доцільних для підвищення ефективності та функційної надійності екскаваторів-драглайнів, є удосконалення системи автоматичного керування технологічним процесом екскавації. Одна із основних складових цієї системи автоматичного керування – 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.

Одним із підзавдань для реалізації вказаного вище підходу є оптимізація траєкторії руху ківша у площині стріли, яка потребує придушення його пружних коливань за максимально можливої швидкодії приводу його підймання. Доцільним підходом для цього є використання в структурі системи керування цього приводу принципів нечіткого керування [2–5].

Зважаючи на це, основним завданням цієї 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 окресленого вище завдання 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 пропонують та досліджують ефективність використання системотехнічних рішень із різними моделями нечітких регуляторів для поліпшення показників динаміки руху ківша-драглайна.

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

У [6] розроблено комп'ютерну модель електромеханічної системи механізму підймання ківша драглайна, на якій досліджено доцільність урахування 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 у разі використання в системі автоматичного керування механізму підймання ківша-драглайна магнітних підсилювачів, які характеризуються значною інерційністю та зменшують швидкодію приводу, їхня інерційність позитивно впливає на швидке та плавне вибирання слабину канатів. Завдяки цьому коливання в перехідній характеристиці цього приводу додатково не зростають.

Отримані у цій роботі результати досліджень засвідчили наявність значних коливань координат електроприводу підймального механізму і великих динамічних навантажень.

Одним із доцільних підходів для зменшення амплітуди коливань координат приводу в перехідних процесах є використання різних типів нечітких регуляторів та схем їх увімкнення.

У цьому дослідженні поставлено завдання проєктування та дослідження ефективності використання нечіткого коректора ПІ-регулятора для зменшення коливань швидкості в електромеханічній системі підймання ківша екскаватора-драглайна.

Структурну схему розробленої електромеханічної САК підймання ківша екскаватора-драглайна ЕШ-15/95А із нечітким коректором (НК) ПІ-регулятора швидкості наведено на рис. 1.

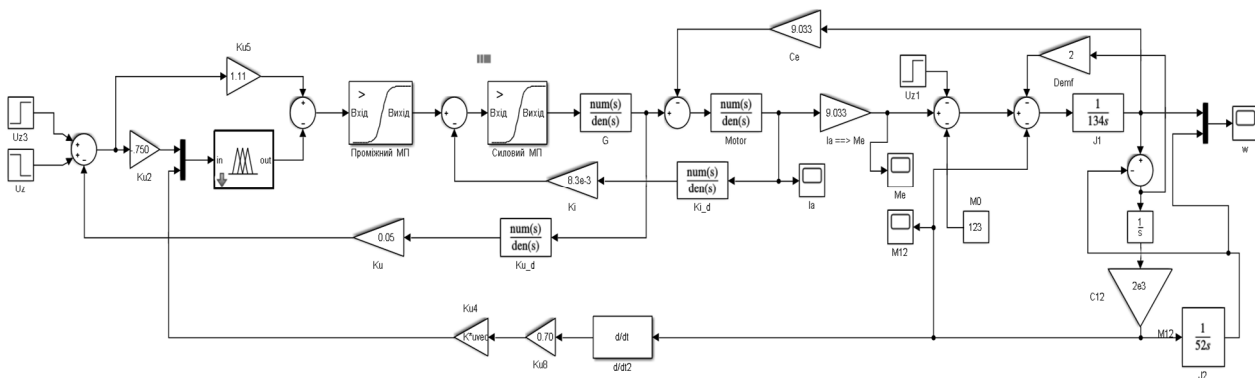


Рис. 1. Структурна схема електромеханічної системи піднімання ківша екскаватора ЕІІ-15/95А

Нечіткий коректор реалізовано на основі системи нечіткого висновку Mamdani, алгоритмічні та параметричні степені свободи якого отримано на основі зіставлення фактичних та бажаних реакцій (траєкторії руху) системи керування рухом ківша у площині стріли за різних задавальних та збурювальних впливів.

Алгоритмічні та параметричні степені свободи нечіткого коректора визначено на основі аналізу фактичних та бажаних траєкторій руху (реакцій САК) у разі зміни керуючих та збурювальних 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 – коригувальний сигнал U_K , який формується на виході нечіткого коректора регулятора швидкості.

На основі зіставлення реальних та бажаних перехідних процесів під час піднімання та опускання драглайна складено базу правил нечітких продукцій НК типу “якщо ... то”, яку подано у табл. 1.

Таблиця 1

База правил нечіткого коректора

		Похибка регулювання e				
		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 (e , 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 здійснено із використанням графічних засобів Fuzzy Logic Toolbox застосунку MatLAB.

Для описання лінгвістичних змінних використано 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 (коригувального сигналу U_K) лінгвістичних змінних нечіткого коректора показано на рис. 2, рис. 3 та рис. 4 відповідно.

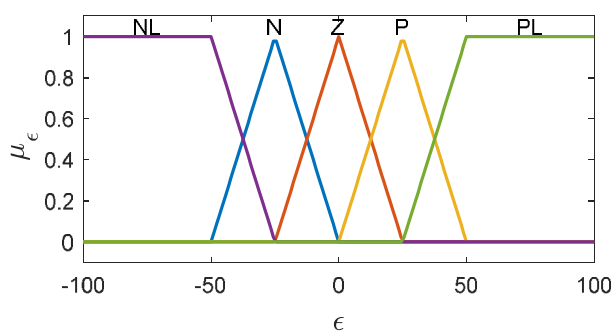


Рис. 2. Функції приналежності змінної ϵ

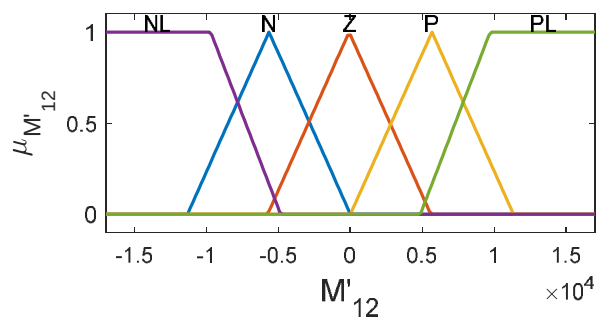


Рис. 3. Функції приналежності змінної M'_{12}

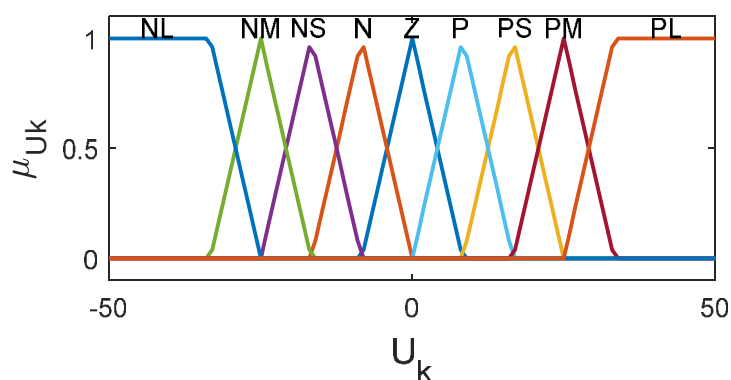


Рис. 4. Функції приналежності корегуючого сигналу U_k

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

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

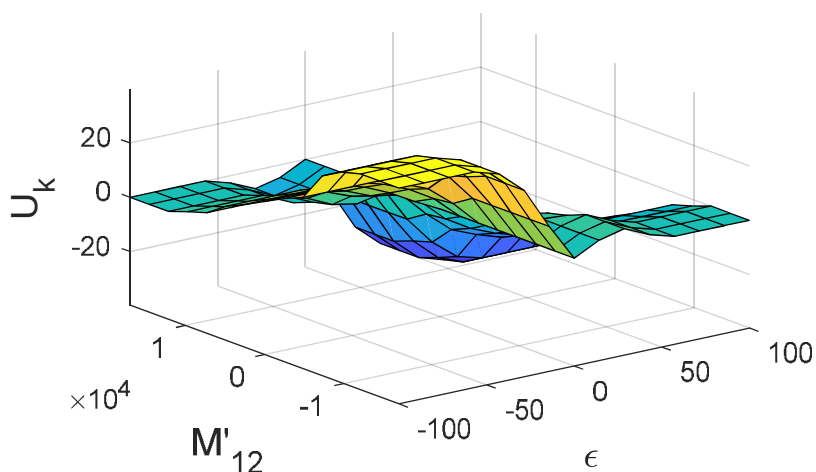


Рис. 5. 3D-поверхня відгуку спроектованого нечіткого коректора

Спроектовану нечітку модель коректора регулятора швидкості імплементовано у Simulink-модель двомасової електромеханічної системи механізму підймання ківша екскаватора-драглайна ЕШ-15/90А (рис. 1). На цій комп'ютерній моделі виконано низку математичних експериментів із

дослідження показників динаміки руху ківша у площині стріли екскаватора-драглайна із використанням нечіткого коректора і, для порівняння, без нього (наявна електромеханічна система підймання ківша).

На рис. 6 зображено отримані на комп'ютерній моделі часові залежності швидкості першої (—) та другої (----) мас (рис. 6, а) та пружного моменту (рис. 6, б) механізму підймання ківша-драглайна із використанням нечіткого коректора, і, для порівняння, на рис. 7 – зміну цих самих координат у наявній електромеханічній системі підймання ківша-драглайна, тобто без нечіткого коректора.

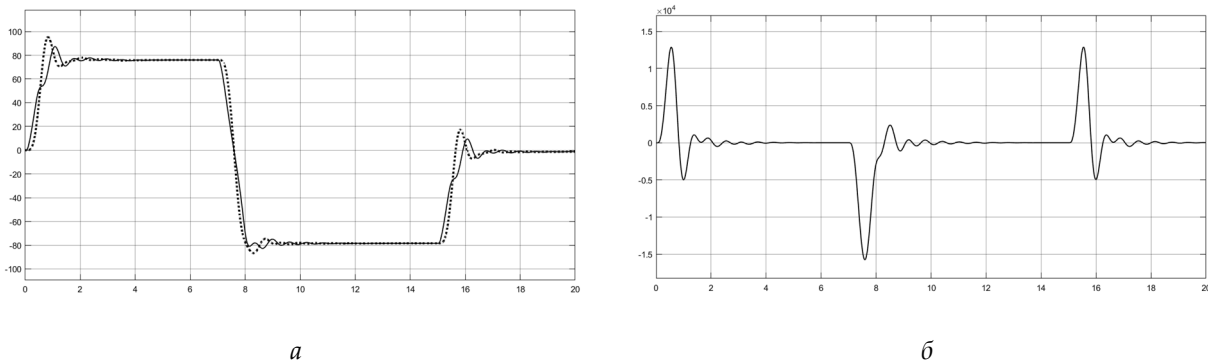


Рис. 6. Часові залежності швидкості (а) та пружного моменту (б) у спроектованій електромеханічній системі механізму підймання ківша екскаватора-драглайна із нечітким коректором

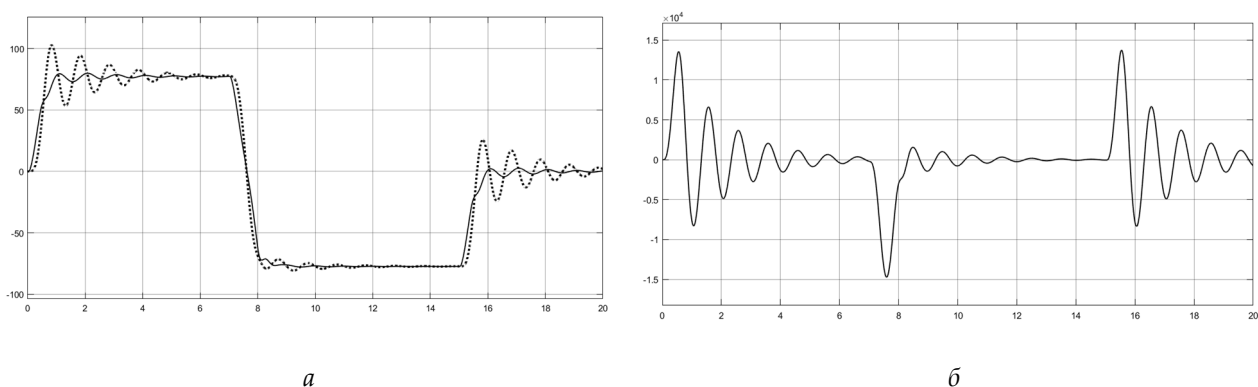


Рис. 7. Часові залежності швидкості (а) та пружного моменту (б) в наявній електромеханічній системі механізму підймання ківша екскаватора-драглайна

Порівняльний аналіз отриманих часових залежностей показав зниження амплітуди коливань швидкості підймання ківша-драглайна та інтенсивне їх загасання у запропонованій електромеханічній системі із нечітким коректором регулятора швидкості. Зменшується також амплітуда та час існування коливань моменту порівняно з цими показниками в наявній електромеханічній системі підймального механізму. Очевидно, що у результаті цього відповідно підвищиться продуктивність екскаватора-драглайна.

Висновки

Комп'ютерне моделювання динамічних процесів зміни основних координат запропонованої електромеханічної системи підймання ківша екскаватора-драглайна із нечітким коректором регулятора швидкості показало комплексне покращення показників динаміки руху ківша-драг-

лайн: знижується амплітуда та час існування коливань як швидкості, так і моменту. Це забезпечує зменшення амплітуди динамічних навантажень підйимального електроприводу, що позитивно впливає на функційну надійність механізму надання руху ківшов та зумовлює збільшення тривалості безвідмовної роботи основних елементів механічної частини електроприводу підймання ківша-драглайна (редуктора, стріли, канатів) і, як наслідок, відповідне підвищення його продуктивності.

Список 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*, Vol. 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 ЕШ-15/90А. *Електроенергетичні та електромеханічні системи*, 2018, I, Вип. 900, 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): 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: 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): 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): 983–994. DOI: 10.1177/0954407017724590.

Y. S. Paranchuk

Lviv Polytechnic National University, Department of
Electromechatronics and Computerized Electromechanical Systems,
e-mail: yaroslav.s.paranchuk@lpnu.ua

R. Ya. Paranchuk

Ivan Franko National University of Lviv,
Department Radiophysics and Computer Technologies,
e-mail: roman.paranchuk@lnu.edu.ua

T. V. Rudyy

Lviv State University of Internal Affairs,
Department of Information Technology,
e-mail: Tarasrudyy@gmail.com

V. B. Tsiapa

Lviv Polytechnic National University, Department of
Electromechatronics and Computerized Electromechanical Systems,
e-mail: volodymyr.b.tsiapa@lpnu.ua

IMPROVEMENT OF THE ESH-15/90A DRAGLINE EXCAVATOR BUCKET LIFTING DRIVE DYNAMICS INDICATORS BASED ON A FUZZY CORRECTOR

© Paranchuk Y. S., Paranchuk R. Ya., Rudyy T. V., Tsiapa V. B., 2025

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

Keywords: dragline excavator, electric lifting drive, fuzzy controller, computer simulation, dynamics indicators.