

ЗАЛАТА А. С., аспірант (Український державний університет залізничного транспорту)

Розроблення структурної схеми та бази правил нейро-нечіткої системи керування дизель-генераторною установкою



Анотація. У статті подано комп'ютерну модель інтелектуальної системи керування дизель-генераторною установкою, реалізовану в середовищі MATLAB/Simulink. Описано формування структурної схеми, що поєднує фізичні моделі силових підсистем і модулі нейро-нечіткого керування. Особливу увагу приділено побудові бази правил, створеної на основі кластеризації Fuzzy C-Means і подальшого нейронного навчання, що забезпечує адаптацію системи до зміни маси поїзда, профілю колії та довжини ділянки руху. Продemonстровано аналітичні залежності керувального коефіцієнта для різних експлуатаційних умов і показано здатність моделі прогнозувати оптимальні керувальні дії в режимі реального часу. Результати підтверджують ефективність поєднання нечіткої логіки та машинного навчання в системах керування дизель-генераторними установками.

Ключові слова: дизель-генераторна установка, інтелектуальне керування, нейро-нечіткі системи, машинне навчання, автономний рухомий склад.

Постановка проблеми.

У сучасних умовах експлуатації дизель-генераторних установок необхідно підвищити енергоефективність, екологічну стабільність і адаптивність режимів роботи силових агрегатів за значної варіативності зовнішніх умов. Традиційні системи керування не забезпечують достатнього рівня адаптації до зміни профілю колії, маси поїзда і довжини ділянки руху, що призводить до підвищених витрат пального, нестабільності параметрів і погіршення динамічних характеристик. У зв'язку з цим виникає потреба у створенні інтелектуальної системи керування, здатної інтегрувати методи штучного інтелекту і забезпечувати оптимізацію керуючих впливів у режимі реального часу. Реалізація такої системи потребує формування комп'ютерної моделі, що відображає фізичні процеси роботи дизель-генераторної установки та містить адаптивні модулі нейро-нечіткого керування. Саме тому актуальним завданням є побудова моделі інтелектуальної системи керування в середовищі Simulink із подальшою її перевіркою.

Аналіз останніх досліджень.

У науковій літературі питання підвищення ефективності керування дизель-генераторними установками розглядають у контексті вдосконалення алгоритмів регулювання подачі пального, збудження генератора і адаптивного налаштування режимів роботи [1 – 3].

Значну увагу приділяють застосуванню математичних моделей, що описують динаміку дизельного двигуна, моделі електричних машин змінного струму і теплових процесів системи охолодження [4, 5]. У дослідженнях також простежують тенденцію щодо активного використання технологій штучного інтелекту, зокрема нейронних мереж і нечітких систем, які допомагають реалізувати нелінійні закони регулювання та забезпечувати адаптивність до змінних умов навантаження [6 – 8].

Методологія нейро-нечітких систем, наведена в роботах, що стосуються ANFIS-архітектури, визначає можливості комбінування експертних правил із механізмами машинного навчання для підвищення точності моделі [9]. У низці публікацій розглянуто використання еволюційних алгоритмів, таких як оптимізація рою частинок, для налаштування параметрів нечітких множин і вагових коефіцієнтів [10].

Незважаючи на наявні дослідження, проблема інтеграції фізичних моделей дизель-генераторної установки з інтелектуальними регуляторами в єдиному середовищі моделювання залишається недостатньо розкритою, особливо щодо побудови повної структурної схеми та відпрацювання взаємодії між модулями керування в Simulink [11]. Це формує підґрунтя для подальшого розроблення комплексної моделі, у межах якої реалізовано адаптивні алгоритми прогнозування і регулювання робочих параметрів.

Виділення невирішених питань. Незважаючи на значний обсяг досліджень, спрямованих на підвищення ефективності керування дизель-генераторними установками, низка аспектів залишається невирішеною. Насамперед це

стосується створення єдиної інтегрованої моделі, у якій фізичні процеси та інтелектуальні регулятори взаємодіють у режимі реального часу та забезпечують динамічну адаптацію до змін зовнішніх умов.

В опублікованих роботах часто розглядають локальні задачі, такі як оптимізація певного вузла або формування окремого регулятора, проте відсутні комплексні моделі, що охоплюють повний цикл роботи дизель-генераторної установки. Недостатньо розробленими залишаються алгоритми узгодження різних частот дискретизації в багаторівневих системах керування, а також механізми інтеграції модулів оптимізації, зокрема модифікованого алгоритму рою частинок, з нейро-нечіткими регуляторами.

Також не повністю вирішено питання побудови універсальної бази правил, яка б забезпечувала коректну роботу системи для широкого діапазону експлуатаційних параметрів, таких як профіль колії, маса поїзда і довжина маршруту. У наявних дослідженнях бракує моделей, здатних забезпечити безперервний перехід від дискретних значень бази даних до аналітичних залежностей, що застосовувані для фазифікації та дефазифікації в нечітких системах.

Усе це потребує створення узагальненої комп'ютерної моделі інтелектуальної системи керування, здатної поєднати фізичну динаміку дизель-генераторної установки, інтелектуальні модулі прогнозування та оптимізаційні механізми в єдиному середовищі Simulink.

Постановка задачі дослідження.

Метою статті є розроблення, реалізація та валідація комп'ютерної моделі інтелектуальної системи керування дизель-генераторною установкою в середовищі MATLAB/Simulink із використанням нейро-нечітких методів та оптимізаційних алгоритмів.

У межах сформульованої мети необхідно відтворити фізичну архітектуру дизель-генераторної установки з урахуванням динамічних, теплових та електромагнітних процесів, створити інтегровані підсистеми

інтелектуального керування, сформувати універсальну базу правил і забезпечити її використання для адаптивного регулювання вхідних параметрів.

Завдання полягає також у побудові структурної схеми, що дає змогу моделювати взаємодію між сенсорними вузлами, нейро-нечіткими регуляторами, оптимізаційними модулями та виконавчими механізмами. Особливу увагу приділено синхронізації процесів у межах єдиної частоти дискретизації та забезпеченню можливості віртуальних випробувань, які дають змогу оцінити ефективність запропонованих алгоритмів керування в широкому діапазоні експлуатаційних умов. Реалізація зазначених завдань спрямована на створення універсальної та адаптивної системи, здатної підвищувати енергоефективність, стабільність і екологічні показники роботи дизель-генераторної установки.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Для побудови моделі інтелектуальної системи керування дизель-генераторною установкою в середовищі Simulink було створено структурну основу, що відтворює реальну фізичну архітектуру силового комплексу. У межах базового рівня були реалізовані моделі дизельного двигуна, системи наддуву, охолодження, підсистеми впорскування палива, генератора змінного струму та навантажувального модуля. Для забезпечення адекватного відображення процесів кожний елемент формували на основі фізично коректних математичних залежностей, що описують нелінійну динаміку відповідних підсистем. Модель дизельного двигуна охопила зміну тиску в камері згорання залежно від циклової подачі пального та значення наддуву, інерційні властивості колінчастого вала, теплові втрати і часову динаміку вихлопних газів. Модель електрогенератора відтворювала електромагнітні процеси у статорі та роторі, зміну вихідної напруги за дії струму збудження та навантаження, а також теплові характеристики, що визначають зміну параметрів у динаміці.

На цьому етапі сформовано структурну схему системи керування (рис. 1), у межах якої передбачено включення нейро-нечіткого модуля, датчиків стану та підсистеми зворотних зв'язків.

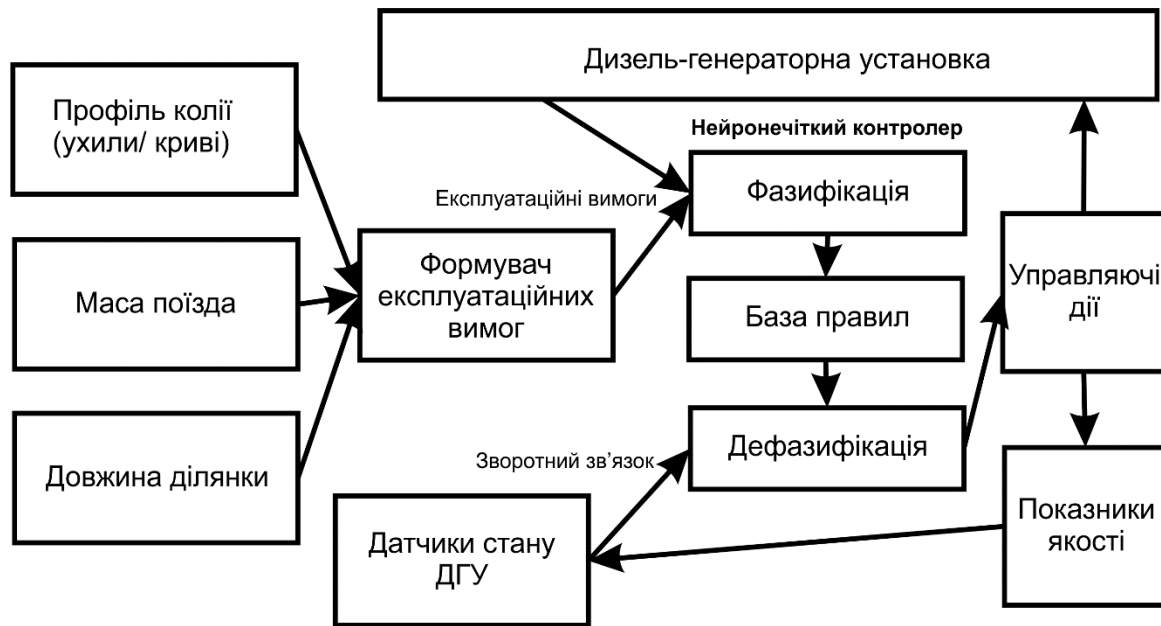


Рис. 1. Структурна схема нейро-нечіткої системи керування ДГУ з урахуванням вхідних умов

На рисунку показано узагальнену структурну схему інтелектуальної нейро-нечіткої системи керування дизель-генераторною установкою, яка забезпечує адаптивне формування керувальних дій залежно від зовнішніх і внутрішніх параметрів роботи енергетичного комплексу. Схема демонструє логічні взаємозв'язки між блоками, що беруть участь у процесі ухвалення рішень, і відображає взаємодію між експлуатаційними умовами руху, вимірювальними підсистемами та нейро-нечітким контролером, відповідальним за обчислення оптимальних сигналів керування.

Зліва відображено три основні зовнішні параметри, які визначають умови експлуатації дизель-генераторної установки. До них належать профіль колії, що включає ухили та криві; маса поїзда, яка впливає на тягове навантаження; довжина ділянки руху, що визначає тривалість дії конкретного режиму. Ці параметри є вхідними змінними верхнього рівня та визначають характер режиму роботи силового агрегату. Вони надходять до формувача експлуатаційних вимог, який виконує перетворення зовнішніх техніко-експлуатаційних умов у стандартизовану форму, придатну для дальшої обробки нейро-нечітким контролером.

Формувач експлуатаційних вимог забезпечує створення множини параметрів, які відображають необхідний режим роботи дизель-генераторної установки. До таких параметрів може належати бажана зміна потужності, допустимі межі навантаження, вимоги щодо стабільності частоти обертання вала та інші характеристики, що впливають на якість функціонування дизель-генераторної установки. Сформовані експлуатаційні вимоги

надходять до нейро-нечіткого контролера, що складається з трьох базових елементів: фазифікації, бази правил і дефазифікації.

Процес фазифікації передбачає перетворення числових експлуатаційних вимог у нечіткі змінні на основі функцій належності. У межах цього етапу відбувається подання реальних значень у формі нечітких термів, що забезпечує можливість подальшої інтерпретації інформації за допомогою логічних правил. База правил виконує логічні операції відповідно до закладеної в систему бази знань, яка сформована за допомогою кластеризації даних і корегована в процесі навчання нейронної складової. Кожне правило описує залежність між умовами руху та бажаною керувальною дією, що забезпечує можливість адаптивного регулювання в умовах невизначеності.

На етапі дефазифікації нечіткі результати логічного висновку перетворені на конкретні числові керувальні дії для відповідних виконавчих механізмів дизель-генераторної установки. До таких дій можуть належати корекція подачі пального, зміна струму збудження генератора, регулювання частоти обертання та інші впливи, що безпосередньо визначають стан енергетичного агрегату.

У нижній частині рисунка наведено блок датчиків стану дизель-генераторної установки, які забезпечують зворотний зв'язок. Вони вимірюють основні параметри, такі як температура, тиск, частота обертання, електричні навантаження та інші показники, що формують оцінку якості керування. Показники якості надходять до нейро-нечіткого контролера, забезпечуючи можливість корекції дій, а також до формувача експлуатаційних вимог, що дає змогу адаптувати систему для змінних умов руху.

Подана структурна схема демонструє повний цикл взаємодії між зовнішніми експлуатаційними умовами, внутрішнім станом дизель-генераторної установки та нейро-нечітким контролером, який забезпечує адаптивне формування керувальних сигналів для підтримання оптимального режиму роботи енергетичного комплексу.

Створена структура забезпечує базу для наступної інтеграції інтелектуальних компонентів і формування механізмів адаптивного керування дизель-генераторною установкою у змінних експлуатаційних умовах.

Після формування фізичної моделі дизель-генераторної установки наступним етапом стало інтегрування до неї інтелектуальних модулів керування. Для реалізації нейро-нечітких регуляторів були використані засоби бібліотек Neural Network Toolbox і Fuzzy Logic Toolbox, які забезпечують можливість поєднання механізмів машинного навчання з експертними правилами. Кожен регулятор реалізований як автономний підсистемний блок, що містить рівні фазифікації, нормалізації, бази знань і дефазифікації. Механізм побудови регуляторів ґрунтований на принципах архітектури ANFIS, яка забезпечує формування гібридної системи, здатної адаптуватися до змін зовнішніх параметрів і корегувати керувальні дії відповідно до поточного стану установки.

На основі побудованої нейро-нечіткої системи було виконано формування та подальший аналіз бази правил (рис. 2), яка відображає залежність між масою поїзда, профілем колії та довжиною ділянки руху. На рисунку подано узагальнене зображення цієї бази правил для трьох характерних довжин ділянок, а саме 100, 200 і 300 км. Кожна

матриця демонструє зміну відносного приросту керувального коефіцієнта ΔP у відсотковому вираженні залежно від поєднання факторів, що визначають експлуатаційні умови роботи дизель-генераторної установки. У межах такого зображення база правил набуває інтерпретованої форми, що дає змогу оцінити характер впливу окремих параметрів на формування оптимальних керувальних дій.

Для ділянки довжиною 100 км спостерігають чітку тенденцію зростання керувального коефіцієнта на підйомах і відповідного його зменшення під час руху на спусках. Так, для поїзда масою 1000 т зміна ΔP становить від -6 % на спуску до +6 % на підйомі, що свідчить про потребу збільшення потужності в умовах зростаючого опору та, навпаки, її зменшення з рухом ухилом. Для маси 3000 т характер змін збережений, однак амплітуда варіювання зростає, що обумовлено збільшенням впливу маси на тягове навантаження. Отримані залежності відображають здатність моделі коректно враховувати співвідношення між масою та профілем колії в межах коротких ділянок руху.

Для довжини ділянки 200 км структура бази правил зберігає загальні закономірності, однак зміни показників ΔP стають більш вираженими. Це свідчить про накопичувальний ефект профілю колії зі збільшенням довжини маршруту, коли регулятор враховує не лише миттєві параметри, а й їхній інтегральний вплив на навантаження дизель-генераторної установки. Так, для маси 3000 т із рухом на підйомі приріст становить до +11 %, а на спуску значення досягає -11 %, що відображає більш суворі вимоги щодо компенсації зміни тягового режиму.

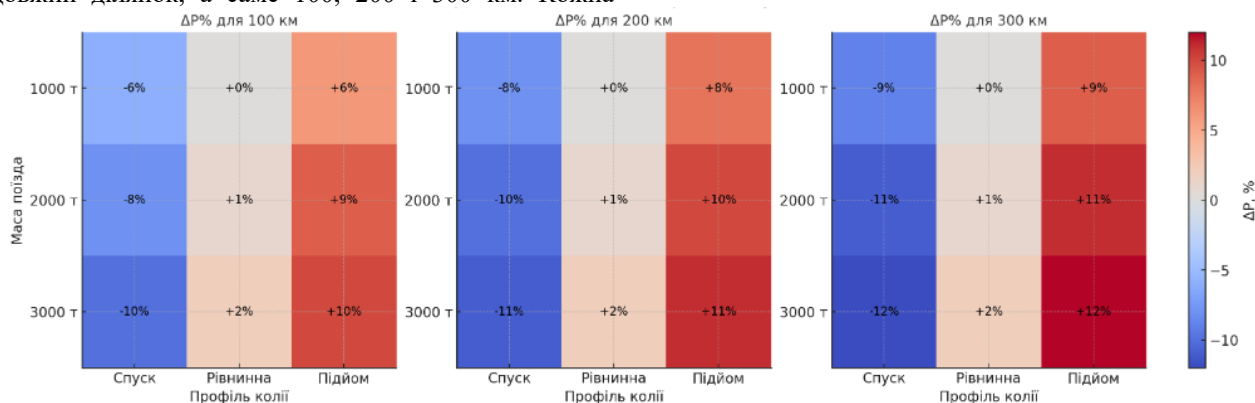


Рис. 2. База правил корекції потужності ДГУ

Для ділянки 300 км відмічено подальше посилення асиметрії між режимами підйому та спуску. Значення ΔP для максимальної маси поїзда досягають +12 % і -12 % відповідно, що пов'язано зі збільшенням енергетичних втрат за тривалого руху у складних умовах профілю колії. Така поведінка свідчить про те, що нейро-нечітка система не лише адаптує керування під параметри маси поїзда та

профілю колії, а й враховує їхню інтегральну дію на всій довжині ділянок. Усі три матриці демонструють структурну узгодженість і логічну завершеність бази правил, що підтверджує коректність її побудови за допомогою FCM-кластеризації та подальшого нейронного навчання.

Подана база правил є основою для формування адаптивних керувальних дій, оскільки вона забезпечує чітке відображення залежностей між

зовнішніми факторами та оптимальними значеннями керувального впливу. Наявність узгоджених закономірностей для різних довжин ділянок свідчить про здатність моделі забезпечувати стабільність і передбачуваність роботи дизель-генераторної установки в разі впливу широкого спектра експлуатаційних умов. Отже, результати аналізу підтверджують валідність побудованої **нейро-нечіткої** системи та її здатність до адекватного узагальнення вхідних даних, що є необхідною умовою для практичного застосування в адаптивних системах керування тяговими енергетичними установками.

На етапі навчання формували набір даних, що включав вхідні параметри, такі як навантаження на колінчастому валу, тиск наддуву, температура охолоджувальної рідини, і відповідні керувальні впливи. Вхідні дані підлягали нормалізації для уникнення дисбалансу масштабів сигналів і підвищення ефективності навчання. На основі методів кластеризації, зокрема алгоритму Fuzzy C-Means, визначали початкові функції належності та кількість правил, після чого виконано процес навчання з використанням комбінованих методів зворотного поширення помилки і градієнтного спуску.

Отже, забезпечено створення адаптивного регулятора, який формує оптимальні керувальні дії, виходячи з даних датчиків і визначених експлуатаційних вимог.

Висновки.

Розроблена в середовищі MATLAB/Simulink модель інтелектуальної системи керування дизель-генераторною установкою забезпечує комплексне відтворення фізичних процесів і алгоритмів адаптивного регулювання. Створена структура охоплює моделі дизельного двигуна, системи наддуву, електрогенератора, теплових підсистем, а також інтелектуальних модулів, реалізованих на основі нейро-нечіткої логіки та оптимізаційних методів. Інтеграція цих компонентів у єдине середовище дала змогу сформувати систему, здатну корегувати роботу силового агрегату відповідно до змін експлуатаційних умов, що проявляється в підвищенні енергоефективності, стабільності динамічних показників і зменшенні витрат пального.

Запропонована модель демонструє ефективність інтелектуальних методів у сферах керування дизель-генераторними установками і тяговими енергетичними комплексами загалом. Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні моделі за рахунок урахування додаткових фізичних процесів, збільшенні точності моделей згоряння та електромагнітної динаміки, інтеграції більш складних нейронних архітектур, зокрема глибинних моделей або рекурентних мереж, а також у застосуванні алгоритмів багатокритеріальної оптимізації для досягнення балансу між енергоефективністю, екологічністю і динамічною стабільністю. Подальше вдосконалення системи може

включати створення реального стенда апаратно-програмної симуляції та розроблення алгоритмів, здатних функціонувати в режимі оновлення параметрів на основі потокових даних, отриманих під час експлуатації.

Список використаних джерел

1. Fu J., Gu S., Wu L., Wang N., Lin L., Chen Z. Research on Optimization of Diesel Engine Speed Control Based on UKF-Filtered Data and PSO Fuzzy PID Control. *Processes*. 2025. Vol. 13, No. 3. Article 777.
2. Qin H., Wang L., Wang S., Ruan W., Jiang F. A Fuzzy Adaptive PID Coordination Control Strategy Based on Particle Swarm Optimization for Auxiliary Power Unit. *Energies*. 2024. Vol. 17, No. 21. Article 5311.
3. Gharib H., Gkasperis A., Svarnas P. Implementation and Possibilities of Fuzzy Logic for Optimal Operation and Early Fault Detection in Marine Diesel Engines. *Machines*. 2024. Vol. 12, No. 6. Article 425.
4. Saadat M., Feszty D., Liem R. Energy-efficient operation of diesel–electric locomotives with fuzzy look-ahead control. *Control Engineering Practice*. 2016. Vol. 54. P. 129–142.
5. Jafari Kaleybar H., Brenna M., Li H., Zaninelli D. Fuel Cell Hybrid Locomotive with Modified Fuzzy Logic Based Energy Management System. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, No. 14. Article 8336.
6. Horobchenko O., Hryniv A., Zaitsev S. Creation of a model of automated traction control of shunting locomotive using fuzzy logic and expert evaluation methods. *Transport Systems and Technologies*. 2024. No. 1 (22). P. 37–48.
7. Goolak S., Shykora I., et al. Analysis of the Efficiency of Traction Drive Control Systems of Electric Rolling Stock Using MATLAB/Simulink. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2647. Article 060018.
8. Jurado F., Carpio J. Neuro-fuzzy control for autonomous wind–diesel systems. *Renewable Energy*. 2002. Vol. 27, No. 3. P. 413–422.
9. Jang J.-S. R., Sun C.-T., Mizutani E. Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1997. 614 p.
10. Bose B. K. Neural and Fuzzy Logic Control of Drives and Power Systems. Oxford: Butterworth–Heinemann, 1997. 711 p.
11. MathWorks. Neuro-Adaptive Learning and ANFIS – Fuzzy Logic Toolbox Documentation. MATLAB & Simulink, 2023. URL: Neuro-adaptive learning and ANFIS (дата звернення: 27.10.2025).

Development of the structural scheme and rule base of a neuro-fuzzy control system for a diesel-unit

Abstract. *This article presents the development and validation of an intelligent control model for a diesel-generator unit implemented in MATLAB/Simulink, integrating physical dynamics with adaptive neuro-fuzzy regulation. The study addresses the limitations of traditional control systems that fail to ensure sufficient adaptability under varying operational conditions such as track profile, train mass and section length. A comprehensive mathematical representation of the diesel engine, turbocharging, cooling, fuel injection and synchronous generator subsystems is constructed to reproduce nonlinear thermodynamic and electromechanical processes. On this foundation, a hybrid neuro-fuzzy controller based on ANFIS principles is introduced, combining data-driven learning with an interpretable rule base formed through Fuzzy C-Means clustering and refined via a hybrid backpropagation and gradient-descent training procedure.*

The paper analyses the resulting rule base, which captures the dependence of the corrective power coefficient on mass, gradient and route length, demonstrating stable and logically consistent behavior across 100, 200 and 300 km sections. The model ensures adaptive modification of fuel supply, excitation current and rotational speed based on sensor feedback and external requirements. Simulation results confirm the capability of the developed system to maintain energy efficiency, stabilise dynamic parameters and decrease fuel consumption under various traction scenarios. The model provides a unified computational environment for studying real-time interaction between physical processes and intelligent regulators, offering a basis for further extensions including more detailed combustion and electromagnetic models, deep neural architectures and multi-criteria optimisation frameworks. The proposed approach can serve as a foundation for advanced adaptive control of traction power systems and real-time hardware-in-the-loop implementations aimed at improving performance, ecological sustainability and operating stability of diesel-generator units.

Keywords: *diesel-generator unit, intelligent control, neuro-fuzzy systems, machine learning, autonomous rolling stock.*

Залата Андрій Сергійович, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0003-0557-795X. Тел.: +38 (097) 710-69-81. E-mail: zalata.ac@gmail.com.

Zalata Andrii, postgraduate student, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0003-0557-795X. Tel.: +38 (097) 710-69-81. E-mail: zalata.ac@gmail.com.