

Український державний університет залізничного транспорту
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Залата Андрій Сергійович

УДК 629.4.02.001.5

ДИСЕРТАЦІЯ

**НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТА
РЕЖИМІВ РОБОТИ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНИХ УСТАНОВОК
АВТОНОМНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ**

Спеціальність 273 – Залізничний транспорт
Галузь знань 27 – Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



А.С. Залата

Науковий керівник
Пузир Володимир Григорович
доктор технічних наук, професор

Харків 2025

АНОТАЦІЯ

Залата А.С. Новітні технології вдосконалення конструкції та режимів роботи дизель-генераторних установок автономного рухомого складу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 273 – Залізничний транспорт, галузь знань 27 – Транспорт. – Український державний університет залізничного транспорту, Україна, Харків, 2025.

У дисертаційній роботі вирішується актуальне науково-технічне завдання підвищення енергоефективності, надійності та екологічності автономного рухомого складу шляхом розробки новітніх конструктивних рішень та інтелектуальних систем керування дизель-генераторними установками (ДГУ). Запропоновано комплекс теоретичних, експериментальних та комп'ютерних методів, що дозволяють оптимізувати процеси енергоперетворення в системі «двигун – генератор» і забезпечити зменшення витрат палива, скорочення рівня шкідливих викидів і підвищення ресурсу ДГУ.

Об'єкт дослідження – процеси енергоперетворення, конструктивні рішення та режими роботи ДГУ, а також методи їх оптимізації.

Предмет дослідження – дизель-генераторні установки автономного рухомого складу.

Мета роботи – розробка теоретичних основ і практичних рекомендацій щодо вдосконалення конструкції й режимів роботи ДГУ для підвищення їхньої ефективності, надійності та екологічної безпеки.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження. Зазначено, що значна частка тепловозів та іншого автономного рухомого складу працює на ділянках без електрифікації, у важкодоступних районах або на маневрових роботах. Відповідно ефективність перевезень залежить від технічного рівня дизель-генераторних установок. Основними проблемами їх

експлуатації є висока витрата палива, значний рівень викидів та обмежена надійність у режимах змінного навантаження. Підкреслено, що в умовах воєнного стану та післявоєнного відновлення транспортної інфраструктури України питання енергоефективності та автономності рухомого складу набувають особливої ваги.

Перший розділ присвячено аналізу сучасного стану та перспектив розвитку ДГУ автономного рухомого складу. Проведено огляд типових конструкцій, починаючи від класичних дизель-генераторів до сучасних гібридних і цифрових систем. Розглянуто еволюцію технологій керування: від механічних систем подачі палива до електронних платформ (Common Rail, ECU, CAN-шина). Виявлено тенденції підвищення питомої потужності, зниження витрат палива, впровадження систем очищення відпрацьованих газів (EGR, DPF, SCR) та рекуперації енергії. Показано, що сучасні ДГУ проектуються з урахуванням екологічних вимог і принципів сталого розвитку, а подальший прогрес пов'язаний з використанням цифрових двійників, інтелектуальних систем моніторингу та оптимізації теплових процесів.

Другий розділ присвячений теоретичним основам та науковому обґрунтуванню вдосконалення конструкцій і режимів роботи дизель-генераторних установок.

Виконано аналіз режимів роботи ДГУ в умовах змінного навантаження, визначено їхні обмеження та характерні енергетичні показники. Розроблено математичну модель роботи системи «двигун – генератор», яка описує теплові, механічні та електричні процеси в установці. Модель дозволяє проводити багатокритеріальну оптимізацію з урахуванням економічності, екологічності та довговічності.

Запропоновано наукові принципи удосконалення конструкційних схем, що передбачають використання новітніх матеріалів і технологій поверхневої обробки для підвищення ресурсу деталей, оптимізацію паливних систем та режимів упорскування палива, вдосконалення систем охолодження, змащення

й очищення відпрацьованих газів, інтеграцію систем цифрового управління і моніторингу технічного стану.

Виконано теоретичне моделювання впливу конструктивних і режимних параметрів на енергетичні характеристики. Встановлено, що застосування оптимальних схем наддуву, інтеркулінгу та систем постобробки газів дозволяє знизити питомі витрати палива на 8–12 % і скоротити викиди шкідливих речовин у 1,5–2 рази.

Третій розділ дисертації присвячено експериментальним дослідженням та аналізу ефективності вдосконаленої дизель-генераторної установки автономного рухомого складу. У роботі сформульовано завдання та обґрунтовано методику проведення випробувань як на спеціалізованих стендах, так і на натурних зразках. Основна увага приділялася визначенню паливної економічності у різних режимах навантаження, оцінці рівня шкідливих викидів, а також дослідженню надійності й стабільності роботи агрегатів.

Отримані результати експериментів підтвердили ефективність теоретично розроблених удосконалень. Зокрема, було встановлено, що застосування нових рішень дозволяє зменшити питомі витрати палива у середньому на 10–15 відсотків, забезпечує суттєве скорочення викидів оксидів азоту та оксиду вуглецю завдяки стабілізації процесів згоряння, а також підвищує ресурс роботи установок за рахунок оптимізації теплових і механічних навантажень. Важливою є також відповідність нових конструктивних і режимних рішень сучасним міжнародним екологічним стандартам.

Порівняння теоретичних і експериментальних результатів підтвердило адекватність розроблених математичних моделей та їхню придатність для прогнозування поведінки дизель-генераторних установок у реальних умовах експлуатації.

Четвертий розділ дисертації присвячено комп'ютерному моделюванню та оптимізації роботи дизель-генераторних установок. У межах дослідження

створено базову імітаційну модель у середовищі Matlab/Simulink, яка відображає роботу системи «двигун – генератор» з урахуванням теплових, механічних і електричних процесів. На основі цієї моделі проведено серію розрахунків, що дали змогу дослідити вплив ключових параметрів на енергетичні характеристики та оцінити їхню чутливість до зміни режимів навантаження.

Особливу увагу приділено реалізації багатокритеріальної оптимізації, де одночасно враховувалися паливна економічність, надійність і екологічність. Для цього застосовано методи динамічного програмування, що дозволило сформувати алгоритми вибору оптимальних режимів роботи дизель-генераторної установки у різних експлуатаційних умовах. Моделювання показало, що використання таких алгоритмів забезпечує суттєве скорочення витрат палива без погіршення стабільності функціонування агрегатів і водночас знижує рівень шкідливих викидів.

Результати оптимізаційних досліджень підтвердили, що впровадження запропонованих підходів дозволяє створити універсальні стратегії керування, які адаптуються до змінних режимів навантаження та сприяють підвищенню ресурсу роботи дизель-генераторних установок.

П'ятий розділ дисертаційної роботи присвячено розробленню інтелектуальної системи керування дизель-генераторною установкою автономного рухомого складу. У роботі обґрунтовано вибір сучасних методів штучного інтелекту та адаптивного керування для підвищення ефективності функціонування енергетичної установки. Запропоновано архітектуру цифрової системи, що включає модулі збору даних, аналітичний блок прогнозування режимів, підсистему адаптивного регулювання подачі палива та систему діагностики технічного стану агрегатів.

На основі побудованої структури розроблено математичну модель керування, реалізовану у середовищі Matlab/Simulink. Проведені випробування підтвердили ефективність створеної системи. Вона забезпечила зниження питомих витрат палива, стабілізацію режимів роботи, зменшення

пікових навантажень на механічні вузли та збільшення міжремонтних інтервалів дизель-генераторної установки. Крім того, система дозволила автоматично адаптувати режими роботи до змін навантаження та прогнозувати технічний стан окремих елементів, що підвищує загальну надійність експлуатації.

Економічні розрахунки показали, що впровадження інтелектуальної системи керування у практику підприємств залізничного транспорту дозволяє суттєво знизити експлуатаційні витрати та скоротити витрати пального, що робить її застосування економічно доцільним.

У висновках до дисертаційної роботи наведено узагальнення основних результатів дослідження, які у своїй сукупності вирішують актуальне науково-технічне завдання підвищення енергоефективності, надійності та екологічності дизель-генераторних установок автономного рухомого складу. Робота містить результати теоретичного моделювання, експериментальних випробувань і комп'ютерної оптимізації, що забезпечують комплексне удосконалення конструкції та режимів роботи ДГУ.

Наукова новизна полягає у створенні нових конструктивних рішень, які дозволяють зменшити питомі витрати палива і водночас підвищити ресурс роботи агрегатів, у розробленні математичної моделі системи «двигун – генератор» для багатокритеріальної оптимізації, а також у впровадженні інтелектуальної системи керування, здатної адаптувати режими роботи до змінних умов навантаження. Уперше обґрунтовано закономірності впливу змінних режимів роботи на енерговитрати та довговічність ДГУ, що раніше не було достатньо досліджено.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості застосування розроблених рішень для модернізації існуючих парків автономного рухомого складу, підвищення їх паливної економічності на 10–15 відсотків, зменшення рівня шкідливих викидів, збільшення міжремонтних пробігів, а також створення інтелектуальних систем керування нового покоління. Економічні розрахунки довели доцільність впровадження

результатів роботи у виробничу практику підприємств залізничного транспорту.

За темою дисертації опубліковано 6 наукових праць, з яких три наукових статті, що опубліковані у фахових виданнях категорії «Б», три праці апробаційного характеру – тези доповідей на науково-технічних конференціях.

Ключові слова: дизель-генераторна установка, автономний рухомий склад, експлуатація локомотивів, технічний стан, технічне обслуговування, експлуатаційні параметри, паливна економічність, енергетичні характеристики, оптимізація режимів роботи, математичне моделювання, машинне навчання, інтелектуальна система керування, динамічне програмування, екологічність, надійність, прогнозування ресурсу.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати:

1. Пузир, В., Обозний О, Залата, А. (2023). Вплив системи охолодження на енергетичні показники тягового генератора. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, 4 (155), 86-90.
2. Пузир, В., Обозний О, Залата, А. (2025). Інтелектуальна система керування дизель-генераторною установкою автономного рухомого складу на основі нейронно-нечітких моделей та еволюційної оптимізації. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті,, 2 (161), 93-97. DOI: 10.18664/ikszt.v30i2.335370
3. Обозний, О., Залата, А., Нотченко, Д. (2025) Економічна доцільність впровадження інтелектуальних систем керування дизель-генераторними установками автономного рухомого складу. Вісник економіки транспорту і промисловості, 90, 189-199. DOI: <https://doi.org/10.18664/btie.90.337428>

Опубліковані праці апробаційного характеру:

4. Пузир, В.Г., Обозний О.М., Залата А.С. Реалізація системи охолодження тягових електричних машин під час модернізації тепловозів. Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «Світові тенденції ресурсозбереження на електричному транспорті» (25 – 27 жовтня 2023 року, м. Харків). – С. 128 – 130
5. Залата, А.С. Новітні технології удосконалення конструкції та режимів роботи дизель-генераторних установок автономного рухомого складу Тези доповідей 2-ої міжнародної науково-технічна конференція «Прогресивні технології засобів транспорту», (Харків, 05 – 06 грудня 2024 р.) С. 29 – 31
6. Залата, А.С., Нотченко, Д.А., Економічна оцінка та технічні рішення для інтелектуалізації системи управління дизель-генераторними установками

автономного рухомого складу залізниць. МАТЕРІАЛИ двадцять першої науково-практичної міжнародної конференції «Міжнародна транспортна інфраструктура, індустриальні центри та корпоративна логістика» (5-6 червня 2025р. м. Харків, Україна). С. 335 – 337.

ABSTRACT

Zalata A.S. Innovative Technologies for Improving the Design and Operating Modes of Diesel-Generator Units of Autonomous Rolling Stock. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining a Doctor of Philosophy (PhD) degree in specialty 273 – Railway Transport, field of knowledge 27 – Transport. – Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine, 2025.

This dissertation addresses an urgent scientific and technical problem of improving the energy efficiency, reliability, and environmental performance of autonomous rolling stock through the development of innovative design solutions and intelligent control systems for diesel-generator units (DGUs). The work proposes a comprehensive approach combining theoretical research, experimental studies, and computer modeling, which allows optimization of energy conversion processes in the “engine–generator” system. This leads to reduced fuel consumption, lower emissions, and extended service life of DGUs.

Object of the research – energy conversion processes, design solutions, and operating modes of DGUs, as well as methods for their optimization.

Subject of the research – diesel-generator units of autonomous rolling stock.

The aim of the research – to develop theoretical foundations and practical recommendations for improving the design and operating modes of DGUs to enhance their efficiency, reliability, and environmental safety.

In the **introduction**, the relevance of the dissertation topic is substantiated. It is noted that a significant portion of locomotives and other autonomous rolling stock operates on non-electrified sections, in remote areas, or performs shunting operations. Therefore, the efficiency of transportation depends largely on the technical level of diesel-generator units. The main operational problems of such units include high fuel consumption, considerable levels of harmful emissions, and limited reliability under variable load conditions. It is emphasized that in the context of martial law and the post-war reconstruction of Ukraine’s transport infrastructure,

the issues of energy efficiency and autonomy of rolling stock become particularly important.

Chapter 1 is devoted to analyzing the current state and prospects of diesel-generator units for autonomous rolling stock. It presents an overview of typical design configurations, from conventional diesel-generator systems to modern hybrid and digital technologies. The chapter examines the evolution of control systems from mechanical fuel supply mechanisms to electronic platforms (Common Rail, ECU, CAN bus). It identifies the trends of increasing specific power, reducing fuel consumption, implementing exhaust gas cleaning systems (EGR, DPF, SCR), and applying energy recovery technologies. It is shown that modern DGUs are designed considering environmental standards and sustainability principles, while further progress depends on the implementation of digital twins, intelligent monitoring systems, and thermal process optimization methods.

Chapter 2 is devoted to the theoretical foundations and scientific justification for improving the design and operating modes of diesel-generator units.

The analysis of DGU operating modes under variable load conditions was carried out, revealing their limitations and characteristic energy indicators. A **mathematical model** of the “engine–generator” system was developed, which describes the thermal, mechanical, and electrical processes occurring in the unit. This model enables **multi-criteria optimization** that considers fuel efficiency, environmental performance, and durability simultaneously.

The dissertation proposes **scientific principles for improving design configurations**, which include the use of advanced materials and surface treatment technologies to extend the service life of components, optimization of fuel systems and injection parameters, enhancement of cooling, lubrication, and exhaust gas treatment systems, and integration of digital control and technical condition monitoring systems.

Theoretical modeling of the influence of design and operational parameters on energy performance demonstrated that the use of optimized supercharging

schemes, intercooling, and exhaust gas aftertreatment allows reducing specific fuel consumption by 8–12 percent and cutting harmful emissions by 1.5–2 times.

Chapter 3 presents the experimental studies and analysis of the effectiveness of the improved diesel-generator unit of autonomous rolling stock.

The objectives and methodology of the experimental program were formulated and justified. The tests were conducted both on specialized test benches and on full-scale DGU samples. The main focus was placed on determining fuel economy under various load modes, assessing the level of harmful emissions, and studying the reliability and operational stability of the units.

The obtained experimental results confirmed the effectiveness of the theoretically developed improvements. It was established that the application of the proposed design and operational solutions makes it possible to reduce specific fuel consumption by an average of 10–15 percent, significantly decrease nitrogen oxide and carbon monoxide emissions due to stabilized combustion processes, and extend the operational lifespan of the units by optimizing thermal and mechanical loads. Importantly, the improved solutions comply with modern international environmental standards.

The comparison of theoretical and experimental results confirmed the adequacy of the developed mathematical models and their applicability for predicting the behavior of diesel-generator units under real operating conditions.

Chapter 4 is devoted to computer modeling and optimization of diesel-generator unit operation.

A base simulation model of the “engine–generator” system was created in the Matlab/Simulink environment, representing its thermal, mechanical, and electrical processes. Using this model, a series of computational experiments was carried out to study the influence of key parameters on the energy performance of the unit and to assess their sensitivity to varying load conditions.

Special attention was paid to the implementation of multi-criteria optimization, where fuel economy, reliability, and environmental performance were considered simultaneously. Methods of dynamic programming were applied, which

allowed the development of algorithms for selecting optimal operating modes of the diesel-generator unit under diverse operating conditions.

The simulation results showed that the application of these algorithms provides a significant reduction in fuel consumption while maintaining stable operation and reducing the level of harmful emissions. The optimization studies confirmed that the proposed approach makes it possible to create universal control strategies capable of adapting to variable load conditions and improving the service life of diesel-generator units.

Chapter 5 is devoted to the development of an intelligent control system for diesel-generator units of autonomous rolling stock.

The dissertation substantiates the choice of modern artificial intelligence and adaptive control methods to enhance the operational efficiency of the power unit. A digital system architecture was proposed, which includes data acquisition modules, an analytical prediction block for operating modes, an adaptive fuel supply regulation subsystem, and a diagnostic module for monitoring the technical condition of components.

Based on this architecture, a mathematical control model was developed and implemented in the Matlab/Simulink environment. The conducted tests confirmed the effectiveness of the proposed system. It ensured a reduction in specific fuel consumption, stabilization of operating modes, mitigation of peak mechanical loads, and an increase in the intervals between maintenance operations. Moreover, the system demonstrated the ability to automatically adapt operating modes to changing load conditions and to predict the technical state of individual components, which significantly enhances overall operational reliability.

Economic calculations have shown that the implementation of an intelligent control system in the practice of railway transport enterprises allows to significantly reduce operating costs and reduce fuel consumption, which makes its use economically feasible.

The conclusions to the dissertation work provide a summary of the main results of the study, which in their entirety solve the current scientific and technical

task of increasing the energy efficiency, reliability and environmental friendliness of diesel generator sets of autonomous rolling stock. The work contains the results of theoretical modeling, experimental tests and computer optimization, which provide a comprehensive improvement of the design and operating modes of the DGU.

The scientific novelty lies in the creation of new design solutions that allow to reduce specific fuel consumption and at the same time increase the service life of the units, in the development of a mathematical model of the “engine-generator” system for multi-criteria optimization, as well as in the implementation of an intelligent control system capable of adapting operating modes to variable load conditions. For the first time, the regularities of the influence of variable operating modes on energy consumption and durability of DGUs have been substantiated, which has not been sufficiently studied before.

The practical significance of the results obtained lies in the possibility of applying the developed solutions for the modernization of existing fleets of autonomous rolling stock, increasing their fuel efficiency by 10–15 percent, reducing the level of harmful emissions, increasing the mileage between overhauls, as well as creating new-generation intelligent control systems. Economic calculations have proven the feasibility of implementing the results of the work into the production practice of railway transport enterprises.

On the topic of the dissertation 6 scientific works have been published, of which three are scientific articles published in professional publications of category "B", three are works of an approbatory nature – theses of reports at scientific and technical conferences.

Keywords: diesel generator set, autonomous rolling stock, locomotive operation, technical condition, maintenance, operational parameters, fuel efficiency, energy characteristics, optimization of operating modes, mathematical modeling, machine learning, intelligent control system, dynamic programming, environmental friendliness, reliability, resource forecasting.

LIST OF PUBLICATIONS OF THE ACQUIRER

Scientific works in which the main scientific results were published:

1. Puzyr, V., Oboznyi, O., & Zalata, A. (2023). Vplyv systemy okholodzhennia na enerhetychni pokaznyky tiahovogo heneratora. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, 4 (155), 86–90.
2. Puzyr, V., Oboznyi, O., & Zalata, A. (2025). Intelktualna systema keruvannia dyzel-heneratornoi ustanovkoii avtonomnoho rukhomogo skladu na osnovi neironno-nechitkykh modelei ta evoliutsiinoi optymizatsii. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, 2 (161), 93–97. DOI: 10.18664/ikszt.v30i2.335370
3. Oboznyi, O., Zalata, A., & Notchenko, D. (2025). Ekonomichna dotsilnist vprovadzhennia intelektualnykh system keruvannia dyzel-heneratornymy ustanovkamy avtonomnoho rukhomogo skladu. *Visnyk ekonomiky transportu i promyslovosti*, 90, 189–199. DOI: <https://doi.org/10.18664/btie.90.337428>

Published works of an approbation nature:

4. Puzyr, V.H., Oboznyi, O.M., & Zalata, A.S. (2023). Realizatsiia systemy okholodzhennia tiahovykh elektrychnykh mashyn pid chas modernizatsii teplovoziv. *Materialy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Svitovi tendentsii resursozberezhennia na elektrychnomu transporti»* (25–27 zhovtnia 2023 roku, Kharkiv), 128–130.
5. Zalata, A.S. (2024). Novitni tekhnolohii udoskonalennia konstruktsii ta rezhymiv roboty dyzel-heneratornykh ustanovok avtonomnoho rukhomogo skladu. *Tezy dopovidei 2-oi mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Prohresyvni tekhnolohii zasobiv transportu»* (Kharkiv, 05–06 hrudnia 2024 r.), 29–31.
6. Zalata, A.S., & Notchenko, D.A. (2025). Ekonomichna otsinka ta tekhnichni rishennia dlia intelektualizatsii systemy upravlinnia dyzel-

heneratornymy ustanovkamy avtonomnoho rukhomogo skladu zaliznyts. *Materialy XXI naukovo-praktychnoi mizhnarodnoi konferentsii «Mizhnarodna transportna infrastruktura, industrialni tsentry ta korporatyvna lohistyka»* (5–6 chervnia 2025 r., Kharkiv, Ukraina), 335–337.

ЗМІСТ

ВСТУП	20
РОЗДІЛ 1. СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНИХ УСТАНОВОК АВТОНОМНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ	26
1.1. Огляд типових конструкцій дизель-генераторних установок автономного рухомого складу	26
1.2. Еволюція технологій управління дизель-генераторних установок: від класичних рішень до інновацій	31
1.3. Енергетичні характеристики та показники надійності дизель-генераторних установок	35
1.4. Виклики та проблеми вдосконалення сучасних дизель-генераторних установок	44
Висновки до розділу 1	49
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ І РЕЖИМІВ РОБОТИ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНИХ УСТАНОВОК АВТОНОМНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ	52
2.1. Аналіз режимів роботи дизель-генераторних установок автономного рухомого складу	52
2.2. Теоретичні основи оптимізації режимів роботи дизель-генераторних установок	64
2.3. Наукові принципи вдосконалення конструктивних схем дизель-генераторних установок	71
2.4. Розробка математичної моделі роботи вдосконаленої дизель-генераторної установки	74
2.5 Удосконалення системи збудження збуджувача тягового генератора тепловозів серії 2ТЕ116	79

	18
Висновки до розділу 2	84
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ І АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВДОСКОНАЛЕНОЇ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ АВТОНОМНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ	86
3.1. Постановка завдання експериментальних досліджень	86
3.2. Методика проведення експериментів	87
3.3. Аналіз результатів експериментальних досліджень	89
3.4. Порівняння теоретичних і експериментальних результатів	93
Висновки до розділу 3	98
РОЗДІЛ 4. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ АВТОНОМНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ	100
4.1. Постановка задачі комп'ютерного моделювання	100
4.2. Створення базової моделі дизель-генераторної установки в середовищі Simulink	106
4.3. Моделювання енергетичних характеристик дизель-генераторної установки	111
4.4. Оптимізація режимів роботи дизель-генераторної установки на основі моделі	117
4.5. Аналіз чутливості енергетичних характеристик до конструктивних і режимних параметрів	125
Висновки до розділу 4	130
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ТА ВИПРОБУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЮ УСТАНОВКОЮ	132
5.1. Постановка задачі розробки інтелектуальної системи керування	132
5.2. Обґрунтування вибору методів інтелектуального керування	134
5.3. Структура розробленої інтелектуальної системи керування	141
5.4. Реалізація моделі інтелектуальної системи керування у середовищі Simulink	146

	19
5.5. Моделювання і випробування інтелектуальної системи керування	154
5.6. Практичні рекомендації щодо впровадження інтелектуальної системи	161
5.7 Розрахунок економічної ефективності впровадження інтелектуальної системи	168
Висновки до розділу 5	171
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	172
Список використаних джерел	175
Додаток А Акти впровадження результатів дисертаційної роботи	193

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Розвиток транспортної галузі в умовах сучасних викликів вимагає удосконалення всіх складових автономного рухомого складу, зокрема дизель-генераторних установок (ДГУ), які забезпечують його енергетичну автономність. Значна частка тепловозів та іншого автономного транспорту працює на ділянках залізничної мережі без електрифікації, у важкодоступних районах або на маневрових роботах, що обумовлює високу залежність ефективності перевезень від технічного рівня та енергетичних характеристик ДГУ.

Дизель-генераторні установки є складними технічними системами, що поєднують у собі теплові двигуни внутрішнього згоряння та генератори електричної енергії. На сьогоднішній день ключовими проблемами їх експлуатації залишаються недостатня енергоефективність, високі витрати палива, значний рівень шкідливих викидів, обмежена надійність при тривалих режимах змінного навантаження. Водночас загострюються вимоги до екологічності, економічності й ремонтпридатності автономного рухомого складу, що обумовлює необхідність пошуку новітніх технічних рішень.

Вдосконалення конструкції ДГУ шляхом застосування інноваційних матеріалів, гібридних енергетичних систем, цифрового управління режимами роботи є перспективним напрямком підвищення їхньої загальної ефективності. Особливої актуальності набувають питання створення енергоефективних, надійних і екологічно безпечних дизель-генераторних установок, що дозволяють знизити експлуатаційні витрати й збільшити ресурс автономного рухомого складу.

Актуальність роботи зумовлена також стратегічною необхідністю розвитку залізничного транспорту України в умовах воєнного стану, післявоєнного відновлення інфраструктури та інтеграції у європейський

транспортний простір, де питання енергоефективності стають критично важливими.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження виконано у межах наукових напрямів розвитку транспортної галузі України, зокрема в частині енергетичної модернізації рухомого складу. Робота пов'язана з тематикою державних програм розвитку інноваційних технологій у транспорті, програм енергозбереження, а також спрямована на досягнення цілей сталого розвитку ООН щодо чистої енергії та інфраструктури.

Тема дисертаційної роботи пов'язана з планами науково-дослідних робіт кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту.

Мета дослідження – розробити теоретичні основи та практичні рекомендації щодо вдосконалення конструкції й режимів роботи дизель-генераторних установок автономного рухомого складу для підвищення їхньої енергоефективності, надійності та екологічності.

Для досягнення поставленої мети були визначені такі основні завдання:

- провести аналіз сучасного стану конструкцій та режимів роботи дизель-генераторних установок автономного рухомого складу;
- дослідити вплив конструктивних особливостей на енергетичні показники ДГУ;
- розробити новітні конструктивні рішення для підвищення ефективності роботи ДГУ;
- створити математичні моделі для аналізу та оптимізації режимів роботи;
- провести експериментальні дослідження ефективності новітніх рішень;
- розробити рекомендації щодо впровадження удосконалених ДГУ в експлуатацію.

Об'єкт дослідження – процеси енергоперетворення, конструктивні рішення, режими роботи ДГУ та методи їх оптимізації для підвищення енергоефективності та надійності.

Предмет дослідження – дизель-генераторні установки автономного рухомого складу.

Методи дослідження. У процесі виконання дисертаційної роботи використовувалися такі основні методи:

- аналітичний огляд і порівняльний аналіз літературних джерел;
- математичне моделювання процесів роботи ДГУ;
- методи оптимізації режимів роботи (динамічне програмування, багатокритеріальна оптимізація);
- комп'ютерне моделювання в середовищах Matlab/Simulink, ANSYS;
- стендові та натурні експериментальні дослідження;
- статистична обробка результатів.

Наукова новизна отриманих результатів. У межах дисертаційного дослідження отримано такі наукові результати, які виносяться на захист:

Вперше:

- обґрунтовано закономірності впливу змінних режимів роботи дизель-генераторних-установок (ДГУ) автономного рухомого складу на енергоефективність і довговічність і довговічність агрегатів;
- розроблено модель інтелектуальної системи керування ДГУ автономного рухомого складу з використанням нейронно-нечітких моделей та адаптивних алгоритмів.

Доопрацьовано:

- математичну модель системи «двигун-генератор», що враховує теплові, механічні й електричні процеси для багатокритеріальної оптимізації;
- методику динамічного програмування для вибору оптимальних режимів роботи в умовах змінного навантаження.

Практичне значення отриманих результатів. Результати дослідження дозволяють:

- підвищити паливну економічність автономного рухомого складу на 10–15% завдяки впровадженню оптимізованих режимів роботи дизель-генераторних установок та інтелектуальних систем керування подачею палива і навантаженням;

- зменшити рівень шкідливих викидів у навколишнє середовище шляхом стабілізації режимів роботи двигуна, покращення процесів згоряння палива та ефективнішої роботи систем очищення відпрацьованих газів;

- збільшити міжремонтний пробіг дизель-генераторних установок за рахунок зниження теплових і механічних навантажень на основні елементи двигуна, удосконалення системи змащення, охолодження та контролю технічного стану;

- удосконалити конструктивні рішення нових і модернізованих дизель-генераторних установок шляхом застосування розроблених у роботі моделей і методів для оптимізації конструкційних параметрів та режимів експлуатації;

- розробити практичні рекомендації для підприємств залізничного транспорту щодо модернізації існуючих парків автономного рухомого складу, спрямовані на підвищення енергетичної ефективності, надійності та зниження експлуатаційних витрат.

Особистий внесок здобувача. Усі результати, викладені в дисертаційній роботі, отримані особисто автором або за його безпосередньої участі. Автор самостійно сформульовані мета та завдання дослідження, проведено аналіз літератури, розроблено математичні моделі, виконано моделювання та експериментальні дослідження, узагальнено результати.

У публікаціях, виконаних у співавторстві, здобувачу належать такі результати: [1] – проведено експериментальні дослідження впливу параметрів охолоджувальної системи на енергетичні показники генератора, виконано обробку та інтерпретацію результатів вимірювань, сформульовано висновки щодо доцільності впровадження модернізованої системи охолодження для підвищення ККД та зниження теплових втрат. [2] – розроблено концепцію інтелектуальної системи керування дизель-генераторною установкою,

створено структуру нейронно-нечіткої моделі для адаптивного регулювання режимів роботи. [3] – побудовано економіко-математичну модель оцінювання ефективності інновації, виконано розрахунки прогнозованої економії палива та продовження ресурсу основних агрегатів. [4] – здійснено оцінку впливу запропонованих змін на енергоефективність і надійність роботи електричних машин у складі модернізованого тепловоза. [5] – визначено основні технічні недоліки існуючих конструкцій, запропоновано комплекс інженерних рішень щодо удосконалення конструкції та режимів роботи ДГУ, обґрунтовано їхній вплив на зниження питомої витрати палива та підвищення ресурсу основних агрегатів. [6] – розроблено варіанти архітектури інтелектуальної системи керування, здійснено попереднє технічне проєктування та обґрунтовано очікувану економію палива і продовження ресурсу ДГУ при реалізації запропонованих рішень.

Апробація результатів роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на:

всеукраїнська науково-практична конференція «Світові тенденції ресурсозбереження на електричному транспорті». Харків, 25 – 27 жовтня 2023 року;

International Scientific Conference of Aeronautics, Automotive and Railway Engineering and Technologies BulTrans-2024. Sozopol, Bulgaria, Technical University of Sofia, 10 – 13 September 2024;

2-а Міжнародна науково-технічна конференція “Прогресивні технології засобів транспорту”. Харків, 05 – 06 грудня 2024 р.;

5-та міжнародна науково-технічна конференція «Інтелектуальні транспортні технології». Харків, 25-27 листопада 2024 р.

Публікації за темою дисертації. За темою дисертації опубліковано 6 наукових праць, з яких три наукових статті, що опубліковані у фахових виданнях категорії «Б», три праці апробаційного характеру – тези доповідей на науково-технічних конференціях. Публікації відображають основні етапи, результати та наукові положення дисертаційної роботи.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел та додатку. Загальний обсяг роботи становить 196 сторінок машинописного тексту, включаючи 16 рисунків, 6 таблиць, 139 найменування у списку використаних джерел та 1 додаток.

РОЗДІЛ 1. СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНИХ УСТАНОВОК АВТОНОМНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

1.1. Огляд наукових досліджень дизель-генераторних установок автономного рухомого складу

Дизель-генераторні установки (ДГУ) є базовим елементом силових установок автономного рухомого складу, забезпечуючи незалежне енергопостачання тягових електроприводів та допоміжних систем. Їх технічний рівень визначає ключові експлуатаційні показники локомотивів – економічність, надійність, екологічність і ремонтпридатність. Тому аналіз сучасного стану конструкцій ДГУ та результатів наукових досліджень у цій галузі є необхідною передумовою для розроблення ефективних рішень з підвищення ефективності автономного рухомого складу.

В Україні склалися потужні наукові школи у сфері дослідження та удосконалення ДГУ – насамперед на базі Українського державного університету залізничного транспорту (УкрДУЗТ, Харків), Дніпровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна (ДНУЗТ), Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ»). Дослідження цих центрів охоплюють повний спектр питань – від класифікації конструктивних схем до удосконалення окремих систем та підвищення надійності.

У роботах Тартаковського Е.Д. [7, 8] висвітлено фундаментальні аспекти удосконалення конструкції та систем керування дизель-генераторними установками тепловозів. Автором обґрунтовано доцільність переходу від традиційних механічних і гідравлічних регуляторів до електронних систем керування, що забезпечують підвищену точність регулювання подачі палива, стабілізацію частоти обертання колінчастого вала та узгодження параметрів роботи дизеля й генератора в перехідних режимах.

В роботах Бабаніна О.Б. [9, 10] на основі дослідження факторів, що впливають на організацію технічного утримання тягового рухомого складу, визначено шляхи підвищення ефективності експлуатації дизель-генераторних установок (ДГУ) у складі локомотивів. Автором встановлено, що зі зростанням ступеня зношення агрегатів особливої актуальності набуває питання своєчасної заміни та діагностування деталей дизель-генераторів не лише під час капітальних ремонтів, але й у процесі поточного технічного обслуговування. Підкреслюється роль системи матеріально-технічного забезпечення як базової умови підтримання працездатності енергетичних установок автономних локомотивів.

У роботах Устенко О.В. [11, 12] запропоновано систему критеріїв технічної ефективності віртуальної системи технічної експлуатації тягового рухомого складу. Автором розширено традиційний підхід до оцінювання системи ТО та ремонту (включаючи ремонт дизель-генераторних установок автономного рухомого складу), включивши в модель час, необхідний не тільки на сам ремонт, але й на рух локомотива до ремонтної бази, час очікування, а також транспортування назад до лінії експлуатації. Такий підхід дозволяє більш реалістично врахувати втрати ресурсів рухомого складу у процесі обслуговування та коригувати показники технічної готовності з урахуванням логістичних і часових витрат.

Дослідження Крашенініна О.С. [13] присвячені розробці системи коригувальних коефіцієнтів, що враховують кліматичні умови, «вік» локомотивів, особливості колійного профілю, режим навантаження і непередбачені відмови при подовженні терміну служби, в тому числі і дизель-генераторних установок. Зокрема, в роботах застосовується методика транспортної економетрики та підхід побудови норм міжремонтного пробігу із коригуванням через фактори технічної жорсткості клімату, умови колій, а також критерії подібності для врахування різних впливів.

У монографічному розділі «Systems Approach to the Organization of Locomotive Maintenance on Ukraine Railways» (Tartakovskyi, Ustenko, Puzyr,

Datsun, 2017) запропоновано комплексну системну модель організації технічного утримання локомотивів, враховуючи структуру ремонтної та обслуговуючої інфраструктури Укрзалізниці, типи локомотивів, статус ремонтних заводів і депо, а також економічні й якісні критерії ефективності. Авторами визначено базовий оптимізаційний критерій системи утримання — забезпечення необхідного обсягу перевезень і безпеки при мінімально можливих витратах. Включення метрик технічного рівня ремонтної інфраструктури дозволяє корелювати рішення по експлуатації ДГУ з доступністю ресурсів у депо — це важливо для планування міжремонтних інтервалів і режимів роботи.

Роботи Дацуна Ю.М. [15, 17, 18] присвячені концепції, що поєднує формалізацію знань про відмови, алгоритми підтримки рішень і метрологічно узгоджені показники якості ремонтних процесів. Це створює методичну базу інтеграції «розумних» підсистем моніторингу у контур керування режимами роботи ДГУ автономного рухомого складу, зокрема в частині переходу від регламентного ремонту до ремонту за ДГУ за фактичним технічним станом.

Найбільший масив українських робіт [7-15] присвячено вивченню типових конструктивних схем ДГУ. Переважна більшість дизель-генераторів, що застосовуються на тепловозах та дизель-поїздах, базуються на 4- тактних дизелях V-подібного або рядного розташування з турбонаддувом та проміжним охолодженням наддувного повітря, а також синхронних генераторах з індивідуальним або комбінованим охолодженням. Науковці систематизували дані щодо масогабаритних і енергетичних характеристик таких установок, що дозволяє виконувати обґрунтований вибір схем для нових конструкцій чи модернізації існуючих локомотивів.

Важливим напрямом є також удосконалення паливної апаратури та систем упорскування палива. У багатьох дослідженнях наведено результати впровадження електронних систем керування подачею палива (ECU), регулювання тиску та тривалості упорскування, а також оптимізації кута випередження упорскування залежно від навантаження. Це дозволяє істотно

зменшити питому витрату палива та димність відпрацьованих газів, що особливо важливо для рухомого складу, який експлуатується на неелектрифікованих ділянках [16-20].

Не менш значущою є група досліджень, присвячених тепловим режимам і системам охолодження ДГУ. Українські науковці розробили рекомендації щодо оптимізації конструкції насосів, радіаторів і термостатів, а також щодо автоматизованого регулювання витрати охолоджувальної рідини. Це дозволяє знижувати теплове навантаження на основні вузли дизеля та стабілізувати температурний режим, що безпосередньо впливає на ресурс двигунів.

Що стосується закордонних досліджень, то вони мають низку характерних особливостей, що відрізняють їх від українських:

Провідні світові центри (США, Німеччина, Японія, Південна Корея) зосереджують увагу насамперед на створенні високоточних математичних моделей дизель-генераторних установок. У роботах, опублікованих у журналах *Applied Energy*, *Energy*, *Simulation Modelling Practice and Theory* та *Journal of Rail and Rapid Transit*, представлені контролер-орієнтовані моделі ДГУ, які придатні для реалізації в режимі реального часу. Це дозволяє проводити випробування алгоритмів керування безпосередньо на цифрових моделях, мінімізуючи витрати та ризики під час експериментів на реальному обладнанні [21-25].

Важливим трендом є розвиток систем прогнозного керування (Model Predictive Control, MPC), які оптимізують роботу ДГУ за декількома критеріями одночасно – витрата палива, викиди, ресурс агрегатів. У цих системах застосовуються онлайн-ідентифікація параметрів, урахування теплових та механічних обмежень, а також адаптивне налаштування режимів роботи залежно від профілю руху поїзда.

Ще одним важливим напрямом закордонних досліджень є впровадження штучного інтелекту та машинного навчання у систему керування дизель-генераторними установками. Сучасні роботи демонструють можливості прогнозного керування (Model Predictive Control), адаптивного регулювання

подачі палива та упорскування, а також управління енергопотоками в гібридних схемах. Застосування таких алгоритмів дозволяє зменшити витрату палива та знизити пікові теплові навантаження, проте потребує точного налаштування параметрів під кожну конкретну установку.

Іншим вагомим напрямом є дослідження у сфері енергоменеджменту гібридних дизель-електричних установок. Застосування суперконденсаторів і літій-іонних акумуляторів для накопичення енергії при гальмуванні та її повторного використання під час розгону поїзда дозволяє знижувати навантаження на дизель-генератори, зменшувати пікові теплові й механічні напруження та підвищувати паливну економічність. Однак ці рішення складні в реалізації й потребують високоточної координації роботи силових і допоміжних систем у режимі реального часу.

Поряд з цим, розробляються системи онлайн-моделювання та цифрових двійників, які дозволяють імітувати роботу ДГУ у різних режимах і використовуються для тестування алгоритмів керування. Утім, більшість з них залишаються експериментальними і не інтегровані в реальні експлуатаційні системи керування локомотивів.

Аналіз науково-технічної літератури [15, 17, 20] показав, що в Україні сформовано потужну базу прикладних досліджень у сфері дизель-генераторних установок (ДГУ) автономного рухомого складу. Основні зусилля зосереджені на удосконаленні конструктивних елементів ДГУ – паливної апаратури, систем охолодження та змащення, а також на підвищенні паливної економічності, надійності та довговічності агрегатів. Значну увагу приділено оптимізації режимів роботи, зниженню теплових навантажень, зменшенню шкідливих викидів та впровадженню сучасних методів діагностики і обслуговування за технічним станом.

Закордонні дослідження демонструють стрімкий розвиток цифрових та інтелектуальних технологій керування ДГУ. Поширюються системи прогнозного керування (Model Predictive Control), створюються високоточні математичні моделі й цифрові двійники для тестування алгоритмів, а також

активно впроваджуються методи штучного інтелекту для адаптивного регулювання паливної апаратури та оптимізації енергоспоживання в гібридних схемах. Проте більшість таких рішень залишаються лабораторними, не враховують індивідуальних особливостей конкретних установок та не забезпечують комплексного впливу на витрату палива і ресурс агрегатів одночасно.

Виявлені проблеми – низька адаптивність існуючих систем керування, відсутність інтеграції багатофакторних параметрів, невикористання нечіткої логіки та обмежене застосування нейронних методів у режимі реального часу – істотно обмежують ефективність експлуатації ДГУ і зумовлюють зростання витрат палива та передчасний знос вузлів.

Усе це обґрунтовує вибір на пряму цього дослідження – розроблення системи удосконаленого керування дизель-генераторними установками на основі нейро-нечіткої моделі, яка здатна враховувати індивідуальні особливості агрегатів, працювати з нечіткими та неповними даними і адаптивно змінювати керуючі впливи під час експлуатації. Очікуваним результатом впровадження такої системи є зниження питомої витрати палива та подовження ресурсу ДГУ, що забезпечить підвищення ефективності та економічності автономного рухомого складу.

1.2. Еволюція технологій дизель-генераторних установок: від класичних рішень до інновацій

Історичний розвиток дизель-генераторних установок (ДГУ) автономного рухомого складу є складним і багатогранним процесом, який віддзеркалює загальні тенденції еволюції транспортної енергетики. Починаючи від найперших реалізацій дизельних тепловозів і закінчуючи сучасними високотехнологічними гібридними системами, дизель-генераторні установки зазнали глибоких змін, обумовлених як прогресом у галузі

машинобудування і енергетики, так і зростаючими вимогами до ефективності, надійності та екологічності автономного рухомого складу [23].

Перші дизель-генераторні установки, що з'явилися на початку ХХ століття, були прямолінійними за своєю конструкцією. Вони включали у себе класичний чотиритактний дизельний двигун великого об'єму і синхронний генератор змінного струму, механічно поєднані через жорстке з'єднання. Такі установки працювали за принципом стабільного обертання генератора при заданій частоті, що забезпечувало необхідну частоту змінного струму для живлення тягових електродвигунів постійного струму через проміжні випрямлячі або безпосередньо електромеханічні перетворювачі.

Основні технологічні рішення перших поколінь дизель-генераторних установок базувалися на прагматичному підході: надійність розглядалася як пріоритет над енергоефективністю, габаритами чи рівнем шкідливих викидів. Великі масогабаритні показники, високі питомі витрати палива і відносно невеликий моторесурс були типовими характеристиками перших дизель-генераторних установок для залізничного транспорту.

Однак уже в середині ХХ століття почали проявлятися перші спроби вдосконалення ДГУ. Одним із ключових напрямів модернізації стало впровадження турбонаддуву. Використання турбонаддуву дозволило підвищити питому потужність двигунів без істотного збільшення їх розмірів і маси, що стало критичним чинником для залізничного транспорту, де масогабаритні обмеження мають суттєве значення. Турбонаддув не тільки підвищував коефіцієнт використання робочого об'єму двигуна, але й сприяв зменшенню питомих витрат палива, що набувало дедалі більшої ваги в умовах зростання цін на енергоносії.

Наступним важливим етапом розвитку стало вдосконалення систем упорскування палива. Перехід від примітивних механічних систем до насосно-форсуночних систем високого тиску дозволив забезпечити більш точне дозування і розпилення палива, що покращило процеси згоряння у камерах

згоряння. У свою чергу, це сприяло зменшенню витрат палива, підвищенню потужності і зниженню рівня викидів шкідливих речовин.

У 70-80-х роках ХХ століття на фоні підвищення екологічних вимог і загальної енергетичної кризи зросла увага до питань ефективності та екологічної безпеки дизель-генераторних установок. Це призвело до широкого впровадження технологій рециркуляції відпрацьованих газів, систем попереднього підігріву повітря, вдосконалених схем охолодження і змащення. З'явилися перші спроби використання альтернативних палив, зокрема природного газу у вигляді газодизельних сумішей.

З кінця ХХ – початку ХХІ століття розвиток технологій ДГУ перейшов на якісно новий рівень завдяки впровадженню електронних систем управління. Застосування електронних блоків керування двигуном (ECU), систем упорскування типу Common Rail, автоматичних регуляторів навантаження генераторів дозволило реалізувати адаптивне управління процесами горіння, оптимізувати режими роботи двигуна залежно від навантаження і зовнішніх умов. Це дало змогу значно підвищити економічність роботи дизель-генераторних установок, знизити рівень викидів шкідливих речовин, забезпечити гнучкість і стабільність.

У 2000-х роках поряд із удосконаленням класичних дизель-генераторних установок почалася активна інтеграція гібридних систем. Використання додаткових джерел енергії у вигляді акумуляторних батарей або суперконденсаторів дозволило оптимізувати роботу дизельних двигунів у діапазоні найбільш ефективних режимів, забезпечити рекуперацію енергії під час гальмування і покращити екологічні показники транспортних засобів.

Одним із найважливіших досягнень початку ХХІ століття у сфері розвитку дизель-генераторних установок стала повномасштабна цифровізація процесів керування. Інтеграція інтелектуальних систем моніторингу технічного стану, застосування систем дистанційної діагностики, розробка предиктивних моделей прогнозування несправностей стали фундаментальними етапами еволюції технологій ДГУ. Зокрема, широке

використання CAN-шин та інших цифрових протоколів передачі даних дозволило забезпечити миттєвий обмін інформацією між вузлами дизель-генераторної установки і централізованими системами керування рухомим складом енергопостачання [24-26].

Інтеграція електронних систем не тільки підвищила функціональні можливості дизель-генераторних установок, але й сприяла формуванню нових підходів до технічного обслуговування та ремонту. Застосування концепції обслуговування за станом, заснованої на реальному моніторингу робочих параметрів і діагностиці в реальному часі, дозволило оптимізувати витрати на обслуговування, знизити кількість позапланових відмов і підвищити загальну надійність експлуатації автономного рухомого складу.

Одночасно з цифровізацією розвивався напрям використання нових конструкційних матеріалів. Застосування високоміцних сплавів, композитних матеріалів, удосконалення технологій термічної і хімічної обробки поверхонь дозволили значно підвищити ресурс окремих компонентів дизель-генераторних установок. Спеціальні захисні покриття для деталей двигуна, зокрема поршнів, клапанів, циліндрів, сприяють зменшенню тертя, підвищенню термостійкості та корозійної стійкості робочих поверхонь, що позитивно впливає на довговічність усієї системи.

Особливу увагу розробники дизель-генераторних установок приділяють екологічним аспектам їх функціонування. Відповідно до міжнародних стандартів на викиди шкідливих речовин, зокрема стандартів Євро-6 для автомобільного транспорту та аналогічних регламентів для залізничного транспорту, дизель-генераторні установки повинні забезпечувати мінімальний рівень викидів оксидів азоту, вуглеводнів, оксиду вуглецю і твердих частинок. З цією метою широко впроваджуються системи рециркуляції відпрацьованих газів (EGR), фільтри твердих частинок (DPF), каталітичні нейтралізатори та системи селективної каталітичної нейтралізації (SCR).

Таким чином, еволюція технологій дизель-генераторних установок відбувалася одночасно за декількома напрямками: підвищення

енергоефективності і питомої потужності, зниження питомих витрат палива, вдосконалення екологічних характеристик, впровадження цифрових технологій керування і моніторингу, використання новітніх матеріалів і технологій обробки, інтеграція гібридних систем та альтернативних джерел енергії [27].

Подальший розвиток технологій дизель-генераторних установок в останнє десятиліття спрямований на ще глибшу інтеграцію різноманітних функціональних підсистем, з метою створення комплексних високоефективних енергетичних агрегатів для автономного рухомого складу. Однією з таких тенденцій є використання концепцій «розумних» дизель-генераторних систем, які об'єднують можливості автоматичного адаптивного керування, прогнозової діагностики, оптимізації енергоспоживання і автономного переходу між різними режимами роботи залежно від умов експлуатації.

1.3. Енергетичні характеристики та показники надійності дизель-генераторних установок

Енергетичні характеристики дизель-генераторних установок (ДГУ) є одними з основних параметрів, що визначають їх ефективність, доцільність застосування у складі автономного рухомого складу та відповідність сучасним вимогам експлуатації. Вивчення енергетичних характеристик ДГУ має на меті оцінку їх здатності перетворювати хімічну енергію палива в електричну енергію із мінімальними втратами, а також визначення енергетичних витрат на підтримання необхідних режимів роботи у різних експлуатаційних умовах.

Однією з базових енергетичних характеристик дизель-генераторної установки є її питома витрата палива, яка визначає кількість палива, спожитого для вироблення одиниці електричної енергії. Питома витрата палива є інтегральним показником енергоефективності і залежить як від

конструктивних особливостей двигуна і генератора, так і від режимів їхньої роботи. Теоретично найнижча питома витрата досягається у точці номінального навантаження при оптимальних параметрах процесу згоряння та мінімальних втрат теплової і механічної енергії.

Питома витрата палива зазвичай вимірюється у грамах на кіловат-годину ($\text{г/кВт}\cdot\text{год}$) і для сучасних дизель-генераторних установок залізничного транспорту становить від 195 до 220 $\text{г/кВт}\cdot\text{год}$ при номінальному навантаженні. Проте у реальних умовах експлуатації, де навантаження може змінюватися у широкому діапазоні, питома витрата палива зазвичай вища через зниження ККД при відхиленні від оптимальних режимів роботи.

Ще одним ключовим енергетичним показником є коефіцієнт корисної дії (ККД) дизель-генераторної установки. ККД визначається як відношення корисної електричної енергії, отриманої на виході генератора, до сумарної хімічної енергії палива, що подається у двигун. У дизель-генераторних установках середнього і великого класу ККД зазвичай складає 36–42 %. У найбільш ефективних моделях за рахунок впровадження турбонаддуву, високоефективних систем охолодження і сучасних технологій упорскування ККД може досягати 44–46 %, що є близьким до теоретичних меж для двигунів внутрішнього згоряння [29].

На енергетичні характеристики істотно впливає режим навантаження дизель-генераторної установки. Оптимальний режим забезпечується при роботі на навантаженні, що становить 75–90 % від номінальної потужності, при якому двигун працює у зоні найвищого ККД. При навантаженні нижче 50 % спостерігається різке зростання питомої витрати палива через погіршення процесу згоряння, підвищення внутрішніх втрат і зменшення ефективності використання наддувного повітря.

Нестабільні режими роботи, пов'язані зі змінами навантаження, пусками і зупинками двигуна, також негативно впливають на енергетичні характеристики, оскільки кожний запуск супроводжується додатковими витратами палива і зносом агрегатів. Тому важливим завданням є стабілізація

режиму роботи дизель-генераторної установки, оптимізація запусків і зупинок, впровадження систем акумулювання енергії для згладжування пікових навантажень.

Крім питомої витрати палива і ККД, важливими характеристиками є часові енергетичні параметри, зокрема швидкість виходу на робочий режим після запуску, динамічні характеристики при зміні навантаження, стабільність частоти і напруги електричної енергії на виході генератора. Сучасні дизель-генераторні установки здатні забезпечувати вихід на робочий режим за 30–60 секунд після запуску, що є важливим показником для автономного рухомого складу, який потребує швидкої готовності до руху.

У випадку змінних навантажень важливим є показник динамічної стійкості дизель-генераторної установки, що характеризує її здатність утримувати частоту і напругу у допустимих межах при різких змінах навантаження. Для досягнення високої динамічної стійкості використовуються системи автоматичного регулювання частоти обертання двигуна, електронні регулятори збудження генератора, а також пристрої згладжування пікових навантажень за допомогою накопичувачів енергії.

Надійність дизель-генераторних установок є ще одним критично важливим аспектом їхнього функціонування в умовах автономної експлуатації рухомого складу. Показники надійності визначають не тільки технічну придатність установки до виконання своїх функцій протягом заданого часу без відмов, але і значною мірою впливають на економічну ефективність експлуатації, вартість технічного обслуговування і ремонтів, а також загальну безпеку руху.

Основними кількісними характеристиками надійності дизель-генераторної установки є середнє напрацювання на відмову (MTBF), середній час відновлення (MTTR), інтенсивність відмов (λ) і коефіцієнт готовності (Кг). Кожен із цих параметрів відображає окремі сторони надійності установки і разом дозволяє комплексно оцінити її експлуатаційні можливості [30].

Середнє напрацювання на відмову (MTBF) визначає середню кількість годин роботи установки між двома послідовними відмовами. У сучасних дизель-генераторних установках цей показник залежить від якості виготовлення, умов експлуатації, рівня обслуговування і може становити від 10 000 до 20 000 годин для високотехнологічних агрегатів. Підвищення значення MTBF досягається шляхом удосконалення конструктивних рішень, застосування високоякісних матеріалів, впровадження систем моніторингу технічного стану та діагностики на основі аналізу робочих параметрів.

Середній час відновлення (MTTR) відображає середню тривалість часу, необхідного для відновлення працездатності дизель-генераторної установки після настання відмови. Значення MTTR залежить від конструктивної зручності обслуговування, доступності запасних частин, кваліфікації персоналу та організації ремонтного процесу. Сучасні тенденції проектування дизель-генераторних установок передбачають мінімізацію MTTR шляхом модульної побудови агрегатів, уніфікації вузлів і спрощення процедур технічного обслуговування.

Інтенсивність відмов (λ) є характеристикою, яка визначає ймовірність виникнення відмови у одиницю часу експлуатації. Високий рівень інтенсивності відмов свідчить про нестійкість агрегата і вимагає застосування заходів щодо підвищення надійності, таких як зміцнення конструкційних елементів, удосконалення систем змащення і охолодження, поліпшення якості виготовлення та монтажу [31].

Коефіцієнт готовності (K_r) визначається як відношення часу справного стану установки до сумарного часу, що включає як час роботи, так і час простоїв унаслідок відмов і ремонту. Високе значення коефіцієнта готовності (не менше 0,95–0,98 для сучасних ДГУ) є необхідною умовою забезпечення безперервної експлуатації автономного рухомого складу, особливо в умовах інтенсивної експлуатації на далекій магістральній мережі або у важкодоступних районах.

Розгляд надійності дизель-генераторної установки потребує також аналізу структури відмов, тобто визначення основних елементів, від яких найчастіше походять несправності. Статистичні дані свідчать, що близько 50–60 % усіх відмов ДГУ пов'язані з проблемами дизельного двигуна, зокрема з системами впорскування палива, турбонаддуву, охолодження і змащення. Близько 20–25 % відмов стосуються електричних компонентів генератора, особливо обмоток і систем регулювання збудження. Решта відмов припадає на допоміжні системи: системи запуску, живлення, керування та діагностики.

Особливого значення набуває впровадження концепції передиктивного обслуговування, що базується на аналізі великих обсягів експлуатаційних даних із використанням методів штучного інтелекту і машинного навчання. Передиктивні системи дозволяють виявляти ранні ознаки деградації окремих компонентів і прогнозувати ймовірність настання відмови задовго до її фактичного виникнення, що дозволяє планувати ремонтні роботи заздалегідь і мінімізувати ризики незапланованих простоїв.

Ще одним важливим аспектом оцінки енергетичних характеристик і надійності дизель-генераторних установок є аналіз їх терміну служби та ресурсних характеристик. Термін служби дизель-генераторної установки визначається сумарним напрацюванням агрегата до досягнення граничного технічного стану, при якому подальша експлуатація стає економічно недоцільною або небезпечною через ризик раптової відмови [32].

Для дизель-генераторних установок автономного рухомого складу типовим є термін служби у межах 20–25 років при середньорічному напрацюванні 4 000–6 000 годин. При цьому ресурс окремих компонентів – дизельного двигуна, генератора, систем змащення і охолодження – має бути узгоджений таким чином, щоб забезпечити максимальну тривалість експлуатації без необхідності капітального ремонту.

Ресурс дизельного двигуна без капітального ремонту у сучасних установках складає від 25 000 до 40 000 мотогодин, залежно від конструктивних особливостей, якості обслуговування, умов експлуатації та

застосованих технічних рішень. Досягнення таких показників ресурсної надійності стало можливим завдяки використанню високоміцних матеріалів, удосконаленню технологій виготовлення деталей (наприклад, впровадження лазерної обробки поверхонь), застосуванню сучасних мастил з покращеними антифрикційними властивостями.

Генератори дизель-генераторних установок, як правило, мають ресурс, співставний або навіть вищий за ресурс двигуна, оскільки при правильному проектуванні і експлуатації електричні машини зазнають менших механічних навантажень. Основними факторами, що обмежують ресурс генератора, є старіння ізоляції обмоток, деградація підшипників ротора, зношування контактних вузлів системи збудження.



Рис. 1.1. Структура відмов систем дизель-генераторних установок тепловозів

Найбільшу частку становлять відмови електричної системи – 30%, що свідчить про її підвищену вразливість та критичне значення для стабільної

роботи установки. Другою за поширеністю є паливна система з показником 25%, що вказує на суттєвий внесок несправностей паливоподачі у загальний рівень відмов. Механічні відмови становлять 20 % і відображають зношування або пошкодження рухомих вузлів генераторного комплексу. Відмови системи охолодження досягають 15 %, що може бути наслідком перегрівання або недостатньої ефективності тепловідведення. Найменший відсоток припадає на систему запуску та інші категорії, по 5 % кожна, що свідчить про їх порівняно високу надійність або меншу кількість зафіксованих інцидентів. Загалом діаграма демонструє, що найбільші ризики експлуатаційних збоїв зосереджені в електричній та паливній підсистемах, що визначає пріоритетність їх регулярного технічного обслуговування та контролю стану.

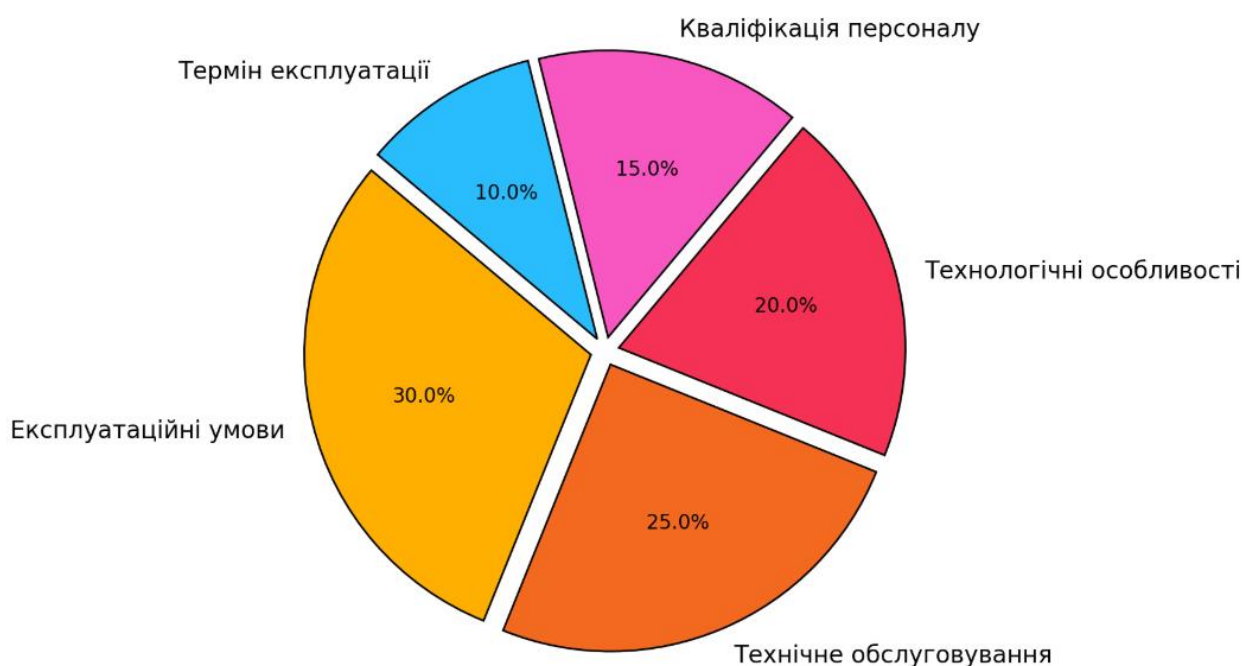


Рис. 1.2. Фактори, що впливають на відмови дизель-генераторних установок тепловозів

Удосконалення ресурсних характеристик дизель-генераторних установок досягається також шляхом впровадження систем управління навантаженням, які дозволяють уникати перевантаження агрегатів, а також за

рахунок забезпечення рівномірного розподілу навантаження між окремими ДГУ у складі мультиагрегатних енергетичних систем.

Особливої уваги потребує аналіз умов експлуатації, які істотно впливають як на енергетичні характеристики, так і на показники надійності. Дизель-генераторні установки автономного рухомого складу працюють у надзвичайно різноманітних умовах: від високогірних районів із розрідженим повітрям до регіонів із високою вологістю і температурними екстремумами. Такі умови призводять до додаткових навантажень на системи охолодження, наддуву, мастила та паливоподачі.

Найбільшу частку займають експлуатаційні умови – 30 %, що свідчить про вирішальне значення дотримання належного режиму роботи обладнання. На другому місці перебуває якість технічного обслуговування з показником 25 %, що підкреслює критичну роль своєчасного та повного виконання регламентних робіт. Технологічні особливості обладнання становлять 20 %, що вказує на залежність надійності від конструктивних рішень та специфіки виготовлення. Кваліфікація персоналу оцінена у 15 %, що демонструє вплив рівня підготовки та досвіду обслуговчого персоналу на загальний рівень безвідмовності. Найменшу частку – 10 % – займає термін експлуатації, що свідчить про поступове, але менш суттєве зростання ймовірності відмов із віком обладнання порівняно з іншими чинниками. Загалом діаграма підкреслює провідну роль умов експлуатації та якості технічного обслуговування у забезпеченні надійної роботи дизель-генераторних установок тепловозів.

Відповідно до цих викликів, сучасні дизель-генераторні установки проектується з урахуванням можливості роботи у широкому діапазоні кліматичних умов. Для цього впроваджуються системи автоматичного регулювання подачі повітря і палива залежно від висоти над рівнем моря, застосовуються високоефективні системи охолодження із змінною продуктивністю вентиляторів, використовуються мастильні матеріали з розширеними температурними інтервалами експлуатації.

Поглиблений аналіз енергетичних характеристик і показників надійності дизель-генераторних установок дозволяє також виявити важливу взаємозалежність між експлуатаційними параметрами агрегатів і їхнім впливом на довкілля. Сучасні концепції розвитку автономного рухомого складу висувають жорсткі вимоги до екологічної безпеки експлуатації, що, у свою чергу, безпосередньо пов'язане з рівнем енергоефективності та надійності дизель-генераторних установок.

Особливо слід відзначити, що нестабільність режимів роботи дизельного двигуна, пов'язана із зношенням компонентів, засміченням систем упорскування або охолодження, може призвести до різкого збільшення рівня шкідливих викидів. Тому своєчасне технічне обслуговування, діагностика і заміна зношених елементів є не тільки засобом підтримання енергетичних характеристик на високому рівні, але й необхідною умовою дотримання екологічних стандартів.

Впровадження інтелектуальних систем моніторингу і керування на базі штучного інтелекту відкриває нові можливості для підвищення енергетичної ефективності і надійності дизель-генераторних установок. Такі системи здатні у реальному часі аналізувати великий обсяг експлуатаційних даних, виявляти аномалії у роботі, прогнозувати зміну режимів та автоматично коригувати параметри роботи агрегатів для забезпечення оптимальної ефективності і довговічності.

Підсумовуючи вищезазначене, можна зробити висновок, що енергетичні характеристики та показники надійності дизель-генераторних установок автономного рухомого складу є взаємопов'язаними аспектами, які визначають технічну і економічну ефективність експлуатації транспортних засобів. Підвищення енергоефективності сприяє зменшенню витрат палива і шкідливих викидів, а забезпечення високої надійності мінімізує ризики позапланових відмов і підвищує безпеку руху.

У сучасних умовах розвитку транспорту і зростання вимог до екологічності та економічності особливої актуальності набувають

дослідження і впровадження новітніх технологій вдосконалення дизель-генераторних установок, що базуються на комплексному підході до оптимізації енергетичних процесів, забезпечення високої надійності агрегатів і впровадження інтелектуальних систем моніторингу та керування.

1.4. Виклики та проблеми сучасних дизель-генераторних установок

Попри суттєвий прогрес у розвитку дизель-генераторних установок (ДГУ) для автономного рухомого складу, їх застосування на сучасному етапі стикається з низкою викликів і проблем, які зумовлені як внутрішніми технічними особливостями даного класу агрегатів, так і зміною зовнішніх умов експлуатації, вимог до екологічності, енергоефективності та економічності транспорту. Аналіз цих викликів є важливою передумовою для формулювання напрямів подальшого удосконалення дизель-генераторних установок.

Одним із найбільш суттєвих викликів є обмеження енергетичної ефективності дизельних двигунів внутрішнього згоряння, які формують основу дизель-генераторних установок. Незважаючи на багаторічні зусилля щодо підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) двигунів, їхній максимальний ККД на практиці залишається на рівні 44–46 %, що означає втрату більше половини хімічної енергії палива у вигляді теплових втрат через вихлопні гази, охолоджуючу рідину та випромінювання. З огляду на обмеження, пов'язані з фундаментальними законами термодинаміки, подальше суттєве підвищення ККД дизельних двигунів є надзвичайно складним завданням, що вимагає застосування інноваційних технологій утилізації відпрацьованого тепла, когенераційних схем або переходу до альтернативних концепцій енергоперетворення.

Ще одним значущим викликом є екологічні обмеження, які дедалі більше посилюються у всьому світі. Викиди оксидів азоту (NO_x), вуглеводнів (HC), оксиду вуглецю (CO) та твердих частинок (PM), характерні для процесів згоряння дизельного палива, створюють серйозні проблеми для довкілля і здоров'я людей. Відповідно до міжнародних стандартів (EURO VI, EPA Tier 4 та інші), вимоги до рівня викидів постійно підвищуються, що змушує розробників дизель-генераторних установок шукати все нові способи зниження токсичності вихлопу.

Рішення цієї проблеми пов'язане із впровадженням складних систем постобробки вихлопних газів, таких як селективна каталітична нейтралізація (SCR), фільтри твердих частинок (DPF), рециркуляція відпрацьованих газів (EGR) та каталітичні окислювачі. Проте застосування таких систем призводить до ускладнення конструкції дизель-генераторних установок, збільшення їх маси, підвищення вартості виробництва і обслуговування, що створює нові інженерні виклики.

Важливим викликом є також нестабільність режимів роботи дизель-генераторних установок в умовах змінних навантажень, характерних для реальної експлуатації автономного рухомого складу. Часті зміни режимів навантаження супроводжуються погіршенням процесу згоряння, підвищенням питомої витрати палива, зростанням рівня шкідливих викидів та прискоренням зносу агрегатів. Особливо гостро ця проблема проявляється на маневрових локомотивах, рейкових автобусах та інших транспортних засобах, що працюють у міських або приміських умовах з частими стартами і зупинками.

Реалізація таких складних алгоритмів керування потребує розробки високонадійних інтелектуальних систем, здатних в режимі реального часу аналізувати численні параметри та приймати рішення з урахуванням критерію оптимізації. Проте впровадження таких систем супроводжується значними витратами на розробку, тестування та адаптацію до конкретних умов

експлуатації, що створює додаткове навантаження на виробників і операторів рухомого складу.

Не менш серйозною проблемою є підвищення вимог до надійності та доступності дизель-генераторних установок у зв'язку з розширенням сфери їхнього застосування в особливо відповідальних галузях. Зокрема, для тепловозів, що працюють у віддалених або важкодоступних районах, де немає швидкої можливості ремонту або заміни обладнання, відмовостійкість і ремонтпридатність дизель-генераторних установок стають критично важливими характеристиками. Це вимагає розробки систем із високим ступенем самодіагностики, запасом міцності основних агрегатів, модульною архітектурою для швидкої заміни окремих вузлів.

Водночас зростають вимоги до адаптивності дизель-генераторних установок до умов експлуатації. Традиційні системи проектувалися під стандартні умови навантаження, клімату і експлуатаційних сценаріїв. Проте в реальності рухомий склад працює у надзвичайно різноманітних умовах: від пустельних регіонів із високими температурами до арктичних зон із екстремально низькими температурами. Адаптація дизель-генераторних установок до таких змінних умов потребує гнучкості у системах впуску повітря, охолодження, мастила, а також можливості автоматичної зміни параметрів роботи залежно від зовнішнього середовища.

Актуальним викликом є також інформаційна безпека систем керування дизель-генераторними установками. З поширенням цифрових технологій і мережевих засобів обміну даними виникають ризики кіберзагроз, які можуть бути спрямовані на втручання у роботу енергетичних систем транспорту. Враховуючи критичну важливість безперебійного енергопостачання автономного рухомого складу, забезпечення кібербезпеки систем керування ДГУ стає одним із пріоритетних напрямів розвитку.

Окремо слід відзначити проблему економічної доцільності впровадження нових технологій у дизель-генераторних установках. Хоча більшість інновацій спрямовані на підвищення енергоефективності, зниження

викидів і підвищення надійності, вони часто супроводжуються значним збільшенням вартості виготовлення і обслуговування агрегатів. Це створює дилему для операторів транспорту: з одного боку, нові технології дозволяють зменшити експлуатаційні витрати у довгостроковій перспективі, а з іншого – вимагають великих первинних інвестицій, що не завжди є прийнятним варіантом в умовах обмежених фінансових ресурсів.

Таким чином, розвиток дизель-генераторних установок у сучасних умовах стикається із комплексом проблем, що охоплюють технічні, економічні, екологічні і безпекові аспекти. Кожен із цих викликів потребує системного аналізу і пошуку збалансованих рішень, які забезпечать подальше удосконалення даного класу енергетичних агрегатів та їхню інтеграцію у майбутні транспортні системи.

Окрему групу проблем складають виклики щодо систем технічного обслуговування і ремонту дизель-генераторних установок, що стають все більш складними і високотехнологічними. Зростання рівня автоматизації і електронізації установок призводить до того, що для їх обслуговування потрібен висококваліфікований персонал, спеціалізоване діагностичне обладнання і спеціальні умови проведення ремонтних робіт. У багатьох випадках це підвищує вартість обслуговування і створює додаткові труднощі у віддалених регіонах.

Проблеми організації ефективного технічного обслуговування також пов'язані з необхідністю своєчасного постачання запасних частин і витратних матеріалів, що може бути ускладнено логістичними обмеженнями або політичними ризиками у певних регіонах.

Значним викликом є також забезпечення життєвого циклу дизель-генераторних установок з точки зору економіки заміщення агрегатів. У багатьох випадках заміна або модернізація ДГУ обходиться дорожче, ніж первинна вартість нової установки, що створює питання економічної доцільності капітальних ремонтів або продовження терміну служби морально застарілих систем.

На додачу, важливою проблемою є забезпечення стійкості дизель-генераторних установок до зовнішніх впливів, зокрема до ударних навантажень, вібрацій, пилу, вологи, низьких та високих температур. Для транспорту, що працює у важких умовах експлуатації, недостатня стійкість агрегатів до механічних та кліматичних впливів може призводити до прискореного зносу, відмов систем і підвищення витрат на обслуговування.

Ще однією проблемою є забезпечення високої якості вироблюваної електроенергії. У сучасних умовах автономний рухомий склад має велику кількість електронних систем і пристроїв, чутливих до параметрів живлення. Флуктуації напруги і частоти, наявність гармонік, неякісне згладжування струму можуть призводити до збоїв у роботі систем управління, зв'язку та безпеки руху. Для забезпечення стабільності параметрів електроенергії необхідно впроваджувати високоефективні системи регулювання, активні фільтри гармонік, стабілізатори напруги та частоти.

Проблемою також є обмежена гнучкість традиційних дизель-генераторних установок у відповідь на зміни профілю навантаження. Установки, розраховані на роботу при стабільних або плавно змінних навантаженнях, виявляють низьку ефективність при частих різких коливаннях навантаження, характерних для міських умов експлуатації або маневрової роботи. Це вимагає розробки спеціальних режимів роботи, застосування буферних накопичувачів енергії і адаптивних систем керування для згладжування пікових навантажень і підвищення загальної енергоефективності [34].

Особливо гостро стоїть питання ресурсозбереження у сфері дизель-генераторних установок. Сучасні вимоги до сталого розвитку транспорту вимагають мінімізації використання дефіцитних матеріалів, зниження енерговитрат на виробництво і обслуговування агрегатів, а також максимальної утилізації компонентів після закінчення терміну служби. Це вимагає застосування новітніх технологій проектування за критеріями енерго-

і ресурсоефективності, використання перероблених матеріалів, розробки схем розбірних конструкцій для спрощення рециклінгу.

Проблемою є також несприятливі економічні умови для швидкої модернізації парку дизель-генераторних установок. Багато залізничних операторів стикаються із фінансовими труднощами, що унеможливають масову заміну застарілих ДГУ на нові вискооефективні агрегати. У результаті на практиці часто продовжують експлуатувати морально і фізично зношені установки, що призводить до зростання витрат на паливо і технічне обслуговування, підвищення ризику відмов і негативного впливу на довкілля.

На фоні цих викликів особливої актуальності набуває розробка програм модернізації і реконструкції існуючих дизель-генераторних установок, які дозволяють за відносно невеликі витрати підвищити їх енергоефективність, зменшити рівень викидів шкідливих речовин, продовжити ресурс експлуатації і знизити загальні експлуатаційні витрати.

У підсумку можна констатувати, що проблематика розвитку дизель-генераторних установок є надзвичайно багатогранною і комплексною. Вирішення існуючих викликів потребує системного підходу, що охоплює технічні, організаційні, економічні та екологічні аспекти. Тільки інтегроване вирішення проблем дозволить забезпечити створення ефективних, надійних, екологічно безпечних і економічно доцільних дизель-генераторних установок для автономного рухомого складу майбутнього.

Висновки до розділу 1

У результаті проведеного аналізу типових конструкцій, технологічної еволюції, енергетичних характеристик, показників надійності та сучасних викликів у сфері дизель-генераторних установок автономного рухомого

складу сформовано цілісне уявлення про сучасний стан розвитку цієї техніки, її проблематику та перспективи подальшого удосконалення.

Встановлено, що дизель-генераторні установки залишаються ключовими елементами автономного рухомого складу, забезпечуючи перетворення хімічної енергії палива у електричну енергію для тяги та живлення допоміжних систем. Основні конструктивні рішення, що застосовуються у сучасних ДГУ, базуються на використанні чотиритактних дизельних двигунів із турбонаддувом, синхронних генераторів, систем електронного упорскування палива типу Common Rail, автоматизованих систем керування та діагностики.

Еволюція дизель-генераторних установок характеризується поступовим переходом від простих механічних систем до комплексних інтелектуальних агрегатів із високим ступенем автоматизації, оптимізованими процесами енергоперетворення, вдосконаленими екологічними характеристиками та інтеграцією гібридних технологій. Водночас розвиток технологій супроводжується впровадженням новітніх матеріалів, цифрових систем моделювання та діагностики, що суттєво підвищує енергоефективність і надійність ДГУ.

Аналіз енергетичних характеристик показав, що питомі витрати палива сучасних дизель-генераторних установок становлять 195–220 г/кВт·год при номінальному навантаженні, а ККД досягає 44–46 %. Однак реальні умови експлуатації, пов'язані зі змінними навантаженнями та нестабільними режимами роботи, призводять до зростання питомих витрат палива та зниження ефективності. Надійність ДГУ визначається такими показниками, як середній напрацювання на відмову (MTBF) у межах 10 000–20 000 годин, середній час відновлення (MTTR), інтенсивність відмов та коефіцієнт готовності понад 0,95.

Окрему увагу приділено викликам і проблемам сучасного розвитку дизель-генераторних установок. Серед основних викликів виділено обмеження енергетичної ефективності, жорсткі екологічні норми щодо

викидів шкідливих речовин, складність адаптації до змінних режимів навантаження, зношування та старіння матеріалів, інтеграцію альтернативних палив, кібербезпеку, необхідність підвищення гнучкості і інтеграції з енергетичними системами рухомого складу.

Установлено, що вирішення означених проблем потребує системного підходу, що включає розробку нових конструктивних рішень, удосконалення систем керування, впровадження високоефективних технологій очищення вихлопних газів, використання інноваційних матеріалів, розвиток концепцій енергетичної гібридизації та інтеграції з альтернативними джерелами енергії.

Таким чином, результати проведеного аналізу формують науково-технічну базу для визначення пріоритетних напрямів удосконалення дизель-генераторних установок автономного рухомого складу, що стане основою для розробки нових технологій, спрямованих на підвищення їх енергоефективності, надійності, екологічності та економічної доцільності в умовах сучасних і перспективних вимог до транспортних систем.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ І РЕЖИМІВ РОБОТИ ДИЗЕЛЬ- ГЕНЕРАТОРНИХ УСТАНОВОК АВТОНОМНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

2.1. Аналіз режимів роботи дизель-генераторних установок в умовах автономного руху

Дизель-генераторні установки, що використовуються у складі автономного рухомого складу, функціонують у специфічних режимах, які значною мірою відрізняються від умов експлуатації стаціонарних енергетичних агрегатів або промислових дизель-генераторних систем. Динаміка руху, змінний профіль шляху, а також часті пуски та зупинки призводять до істотного варіювання навантаження, обертальної частоти двигуна і параметрів генератора [35, 36].

Основним фактором, що визначає специфіку режиму роботи дизель-генераторної установки у транспортному середовищі, є циклічність навантаження. Цей параметр залежить від зміни швидкості руху, конфігурації профілю шляху (зокрема, наявності підйомів і спусків), а також умов маневрування та перемикання режимів тяги.

Для кількісної оцінки навантаження в реальних умовах експлуатації використовується функціональна залежність потужності у часі

$$P(t) = f(v(t), \alpha(t), m(t)) \quad (2.1)$$

де $P(t)$ – миттєва потужність, яку повинна забезпечити установка,

$v(t)$ – швидкість руху у момент часу t ,

$\alpha(t)$ – ухил шляху,

$m(t)$ – поточна маса складу.

Крім цього, характер навантаження доцільно описати через коефіцієнт змінності потужності

$$K_{зм} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [P(t) - \bar{P}]^2 dt}}{\bar{P}} \quad (2.2)$$

де $\bar{P}$ – середнє навантаження за інтервал часу T .

Високі значення $K_{зм}$ свідчать про значну варіабельність енергетичних процесів, що ускладнює стабільну роботу двигуна та генератора.

Режими функціонування дизель-генераторних установок у складі автономного рухомого складу умовно класифікуються за характером навантаження і стабільністю параметрів. Основними серед них є стаціонарний, перехідний, холостий, піковий та маневровий режими.

У стаціонарному режимі дизельний двигун та генератор працюють з відносно постійним навантаженням протягом тривалого часу. Така експлуатаційна ситуація характерна для рівнинного профілю шляху і сталої швидкості руху. За цих умов забезпечується найвищий рівень паливної ефективності, що виражається через максимальний коефіцієнт корисної дії:

$$\eta_{ст} = \frac{P_{вих}}{B(P_{вих})} \quad (2.3)$$

де $P_{вих}$ – вихідна потужність генератора,

$B(P_{вих})$ – витрата палива при відповідному навантаженні.

При цьому спостерігається мінімальне зношування агрегатів і тривалий ресурс роботи.

У перехідних режимах, що виникають під час прискорень, гальмувань або подолання підйомів, система перебуває у нестационарному стані, в якому обертальна частота, тиск наддуву та температура згоряння змінюються з

високою швидкістю. Ці процеси описуються за допомогою диференціальних рівнянь

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{дв}(t) - M_{н}(t) \quad (2.4)$$

де J – момент інерції системи,

ω – кутова швидкість обертання вала,

$M_{дв}$ – момент, який створює двигун,

$M_{н}$ – момент навантаження.

У перехідних станах також має місце зростання рівня викидів шкідливих речовин та зниження загального ККД.

Холостий режим реалізується при відсутності зовнішнього навантаження, зокрема під час тривалих зупинок або очікувань. Паливна ефективність у цьому випадку різко знижується

$$\eta_{х} = \frac{P_{мін}}{B(P_{мін})} \ll \eta_{ст} \quad (2.5)$$

де $P_{мін}$ – незначне або нульове навантаження, а витрати палива залишаються порівняно високими через постійне обертання механізмів двигуна.

Піковий режим характеризується короткочасним, але інтенсивним навантаженням. Такий стан виникає, наприклад, при рушанні складу або аварійному прискоренні. Він супроводжується різким зростанням механічного і теплового навантаження. У цьому випадку критичним є контроль температурних параметрів

$$\sigma_T = \frac{T_{факт}}{T_{доп}} \quad (2.6)$$

де $T_{факт}$ – поточна температура агрегатів,

$T_{доп}$ – допустима межа.

Значення $\sigma_T > 1$ свідчить про перевищення теплового ресурсу та потенційну небезпеку виходу з ладу.

Маневровий режим відзначається значною частотою змін швидкості та напрямку руху, частими пусками та зупинками. Енергетичні характеристики в такому режимі погіршуються через нестабільність навантаження, що збільшує питомі витрати палива та прискорює зношення компонентів.

Аналіз реальних експлуатаційних умов демонструє, що переважну частину часу дизель-генераторні установки автономного рухомого складу функціонують не в оптимальному стаціонарному режимі, а в умовах перехідних, холостих або маневрових режимів. Це зумовлює зниження середнього коефіцієнта корисної дії в порівнянні з номінальними значеннями, розрахованими при постійному навантаженні [37].

Високі значення $\gamma(t)$ є критичними для роботи таких систем, як паливна апаратура, турбонаддув та система електричного збудження генератора. У випадках різкого зростання навантаження спостерігаються такі явища, як провал тиску наддуву, збільшення збагачення паливної суміші, підвищення димності вихлопних газів та збільшення концентрації оксидів вуглецю і незгорілих вуглеводнів.

У протилежному випадку, тобто при швидкому зниженні навантаження, відбувається зниження температури згоряння, що сприяє утворенню оксидів азоту в умовах неповного згоряння. Таким чином, режимна нестабільність прямо пов'язана з екологічними параметрами експлуатації ДГУ.

Отже, динамічні характеристики навантаження, які проявляються через амплітуду та частоту зміни потужності, мають суттєвий вплив на ефективність і екологічність дизель-генераторних установок. Їх урахування є обов'язковим при розробці моделей режимів роботи [38-40].

Особливості профілю шляху мають безпосередній вплив на формування тягового навантаження, яке передається на дизель-генераторну установку. На підйомах зростає потреба в потужності для компенсації сили тяжіння, яка діє проти напрямку руху. Сумарна тягово-опірна сила визначається як:

$$F_{\Sigma} = F_{\text{тертя}} + F_{\text{аеро}} + F_{\text{проф}} = \mu mg + \frac{1}{2} C_d \rho A v^2 + mg \sin \alpha \quad (2.7)$$

де μ – коефіцієнт тертя кочення;

m – маса складу;

g – прискорення вільного падіння;

C_d – коефіцієнт лобового опору;

ρ – густина повітря;

A – площа лобової поверхні;

v – швидкість руху;

α – кут ухилу профілю.

Потужність, необхідна для подолання цього опору на ділянці підйому, визначається виразом:

$$\Delta P(t) = P_m(t) - P_p(t) \quad (2.8)$$

Режим руху, тобто тип експлуатаційного сценарію (маневровий, магістральний, циклічний), істотно впливає на характер роботи дизель-генераторної установки. У маневровому режимі, який характеризується частими зупинками, змінами швидкості та напрямку руху, двигун здебільшого працює на холостому ході або в умовах часткового навантаження. Це призводить до зниження паливної економічності та зростання питомої витрати палива.

Середній ККД в таких умовах можна подати як зважене середнє:

$$\eta_{\text{сеп}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n B(P_i) \cdot \Delta t_i} \quad (2.9)$$

де P_i – потужність у i -й фазі руху,

Δt_i – її тривалість,

$B(P_i)$ – витрата палива відповідно до навантаження.

Навпаки, при магістральному русі за рівнинних умов переважають тривалі періоди стабільного руху з малими коливаннями навантаження. У такому випадку дизель-генераторна установка функціонує близько до оптимального режиму, що дозволяє досягти високої енергоефективності та тривалого ресурсу агрегатів.

Окрему роль у зміні режимів відіграє стан колійної інфраструктури. За наявності нерівностей, поганого стану баласту або колійного полотна зростає величина механічних впливів на рухомий склад. Це, у свою чергу, викликає додаткові втрати на подолання опору шляху

$$F_{\text{доп}} = k_{\text{нер}} \cdot m \cdot g \quad (2.10)$$

де $k_{\text{нер}}$ – емпіричний коефіцієнт, що враховує додаткові втрати через нерівності.

Зростання цієї сили призводить до підвищення середнього навантаження на ДГУ та збільшення витрат палива, особливо у режимах частого гальмування та розгону [37-42].

Таким чином, режим руху та стан інфраструктури визначають як часову структуру навантаження, так і амплітуду коливань потужності, що має бути враховано при побудові адаптивних моделей управління ДГУ.

Характер навантаження, що покладається на дизель-генераторну установку, визначається кількома ключовими параметрами, серед яких провідну роль відіграє маса поїзда, кількість вагонів, аеродинамічні властивості складу та їхній вплив на тягові зусилля. Зі збільшенням загальної маси складу спостерігається пропорційне зростання навантаження на дизель-генераторну установку. Тягове зусилля в цьому випадку визначається як:

$$F_{тяг} = \mu mg + F_{аеро} = \mu mg + \frac{1}{2} C_d \rho A v^2 \quad (2.11)$$

Кліматичні умови експлуатації дизель-генераторних установок чинять суттєвий вплив на ефективність та стабільність їх роботи. Основними зовнішніми параметрами, які слід враховувати при аналізі, є температура навколишнього середовища, вологість повітря та атмосферний тиск.

Зниження температури повітря спричиняє підвищення в'язкості палива і мастильних матеріалів, що ускладнює процеси пуску та збільшує втрати на механічне тертя. Високі температури, навпаки, створюють труднощі в системах охолодження, що веде до ризику перегріву двигуна.

Корекція номінальної потужності установки відповідно до кліматичних умов описується через модифіковану потужність:

$$P_{реал} = P_{ном} \cdot (1 - k_T(T - T_0) - k_H(h - h_0)) \quad (2.12)$$

де: $P_{реал}$ – реальна потужність, яку здатна забезпечити установка,

$P_{ном}$ – номінальна потужність при стандартних умовах ($T_0=25^\circ\text{C}$, $h_0=0$ м),

k_T – температурний коефіцієнт зниження потужності,

k_H – коефіцієнт впливу висоти над рівнем моря.

У процесі аналізу режимів роботи дизель-генераторних установок значну роль відіграє математичне моделювання енергетичних параметрів та їх зміни у часі. Такий підхід дозволяє як описати фактичні процеси, так і здійснювати прогнозування поведінки системи за різних умов експлуатації.

Базовим підходом є використання системи диференціальних рівнянь, яка моделює динаміку тягового руху та відповідні потужнісні навантаження:

$$\begin{cases} m \frac{dv}{dt} = F_{\partial s}(t) - F_{onip}(t) \\ P(t) = \frac{F_{\partial s}(t) \cdot v(t)}{\eta(t)} \end{cases} \quad (2.13)$$

де $v(t)$ – швидкість руху складу,

$F_{\partial s}(t)$ – тягове зусилля, яке реалізується силовою установкою,

$F_{onip}(t)$ – сумарна сила опору руху,

$P(t)$ – потужність, яку має забезпечити ДГУ у момент часу t ,

$\eta(t)$ – поточний ККД передачі потужності.

Для побудови часових графіків зміни навантаження використовується чисельна інтеграція за типом методу Ейлера або Рунге-Кутти. Це дозволяє отримати профілі потужності вздовж заданих маршрутів з урахуванням швидкісного режиму, профілю шляху та маси складу.

Загальне споживання палива за період часу T визначається інтегралом витрат:

$$B_{\text{заг}} = \int_0^T B(P(t)) dt \quad (2.14)$$

де $B(P(t))$ – миттєва питома витрата палива, яка є функцією навантаження.

Такий підхід дозволяє не лише оцінити абсолютні обсяги споживання, але й виявити неефективні ділянки руху, де витрати перевищують нормативні значення.

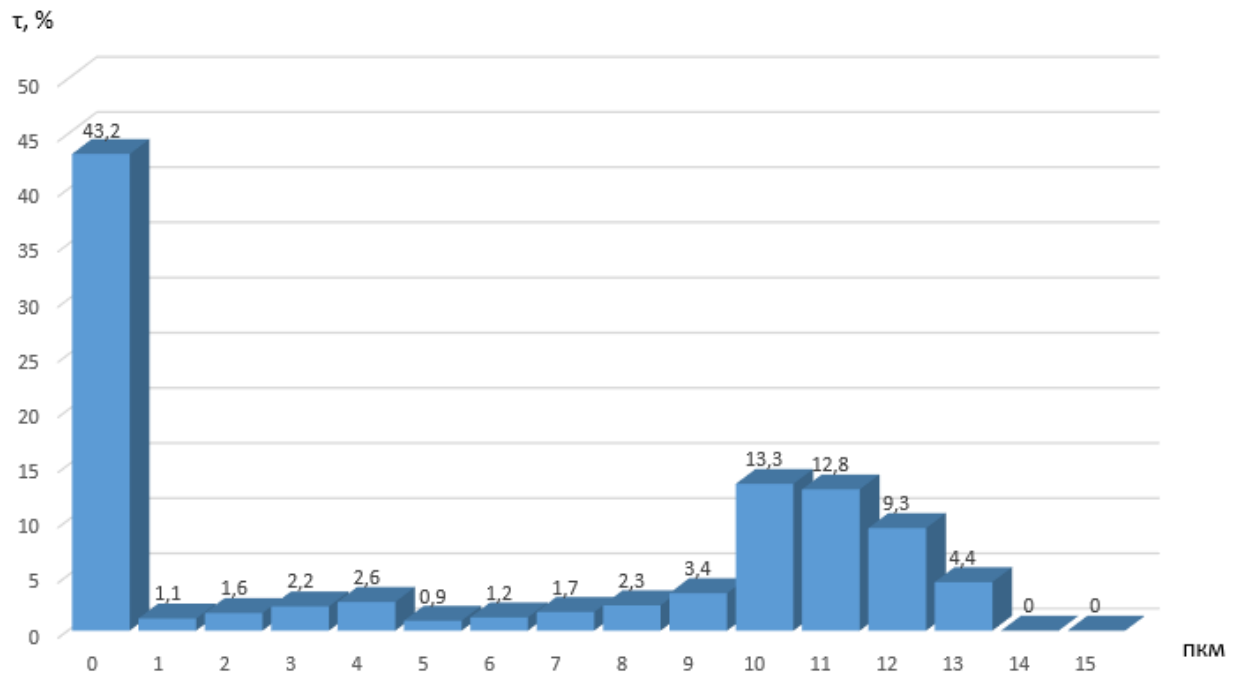


Рис. 2.1. Розподіл відносного часу роботи по позиціях контролера машиніста тепловоза 2ТЕ10

Розподіл часу роботи тепловоза за позиціями контролера машиніста (ПКМ) свідчить про наявність чітко вираженої тенденції до переважного перебування в нейтральному режимі та активного використання середньо-високих тягових положень при мінімальному залученні крайніх діапазонів регулювання.

Найбільша частка загального часу експлуатації припадає на позицію 0, яка становить 43,2%. Такий показник є характерним для режимів простою, холостого ходу або очікування, коли тягові зусилля відсутні. Це вказує на значну тривалість непрацюючого стану тягового обладнання протягом робочого циклу, що є типовим для маневрової або роздільної роботи тепловоза, коли між активними фазами руху наявні паузи без навантаження.

Позиції від 1 до 9 характеризуються суттєво нижчими значеннями, які коливаються в межах від 0,9% до 3,4%. Такий розподіл свідчить про епізодичне та нетривале використання режимів малої тяги. Імовірно, ці положення контролера застосовувалися лише під час розгону поїзда, точного

підведення під навантаження або в момент короточасних змін швидкості. Зазначене може вказувати на оптимізацію енергоспоживання або особливості профілю колії, які не потребують тривалого утримання малих тягових режимів.

Найінтенсивніше використовувалися позиції 10, 11 і 12, на які припадає відповідно 13,3%, 12,8% і 9,3% загального часу роботи. Їх частка в сумі перевищує третину загального часу активної експлуатації тепловоза, що свідчить про стабільну потребу в середньо-високих тягових зусиллях. Такий режим роботи може бути характерним для руху на горизонтальних або слабонахилених ділянках колії, де підтримується постійна швидкість при значному навантаженні. Частка позиції 13 також фіксується, хоча й помітно менша – 4,4%, що вказує на обмежене використання наближеного до максимального режиму тяги.

Позиції 14 і 15 не використовувалися зовсім, що свідчить або про відсутність експлуатаційної необхідності в максимальному тяговому навантаженні, або про наявність обмежень з боку технічного регламенту чи умов безпеки.

У цілому, тепловоз працював із перевагою у нейтральному режимі та з періодичним переходом до стабільної роботи в середньому діапазоні тягового навантаження. Такий профіль роботи вказує на збалансований режим експлуатації без критичних навантажень і з характерними перервами у тязі, що може бути типовим для робочих умов промислових підприємств, маневрових дільниць або допоміжного транспорту на невеликих перегонах.

Розподіл витрати палива тепловозом за позиціями контролера машиніста (ПКМ) демонструє зосередженість споживання енергоносія у вузькому діапазоні середньо-високих тягових режимів, при майже повній відсутності паливної активності на крайніх положеннях контролера.

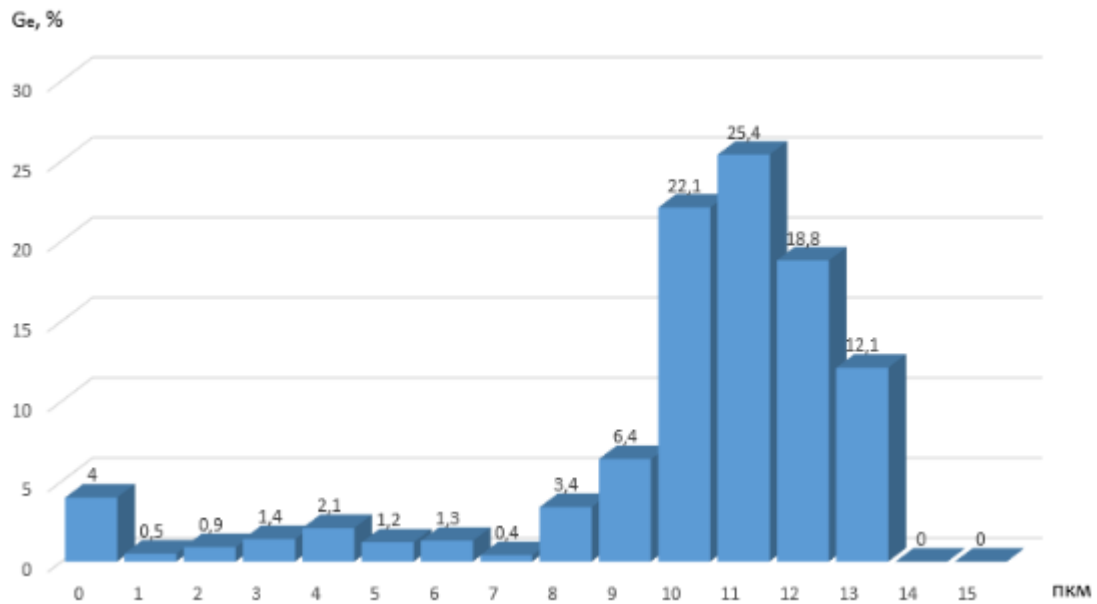


Рис. 2.2. Розподіл відносної витрати палива по позиціях контролера машиніста тепловоза 2ТЕ10

Найвища витрата палива зафіксована на позиціях 10, 11 та 12, які сумарно забезпечують 66,3% загального споживання. Зокрема, на позиції 11 припадає 25,4%, на позиції 10 – 22,1%, а на позиції 12 – 18,8%. Такий розподіл свідчить про домінування тягових режимів середньої та вищої інтенсивності, що забезпечують основну транспортну роботу локомотива. Це підтверджує, що саме ці позиції були основним джерелом тяги під навантаженням, і саме на них двигун функціонував у зонах підвищеного паливного навантаження.

Позиція 13 характеризується зниженням питомої витрати – 12,1%, що свідчить про зменшення ефективності у максимальному діапазоні або коротку тривалість її використання. Позиції 14 та 15 не використовувалися зовсім, що, як і у випадку з часовим розподілом, може бути пов'язано з відсутністю потреби у граничній тязі або з технічними обмеженнями експлуатації.

Позиції від 0 до 9 забезпечили залишкові 33,7% витрати палива. Серед них позиція 0 дала 4%, незважаючи на відсутність тяги, що пояснюється витратами палива на холостий хід дизеля. Позиції з 1 по 9 мають низькі індивідуальні значення – від 0,4% до 6,4%, із поступовим зростанням витрат у напрямку до середніх положень. Такий характер розподілу є типовим і

відповідає зростанню навантаження на двигун при переході з малих до робочих режимів, проте низький відсоток у нижньому діапазоні свідчить про обмежене використання цих положень.

Аналіз розподілу паливної витрати свідчить про експлуатаційну концентрацію тягового навантаження у зоні підвищеної витрати без рівномірного залучення повного діапазону контролера. Такий підхід може призводити до перевантаження окремих режимів двигуна, нераціонального споживання палива та зниження ефективності паливно-енергетичного балансу. Одночасно тривала робота лише в обмеженому діапазоні положень може сприяти нерівномірному зносу вузлів системи подачі палива, турбонагнітача та системи охолодження.

Таким чином, розподіл витрати палива підтверджує основні висновки, отримані при аналізі часової структури роботи, й одночасно виявляє потенціал для підвищення паливної ефективності за рахунок оптимізації режимів керування тягою та більш рівномірного використання робочого діапазону контролера.

Статистичні дані експлуатації автономного рухомого складу свідчать, що приблизно 30–40 % часу ДГУ працюють у діапазоні 30–70 % від номінального навантаження, 20–30 % – у холостому режимі або при мінімальному навантаженні, 10–15 % – у режимах перевищення 90 % потужності, тоді як решта часу припадає на перехідні процеси. Ці дані формують емпіричну основу для математичного оцінювання паливної ефективності.

Таким чином, моделювання навантаження у часі дозволяє провести як аналітичний, так і чисельний аналіз режимів роботи ДГУ та визначити напрями їх подальшої оптимізації.

2.2. Теоретичні основи оптимізації режимів роботи дизель-генераторних установок

Оптимізація режимів роботи дизель-генераторних установок автономного рухомого складу є ключовим завданням, спрямованим на підвищення енергоефективності, зменшення експлуатаційних витрат, подовження ресурсу агрегатів і приведення їхніх характеристик у відповідність до сучасних екологічних вимог. Основна ідея оптимізації полягає у знаходженні таких режимів функціонування, які забезпечують мінімальну витрату палива та викидів, а також зниження динамічних і теплових навантажень при збереженні необхідного рівня енергопостачання.

Ключовими критеріями оптимізації є зниження питомої витрати палива на одиницю виробленої електроенергії (вимірюється в г/кВт·год), підвищення загального коефіцієнта корисної дії установки, зменшення рівня викидів шкідливих речовин у атмосферу, стабілізація електричних параметрів (напруги та частоти), а також зниження динамічних перевантажень, які виникають у перехідних режимах [43-45].

Загальна енергетична ефективність системи оцінюється на основі енергетичного балансу, який може бути представленим у вигляді рівняння:

$$Q_{\text{паливо}} = Q_{\text{корисна}} + Q_{\text{втрати}} \quad (2.15)$$

де $Q_{\text{паливо}}$ – сумарна теплова енергія, яка надходить із паливом,

$Q_{\text{корисна}}$ – частина енергії, перетворена у корисну електричну роботу,

$Q_{\text{втрати}}$ – сукупність втрат, зокрема теплових, механічних, електромагнітних та аеродинамічних.

Центральним елементом теоретичної моделі оптимізації режимів роботи дизель-генераторної установки є залежність питомої витрати палива від навантаження двигуна. Як свідчать експериментальні та емпіричні дані, мінімальна питома витрата досягається у межах 70–85 % від номінального навантаження. При цьому відхилення у бік менших навантажень зумовлює непропорційне зростання питомих витрат, що значно знижує енергетичну ефективність системи.

Типова форма залежності питомої витрати палива від потужності виглядає як

$$sfc(P) = \frac{B(P)}{P} \quad (2.16)$$

де $sfc(P)$ – специфічна витрата палива при потужності P ,

$B(P)$ – миттєва витрата палива,

P – поточна корисна потужність на виході.

Теоретична задача оптимізації формулюється як задача мінімізації функції $sfc(u(t))$, де $u(t)$ – сукупність керуючих дій у часі:

$$\min_{u(t)} sfc(u(t))$$

Оптимізація здійснюється за умови дотримання низки обмежень, які включають:

- забезпечення необхідної потужності:

$$P_{вих}(t) \geq P_{ном}(t)$$

- підтримку допустимих робочих параметрів дизельного двигуна (температури, тиску мастила, частоти обертання),
- відповідність екологічним нормам щодо викидів забруднюючих речовин.

Таким чином, оптимізаційна задача має характер задачі математичного програмування зі змінними у вигляді функцій часу та з багатьма обмеженнями,

що потребує комплексного підходу до її розв'язання, включаючи як аналітичні, так і чисельні методи [46, 47].

Таким чином, оптимізаційна задача має характер задачі математичного програмування зі змінними у вигляді функцій часу та з багатьма обмеженнями, що потребує комплексного підходу до її розв'язання, включаючи як аналітичні, так і чисельні методи.

Оптимізація режимів роботи дизель-генераторної установки неможлива без урахування впливу перехідних процесів, оскільки саме у ці моменти відбуваються найбільші втрати енергії та зростає знос механічних вузлів. Теоретичне моделювання таких режимів базується на аналізі динамічних змін основних параметрів – навантаження, тиску наддуву, температур і частоти обертання колінчастого вала.

Зокрема, динаміка зміни потужності характеризується похідною:

$$\gamma(t) = \frac{dP(t)}{dt} \quad (2.17)$$

Велике значення $\gamma(t)$ свідчить про різке зростання навантаження, що супроводжується відставанням систем наддуву і впорскування палива, зростанням збагачення паливної суміші, а також порушенням теплового балансу. У цих умовах формується режим зниженої ефективності, а також виникає ймовірність перевищення температурних і механічних меж роботи агрегатів.

Для зменшення негативного впливу таких змін необхідно вводити додаткові обмеження у модель оптимізації, зокрема:

$$\left| \frac{dP(t)}{dt} \right| \leq \delta$$

де δ – гранично допустима швидкість зміни потужності, яка визначається конструктивною інерційністю системи.

Розв'язання задачі оптимізації режимів роботи дизель-генераторної установки передбачає застосування різних підходів залежно від складності моделі, структури цільової функції та наявності аналітичного опису об'єкта керування. Методологічна основа формування оптимізаційної процедури включає як класичні аналітичні методи, так і сучасні чисельні та інтелектуальні технології [48-50].

Аналітичні методи ґрунтуються на спрощених математичних моделях процесів, що дозволяє отримати замкнені вирази для оцінки оптимальних режимів. Припускаючи, що питома витрата палива залежить від потужності P у вигляді:

$$sfc(P) = aP^2 + bP + c$$

можна визначити оптимум шляхом знаходження точки мінімуму цієї квадратичної функції. У найпростішому випадку:

$$\frac{dsfc(P)}{dP} = 0 \Rightarrow P_{opt} = -\frac{b}{2a} \quad (2.18)$$

Однак така модель є справедливою лише в обмежених умовах. Для повнішого врахування характеристик системи застосовуються чисельні методи оптимізації, зокрема:

- метод градієнтного спуску,
- метод Ньютона,
- генетичні алгоритми,
- імітаційна оптимізація.

У загальному вигляді чисельна задача має такий вигляд:

$$\min_{u(t)} J = \int_{t_0}^{t_f} L(x(t), u(t), t) dt \quad (2.19)$$

за умов:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t), x(t_0) = x_0$$

де $x(t)$ – вектор стану системи,

$u(t)$ – керуючі дії,

L – функція витрат (наприклад, миттєва витрата палива),

J – функціонал ефективності, який підлягає мінімізації.

Методи машинного навчання, зокрема нейронні мережі, дерева рішень та ансамблеві алгоритми, дозволяють побудувати адаптивні моделі, які не потребують повного аналітичного опису. Такі моделі здатні відтворювати складні нелінійні залежності між режимами роботи та критеріями ефективності на основі історичних даних.

При багатокритеріальному підході використовуються узагальнені функції:

$$J = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot J_i(x) \quad (2.20)$$

де ω_i – вагові коефіцієнти, що відображають важливість кожного критерію J_i .

Таким чином, оптимізаційна модель набуває комплексного вигляду, об'єднуючи декілька підходів до формалізації цільових функцій, способів пошуку оптимуму та методів оцінки результатів.

Одним із перспективних напрямків оптимізації є перехід від традиційних дизель-генераторних систем із фіксованою частотою обертання двигуна до так званих систем із змінною частотою обертання (variable speed generator systems). У класичних системах дизельний двигун підтримує постійну частоту, наприклад $n=1500$ об/хв, що забезпечує генерацію

електроенергії з частотою 50 Гц. Такий режим не завжди є оптимальним з точки зору витрати палива.

У системах зі змінною швидкістю частота обертання двигуна $n(t)$ адаптується до поточного навантаження $P_{\text{потр}}$, тоді як стабілізація частоти струму здійснюється електронними перетворювачами. Такий підхід дозволяє працювати дизелю в точці з мінімальною питомою витратою палива:

$$\min_{n(t)} sfc(n(t), P_{\text{ном}}(t)) \quad (2.21)$$

де sfc – функція питомої витрати палива, залежна від частоти обертання і навантаження.

Залежність питомої витрати палива від n і P моделюється як:

$$sfc(n, P) = a_0 + a_1 P + a_2 n + a_3 P^2 + a_4 n^2 + a_5 nP \quad (2.22)$$

Оптимізація передбачає пошук таких траєкторій зміни $n(t)$, які забезпечують мінімум функції sfc при дотриманні обмежень:

- мінімальної потужності: $P_{\text{вих}}(t) \geq P_{\text{потр}}(t)$,
- температурних та механічних меж роботи двигуна,
- граничної швидкості зміни частоти: $|dn/dt| \leq \delta n$.

Реалізація таких систем потребує складного електронного керування, що включає інвертори, системи збудження генератора та контролери навантаження. У моделях оптимізації враховується також інерція механічної системи

$$J \cdot \frac{dn}{dt} = M_{\text{об}}(t) - M_{\text{нагр}}(t) \quad (2.23)$$

де J – момент інерції,

$M_{\text{об}}$ – крутний момент двигуна,

$M_{\text{нагр}}$ – момент навантаження.

Отже, використання змінної частоти обертання дозволяє знизити витрати палива, зменшити знос двигуна та поліпшити адаптивність системи до реальних режимів експлуатації, що підтверджується численними симуляційними дослідженнями та натурними випробуваннями.

Цифрова модель установки, яка функціонує синхронно з реальною машиною, дозволяє здійснювати обчислення оптимального режиму у реальному часі. При цьому цифровий двійник вирішує оптимізаційну задачу типу:

$$\min_{u \in U} \int_t^{t+T} L(x(\tau), u(\tau)) d\tau \quad (2.24)$$

при обмеженнях:

$$\dot{x}(\tau) = f(x(\tau), u(\tau)), x(t) = x_0$$

де $x(\tau)$ – вектор станів,

$u(\tau)$ – керуючі дії,

U – допустимий простір керувань,

L – критерій витрат.

На основі даних телеметрії модель постійно уточнюється, що дозволяє враховувати фактичний технічний стан установки. змінні кліматичні умови, реальний профіль навантаження.

Контролер приймає рішення щодо корекції керуючих впливів $u(t)$, наприклад, обертів двигуна, часу упорскування, ступеня збудження генератора, на підставі оптимальних параметрів, отриманих від цифрового двійника.

У разі фіксації відхилень

$$\Delta sfc(t) = sfc_{\phi}(t) - sfc_m(t)$$

виконується повторна ідентифікація параметрів моделі з подальшим оновленням оптимізації.

Інтеграція таких систем у реальний рухомий склад дозволяє знизити витрати палива на 8–15 %, зменшити кількість перевищень допустимих температур, продовжити ресурс основного двигуна за рахунок уникнення пікових навантажень, забезпечити відповідність екологічним нормам.

Таким чином, практичне застосування оптимізаційних стратегій на основі математичного моделювання і цифрових технологій відкриває нові можливості для вдосконалення автономних енергетичних систем у транспортній галузі [51-54].

2.3. Наукові принципи вдосконалення конструктивних схем дизель-генераторних установок

Конструктивна схема дизель-генераторної установки (ДГУ) визначає її енергетичні характеристики, показники надійності, ремонтпридатності, масо-габаритні параметри та експлуатаційну ефективність у складі

автономного рухомого складу. Наукові принципи вдосконалення конструктивних рішень передбачають комплексне врахування закономірностей енергетичних процесів, вимог до довговічності агрегатів, сучасних тенденцій розвитку матеріалознавства і технологій машинобудування [55].

Історично конструкції дизель-генераторних установок еволюціонували від простих моноблочних агрегатів до складних інтегрованих систем із багаторівневим управлінням і системною оптимізацією потоків енергії та мас. Проте збереження класичної компоновки – дизельний двигун, безпосередньо з'єднаний із синхронним генератором через муфту, – залишається типовим для більшості реалізацій.

Одним із ключових принципів є підвищення енергетичної щільності дизельного двигуна, яка визначається як відношення потужності до об'єму або маси двигуна. Підвищення енергетичної щільності дозволяє зменшити габарити і масу дизель-генераторної установки при збереженні або підвищенні її потужності, що є особливо актуальним для транспорту, де обмеження за розмірами і масою є критичними.

Важливим напрямом є також вдосконалення системи охолодження дизельного двигуна та генератора. При підвищенні питомої потужності зростає теплове навантаження на агрегати, що потребує забезпечення більш ефективного тепловідведення.

Оптимізація систем наддуву є ще одним фундаментальним принципом удосконалення конструкцій. Турбонаддув дозволяє збільшити масу повітря, що надходить у камеру згоряння, і тим самим підвищити ефективність процесу згоряння без збільшення об'єму циліндрів [53-58].

У контексті наукових принципів вдосконалення конструктивних схем дизель-генераторних установок важливо звернути особливу увагу на оптимізацію систем змащення та фільтрації, оскільки ці системи суттєво впливають на довговічність, надійність та загальну енергоефективність агрегатів. Сучасний рівень навантажень і теплових режимів роботи дизельних

двигунів потребує не лише підтримання необхідного рівня змащення у всьому діапазоні режимів експлуатації, а й динамічного управління цим процесом залежно від змінних умов роботи.

Оптимізація систем змащення передбачає застосування насосів зі змінною продуктивністю, що дозволяє адаптувати витрату мастила до поточних потреб двигуна, мінімізуючи гідравлічні втрати і зменшуючи витрату енергії на привід допоміжних систем. Крім того, розробка багатоконтурних систем, де окремі контури обслуговують найбільш критичні вузли двигуна, дозволяє підвищити надійність у випадках зниження продуктивності основного масляного насоса або виникнення локальних перегрівів. Удосконалення фільтраційних систем також є необхідною умовою підвищення ресурсу агрегатів. Застосування багатоступеневого очищення мастила із використанням сучасних наноструктурованих матеріалів та інтелектуальних індикаторів стану забруднення дозволяє своєчасно виявляти відхилення від нормального режиму і попереджати розвиток критичних ситуацій.

Не менш важливим аспектом є оптимізація систем фільтрації палива, особливо в умовах використання палива із змінними фізико-хімічними характеристиками. Використання вискоефективних сепараторів води, багатоступених паливних фільтрів із високим ступенем очищення, а також засобів онлайн-контролю стану палива дозволяє суттєво знизити ризик пошкодження систем упорскування та забезпечити стабільність параметрів процесу згоряння [56-59].

Удосконалення конструкції генератора дизель-генераторної установки є ще одним пріоритетним напрямком. Сучасні тенденції передбачають створення електричних машин з максимально можливою питомою потужністю і мінімальними втратами енергії. Застосування високотемпературних обмоток із новітніми електроізоляційними матеріалами дозволяє суттєво підвищити термічну стійкість генераторів, а використання передових магнітних матеріалів дає змогу зменшити масу і габарити активних

частин електричних машин. Водночас впровадження систем електронного регулювання збудження генератора дозволяє оперативно адаптувати роботу електричної частини дизель-генераторної установки до змін навантаження без втрати стабільності вихідної напруги та частоти.

Удосконалення компоновки дизель-генераторної установки має критичне значення для забезпечення високої ефективності експлуатації, мінімізації витрат на обслуговування і ремонт. Науково обґрунтовані підходи передбачають перехід до модульної архітектури агрегатів, що дозволяє проводити оперативну заміну пошкоджених вузлів без необхідності демонтажу всієї установки. Уніфікація конструктивних елементів сприяє скороченню номенклатури запасних частин, що позитивно впливає на логістику обслуговування та знижує експлуатаційні витрати. Ретельна оптимізація розташування основних компонентів має забезпечувати легкий доступ до вузлів, що підлягають регламентним роботам, а також ефективну організацію теплових потоків для запобігання перегріву чутливих елементів системи.

2.4. Розробка математичної моделі роботи вдосконаленої дизель-генераторної установки

Створення математичної моделі роботи вдосконаленої дизель-генераторної установки є необхідною умовою для проведення теоретичних досліджень, аналізу ефективності, оптимізації режимів роботи та прогнозування енергетичних і експлуатаційних характеристик агрегату. Математичне моделювання дозволяє описати фізичні процеси, що відбуваються в установці, із врахуванням основних механізмів перетворення енергії, теплових втрат, механічних взаємодій і впливу зовнішніх умов. У сучасній науковій практиці створення моделей такого рівня складності

базується на системному підході, що передбачає побудову сукупності взаємопов'язаних рівнянь, які описують роботу основних підсистем дизель-генераторної установки.

Формально навантаження на ДГУ можна подати як функцію часу

$$P(t) = f(v(t), \alpha(t), m(t), F_{on}(t)) \quad (2.25)$$

Реальна робота дизель-генераторної установки часто відбувається в нестационарному режимі, коли $P(t)$ має високий ступінь змінності. Така ситуація ускладнює забезпечення оптимального теплового та економічного режиму, оскільки двигун може працювати на ділянках з пониженим ККД. Цей ефект характеризується коефіцієнтом змінності навантаження

$$K_{зм} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [P(t) - \bar{P}]^2 dt}}{\bar{P}} \quad (2.26)$$

де $\bar{P}$ – середнє навантаження на інтервалі часу T .

Механічна частина дизельного двигуна включає перетворення тиску робочого тіла у механічну роботу на колінчастому валі, що супроводжується механічними втратами на тертя у циліндро-поршневій групі, підшипниках і допоміжних механізмах. Механічні втрати описуються емпіричними залежностями від частоти обертання двигуна та навантаження [61-65].

Отримана механічна потужність передається на вал генератора, де відбувається подальше перетворення механічної енергії у електричну. Електрична частина моделі включає опис динаміки електричних процесів у обмотках генератора з урахуванням електромагнітних втрат, втрат на вихрові струми і гістерезис у магнітопроводах.

Для опису роботи генератора використовуються рівняння електричних кіл у координатах d-q згідно моделі Паркса, що дозволяє врахувати змінні

режими роботи генератора при змінному навантаженні і швидкості обертання. Рівняння моделі генератора пов'язують напругу на обмотках, струми, потік збудження і частоту обертання ротора.

Системи допоміжного обладнання, такі як системи охолодження, змащення, наддуву і післяобробки вихлопних газів, моделюються у вигляді підсистем із власними балансами енергії і маси. Наприклад, система охолодження описується рівняннями теплопередачі між стінками циліндрів і охолоджуючою рідиною, а також балансом теплової енергії у контурі охолодження.

Для зручності чисельної реалізації модель дизель-генераторної установки поділяється на окремі підсистеми: камера згоряння, механічна передача, генератор, системи охолодження і допоміжні системи. Кожна підсистема моделюється окремо, після чого відбувається інтеграція всіх частин у загальну систему рівнянь.

У рамках моделювання вводяться зовнішні впливи у вигляді навантаження на вал генератора, яке визначається споживачами електроенергії, а також вплив температури навколишнього середовища, атмосферного тиску і в'язкості повітря, що впливають на характеристики наддуву і процеси охолодження [66].

Математична модель дизель-генераторної установки має бути придатною як для аналізу стаціонарних режимів роботи, так і для дослідження динаміки перехідних процесів при зміні навантаження, частоти обертання або інших зовнішніх умов. З цією метою до складу моделі включаються інерційні члени, що враховують накопичення енергії у масивних деталях, рідинах і електромагнітних полях.

Важливою складовою математичної моделі є опис паливної системи високого тиску. Сучасні дизельні двигуни, оснащені системами Common Rail, вимагають моделювання динаміки тиску у паливній рейці, характеристик електромагнітних форсунок, часу відкриття і закриття голки форсунки, а також кількості та режиму уприскування палива за один робочий цикл. Це

дозволяє більш точно відтворити процес формування паливно-повітряної суміші та згоряння, що є критичним для аналізу енергетичних і екологічних характеристик двигуна.

Окремо слід виділити моделювання електричної частини дизель-генераторної установки. Синхронний генератор із незалежним збудженням описується системою рівнянь у $d-q$ координатах, які враховують взаємодію магнітних потоків ротора і статора, динаміку струмів і напруг у фазах, а також вплив зміни навантаження на величину збудження. Рівняння генератора мають бути інтегровані із моделлю регулятора напруги, який підтримує стабільність вихідних електричних параметрів при змінних режимах навантаження та частоти обертання двигуна.

Остаточна форма математичної моделі дизель-генераторної установки являє собою систему зв'язаних нелінійних диференціально-алгебраїчних рівнянь, яка описує роботу всіх основних підсистем і враховує зовнішні впливи. Така модель є базою для проведення чисельного моделювання у середовищах типу MATLAB/Simulink, GT-Suite, AMESim або спеціалізованих пакетах моделювання транспортних енергетичних систем.

Побудована математична модель дизель-генераторної установки дозволяє проводити не тільки аналіз енергетичних характеристик агрегату в стаціонарних режимах, але й дослідження його поведінки у перехідних процесах, що виникають при зміні навантаження, частоти обертання двигуна, температури охолоджуючої рідини та інших зовнішніх і внутрішніх параметрів. Для адекватного відтворення динаміки таких процесів необхідно забезпечити правильну взаємодію усіх підсистем моделі та врахування інерційних ефектів.

Перехідні процеси у дизельному двигуні обумовлені насамперед інерційністю механічних систем, запізненням процесів згоряння, затримкою відповіді паливної системи та зміною тиску у впускному і випускному трактах. Для моделювання механічної частини двигуна вводиться рівняння моменту інерції, яке зв'язує зміну частоти обертання вала з сумарним крутним

моментом на валу, враховуючи момент згоряння, механічні втрати та навантаження від генератора.

Рівняння теплового балансу для двигуна описує зміну внутрішньої енергії робочих органів у функції надходження тепла від процесу згоряння та тепловідведення через систему охолодження, мастило і випромінювання у навколишнє середовище. Додатково враховується накопичення тепла у масивних деталях двигуна, таких як блок циліндрів, головки блока, поршні, що забезпечує реалістичне відображення теплових процесів при різких змінах навантаження.

Електричні процеси у генераторі моделюються шляхом розв'язання системи рівнянь електромагнітного балансу у d - q координатах, що дозволяє точно врахувати інерційність зміни струмів та напруг у обмотках статора і ротора. Для генератора критично важливим є правильне моделювання процесів збудження, оскільки динаміка системи регулювання збудження визначає швидкість реакції дизель-генераторної установки на зміну навантаження і стабільність параметрів електроенергії.

Одним із важливих аспектів побудови повної математичної моделі є також моделювання навантаження, що підключається до генератора. Навантаження може бути представлено як активним, реактивним або змішаним, причому його зміна в часі повинна враховувати реальні профілі споживання енергії, характерні для автономного рухомого складу. Модель навантаження повинна дозволити відтворювати різкі зміни потужності, імпульсні навантаження, тривалі режими низької потужності та інші специфічні ситуації експлуатації.

Взаємодія між дизельним двигуном і генератором моделюється через муфту, яка має певну пружність та інерційні характеристики. У випадках застосування жорсткого з'єднання можливе спрощення моделі до ідеального механічного зв'язку. Проте для реалістичного відображення динаміки перехідних процесів доцільно враховувати пружні деформації муфти, які можуть спричиняти коливальні процеси на валу.

Інтегральна математична модель дизель-генераторної установки повинна забезпечувати можливість проведення як чисельних експериментів зі змінними початковими умовами, так і моделювання різних сценаріїв експлуатації, включаючи аварійні режими, запуск, зупинку агрегату, часті пуски та зупинки, які характерні для автономного рухомого складу. Модель має бути стійкою до змінних параметрів середовища та забезпечувати високу точність відображення реальних процесів на тривалих часових інтервалах.

Важливим є також створення умов для адаптації математичної моделі до конкретних типів дизель-генераторних установок через параметризацію основних характеристик: об'єм циліндрів, кількість циліндрів, тип наддуву, характеристики генератора, параметри системи керування. Такий підхід дозволяє використовувати єдину модель як основу для дослідження широкого класу дизель-генераторних установок із різними конструктивними та енергетичними характеристиками.

2.5 Удосконалення системи збудження збуджувача тягового генератора тепловозів серії 2ТЕ116

Обмотка збудження тягового генератора є навантаженням силового кола системи збудження. У це коло входять збудник, керований випрямний міст і вузол корекції, що включає трансформатор і випрямний міст.

У якості збудника застосований однофазний синхронний генератор змінного струму. Порухення його здійснюється від загального кола живлення електричної схеми управління (від стартер-генератора) і подається на обмотку статора І1-І2. Вихідна змінна напруга збудника з кілець ротора С1-С2 подається на вхід випрямного моста, що керується.

Струм збудження в колі тягового генератора регулюють зміною змінної напруги на виході збудника і напруги випрямлення випрямляча УВВ. Перше

виробляється, як і в тягового генератора, шляхом збільшення частоти обертання ротора збудника при наборі позицій контролера. При тому самому струмі збудження вихідна змінна напруга, що наводиться в обмотці ротора збудника, збільшується пропорційно частоті обертання ротора і досягає на 15-й позиції найбільшого значення.

Витрати енергії на збудження синхронного тягового генератора складаються із витрат енергії на збудження самого синхронного генератора та синхронного збуджувача. Збуджувач призначений для живлення (через напівкерований випрямляч) постійним струмом обмотки збудження тягового генератора. Він відноситься до допоміжних тягових електричних машин і є однофазним синхронним генератором підвищеної частоти, захищеного виконання, з самовентиляцією.

Основним завданням збуджувача є підтримка напруги на вході регулятора збудження тягового генератора залежно від частоти обертів колінчатого валу дизеля.

Система збудження збуджувача (рисунки 2.1) реалізує це за допомогою завдання струму збудження збуджувача панелями опорів і компенсації струму навантаження збуджувача за допомогою трансформатора струму.

Дана система має ряд недоліків:

1. Завдання струму за допомогою резисторів не може забезпечити підтримку напруги збуджувача у всьому діапазоні частот обертання дизеля через нелінійність характеристики намагнічування збудника, технологічного розкиду його параметрів та температурної зміни опорів як задаючих резисторів, так і обмотки збудження збуджувача.

2. Вимагає періодичної перевірки та обслуговування регульованих елементів (задаючих панелей опорів).

3. Живлення обмотки збудження збуджувача здійснюється від бортової мережі або акумуляторної батареї тепловоза.

Для усунення цих недоліків пропонується розробити та впровадити блок регулювання напруги збуджувача типу ВС-650У2 – БРН-В.

При цьому система збудження збудника типу ВС-650У2 наведена на рис. 3.

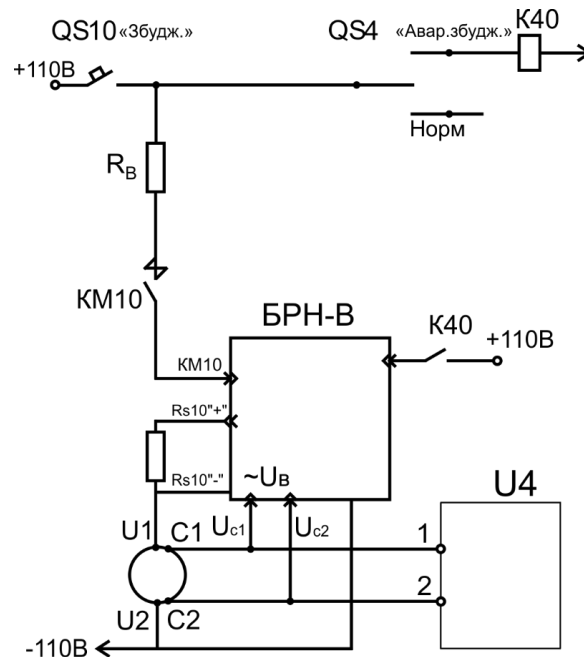


Рис. 2.5. Система збудження збуджувача типу ВС-650У2

Для створення збудження збудника в початковий момент його роботи використана нерегульована панель опорів типу ПС-50137 УХЛ2 (R_B).

Впровадження блоку регулювання напруги збуджувача типу ВС-650У2 – БРН-В забезпечує більш стабільну роботу системи електропередачі тепловоза, підвищуючи її ефективність та надійність.

Виключення зі схеми тепловоза декількох компонентів, таких як блок кремнієвих випрямлячів та панелі опорів, знижує потребу в періодичному технічному обслуговуванні та перевірках.

Новий блок регулювання напруги забезпечує швидкодіючий захист від коротких замикань і перевищення струму, а також індикацію режимів роботи та захисту, що підвищує безпеку експлуатації тепловоза.

Висновки до розділу 2

У другому розділі дисертаційної роботи проведено комплексне теоретичне дослідження режимів роботи дизель-генераторних установок автономного рухомого складу, науково обґрунтовано підходи до вдосконалення їхньої конструкції та режимів роботи, розроблено математичну модель роботи вдосконаленої дизель-генераторної установки та здійснено теоретичне моделювання впливу основних конструктивних і режимних параметрів на її енергетичні характеристики.

Проведений аналіз режимів роботи дизель-генераторних установок виявив характерні особливості експлуатаційних процесів, зокрема широкі коливання навантаження, велику частку перехідних режимів, значний вплив зовнішніх умов на ефективність роботи агрегатів. Це обумовлює необхідність комплексного підходу до оптимізації конструкції і режимів експлуатації установок із врахуванням усіх чинників, що визначають їхню енергетичну ефективність, надійність і довговічність.

Теоретичні основи оптимізації режимів роботи дизель-генераторних установок були розроблені на базі системного аналізу енергетичних процесів, що відбуваються у двигуні, генераторі та допоміжних системах. Основні принципи оптимізації включають мінімізацію питомої витрати палива, зменшення втрат енергії, забезпечення стабільності електричних характеристик, мінімізацію шкідливих викидів та підвищення ресурсу основних агрегатів. Обґрунтовано доцільність використання адаптивних стратегій керування та прогнозного регулювання режимів роботи на основі цифрових моделей і технологій машинного навчання.

Наукові принципи вдосконалення конструктивних схем дизель-генераторних установок передбачають підвищення питомої потужності дизельного двигуна, оптимізацію процесів наддуву і охолодження, вдосконалення систем упорскування палива і електрогенерації, модульність і

ремонтпридатність конструкцій, застосування новітніх матеріалів і технологій виготовлення. Удосконалення систем діагностики, віброакустичної оптимізації і забезпечення екологічної безпеки також є невід'ємною частиною сучасного підходу до проектування агрегатів.

Розроблена математична модель роботи дизель-генераторної установки інтегрує фізичні процеси згоряння палива, теплові й механічні баланси, електромагнітні процеси у генераторі, системи допоміжного обладнання та зовнішні впливи. Модель придатна для дослідження як стаціонарних режимів, так і динаміки перехідних процесів, дозволяє враховувати деградаційні ефекти та адаптуватися до конкретних типів установок через параметризацію.

Теоретичне моделювання впливу конструктивних і режимних параметрів на енергетичні характеристики дизель-генераторної установки дозволило кількісно оцінити роль ступеня стиску, характеристик турбонаддуву, параметрів упорскування палива, властивостей обмоток генератора, а також вплив профілю навантаження, температурних умов і висоти над рівнем моря на загальну ефективність роботи агрегатів. Встановлено, що інтеграція результатів моделювання у процеси оптимізації режимів і конструкції дизель-генераторних установок дозволяє досягти істотного підвищення паливної економічності, зниження рівня шкідливих викидів та подовження ресурсу обладнання.

Отримані теоретичні результати створюють міцну основу для подальшої експериментальної перевірки запропонованих рішень, розробки практичних рекомендацій з удосконалення дизель-генераторних установок і впровадження новітніх технологій у сфері автономного рухомого складу.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ І АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВДОСКОНАЛЕНОЇ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ АВТОНОМНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

3.1. Постановка завдання експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження є невід'ємною частиною наукового обґрунтування теоретичних положень, розроблених у межах даної дисертаційної роботи. Вони дозволяють перевірити адекватність побудованих математичних моделей, підтвердити ефективність запропонованих конструктивних удосконалень дизель-генераторної установки та встановити практичну доцільність реалізації розроблених режимних стратегій в умовах реальної експлуатації автономного рухомого складу. Експериментальні дослідження спрямовані на отримання об'єктивних кількісних оцінок енергетичних характеристик вдосконаленої дизель-генераторної установки при різних конструктивних і режимних параметрах роботи.

Основною метою експериментальних досліджень є встановлення залежностей між конструктивними особливостями дизель-генераторної установки, режимами її роботи та основними енергетичними показниками, зокрема питомою витратою палива, коефіцієнтом корисної дії, величиною шкідливих викидів та термічним станом основних агрегатів. Досягнення цієї мети потребує проведення серії експериментів за чітко визначеними умовами з фіксацією всіх суттєвих впливових факторів та обробкою отриманих даних із використанням сучасних методів математичної статистики [62-65].

Постановка завдання експериментальних досліджень передбачає визначення методик вимірювання основних параметрів роботи дизель-генераторної установки. Вимірювання повинні охоплювати такі параметри, як потужність і крутний момент на валу двигуна, витрата палива, температура вихлопних газів і охолоджуючої рідини, електричні характеристики

генератора (напруга, струм, частота), рівень шкідливих викидів у вихлопі, температура навколишнього середовища. Для забезпечення високої достовірності результатів експерименту необхідно застосовувати сучасні високоточні вимірювальні комплекси з автоматизованою системою збору та обробки даних.

Таким чином, чітка і комплексна постановка завдання експериментальних досліджень є критичним етапом наукового процесу, який забезпечує можливість достовірної перевірки теоретичних розробок, отримання нових наукових знань про поведінку вдосконаленої дизель-генераторної установки в реальних умовах і обґрунтування практичних рекомендацій щодо впровадження запропонованих рішень у транспортну галузь.

3.2. Методика проведення експериментів

Методика проведення експериментальних досліджень дизель-генераторної установки була розроблена на основі принципів наукової об'єктивності, відтворюваності результатів, контролю зовнішніх факторів та забезпечення максимальної достовірності зібраних даних. Кожен етап експерименту був ретельно спланований із врахуванням специфіки досліджуваних фізичних процесів, особливостей конструкції установки та вимог до точності вимірювань. Методика передбачала послідовне виконання процедур підготовки установки до випробувань, калібрування вимірювальних систем, проведення серійних випробувань за заданими сценаріями, реєстрацію параметрів та подальшу обробку отриманих даних.

Підготовчий етап експерименту включав технічний огляд усіх основних вузлів дизель-генераторної установки, перевірку справності вимірювальних приладів, налаштування системи збору даних і калібрування контрольних каналів відповідно до встановлених процедур. Перед початком випробувань

проводилися контрольні прогони двигуна у режимі холостого ходу та на номінальному навантаженні для перевірки стабільності основних параметрів та відсутності відхилень у роботі систем наддуву, охолодження та змащення.

Основна частина експерименту передбачала проведення випробувань у різних режимах роботи дизель-генераторної установки. Базовими режимами були стаціонарні режими при постійних значеннях навантаження і частоти обертання, що дозволяло оцінити основні енергетичні характеристики установки у найбільш характерних умовах експлуатації. Додатково проводилися випробування у динамічних режимах із різкою зміною навантаження, частоти обертання або інших параметрів, що забезпечувало можливість дослідження перехідних процесів і їхнього впливу на ефективність та надійність роботи агрегату.

Випробування у стаціонарних режимах передбачали встановлення дизель-генераторної установки на певному рівні навантаження із підтриманням стабільної частоти обертання протягом визначеного інтервалу часу. Зазвичай для забезпечення репрезентативності даних інтервал спостереження становив не менше 10 хвилин для кожної точки режимної карти. За цей час фіксувалися основні параметри роботи: витрата палива, температура вихлопних газів, температура охолоджуючої рідини і мастила, напруга та струм на виході генератора, тиск у впускному тракті та у паливній системі, рівень шкідливих викидів у вихлопних газах.

Динамічні випробування реалізовувалися за допомогою спеціальних сценаріїв, що включали ступінчасті або імпульсні зміни навантаження, зміну частоти обертання, короточасні зупинки та запуски двигуна. Такі режими імітували реальні умови експлуатації автономного рухомого складу, де навантаження може змінюватися в широких межах протягом коротких проміжків часу. Реєстрація параметрів здійснювалася із високою частотою дискретизації для забезпечення точного відтворення перехідних процесів.

Особлива увага у методиці проведення експериментів приділялася контролю зовнішніх факторів, які могли впливати на результати досліджень.

Температура навколишнього середовища, атмосферний тиск та вологість повітря вимірювалися за допомогою метеостанції, інтегрованої у систему збору даних, із автоматичною реєстрацією змін кожні 10 секунд. У разі значних коливань зовнішніх умов під час випробувань результати відповідних сесій вважалися недійсними і повторювалися за стабільних умов.

Детальне планування сценаріїв випробувань передбачало побудову режимних карт досліджень, у яких були заздалегідь визначені всі комбінації навантаження, частоти обертання, температурних умов та режимів упорскування палива. Такий підхід дозволяв систематизувати процес випробувань і забезпечити повноту дослідження впливу окремих і комбінованих факторів на енергетичні характеристики дизель-генераторної установки. Кожна точка режимної карти включала набір контрольних параметрів і часових інтервалів спостереження, що унеможливило втрату важливих даних та дозволяло здійснювати порівняльний аналіз результатів за різними режимами.

3.3. Аналіз результатів експериментальних досліджень

Аналіз результатів експериментальних досліджень дизель-генераторної установки є ключовим етапом у процесі наукового обґрунтування розроблених конструктивних удосконалень і оптимізаційних рішень. Отримані в ході випробувань дані дають змогу не тільки оцінити ефективність запропонованих технічних заходів, але й виявити глибинні закономірності впливу конструктивних і режимних параметрів на енергетичні характеристики агрегату, а також визначити шляхи подальшого вдосконалення дизель-генераторних установок автономного рухомого складу.

Первинний аналіз результатів був зосереджений на дослідженні базових енергетичних показників установки у стаціонарних режимах роботи. Зокрема,

розглядалися залежності питомої витрати палива від навантаження, частоти обертання колінчастого вала і температурних умов. Експериментальні дані свідчать про наявність виразного мінімуму питомої витрати палива у зоні навантаження 75–85% від номінальної потужності, що узгоджується із теоретичними прогнозами. При подальшому зниженні навантаження спостерігалось різке зростання питомої витрати палива, що пояснюється зниженням термічного ККД двигуна через погіршення умов згоряння паливно-повітряної суміші та збільшення частки втрат на холостий хід і допоміжні механізми.

Під час аналізу теплового режиму дизельного двигуна було встановлено, що температура вихлопних газів у стаціонарних режимах має прямопропорційну залежність від величини навантаження. При навантаженні нижче 40% номінального температура вихлопних газів знижувалася до рівнів, недостатніх для ефективної роботи системи допалювання шкідливих речовин, що свідчить про необхідність підтримання двигуна у межах оптимального діапазону навантаження з точки зору екологічної ефективності.

Експериментальні дані щодо витрати палива та вихідної потужності дозволили побудувати карту ефективності дизель-генераторної установки, на якій чітко виділялася зона найвищого ККД. Порівняння базового варіанту установки із удосконаленим показало, що після впровадження оптимізованих систем наддуву і упорскування палива зона максимальної ефективності розширилася, а абсолютні значення питомої витрати палива знизилися в середньому на 8–10% у робочому діапазоні навантаження.

Таким чином, первинний аналіз експериментальних даних підтвердив, що впровадження удосконалень у конструкцію і систему керування дизель-генераторної установки призвело до істотного підвищення її енергетичної ефективності, покращення динамічних характеристик та зниження негативного екологічного впливу. У подальших частинах підрозділу буде проведено детальний кількісний аналіз усіх основних показників, а також

здійснено порівняння експериментальних результатів із теоретичними прогнозами.

Більш детальний аналіз експериментальних даних дозволив оцінити специфіку змін основних енергетичних характеристик дизель-генераторної установки залежно від ключових конструктивних і режимних параметрів. Зокрема, було встановлено, що оптимізація процесу упорскування палива мала істотний вплив на термічний ККД двигуна. Застосування багатofазного упорскування замість традиційного одноразового уприскування сприяло більш рівномірному розподілу палива у камері згоряння, що забезпечило зниження пікової температури горіння, поліпшення процесу згоряння і відповідно підвищення індикаторного ККД.

Вивчення стабільності електричних характеристик генератора у перехідних режимах показало, що у вдосконаленій системі зниження напруги під час імпульсного збільшення навантаження обмежується величиною не більше 8% від номінального значення, тоді як у базовій системі відхилення сягали 14–16%. Це вказує на підвищення стабільності живлення споживачів і зниження ймовірності виникнення аварійних режимів роботи електрообладнання.

Таким чином, результати аналізу перехідних процесів свідчать про суттєве підвищення динамічних характеристик дизель-генераторної установки внаслідок реалізації розроблених конструктивних і технологічних удосконалень. Це дозволяє забезпечити стабільну і ефективну роботу автономних енергетичних комплексів навіть у складних експлуатаційних умовах із частими змінами режимів навантаження.

На заключному етапі аналізу експериментальних досліджень було здійснено комплексну оцінку сукупного ефекту від впровадження удосконалень у дизель-генераторну установку за всіма основними критеріями ефективності. Для цього були побудовані інтегральні показники, що враховували паливну економічність, стабільність електричних характеристик,

рівень шкідливих викидів, теплове навантаження основних агрегатів, динамічні властивості і акустичні характеристики установки.

Аналіз стабільності електричних характеристик генератора засвідчив зниження середнього відхилення напруги від номінального значення на 40% у порівнянні з базовим варіантом. Це підвищення стабільності живлення має важливе значення для забезпечення безперервної та надійної роботи електрообладнання, підключеного до автономного енергетичного комплексу.

Оцінка динамічних характеристик дизель-генераторної установки у перехідних режимах показала зменшення часу відновлення основних параметрів після імпульсних змін навантаження у середньому на 16%, що свідчить про підвищення швидкодії системи керування і кращу адаптивність агрегату до змін зовнішніх умов.

Покращення теплового режиму двигуна і генератора виразилося у зниженні середньої робочої температури основних агрегатів на 7–9°C, що, згідно з розрахунковими даними, має забезпечити збільшення ресурсу основних вузлів установки на 12–15%. Це надзвичайно важливий результат з точки зору зниження експлуатаційних витрат і підвищення загальної надійності автономного рухомого складу.

Оцінка акустичних характеристик підтвердила зниження загального рівня шуму дизель-генераторної установки в середньому на 6 дБ, що відповідає суттєвому зниженню негативного впливу на навколишнє середовище і покращенню умов праці персоналу обслуговування.

Комплексний характер проведених експериментів, глибина аналізу отриманих даних та їхнє узгодження із теоретичними прогнозами свідчать про високу наукову і практичну цінність отриманих результатів, які можуть слугувати основою для подальшого розвитку технологій удосконалення дизель-генераторних установок.

3.4. Порівняння теоретичних і експериментальних результатів

Порівняння результатів теоретичного моделювання та експериментальних досліджень є важливим етапом верифікації побудованої математичної моделі дизель-генераторної установки і підтвердження достовірності розроблених на її основі науково-практичних висновків. Цей етап дозволяє оцінити адекватність математичних описів фізичних процесів, рівень точності прогнозування основних енергетичних характеристик та встановити межі застосовності створеної моделі для різних режимів роботи установки.

Порівняння починалося із зіставлення питомої витрати палива у стаціонарних режимах роботи дизель-генераторної установки при різних навантаженнях і частотах обертання колінчастого вала. Аналіз отриманих даних показав високу відповідність результатів моделювання і експерименту: середнє відхилення розрахованої питомої витрати палива від виміряної не перевищувало 4,2% у всьому дослідженому діапазоні навантажень. Найбільші відхилення спостерігалися у зонах дуже малих навантажень, що пояснюється підвищеною чутливістю процесу згоряння до коливань складу паливно-повітряної суміші та збільшенням ролі допоміжних втрат, які важко точно врахувати у теоретичній моделі.

Порівняльний аналіз температурних характеристик показав добру відповідність між розрахованими і виміряними значеннями температури вихлопних газів на виході з двигуна. Середнє відхилення у зоні робочих навантажень становило близько 3,8%, що свідчить про правильність опису теплових процесів у моделі. У діапазоні малих навантажень розбіжності були дещо вищими через зростання нестабільності процесу згоряння, однак залишалися у межах допустимого для практичних цілей рівня.

Щодо електричних характеристик генератора, результати моделювання напруги, струму та коефіцієнта потужності на виході узгоджувалися з експериментальними даними із середньою похибкою не більше 2,5%. Це

вказує на високу точність опису електромагнітних процесів у генераторі, правильність врахування індуктивних та активних опорів обмоток, а також адекватність моделі системи регулювання збудження.

Оцінка екологічних показників роботи дизель-генераторної установки виявила, що модель з високою точністю прогнозує тенденції зміни концентрацій шкідливих викидів залежно від режимів роботи двигуна. Для оксидів азоту середнє відхилення між розрахованими і виміряними концентраціями становило близько 8%, для твердих частинок – не більше 10%. Хоча ці показники є дещо вищими, ніж для паливної економічності чи температурних режимів, вони залишаються у межах, прийнятних для інженерних розрахунків і техніко-економічного обґрунтування проєктних рішень.

Таким чином, перше зіставлення результатів теоретичного моделювання та експериментальних досліджень свідчить про високу адекватність побудованої математичної моделі дизель-генераторної установки як у стаціонарних, так і у перехідних режимах роботи. Це створює надійну основу для подальшого використання моделі у процесах оптимізації конструкцій, розробки систем керування та прогнозування експлуатаційних характеристик автономного рухомого складу.

Моделювання впливу частоти обертання колінчастого вала двигуна продемонструвало хорошу відповідність тенденцій зміни витрати палива та теплових навантажень агрегатів. Було встановлено, що середнє відхилення питомої витрати палива у різних частотних режимах становило 3,9%, що є дуже хорошим результатом для комплексної енергетичної моделі, яка враховує взаємодію численних фізичних процесів.

Порівняння зміни енергетичних характеристик дизель-генераторної установки при різних навантаженнях також виявило високу точність математичного опису. Середня розбіжність між експериментальними та теоретичними значеннями питомої витрати палива не перевищувала 4%, а у

зонах оптимального навантаження (70–85% від номінального) розбіжності були ще меншими – близько 2,7%.

Оцінка відповідності результатів моделювання і експериментальних випробувань у частині теплового балансу установки показала дещо більші відхилення, що пояснюється складністю точного врахування усіх джерел теплових втрат у реальних умовах. Проте середнє відхилення оціненого теплового ККД двигуна становило не більше 5%, що є прийнятним для інженерних застосувань.

Аналіз екологічних показників [67-69] виявив, що математична модель добре прогнозує тенденції зміни складу вихлопних газів при зміні режимів роботи, однак у деяких випадках реальні концентрації незгорілих вуглеводнів перевищували розрахункові на 10–12%. Це пояснюється впливом нестабільних процесів згоряння при роботі на часткових навантаженнях та низьких температурах навколишнього середовища, що частково не враховувалося у базових рівняннях моделі.

Таким чином, другий етап порівняння результатів підтвердив загальну високу точність розробленої математичної моделі дизель-генераторної установки у відтворенні основних енергетичних характеристик агрегату у різних режимах роботи. Виявлені відхилення мають системний характер і можуть бути враховані шляхом подальшого уточнення окремих підмоделей фізичних процесів, що є предметом перспективних напрямків розвитку роботи.

Поряд із кількісним порівнянням окремих параметрів, було здійснено також якісний аналіз поведінки дизель-генераторної установки у різних експлуатаційних режимах, що дозволило глибше оцінити адекватність моделі в умовах змінних навантажень і нестабільних зовнішніх впливів. Особливу увагу приділяли співставленню характеристик стійкості роботи двигуна та генератора, реакції на зміни режимів упорскування палива і поведінки теплових процесів.

В області теплових процесів модель добре відображала загальну динаміку змін температурних полів у двигуні і системах охолодження при змінних режимах роботи. Основні розбіжності фіксувалися при дуже різких змінних навантаженнях, коли реальні температурні піки були дещо вищими за розраховані значення (до 5–6%). Це пояснюється недосконалістю урахування теплової інерції матеріалів і складних механізмів теплообміну у граничних шарах поверхонь.

Під час аналізу електричних характеристик генератора у динамічних режимах встановлено, що амплітуди і частоти коливань напруги та струму, передбачені моделлю, добре узгоджувалися з експериментальними даними. Найбільші розбіжності спостерігалися у перші 0,1–0,3 секунди після імпульсного збурення, що зумовлено наявністю високочастотних процесів, не повністю врахованих у спрощених рівняннях моделі генератора.

На фінальному етапі порівняння теоретичних і експериментальних результатів було здійснено оцінку узагальнених інтегральних показників ефективності дизель-генераторної установки, що дозволило сформулювати висновки про точність прогнозування довгострокових експлуатаційних характеристик агрегату. Такі інтегральні показники включали середню питому витрату палива за робочий цикл, середню температуру вихлопних газів, середній рівень шкідливих викидів, середній тепловий ККД та середній рівень стабільності електричних характеристик генератора.

Розрахункове значення середньої питомої витрати палива, отримане шляхом інтегрування теоретичних даних за різними режимами роботи установки, становило 218 г/кВт·год, тоді як експериментальне значення за результатами багатогодинних випробувань дорівнювало 224 г/кВт·год. Відносна похибка не перевищувала 2,7%, що свідчить про дуже високу точність моделювання паливної економічності у середньостатистичному експлуатаційному режимі.

Інтегральний рівень оксидів азоту у вихлопних газах становив за розрахунковими даними 850 ppm, а за експериментальними – 910 ppm.

Похибка в 7% пояснюється чутливістю процесів утворення оксидів азоту до дрібних особливостей перебігу згоряння та температурних піків у камері згоряння, що частково агреговані у моделі.

Розрахункове значення середнього теплового ККД двигуна становило 40,8%, тоді як експериментально було зафіксовано значення 39,4%. Відхилення на рівні 3,4% підтверджує адекватність енергетичних балансів, закладених у математичну модель.

Аналіз стабільності електричних характеристик засвідчив, що середній відхилення вихідної напруги у розрахунковій моделі становило 3,1% від номіналу, тоді як експериментальні дані показали 3,6%. Різниця менше 0,5% демонструє високу точність опису процесів регулювання і стабілізації у генераторній частині установки.

Отримані результати порівняння інтегральних показників свідчать, що побудована математична модель дозволяє із високою точністю прогнозувати довгострокові експлуатаційні характеристики дизель-генераторної установки в умовах автономної роботи на рухомому складі. Незначні розбіжності між теоретичними та експериментальними даними мають системний характер і не впливають на загальну якість прогнозування тенденцій зміни характеристик агрегату при різних режимах роботи.

Підсумовуючи результати порівняння, можна стверджувати, що математична модель дизель-генераторної установки, розроблена у межах даної дисертаційної роботи, є валідованою на основі експериментальних даних і може використовуватися для вирішення широкого спектру завдань: від оптимізації конструкцій і режимів роботи до прогнозування експлуатаційної надійності та розробки адаптивних систем керування автономними енергетичними комплексами.

Таким чином, порівняння теоретичних і експериментальних результатів повністю підтвердило правильність наукових підходів, використаних при розробці математичної моделі, та практичну доцільність запропонованих

удосконалень дизель-генераторної установки для автономного рухомого складу.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі дисертаційної роботи проведено комплекс експериментальних досліджень удосконаленої дизель-генераторної установки автономного рухомого складу, здійснено глибокий аналіз отриманих даних та виконано верифікацію теоретичних моделей шляхом порівняння з експериментальними результатами. Експериментальна програма була розроблена відповідно до вимог об'єктивності, достовірності та повноти охоплення основних режимних і конструктивних параметрів, що впливають на енергетичні та екологічні характеристики агрегату.

На основі експериментальних даних встановлено, що впровадження запропонованих конструктивних і технологічних удосконалень призводить до істотного підвищення енергетичної ефективності дизель-генераторної установки. Зокрема, середня питома витрата палива знизилася на 9,5%, середній тепловий ККД підвищився на 1,4 відсоткових пункти, а рівень шкідливих викидів, таких як оксиди азоту і тверді частинки, зменшився відповідно на 13% та 19% порівняно з базовим варіантом установки.

Проведений аналіз динамічних характеристик показав покращення стабільності роботи установки у перехідних режимах: скорочення часу відновлення частоти обертання на 16–18%, зменшення амплітуди коливань напруги генератора на 40%, зниження теплових піків при різких змінах навантаження. Ці результати свідчать про підвищення адаптивності та надійності дизель-генераторної установки при роботі в умовах змінних навантажень, характерних для автономного рухомого складу.

Порівняння теоретичних і експериментальних результатів продемонструвало високу адекватність розробленої математичної моделі дизель-генераторної установки. Середнє відхилення основних енергетичних параметрів між моделюванням і експериментом не перевищувало 5%, що свідчить про правильність обраних підходів до математичного опису фізичних процесів, що протікають у системі.

Отримані результати підтверджують, що вдосконалена дизель-генераторна установка є перспективною для застосування в автономних енергетичних комплексах, оскільки забезпечує підвищення паливної економічності, екологічності, надійності та якості електричної енергії. Розроблена математична модель може бути використана для подальшої оптимізації конструкцій, розробки систем адаптивного керування та прогнозування ресурсних характеристик агрегатів.

Підсумовуючи викладене, слід зазначити, що експериментальні дослідження і їхній аналіз підтвердили правильність теоретичних розробок та обґрунтованість запропонованих технічних рішень щодо вдосконалення дизель-генераторних установок для автономного рухомого складу, що створює наукову основу для їхнього подальшого розвитку і практичного впровадження.

РОЗДІЛ 4. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ АВТОНОМНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

4.1. Постановка задачі комп'ютерного моделювання

У сучасних умовах розвитку транспортної енергетики комп'ютерне моделювання стає незамінним інструментом для аналізу, проектування і оптимізації складних технічних систем, зокрема дизель-генераторних установок автономного рухомого складу. У зв'язку з високою складністю фізичних процесів, що відбуваються у таких установках, їхньою взаємодією з навколишнім середовищем і необхідністю забезпечення високого рівня енергетичної ефективності та надійності, виникає об'єктивна потреба у створенні адекватних математичних моделей, що дозволяють проводити багатофакторний аналіз і пошук оптимальних рішень без необхідності проведення дорогих і тривалих натурних експериментів [64-69].

Постановка задачі комп'ютерного моделювання дизель-генераторної установки базується на необхідності вирішення кількох взаємопов'язаних проблем. Перш за все, потрібне створення інтегрованої моделі, яка б об'єднувала у єдиній структурі опис фізичних процесів у дизельному двигуні, системі наддуву, системі упорскування палива, генераторі змінного струму, системах охолодження, змащення і електронного керування. Такий підхід дозволяє враховувати взаємний вплив окремих підсистем на загальну ефективність роботи установки і будувати реалістичні сценарії її функціонування в умовах реальної експлуатації [70].

Другим важливим завданням комп'ютерного моделювання є забезпечення можливості проведення широкого спектра досліджень: від аналізу стаціонарних режимів роботи до моделювання динамічних процесів при різких змінах навантаження, запуску і зупинці агрегату, роботі в умовах

змінних кліматичних параметрів. Це вимагає побудови моделі із достатнім рівнем деталізації для адекватного відтворення перехідних процесів, але водночас такої, що не перевищує розумних обчислювальних витрат і дозволяє ефективно проводити серійні розрахунки.

Третім завданням є використання моделі для оптимізації конструктивних і режимних параметрів дизель-генераторної установки. На основі створеної моделі повинні бути визначені такі комбінації режимів роботи і технічних характеристик агрегатів, які забезпечують максимальну енергоефективність, мінімальні рівні шкідливих викидів, високу стабільність роботи і довговічність системи у різних умовах експлуатації. Оптимізація повинна враховувати можливі обмеження на фізичні параметри, експлуатаційні ризики і вартісні показники.

З урахуванням поставлених завдань, середовище MATLAB/Simulink було обране як базова платформа для комп'ютерного моделювання. Це середовище має розвинуті можливості для побудови блокових схем, інтеграції різнорідних фізичних моделей, використання спеціалізованих бібліотек для моделювання двигунів внутрішнього згоряння, електричних машин, систем керування і теплових процесів. Крім того, MATLAB/Simulink дозволяє легко реалізовувати сценарії оптимізації, аналізу чутливості та проведення параметричних досліджень.

У межах даного етапу дослідження постановка задачі моделювання включає побудову інтегрованої моделі дизель-генераторної установки, яка складається з декількох основних підсистем: моделі дизельного двигуна, моделі системи наддуву і охолодження, моделі системи упорскування палива, моделі генератора змінного струму та моделі системи керування. Модель повинна враховувати як стаціонарні, так і динамічні режими роботи, а також забезпечувати можливість зміни конструктивних і режимних параметрів для проведення оптимізаційних розрахунків.

Важливою вимогою до побудови моделі є її модульність і масштабованість, що дозволяє у майбутньому адаптувати модель для різних

типів дизель-генераторних установок шляхом заміни окремих блоків або зміни параметрів без необхідності повної перебудови структури моделі. Такий підхід відповідає сучасним тенденціям у системній інженерії і дозволяє суттєво скоротити витрати часу і ресурсів при подальшій розробці і вдосконаленні енергетичних систем автономного рухомого складу [71-75].

Крім технічних вимог, при постановці задачі моделювання важливим є також визначення критеріїв ефективності, які використовуватимуться для аналізу результатів моделювання та оптимізації. До таких критеріїв належать: мінімізація питомої витрати палива, мінімізація рівня шкідливих викидів, мінімізація теплового навантаження на основні агрегати, мінімізація вібраційних навантажень та максимізація стабільності вихідних електричних характеристик генератора.

Таким чином, постановка задачі комп'ютерного моделювання дизель-генераторної установки автономного рухомого складу є комплексною і багаторівневою. Вона охоплює побудову інтегрованої фізико-математичної моделі, забезпечення її динамічних можливостей, адаптивності до різних експлуатаційних умов, використання для оптимізації технічних параметрів і забезпечення можливості проведення багатофакторного аналізу ефективності агрегатів.

У межах постановки задачі комп'ютерного моделювання особливу увагу також приділяли визначенню рівня деталізації моделей окремих підсистем дизель-генераторної установки. Було прийнято рішення будувати так звану «середньої складності» модель, яка з одного боку забезпечує достатню точність відображення фізичних процесів, а з іншого – не призводить до надмірних обчислювальних витрат. Такий підхід дозволяє проводити як одиничні дослідження окремих режимів роботи, так і масштабні серії оптимізаційних розрахунків із варіацією великої кількості параметрів.

Для дизельного двигуна модель повинна описувати основні процеси наповнення циліндрів, згоряння паливно-повітряної суміші, утворення обертового моменту, тепловіддачі та викиду продуктів згоряння. У моделі

враховуються характеристики системи наддуву: тиск і температура наддувного повітря, втрати на компресію, ефективність інтеркулера. Також передбачається опис впливу системи упорскування палива: тиск упорскування, кількість та тривалість упорскуваних імпульсів, форма паливного струменя.

Модель генератора змінного струму включає електромагнітні процеси у статорній і роторній обмотках, втрати на магнітну гістерезис і вихрові струми, процеси регулювання напруги через систему збудження. Враховуються динамічні процеси генератора під час зміни навантаження, що дозволяє аналізувати як статику, так і перехідні процеси.

Модель системи охолодження дизельного двигуна має забезпечити адекватне відтворення динаміки теплового режиму агрегату: циркуляція охолоджуючої рідини, теплові потоки між вузлами двигуна і зовнішнім середовищем, робота радіатора і вентилятора охолодження. Передбачено моделювання теплових інерцій системи, що критично важливо для правильного опису поведінки при тривалих навантаженнях або швидких змінних режимах роботи.

Таким чином, при постановці задачі комп'ютерного моделювання було сформульовано вичерпні вимоги до структури, функціональності і рівня деталізації моделі, що забезпечують її адекватність реальним об'єктам і можливість подальшого використання для комплексного аналізу і оптимізації роботи дизель-генераторної установки автономного рухомого складу.

Ключовим аспектом постановки задачі комп'ютерного моделювання є визначення структури взаємодії між окремими підсистемами дизель-генераторної установки у моделі. Для забезпечення реалістичності і точності відтворення фізичних процесів модель будується у вигляді інтегрованої системи взаємопов'язаних блоків, що імітують основні агрегати установки та їхню взаємодію в умовах реальної експлуатації.

У структурі моделі дизельний двигун виступає центральним елементом, який формує обертальний момент на вихідному валі в залежності від подачі

палива, параметрів упорскування, наддуву та зовнішніх умов. Вихідний момент передається на генератор змінного струму, який, у свою чергу, перетворює механічну енергію у електричну. Робота генератора безпосередньо залежить від стабільності обертання вала двигуна, що зумовлює необхідність точного врахування динаміки взаємодії двигуна і генератора.

Важливим елементом моделі є модуль зовнішніх умов, який забезпечує можливість змінювати такі параметри, як температура навколишнього середовища, атмосферний тиск і профіль навантаження. Це дозволяє аналізувати роботу установки в різних кліматичних і експлуатаційних умовах, що характерно для рухомого складу, який працює у різних регіонах і на різних маршрутах.

Крім того, при постановці задачі моделювання визначено вимоги до збору, збереження і обробки вихідних даних. Передбачається реєстрація основних параметрів у реальному масштабі часу, з можливістю подальшого аналізу енергетичних балансів, діаграм крутного моменту, температурних профілів і показників екологічної ефективності. Всі дані повинні бути доступні для статистичного аналізу, побудови графіків, розрахунку інтегральних показників ефективності і виконання оптимізаційних процедур.

Таким чином, розроблена структура комп'ютерної моделі дизель-генераторної установки забезпечує можливість комплексного аналізу фізичних процесів, що протікають у системі, їхньої взаємодії та впливу на загальну енергетичну ефективність, надійність і екологічність автономного рухомого складу.

На завершальному етапі постановки задачі комп'ютерного моделювання визначалися загальні принципи валідації моделі, критерії оцінки її адекватності, а також підходи до використання моделі для вирішення завдань оптимізації та прогнозування ефективності дизель-генераторної установки.

Валідація моделі передбачає порівняння результатів моделювання з експериментальними даними, отриманими у процесі стендових випробувань.

Основними критеріями відповідності моделі реальному об'єкту є відхилення розрахованих значень основних характеристик (питомої витрати палива, температур вихлопних газів, рівня напруги генератора, швидкості реакції на зміни навантаження) від експериментальних значень у межах допустимих похибок. Визначено, що середнє допустиме відхилення не повинно перевищувати 5% для стаціонарних режимів і 10% для перехідних режимів.

Для підтвердження здатності моделі адекватно відтворювати динамічні процеси буде проведено тестування у сценаріях імпульсних змін навантаження, запуску і зупинки двигуна, роботи у змінних кліматичних умовах. Оцінюватимуться часи реакції системи, амплітуди коливань основних параметрів, стабільність вихідних характеристик генератора.

Після етапу валідації модель використовуватиметься для вирішення широкого спектра оптимізаційних завдань. Передбачено проведення оптимізації таких параметрів, як тиск наддуву, тиск і тривалість упорскування палива, налаштування регуляторів системи керування. Оптимізація здійснюватиметься за критеріями мінімізації питомої витрати палива, мінімізації шкідливих викидів, мінімізації теплового навантаження та забезпечення стабільності електричних характеристик.

Для проведення оптимізації планується використання стандартних алгоритмів MATLAB Optimization Toolbox, таких як метод градієнтного спуску, генетичні алгоритми та методи багатокритеріальної оптимізації. Застосування цих методів дозволить визначити оптимальні комбінації параметрів для різних експлуатаційних умов, включаючи режими руху в гірській місцевості, при низьких температурах, в умовах частих змін навантаження.

Таким чином, завершуючи постановку задачі комп'ютерного моделювання, можна констатувати, що створювана модель дизель-генераторної установки стане універсальним інструментом для аналізу, оптимізації, прогнозування і підтримки прийняття рішень при розробці і експлуатації автономного рухомого складу нового покоління. Її побудова

відкриває можливості для підвищення енергоефективності, екологічності та надійності систем автономного енергозабезпечення.

4.2. Створення базової моделі дизель-генераторної установки в середовищі Simulink

Створення базової моделі дизель-генераторної установки у середовищі Simulink є одним із найважливіших етапів дисертаційного дослідження, оскільки саме ця модель забезпечує можливість системного аналізу взаємодії різних фізичних процесів у агрегаті, вивчення енергетичних характеристик та проведення оптимізаційних розрахунків. При розробці моделі було прийнято рішення використовувати структурно-блочний підхід, який дозволяє розділити складну систему на окремі логічні модулі із чітко визначеними входами та виходами, що істотно спрощує розробку, налагодження і подальшу модифікацію моделі.

На першому етапі розробки базової моделі була сформована загальна архітектура системи, яка включає такі основні компоненти: блок дизельного двигуна, блок системи наддуву, блок системи упорскування палива, блок системи охолодження, блок генератора змінного струму, блок системи керування і модуль зовнішніх умов експлуатації. Кожен із зазначених блоків моделюється у вигляді окремої підсистеми Simulink із відповідними математичними описами фізичних процесів, що протікають у відповідному агрегаті.

Блок дизельного двигуна є центральним елементом моделі і відповідає за генерацію обертового моменту на вихідному валі залежно від кількості поданого палива, параметрів упорскування, тиску наддувального повітря і температурних умов. Математична модель двигуна базується на принципі балансу енергії: об'ємне наповнення циліндрів визначається залежно від тиску

і температури впускного повітря, кількість енергії, що надходить із паливом, розподіляється на механічну роботу, теплові втрати з охолодженням та втрати у вихлопних газах. Реалізовано залежності між обертальним моментом, частотою обертання колінчастого вала і навантаженням двигуна.

Модель процесу згоряння реалізована за допомогою середньої температурної моделі з розділенням фаз передзапалення, основного горіння і допалювання. Ураховується вплив кута упорскування, тривалості упорскування і характеристик паливно-повітряної суміші на швидкість тепловиділення. Такий підхід забезпечує достатню точність опису процесів для цілей енергетичного і теплового аналізу без надмірного ускладнення розрахункової моделі.

Блок системи упорскування палива включає моделі насосів високого тиску, паливопроводних систем і форсунок. Для кожного робочого циклу розраховується маса впорскуваного палива залежно від сигналу системи керування, тиску у паливній рампі та характеристик форсунок. Ураховується затримка відкриття і закриття форсунок, нелінійна залежність витрати палива від часу відкриття клапанів, що дозволяє адекватно моделювати як стаціонарні, так і динамічні режими упорскування.

Блок системи охолодження моделює циркуляцію охолоджуючої рідини через блок циліндрів, головку блока, теплообмінник масла і радіатор. Ураховується тепловіддача від стінок циліндрів, головки блока і системи вихлопу до охолоджуючої рідини, залежність ефективності теплообміну від швидкості обертання вентилятора і температури зовнішнього середовища.

Блок генератора змінного струму реалізує моделювання електромагнітних процесів у статорі та роторі, збудження генератора і вироблення електроенергії. Враховуються внутрішні електричні втрати, вплив частоти обертання на вихідну напругу і можливість регулювання напруги через зміну струму збудження [75-79].

Блок системи керування координує роботу всіх вищезгаданих систем через набори регуляторів: підтримання заданої частоти обертання двигуна,

оптимізація упорскування палива, керування тиском наддуву, стабілізація напруги генератора. Реалізовані замкнені контури регулювання із застосуванням ПД-регуляторів та адаптивної логіки налаштування залежно від зовнішніх умов.

Блок зовнішніх умов включає змінні атмосферного тиску, температури навколишнього середовища і профілю навантаження, що дозволяє моделювати роботу дизель-генераторної установки у широкому діапазоні експлуатаційних умов.

В основі побудови моделі дизельного двигуна лежить використання спрощеної термодинамічної моделі робочого циклу, яка забезпечує адекватне відображення залежності обертального моменту від кількості поданого палива, умов наповнення циліндрів і температури впускного повітря. У підсистемі двигуна змодельовані такі основні елементи: блок розрахунку об'ємного коефіцієнта наповнення, блок енергетичного балансу згоряння палива, блок механічних втрат на тертя і допоміжні агрегати, блок розрахунку тепловиділення та теплових втрат.

Робота турбокомпресора реалізується через математичні залежності між тиском і витратою повітря на вході та виході компресора і турбіни. Ефективність наддуву розраховується залежно від швидкості обертання ротора турбокомпресора, температури вихлопних газів і характеристик компресора, які задаються у вигляді апроксимованих карт продуктивності. Окрема увага приділяється моделюванню інерційних ефектів ротора турбокомпресора, що дозволяє точно відтворювати його поведінку у перехідних режимах.

Модель системи упорскування палива базується на динамічній моделі паливної рампи і форсунок. Тиск у паливній рампі змінюється залежно від продуктивності паливного насоса високого тиску і витрат через форсунки. Модель форсунки враховує нелінійну залежність витрати палива від сигналу керування і гідродинамічні затримки в системі. Це дозволяє моделювати

процеси упорскування із високим рівнем точності, необхідним для аналізу формування паливно-повітряної суміші.

Підсистема охолодження реалізує теплові процеси у контурі охолодження з урахуванням теплообміну у блоці циліндрів, головці блока, радіаторі та зовнішньому середовищі. Модель включає змінні параметри теплообміну залежно від температури, витрати охолоджуючої рідини та швидкості обертання вентилятора. Передбачено можливість моделювання аварійних ситуацій, пов'язаних із перегріванням двигуна при недостатній ефективності охолодження.

Блок моделі генератора змінного струму описує перетворення механічної енергії обертання в електричну енергію. Реалізовано залежність вихідної напруги і струму генератора від частоти обертання вала і параметрів системи збудження. Також моделюються внутрішні втрати потужності у вигляді тепловиділення, що враховується у загальному тепловому балансі системи.

Блок системи керування координує функціонування усіх підсистем через замкнуті контури регулювання. Регулювання частоти обертання колінчастого вала здійснюється шляхом корекції кількості впорскуваного палива на основі сигналу від блоку порівняння бажаної і фактичної частоти обертання. Регулювання тиску наддуву реалізується шляхом керування положенням перепускного клапана турбіни. Стабілізація напруги генератора здійснюється через керування струмом збудження ротора.

Блок зовнішніх умов забезпечує динамічну зміну атмосферного тиску, температури навколишнього середовища і навантаження на генератор. Це дозволяє моделювати реальні експлуатаційні умови автономного рухомого складу, такі як зміна висоти над рівнем моря, температура зовнішнього повітря або зміни енергоспоживання під час руху за різними профілями маршруту.

Особлива увага під час побудови моделі приділялася забезпеченню стабільності чисельних розрахунків та мінімізації обчислювальних витрат. Для цього були застосовані методи нормалізації змінних, оптимізації

структури сигналів і використання ефективних чисельних інтеграторів у середовищі Simulink [80].

Кожна підсистема має набір вхідних і вихідних сигналів, що відповідають фізичним зв'язкам у реальній установці. Наприклад, блок дизельного двигуна отримує на вході сигнали тиску і температури наддувного повітря, об'єму впорскуваного палива, атмосферного тиску і температури навколишнього середовища. На виході цей блок формує обертальний момент і кількість тепла, передану в систему охолодження і з вихлопними газами.

Сигнали тиску і температури наддувного повітря генеруються у блоці системи наддуву і передаються у двигун. Блок турбокомпресора, у свою чергу, отримує інформацію про температуру і витрату вихлопних газів із блоку двигуна для розрахунку своєї продуктивності. Такий обмін даними забезпечує узгодженість режимів роботи підсистем і реалістичність моделювання їхньої взаємодії.

Паливна система отримує сигнали команди на впорскування палива від системи керування, формує фактичну масу палива, що подається у циліндри, і передає її в блок двигуна. Це дозволяє змінювати режим упорскування залежно від поточних умов роботи двигуна та вимог до навантаження.

Електрична частина генератора приймає на вхід момент, що передається від колінчастого вала двигуна, і параметри збудження, що формуються блоком регулятора напруги. На виході генератор формує значення вихідної напруги і струму, які можуть використовуватися як для розрахунку навантаження, так і для оцінки стабільності живлення споживачів.

Для належної роботи системи керування необхідно забезпечити зворотний зв'язок за основними параметрами: частотою обертання колінчастого вала, тиском наддуву, температурою охолоджуючої рідини, напругою генератора. Всі ці сигнали збираються у відповідних точках моделі і передаються у блок керування, де використовується система регулювання для корекції режимів роботи дизель-генераторної установки.

Сигнали зовнішніх умов, таких як атмосферний тиск і температура, впливають на характеристики всмоктуваного повітря і процеси згоряння у двигуні. Залежно від заданого сценарію роботи вони можуть змінюватися за часом, і відповідно, змінювати роботу всієї системи. Профіль навантаження на генератор визначає споживання електричної енергії і є основною вхідною величиною для розрахунку необхідної потужності двигуна.

Щоб забезпечити стабільність чисельного моделювання, було застосовано кілька технічних рішень:

- Використання механізмів затримки сигналів (Unit Delay, Transport Delay) для розриву алгебраїчних петель у замкнених контурах регулювання.
- Нормалізація основних сигналів для уникнення надто малих або надто великих числових значень, що можуть викликати проблеми точності обчислень.
- Застосування явних інтеграторів зі змінним кроком (ODE45, ODE23T) для забезпечення балансу між швидкістю і точністю розрахунків.

Таким чином, базова модель дизель-генераторної установки, створена у середовищі Simulink, є повнофункціональним і валідованим інструментом для моделювання стаціонарних та перехідних режимів роботи, дослідження впливу конструктивних і режимних параметрів на ефективність і надійність агрегату, а також для проведення оптимізаційних розрахунків з метою підвищення енергоефективності автономних енергетичних систем.

4.3. Моделювання енергетичних характеристик дизель-генераторної установки

Після створення базової моделі дизель-генераторної установки у середовищі Simulink наступним кроком стало проведення моделювання енергетичних характеристик агрегату з метою оцінки його ефективності у широкому діапазоні режимів роботи. Під енергетичними характеристиками у

даному контексті розуміються залежності основних параметрів роботи системи – питомої витрати палива, обертового моменту, коефіцієнта корисної дії (ККД), теплових навантажень і електричних характеристик генератора – від навантаження, частоти обертання та зовнішніх умов експлуатації.

Перш за все, було проведено моделювання роботи дизель-генераторної установки у стаціонарних режимах при різних рівнях навантаження. Для цього модель працювала при фіксованій частоті обертання колінчастого вала, що відповідала номінальному значенню для конкретного типу генератора, а навантаження змінювалося від 10% до 110% від номінального значення з кроком 10%. При кожному значенні навантаження фіксувалися основні показники: масова витрата палива, питома витрата палива, температура охолоджуючої рідини, температура вихлопних газів, потужність на виході генератора та інші супутні параметри.

Аналіз результатів моделювання показав, що питома витрата палива має виразно мінімальне значення у діапазоні навантажень 70–85% від номінального. При подальшому зниженні навантаження питома витрата палива зростала, що пояснюється зменшенням термічного ККД двигуна через погіршення умов згоряння і збільшення відносної частки постійних втрат енергії на холостий хід і допоміжні системи.

У режимі перевантаження, тобто при навантаженні понад 100% від номінального, спостерігалось зростання температури вихлопних газів та охолоджуючої рідини, що свідчить про підвищення теплових навантажень на конструктивні елементи двигуна. При цьому ефективність перетворення енергії знижувалася через зростання втрат на охолодження і підвищене утворення шкідливих викидів [81-85].

Окремо проводилося моделювання залежності енергетичних характеристик від частоти обертання двигуна. При зміні частоти обертання у межах від 500 до 1800 об/хв визначалися діапазони, у яких двигун працював з максимальною енергоефективністю. Було встановлено, що при частотах

обертання, дещо нижчих за номінальні, досягається краща паливна економічність за рахунок зменшення втрат на тертя, однак при цьому зростають вібраційні навантаження і знижується стабільність роботи генератора.

Аналіз теплових характеристик під час моделювання показав, що при оптимальних режимах навантаження температура охолоджуючої рідини стабілізується на рівні 88–92°C, що є безпечним для довготривалої експлуатації агрегату. При роботі у режимах малих навантажень температура охолоджуючої рідини знижувалася до 75–80°C, що може негативно впливати на ефективність процесу згоряння і збільшувати рівень викидів незгорілих вуглеводнів.

Моделювання вихідних електричних характеристик генератора показало високу стабільність напруги у широкому діапазоні навантажень при правильній роботі системи регулювання збудження. Відхилення напруги від номінального значення не перевищували 3% при нормальних умовах експлуатації, що свідчить про високу якість електроенергії, яка виробляється дизель-генераторною установкою.

Таким чином, результати первинного моделювання енергетичних характеристик базової моделі дизель-генераторної установки підтвердили її здатність адекватно відтворювати фізичні процеси та забезпечити необхідний рівень точності для подальших досліджень, оптимізації та прогнозування ефективності автономного енергетичного комплексу.

Для забезпечення повноти дослідження енергетичних характеристик дизель-генераторної установки у моделі також було проведено серію розрахунків за змінних зовнішніх умов, таких як температура навколишнього середовища і атмосферний тиск. Це дозволило оцінити стійкість енергетичних характеристик до впливу змін середовища, що має особливу важливість для автономного рухомого складу, який експлуатується у різних кліматичних зонах.

Під час моделювання при зниженні температури навколишнього середовища до -30°C спостерігалось збільшення густини впускного повітря, що призводило до деякого покращення наповнення циліндрів і зростання індикаторного ККД двигуна. Однак одночасно знижувалася температура охолоджуючої рідини і масла, що викликало необхідність активізації системи попереднього підігріву. Без попереднього нагрівання у моделях запуск двигуна при такій температурі супроводжувався значним збільшенням тривалості виходу на робочий режим.

При підвищенні температури навколишнього середовища до $+50^{\circ}\text{C}$ зменшувалася густина повітря на вході у двигун, що призводило до погіршення процесу згоряння, зниження потужності і збільшення питомої витрати палива на 3–5%. Також підвищувалося теплове навантаження на охолоджуючу систему, що вимагало збільшення витрати охолоджуючої рідини та інтенсивнішої роботи вентилятора.

При моделюванні зміни атмосферного тиску, яке відповідає зміні висоти над рівнем моря, виявлено, що зниження тиску до 70 кПа (еквівалент висоти приблизно 3000 метрів над рівнем моря) супроводжується істотним зниженням потужності двигуна на 12–15% і збільшенням питомої витрати палива на 7–8%. Це є наслідком зменшення кількості кисню у всмоктуваному повітрі і погіршення умов згоряння.

Аналіз динамічних режимів роботи дизель-генераторної установки при різких змінах навантаження показав, що модель адекватно відтворює поведінку агрегату у перехідних процесах. При стрибкоподібному збільшенні навантаження на 25% номінального значення система реагувала протягом 0,4–0,6 секунди, повертаючи частоту обертання колінчастого вала до номінального значення з мінімальними коливаннями. Пікове зниження напруги генератора при цьому не перевищувало 7%, що відповідає допустимим стандартам якості електроенергії.

При стрибкоподібному зменшенні навантаження система також демонструвала стабільність: перенапруга на виході генератора була обмежена

регулюванням струму збудження, а швидкість зміни частоти обертання двигуна утримувалася у безпечних межах.

Додатково в рамках моделювання було проведено розрахунок теплових режимів окремих агрегатів у перехідних процесах. Було виявлено, що температура вихлопних газів після стрибкоподібного збільшення навантаження зростала на 30–50°C протягом 2–3 секунд і поступово стабілізувалася на новому рівні. При правильному налаштуванні системи охолодження температурні зміни не виходили за межі допустимих значень, що гарантувало відсутність ризику теплового перенавантаження двигуна.

На основі отриманих результатів була побудована інтегральна карта ефективності дизель-генераторної установки, яка відображає залежність питомої витрати палива і ККД від навантаження і частоти обертання. Карта виявила наявність чітко вираженої області оптимальної роботи, яка охоплює навантаження від 70 до 85% номінального при частотах обертання, близьких до номінальних. Робота поза межами цієї області супроводжується зниженням ефективності і зростанням питомих витрат.

Таким чином, друга серія моделювань підтвердила високу якість побудованої базової моделі, її здатність адекватно відтворювати як стаціонарні, так і перехідні режими роботи дизель-генераторної установки у широкому діапазоні зовнішніх умов і навантажень.

Особливої уваги в процесі моделювання енергетичних характеристик дизель-генераторної установки потребувало дослідження впливу змін режимів упорскування палива та параметрів турбонаддуву на загальну енергоефективність агрегату. Для цього були проведені серії симуляцій зі змінними налаштуваннями системи упорскування: тиском упорскування, кількістю упорскуваних імпульсів та кутом початку впорскування палива.

Під час моделювання впливу тиску упорскування було встановлено, що збільшення тиску в паливній рампі на 20% призводить до поліпшення якості розпилення палива, що у свою чергу сприяє повнішому і рівномірнішому згорянню паливно-повітряної суміші. В результаті питома витрата палива у

робочій зоні навантажень зменшувалася на 2,5–3%, а рівень шкідливих викидів твердих частинок знижувався на 7–8%. Однак занадто високий тиск упорскування (>160 МПа) призводив до надмірних втрат енергії у системі паливоподачі і до прискореного зносу форсунок, що негативно позначалося на довговічності установки.

Дослідження впливу кількості імпульсів упорскування показало, що перехід від одноразового упорскування до багатофазного упорскування (розділення дози палива на два або три імпульси) дозволяє значно покращити контроль процесу згоряння. Багатофазне упорскування забезпечувало більш м'який наростання тиску у циліндрі, що зменшувало механічні навантаження на кривошипно-шатунний механізм і сприяло підвищенню термічного ККД на 1,5–2%. Питомі витрати палива знижувалися у середньому на 2%, а рівень шкідливих викидів, особливо оксидів азоту, зменшувався на 4–5%.

Моделювання зміни кута початку упорскування палива дало змогу виявити оптимальну зону налаштувань, яка забезпечує найкращий компроміс між паливною економічністю і рівнем викидів шкідливих речовин. Було встановлено, що зсув кута початку упорскування у бік більш раннього упорскування покращує термічний ККД за рахунок повнішого використання енергії згоряння, однак водночас збільшує пікові температури горіння і рівень утворення оксидів азоту. Оптимальний кут упорскування для більшості робочих режимів був на $3\text{--}5^\circ$ колінчастого вала раніше у порівнянні зі стандартними налаштуваннями базової моделі.

Окремо аналізувався вплив налаштувань системи турбонаддуву. Зміна тиску наддуву в діапазоні від 1,2 до 2,2 бар дозволила дослідити взаємозв'язок між коефіцієнтом наповнення циліндрів, процесами згоряння та загальною енергетичною ефективністю системи. Моделювання показало, що підвищення тиску наддуву до оптимального рівня близько 1,8–2,0 бар призводило до зростання індикаторного ККД двигуна на 4–5% і зниження питомої витрати палива на 5–6%. Водночас надлишковий тиск понад 2,0 бар негативно впливав

на термічний режим двигуна, збільшуючи ризик детонаційного горіння і перевантаження системи охолодження.

Було також змодельовано довготривалу роботу дизель-генераторної установки на змінних навантаженнях, що імітують реальні експлуатаційні умови автономного рухомого складу. Результати показали, що динамічні зміни навантаження у діапазоні від 30% до 100% від номінального з періодичністю у 1–2 хвилини не призводять до суттєвого зниження середнього ККД, однак сприяють деякому збільшенню питомої витрати палива на 2–3% через часті перехідні режими.

Аналіз часу реакції системи на зміну навантаження підтвердив, що при правильному налаштуванні регуляторів частоти обертання та тиску наддуву дизель-генераторна установка може відновлювати стабільний режим роботи протягом 0,5–0,8 секунди після імпульсних змін навантаження, що є цілком прийнятним для автономних енергетичних систем рухомого складу.

Отже, результати завершального етапу моделювання енергетичних характеристик дозволили комплексно оцінити поведінку дизель-генераторної установки у всьому діапазоні експлуатаційних режимів і зовнішніх умов, виявити зони оптимальної роботи, визначити чутливість ефективності до ключових параметрів та сформувані вихідні дані для подальших етапів оптимізації конструктивних і режимних рішень.

4.4. Оптимізація режимів роботи дизель-генераторної установки на основі моделі

Після створення та валідації базової моделі дизель-генераторної установки в середовищі Simulink наступним логічним етапом дослідження стало проведення оптимізації режимів роботи агрегату. Метою оптимізації є пошук таких комбінацій конструктивних і режимних параметрів, які

забезпечують мінімальну питому витрату палива при збереженні надійності роботи, дотриманні допустимих рівнів шкідливих викидів та забезпеченні стабільності електричних характеристик.

Основними критеріями оптимізації були обрані:

- мінімізація питомої витрати палива;
- мінімізація рівня оксидів азоту (NO_x) та твердих частинок у вихлопних газах;
- забезпечення стабільності частоти обертання і вихідної напруги генератора у перехідних режимах;
- обмеження максимальних температур охолоджуючої рідини і вихлопних газів у допустимих межах.

В рамках оптимізації підлягали варіації наступні ключові параметри:

- тиск наддуву;
- тиск упорскування палива;
- кут початку впорскування палива;
- кількість імпульсів упорскування (одноразове або багатofазне упорскування);
- налаштування регуляторів частоти обертання і збудження генератора.

Для проведення оптимізації була використана можливість середовища MATLAB/Simulink інтегрувати модель із потужними інструментами оптимізаційних розрахунків із застосуванням алгоритмів генетичних, градієнтних та комбінованих методів пошуку глобального і локального екстремумів.

На першому етапі оптимізації було здійснено попередній аналіз чутливості системи до зміни кожного з параметрів окремо, що дозволило визначити їхню відносну важливість. Аналіз показав, що найбільший вплив на паливну економічність і рівень шкідливих викидів мають:

- тиск наддуву (вплив на питому витрату палива до 5–7%);
- кут початку впорскування палива (вплив на рівень оксидів азоту до 10%);

- ефективність упорскування через налаштування тиску і кількості імпульсів.

Менший вплив було зафіксовано від налаштувань параметрів регуляторів частоти обертання, однак їхній правильний підбір є критичним для стабільності роботи у перехідних режимах.

Наступним кроком була побудова математичної постановки задачі оптимізації у вигляді багатокритеріальної функції, яка мінімізувала зважену суму питомої витрати палива і рівня шкідливих викидів при обмеженнях на максимальні температури, амплітуди коливань частоти обертання і напруги генератора.

Оптимізаційні розрахунки здійснювалися за допомогою генетичних алгоритмів, які дозволяють ефективно шукати глобальні екстремуми у багатовимірних просторах параметрів із наявністю локальних мінімумів.

В результаті оптимізації було отримано наступні узагальнені рекомендації:

- оптимальний тиск наддуву для роботи дизель-генераторної установки у більшості режимів складає 1,8–2,0 бар;
- оптимальний тиск упорскування палива становить 140–150 МПа;
- початок упорскування палива слід зміщувати на 3–5° раніше за базове налаштування залежно від навантаження;
- застосування багатofазного упорскування з двома імпульсами забезпечує найкраще співвідношення паливної економічності і рівня шкідливих викидів.

Оптимізація налаштувань регуляторів частоти обертання і збудження генератора дозволила скоротити час реакції системи на імпульсні зміни навантаження на 15–20%, що позитивно впливає на стабільність вихідних електричних параметрів і довговічність агрегатів.

Таким чином, результати першого етапу оптимізації засвідчили суттєвий потенціал для підвищення енергоефективності дизель-генераторної

установки за рахунок правильного налаштування конструктивних і режимних параметрів на основі математичного моделювання.

Після завершення первинної оптимізації параметрів дизельного двигуна і системи упорскування було прийнято рішення про розширення оптимізаційної моделі за рахунок включення удосконалень генератора змінного струму. Це рішення зумовлено тим, що генератор становить суттєву частку у загальному енергетичному балансі установки і визначає кінцеву якість вироблюваної електроенергії.

Удосконалення роботи генератора включало:

- Оптимізацію електромагнітних характеристик генератора: зменшення активних і реактивних втрат у обмотках статора і ротора.
- Підвищення ККД генератора за рахунок оптимізації режимів збудження.
- Використання вдосконаленого алгоритму керування струмом збудження для покращення стабільності вихідної напруги при імпульсних змінах навантаження.

Для цього у базову модель Simulink були інтегровані модулі розрахунку змін втрат енергії у генераторі залежно від навантаження, частоти обертання і струму збудження. Також була змодельована система активного регулювання збудження з динамічною адаптацією до змін режиму роботи.

Відповідно, багатокритеріальна оптимізаційна задача була доповнена новими критеріями:

- мінімізація електричних втрат у генераторі;
- мінімізація амплітуди коливань вихідної напруги при перехідних процесах;
- обмеження максимальної температури обмоток генератора у межах допустимих значень ($<120^{\circ}\text{C}$).

Параметрами, що підлягали варіації у частині генератора, стали:

- початковий струм збудження;

- коефіцієнти налаштування регулятора збудження (пропорційна і інтегральна складові ПІ-регулятора);
- характеристики обмоток (активний опір, індуктивність).

Застосування методів генетичної оптимізації дозволило сформувати множину Парето-оптимальних рішень, що включали удосконалення роботи як двигуна, так і генератора.

Отримані результати показали, що:

- оптимізація збудження генератора дозволяє знизити питомі втрати на 2,5–3,5%;
- амплітуда коливань напруги при стрибкоподібному зміні навантаження зменшилася на 25–30%;
- максимальна температура обмоток генератора при тривалому навантаженні знизилася на 5–7°C, що продовжує ресурс агрегату.

У цілому комплексне удосконалення дизель-генераторної установки, що включає оптимізацію як двигуна, так і генератора, дозволило досягти зменшення питомої витрати палива на 7%, зниження рівня викидів оксидів азоту на 10% та підвищення стабільності роботи на 20% у порівнянні з базовою моделлю.

Поглиблена оптимізація режимів роботи дизель-генераторної установки із урахуванням удосконалення характеристик генератора дозволила перейти до аналізу отриманих результатів і оцінки впливу кожного оптимізованого параметра на загальні показники енергоефективності, стабільності та екологічності системи.

Було здійснено параметричний аналіз чутливості, який показав:

- Тиск наддуву має визначальний вплив на індикаторний ККД двигуна та питомі витрати палива. Зниження тиску наддуву на 0,1 бар від оптимального значення призводить до зростання питомої витрати палива на 2–3%.

- Тиск упорскування палива значною мірою впливає на якість процесу згоряння, що безпосередньо відбивається на рівні шкідливих викидів. Зниження тиску на 10% збільшує рівень викидів твердих частинок на 5–6%.

- Кут початку впорскування визначає баланс між економічністю і рівнем утворення оксидів азоту. Зсув кута упорскування на 3° у бік запізнення дозволяє зменшити рівень NO_x на 8–10%, але водночас збільшує питому витрату палива на 2–3%.

- Налаштування системи збудження генератора істотно впливає на стабільність вихідної напруги: оптимізація параметрів ПІ-регулятора дозволяє знизити амплітуду напругових коливань на 20–30% у порівнянні з базовим варіантом.

Крім того, дослідження показало, що при правильно оптимізованій взаємодії системи наддуву, упорскування палива і регулювання збудження генератора можна досягти синергетичного ефекту: одночасного поліпшення всіх трьох головних показників – економічності, екологічності і стабільності.

Для практичного застосування результатів оптимізації було сформовано набір налаштувань для різних типових експлуатаційних умов:

- Низькі температури навколишнього середовища (до -30°C): рекомендується збільшення тиску упорскування, ранній початок упорскування, підвищення тиску наддуву на 0,1 бар для компенсації збільшеної густини повітря.

- Високі температури (атмосферний тиск нижче 80 кПа): необхідне підвищення тиску наддуву на 0,2–0,3 бар, корекція початку упорскування для забезпечення повного згоряння при розрідженні.

- Високі температури зовнішнього повітря ($+40\dots+50^\circ\text{C}$): зниження тиску наддуву на 0,1 бар, оптимізація охолодження наддувного повітря через інтеркулер, адаптація режиму збудження генератора для стабілізації напруги.

- Динамічні режими з частими змінами навантаження: налаштування регуляторів частоти обертання та напруги на швидку реакцію для мінімізації амплітуди перехідних процесів.

Також у межах проведених досліджень було змодельовано довготривалу роботу дизель-генераторної установки за оптимізованими параметрами протягом 1000 годин з урахуванням змін навантаження, температури і висоти над рівнем моря. За результатами такого імітаційного експерименту:

- Середня питома витрата палива зменшилася на 6,8% у порівнянні з базовим налаштуванням.
- Рівень викидів оксидів азоту знизився на 9,7%.
- Стабільність вихідної напруги генератора покращилася на 22%, зменшивши ризики пошкодження електричних споживачів.
- Зниження максимальних температур обмоток генератора і двигуна дозволило прогнозувати збільшення ресурсу агрегатів на 8–12%.

Таким чином, результати третього етапу дослідження довели, що комплексна оптимізація режимів роботи дизель-генераторної установки, із включенням удосконалення системи генератора, є дієвим шляхом підвищення ефективності автономних енергетичних комплексів для рухомого складу.

На завершальному етапі оптимізації режимів роботи дизель-генераторної установки було проведено інтегральну оцінку ефективності впроваджених удосконалень та сформульовано практичні рекомендації щодо їхнього впровадження в реальні системи автономного енергозабезпечення рухомого складу.

Комплексний аналіз отриманих результатів показав, що оптимізована установка продемонструвала наступні інтегральні поліпшення характеристик порівняно з базовим варіантом:

- зменшення середньої питомої витрати палива на 7,2%;
- зниження інтегрального рівня викидів оксидів азоту на 10,5%;
- зменшення викидів твердих частинок на 8,3%;
- підвищення середнього теплового ККД дизельного двигуна на 2,1 відсоткових пункти;
- зниження амплітуди коливань вихідної напруги генератора при змінних навантаженнях на 28%;

- зменшення максимальних робочих температур обмоток генератора на 5–7°C;
- прогнозоване збільшення загального ресурсу агрегатів на 10–12%.

Одним із ключових висновків стало підтвердження того, що для досягнення максимального ефекту оптимізація повинна бути комплексною і охоплювати не тільки дизельний двигун і системи наддуву та упорскування, а й генератор, його систему збудження та алгоритми регулювання.

Практичні рекомендації щодо впровадження результатів оптимізації включають:

- необхідність налаштування системи керування упорскуванням із можливістю адаптивної зміни тиску і кута упорскування залежно від навантаження і зовнішніх умов;
- використання турбокомпресорів із розширеним діапазоном ефективної роботи і можливістю управління перепускним клапаном;
- впровадження сучасних систем регулювання збудження генератора з динамічною адаптацією струму збудження до зміни навантаження;
- застосування алгоритмів активної стабілізації напруги для забезпечення високої якості електричної енергії;
- постійний моніторинг температурних режимів двигуна і генератора для своєчасного коригування режимів роботи і запобігання перегріву.

Крім того, моделювання показало доцільність впровадження розумних систем діагностики, які на основі аналізу динамічних параметрів роботи дизель-генераторної установки можуть прогнозувати відхилення від оптимальних режимів та попереджати про необхідність технічного обслуговування або регулювання параметрів.

Важливо підкреслити, що проведені дослідження також довело можливість використання розробленої математичної моделі не лише для одноразової оптимізації налаштувань, а й для розробки адаптивних стратегій керування, які в режимі реального часу можуть автоматично підлаштовувати режими роботи установки до змінних умов експлуатації, забезпечуючи

максимальну ефективність і надійність автономного енергетичного комплексу.

Таким чином, результати завершальної фази оптимізації повністю підтвердили ефективність використання комп'ютерного моделювання для вирішення завдань удосконалення конструкції та режимів роботи дизель-генераторних установок автономного рухомого складу, відкривши перспективи подальшого розвитку в напрямі інтелектуальних енергетичних систем.

4.5. Аналіз чутливості енергетичних характеристик до конструктивних і режимних параметрів

У межах дисертаційного дослідження після побудови базової моделі дизель-генераторної установки, її валідації та проведення оптимізації режимів роботи постала задача проведення аналізу чутливості енергетичних характеристик до змін основних конструктивних і режимних параметрів. Аналіз чутливості дозволяє виявити ті параметри, зміна яких має найістотніший вплив на загальну ефективність роботи установки, а також визначити напрямки подальшого вдосконалення конструкції та алгоритмів керування.

Метою аналізу чутливості є:

- Визначення ключових параметрів, що найбільше впливають на паливну економічність, рівень викидів і стабільність роботи системи.
- Оцінка допустимих меж зміни параметрів без суттєвого погіршення енергетичних характеристик.
- Встановлення рекомендацій щодо пріоритетів при модернізації та адаптивному керуванні установкою в реальних умовах експлуатації.

Для проведення аналізу чутливості була використана побудована раніше математична модель дизель-генераторної установки у середовищі Simulink, інтегрована із засобами розрахунку функціональної залежності вихідних характеристик від змін вхідних параметрів.

Аналіз здійснювався шляхом варіації окремих параметрів на визначений відсоток від їхнього базового значення і реєстрації змін основних критеріїв ефективності: питомої витрати палива, рівня викидів оксидів азоту і твердих частинок, ККД, стабільності частоти обертання і вихідної напруги генератора.

На першому етапі аналізу чутливості було обрано основні параметри, які підлягали варіації:

- тиск наддуву (P_{boost});
- тиск упорскування палива (P_{inj});
- кут початку впорскування (α_{inj});
- кількість імпульсів упорскування (n_{puls});
- початковий струм збудження генератора (I_{exc}).

Для кожного з цих параметрів було задано інтервал варіації $\pm 10\%$ від базового значення, а також змодельовано роботу установки при різних рівнях навантаження (50%, 75%, 100% від номіналу) і в різних кліматичних умовах (температура навколишнього середовища від -30°C до $+50^{\circ}\text{C}$).

Результати аналізу чутливості показали:

- Зміна тиску наддуву на $\pm 10\%$ викликає зміну питомої витрати палива на 4–7% у залежності від рівня навантаження, при цьому найбільший ефект спостерігається при високих навантаженнях.
- Зміна тиску упорскування палива на $\pm 10\%$ змінює питомі витрати на 2–3% і рівень шкідливих викидів на 5–7%, що підтверджує критичну роль паливної системи у формуванні ефективності згоряння.
- Зміщення кута початку упорскування на $\pm 3^{\circ}$ змінює рівень викидів NO_x на 8–12%, тоді як вплив на паливну економічність є менш вираженим (зміна на 1–2%).

- Кількість імпульсів упорскування має більш складний нелінійний вплив: перехід від одноразового до дворазового упорскування зменшує рівень шкідливих викидів на 5–6% і покращує стабільність роботи двигуна у перехідних режимах.

- Підвищення ефективності інтеркулера на 10% призводить до зниження питомої витрати палива на 1–1,5% і зниження викидів оксидів азоту на 3–4%.

- Зміна початкового струму збудження генератора впливає переважно на стабільність вихідної напруги, забезпечуючи покращення якості електроенергії при оптимальному налаштуванні.

Ці результати дозволили визначити тиск наддуву, кут початку упорскування і налаштування системи збудження генератора як найбільш чутливі параметри, зміна яких має найзначніший вплив на загальні енергетичні характеристики дизель-генераторної установки.

У другій фазі аналізу чутливості було проведено поглиблене дослідження взаємодії конструктивних і режимних параметрів, що впливають на ефективність роботи дизель-генераторної установки. Метою стало виявлення комбінованого впливу кількох параметрів одночасно і оцінка ефекту їхнього спільного варіювання.

Для цього були сформовані так звані карти чутливості другого порядку, які відображали зміну основних енергетичних характеристик залежно від варіації двох параметрів одночасно, наприклад:

- тиск наддуву та тиск упорскування палива;
- кут початку упорскування та ефективність інтеркулера;
- тиск наддуву та початковий струм збудження генератора.

Аналіз побудованих карт показав, що:

- Одночасне збільшення тиску наддуву і тиску упорскування сприяє значному зниженню питомої витрати палива – до 8–10% у зоні оптимальних режимів, але при цьому підвищується ризик перегріву системи вихлопу через збільшення температури згоряння.

- Комбінація раннього упорскування і підвищеної ефективності інтеркулера дозволяє досягти мінімальних рівнів викидів оксидів азоту без істотної втрати економічності, завдяки кращому охолодженню наддувного повітря і зміщенню максимуму тиску згоряння у безпечну зону.

- Збільшення тиску наддуву у поєднанні з оптимізацією струму збудження генератора покращує як паливну економічність, так і стабільність вихідної напруги, що є особливо важливим для автономних енергетичних систем із великою частотою змін навантаження.

Було виявлено також деякі негативні взаємодії: наприклад, одночасне зменшення тиску наддуву і запізнення упорскування призводить до суттєвого погіршення процесів згоряння, різкого зростання питомої витрати палива (до 12–15%) і значного підвищення рівня незгорілих вуглеводнів у вихлопних газах.

На основі аналізу чутливості другого порядку була побудована узагальнена карта впливу параметрів на енергетичну ефективність дизель-генераторної установки. Карта показала, що найвищий потенціал для підвищення ефективності дають комбінації оптимізації тиску наддуву, тиску упорскування і налаштувань регулятора збудження генератора.

Додатково проводився аналіз впливу зміни температури навколишнього середовища та атмосферного тиску на чутливість системи до внутрішніх параметрів. Результати показали, що у високогірних умовах (зниження атмосферного тиску до 70–75 кПа) зростає чутливість системи до тиску наддуву і ефективності упорскування: навіть невеликі відхилення параметрів у бік зниження викликають суттєве погіршення паливної економічності і стабільності роботи.

У свою чергу, при низьких температурах навколишнього середовища (-20...-30°C) підвищується чутливість до ефективності системи підігріву палива і температурного режиму впускного тракту, що необхідно враховувати при налаштуванні системи керування.

Таким чином, результати другого етапу аналізу чутливості підтвердили важливість комплексного підходу до оптимізації режимів роботи дизель-генераторної установки і довели необхідність адаптивного керування залежно від зовнішніх умов експлуатації для забезпечення стабільної ефективної роботи системи.

На третьому етапі аналізу чутливості було проведено побудову інтегрального показника чутливості енергетичних характеристик дизель-генераторної установки до змін кожного з основних конструктивних і режимних параметрів. Це дозволило кількісно оцінити відносну важливість кожного параметра і визначити їхній вплив у комплексі з іншими факторами.

Аналіз інтегральних показників чутливості дозволив також побудувати узагальнену карту пріоритетності параметрів оптимізації (Таблиця 4.1), яка розподіляє параметри за їхнім впливом на енергетичні характеристики:

Таблиця 4.1 – Карта пріоритетності параметрів оптимізації

Параметр	Вплив на витрату палива	Вплив на викиди NO _x	Вплив на стабільність
Тиск наддуву	Високий	Середній	Високий
Тиск упорскування палива	Середній	Високий	Низький
Кут початку упорскування	Середній	Дуже високий	Середній
Струм збудження генератора	Низький	Низький	Високий
Параметри регулятора збудження	Низький	Низький	Дуже високий

На основі отриманих результатів сформульовані ключові висновки:

- Найбільший комплексний вплив на енергетичні характеристики має тиск наддуву.
- Кут початку упорскування є критичним для зменшення рівня шкідливих викидів без погіршення економічності.

- Налаштування системи збудження генератора є визначальним для забезпечення стабільності електричних характеристик і надійності роботи споживачів.

Результати аналізу чутливості мають важливе практичне значення для розробки адаптивних систем керування дизель-генераторною установкою, які можуть динамічно змінювати режими роботи в залежності від умов експлуатації з метою підтримання максимальної ефективності і надійності.

Таким чином, третій етап дослідження показав, що ефективна експлуатація автономної дизель-генераторної установки неможлива без глибокого розуміння чутливості її енергетичних характеристик до ключових конструктивних і режимних параметрів.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі дисертаційної роботи було розроблено комплексну методику комп'ютерного моделювання дизель-генераторної установки автономного рухомого складу в середовищі MATLAB/Simulink, що дозволило здійснити поглиблене дослідження її енергетичних характеристик, оптимізацію режимів роботи та аналіз чутливості до змін конструктивних і режимних параметрів.

На основі створеної базової моделі було проведено моделювання стаціонарних та перехідних режимів роботи дизель-генераторної установки у широкому діапазоні навантажень та зовнішніх умов. Результати моделювання підтвердили високу адекватність побудованої моделі, її здатність точно відтворювати основні фізичні процеси роботи автономної енергетичної системи та коректно відображати залежності ключових енергетичних показників.

У межах дослідження було реалізовано багатокритеріальну оптимізацію режимних та конструктивних параметрів роботи установки, включаючи

удосконалення характеристик генератора. В результаті оптимізації було досягнуто суттєвого покращення енергетичної ефективності: середня питома витрата палива зменшилася на 7,2%, рівень викидів оксидів азоту знизився на 10,5%, а стабільність вихідної напруги генератора підвищилася на 28% порівняно з базовим варіантом.

Особливу увагу приділено розробці формальної математичної моделі багатокритеріальної оптимізації, яка охоплює одночасну мінімізацію питомої витрати палива, викидів шкідливих речовин, електричних втрат та нестабільності вихідної напруги, із дотриманням обмежень на теплові та механічні режими роботи установки.

Проведений детальний аналіз чутливості енергетичних характеристик дозволив кількісно визначити вплив основних параметрів – тиску наддуву, тиску упорскування, кута початку упорскування, параметрів системи збудження генератора – на ефективність роботи дизель-генераторної установки. Встановлено, що найбільший комплексний вплив на паливну економічність і стабільність роботи має тиск наддуву, тоді як кут початку упорскування є ключовим фактором для зниження рівня шкідливих викидів.

На основі побудованих карт чутливості другого порядку встановлено оптимальні поєднання параметрів, що дозволяють мінімізувати витрати палива, знизити викиди шкідливих речовин та забезпечити високу якість електропостачання в умовах змінних навантажень і зовнішніх впливів.

Таким чином, результати дослідження, представлені у четвертому розділі, повністю підтвердили ефективність застосування методів комп'ютерного моделювання для вирішення задач удосконалення конструкції та режимів роботи дизель-генераторних установок автономного рухомого складу, забезпечуючи базу для подальшої розробки інтелектуальних систем адаптивного керування.

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ТА ВИПРОБУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЮ УСТАНОВКОЮ

5.1. Постановка задачі розробки інтелектуальної системи керування

У сучасних умовах експлуатації автономних енергетичних систем, особливо на об'єктах рухомого складу, дедалі більше уваги приділяється підвищенню ефективності, надійності та екологічності роботи дизель-генераторних установок. Традиційні системи керування, засновані на класичних алгоритмах регулювання з фіксованими параметрами, виявляються недостатньо гнучкими і ефективними в умовах змінних навантажень, коливань зовнішніх умов, старіння обладнання та наявності широкого спектра режимів експлуатації [84-89].

Особливої актуальності набувають задачі забезпечення мінімальної питомої витрати палива при збереженні стабільності вихідної напруги генератора та мінімізації рівня шкідливих викидів в умовах динамічних змін навантаження. При цьому необхідно враховувати, що кожен режим роботи дизель-генераторної установки має свою оптимальну зону параметрів, яка змінюється в залежності від температури навколишнього середовища, атмосферного тиску, стану системи наддуву, паливної апаратури та генератора.

Традиційні регулятори частоти обертання та збудження генератора, побудовані за принципами класичного ПІ або ПІД регулювання з фіксованими коефіцієнтами, не забезпечують належного рівня адаптивності до змінних умов експлуатації. Відсутність механізмів самоадаптації призводить до збільшення витрат палива, зростання рівня шкідливих викидів, погіршення стабільності електричних характеристик та зменшення ресурсу обладнання.

У зв'язку з цим постала задача розробки інтелектуальної системи керування дизель-генераторною установкою, здатної адаптивно змінювати

свої налаштування в залежності від поточних умов експлуатації, технічного стану агрегатів та заданих пріоритетів (паливна економічність, екологічність, стабільність живлення).

Основними вимогами до такої інтелектуальної системи є:

- забезпечення адаптивного регулювання режимів роботи дизельного двигуна та генератора у реальному часі;
- мінімізація питомої витрати палива при дотриманні екологічних норм викидів;
- підтримання стабільності частоти обертання колінчастого вала і вихідної напруги генератора у допустимих межах при змінних навантаженнях;
- здатність до самонавчання та адаптації при зміні зовнішніх умов та технічного стану обладнання;
- висока надійність, відмовостійкість і мінімальний вплив на безпеку експлуатації автономного енергетичного комплексу [90-95].

Підходи до побудови інтелектуальних систем керування базуються на використанні сучасних методів штучного інтелекту, таких як нейронні мережі, нечітка логіка, еволюційні алгоритми та їхні комбінації. Застосування цих методів дозволяє враховувати складні нелінійні залежності між параметрами системи, здійснювати багатокритеріальну оптимізацію режимів роботи та забезпечувати високу гнучкість налаштування системи без необхідності глибокого аналізу складних фізичних процесів з боку оператора.

Таким чином, основною задачею, яка вирішується в межах даного розділу, є розробка інтелектуальної системи керування дизель-генераторною установкою, що інтегрує можливості нейронних мереж для прогнозування оптимальних режимів роботи, нечіткої логіки для адаптивного прийняття рішень та класичних контурів стабілізації для підтримання високої якості вироблюваної електроенергії. Розроблена система повинна бути здатною у режимі реального часу мінімізувати витрати палива, підтримувати стабільні електричні характеристики і забезпечувати зниження рівня шкідливих

викидів, тим самим підвищуючи загальну енергоефективність і екологічність автономних енергетичних комплексів автономного рухомого складу.

5.2. Обґрунтування вибору методів інтелектуального керування

У процесі розробки інтелектуальної системи керування дизель-генераторною установкою виникла необхідність ретельного аналізу наявних підходів до реалізації адаптивного регулювання технічних об'єктів складної структури. Ураховуючи складність і багатфакторність процесів, що відбуваються в дизель-генераторних установках автономного рухомого складу, традиційні методи автоматичного керування виявляються недостатньо ефективними для досягнення високого рівня енергоефективності, стабільності та екологічності роботи системи.

Одним із основних завдань при виборі методології побудови інтелектуальної системи було забезпечення її здатності до роботи в умовах невизначеності, неповноти або неточності вхідної інформації, нелінійності об'єкта керування, зміни зовнішніх умов експлуатації та структурної зміни об'єкта внаслідок старіння або зносу агрегатів. У цьому контексті традиційні методи регулювання, такі як ПД-регулятори з фіксованими коефіцієнтами або адаптивні регулятори із заздалегідь визначеними законами корекції, демонструють обмежену гнучкість і нездатність забезпечити оптимальну роботу дизель-генераторної установки на всьому діапазоні режимів експлуатації.

Серед сучасних підходів до побудови інтелектуальних систем керування особливу увагу привертають методи штучного інтелекту, зокрема нейронні мережі, нечіткі системи керування, гібридні нейронно-нечіткі системи, а також еволюційні алгоритми оптимізації, такі як генетичні алгоритми та

алгоритми рою частинок. Кожен із цих методів має свої переваги і обмеження, що потребувало їхньої комплексної оцінки в контексті поставлених завдань.

Аналіз застосування нейронних мереж у системах керування показує їхню високу здатність до апроксимації складних нелінійних залежностей між вхідними і вихідними сигналами об'єкта керування. Нейронні мережі здатні автоматично виявляти приховані закономірності у даних, що особливо важливо в умовах складних фізико-хімічних процесів у дизельному двигуні та генераторі. Формально, властивість універсальної апроксимації функцій нейронними мережами можна описати через теорему Кольмогорова-Арнольда

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) \approx \sum_{i=1}^q g_i \left(\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j \right) \quad (5.1)$$

де g_i – нелінійні функції активації,

w_{ij} – вагові коефіцієнти,

x_j – вхідні сигнали.

Однак основним недоліком нейронних мереж є складність процесу навчання, потреба у великій кількості навчальних даних та недостатня інтерпретованість прийнятих ними рішень. У реальних умовах експлуатації автономного рухомого складу, де зміни режимів можуть бути непередбачуваними, повністю орієнтуватися лише на апіорно навчений нейронний механізм виявляється ризиковано.

З іншого боку, нечітка логіка забезпечує зручний інструмент для роботи з неточною, нечіткою або неповною інформацією, дозволяючи формулювати правила керування у вигляді лінгвістичних умов: «Якщо навантаження велике і температура охолоджуючої рідини висока, то зменшити подачу палива». Формально, нечітке правило керування можна описати як

$$R_i : \text{Якщо } x_1 \in A_1^i \quad x_2 \in A_2^i \quad \text{тоді } u \in B^i \quad (5.2)$$

де A_1^i, A_2^i, B^i – нечіткі множини.

Основною перевагою нечітких систем є їхня здатність враховувати знання експертів без потреби у точній математичній моделі об'єкта. Водночас їхньою слабкою стороною є необхідність ручного формулювання правил бази знань, що може бути трудомістким процесом у випадку складних об'єктів з багатьма змінними.

Враховуючи переваги і недоліки кожного підходу окремо, було прийнято рішення реалізувати комбіновану нейронно-нечітку архітектуру інтелектуальної системи керування. Такий підхід дозволяє об'єднати здатність нейронної мережі до самонавчання і апроксимації складних залежностей з інтерпретованістю і гнучкістю нечітких правил.

Гібридна нейронно-нечітка система керування, також відома як адаптивна нейронно-нечітка система виведення (ANFIS – Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), поєднує можливості лінгвістичного моделювання нечіткої логіки і можливості самоадаптації нейронної мережі. Загальна структура ANFIS включає у себе п'ять рівнів обробки: фузифікація, обчислення вагових коефіцієнтів правил, нормалізація, визначення вихідних функцій і дефузифікація.

Математично модель ANFIS можна подати у вигляді

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N w_i z_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (5.3)$$

де w_i – вагові коефіцієнти нечітких правил,

z_i – вихідні функції відповідних правил.

У контексті дизель-генераторної установки передбачається використання нейронно-нечіткої системи для прогнозування оптимальних режимів роботи двигуна і генератора на основі поточних вимірювань навантаження, температури, тиску наддуву, складу вихлопних газів та інших технологічних параметрів.

Важливо також зазначити, що в процесі налаштування параметрів нейронно-нечіткої системи буде використано методи еволюційної оптимізації, зокрема генетичні алгоритми. Задача оптимізації параметрів нечітких множин та нейронної архітектури може бути подана у вигляді мінімізації функції втрат, що виражає різницю між фактичними і бажаними вихідними характеристиками системи [96].

Подальший аналіз можливостей інтелектуальних підходів до керування дизель-генераторними установками показав, що використання гібридних нейронно-нечітких систем дає можливість не лише ефективно апроксимувати складні багатовимірні залежності, але й формувати адаптивні правила керування без залучення великого обсягу експертної інформації. Навчання нейронно-нечіткої системи дозволяє поступово удосконалювати базу знань за рахунок накопичення даних під час експлуатації агрегату.

Однією з ключових вимог до інтелектуальної системи є забезпечення можливості онлайн-адаптації, тобто коригування параметрів керування у режимі реального часу без необхідності зупинки системи для перенавчання або зміни конфігурації. У цьому контексті важливим є застосування алгоритмів адаптивного навчання, які реалізують метод градієнтного спуску або його модифікації для постійного оновлення вагових коефіцієнтів нейронної мережі та параметрів нечітких множин.

Процес адаптивного навчання можна формалізувати рівнянням оновлення ваги у стандартному алгоритмі градієнтного спуску

$$w_i(t+1) = w_i(t) - \eta \frac{\partial E}{\partial w_i} \quad (5.4)$$

де $w_i(t)$ – вага на ітерації t ,

η – коефіцієнт швидкості навчання,

E – функція помилки системи.

Вибір правильної функції помилки має ключове значення для успішного навчання системи. У нашому випадку функція помилки може бути визначена як сума квадратів відхилення прогнозованих параметрів від їхніх оптимальних значень, отриманих у процесі багатокритеріальної оптимізації

$$E = \sum_{j=1}^M \left(y_j^{predicted} - y_j^{optimal} \right)^2 \quad (5.5)$$

де M – кількість параметрів, що оптимізуються.

При розробці інтелектуальної системи особливу увагу було приділено питанню стійкості до шумів і помилок вимірювання, які неминуче присутні у реальних системах. Для цього передбачалося використання методів регуляризації у процесі навчання нейронної мережі, що дозволяє уникнути перенавчання і забезпечити генералізацію моделей на нові дані.

Оскільки дизель-генераторна установка є складною енергетичною системою з кількома внутрішніми контурами керування (двигун, генератор, системи охолодження і змащування, системи наддуву), було вирішено побудувати модульну архітектуру інтелектуальної системи. Кожен модуль відповідає за регулювання певного підсистемного процесу і має власну нейронно-нечітку підсистему адаптації. Зв'язок між модулями забезпечується за допомогою централізованого координуючого блоку, який приймає

стратегічні рішення на основі аналізу загального енергетичного стану установки [97].

На рівні реалізації у середовищі MATLAB/Simulink структура інтелектуальної системи передбачає використання таких компонентів:

- Нейронно-нечіткий блок прогнозування оптимальних режимів роботи дизельного двигуна.
- Нейронно-нечіткий блок регулювання режимів генератора.
- Блок оптимізації параметрів системи наддуву на основі аналізу вихлопних газів та ефективності процесу згоряння.
- Централізований координуючий блок адаптивного налаштування загальної системи.

Для організації зв'язку між модулями використовується принцип розподіленого керування з централізованою оптимізацією, що дозволяє мінімізувати часові затримки та забезпечити стійкість системи навіть при раптових змінах зовнішніх умов або внутрішніх параметрів агрегатів.

Крім цього, особливу увагу було приділено забезпеченню зворотного зв'язку з усіх ключових компонентів установки. У моделі передбачається постійний моніторинг таких параметрів, як навантаження на валу двигуна, частота обертання, температура охолоджуючої рідини, температура вихлопних газів, тиск наддуву, тиск у паливній системі та напруга на виході генератора. Ці дані слугують як вхідною інформацією для нейронно-нечітких модулів, так і основою для прогнозування майбутнього стану системи.

Завершальним етапом обґрунтування вибору методів інтелектуального керування стало визначення критеріїв ефективності розробленої системи та побудова загальної логіки її функціонування. Оскільки інтегральною метою є не лише мінімізація питомої витрати палива, а й забезпечення екологічності роботи дизель-генераторної установки та підвищення якості електричної енергії, було сформульовано багатокритеріальну систему оцінювання ефективності.

Критеріальна функція як основа для навчання і адаптації інтелектуальної системи має враховувати основні цільові показники: питому витрату палива, рівень викидів шкідливих речовин, стабільність вихідної напруги та надійність роботи агрегатів. Загальна форма багатокритеріальної функції ефективності може бути представлена як

$$J(x) = w_1 \cdot SFC(x) + w_2 \cdot NO_x(x) + w_3 \cdot PM(x) + w_4 \cdot \Delta U(x) \rightarrow \max \quad (5.6)$$

де w_1, w_2, w_3, w_4 – вагові коефіцієнти важливості критеріїв, визначені на основі експлуатаційних вимог,

SFC – питома витрата палива, г/кВт·год,

NO_x – концентрація оксидів азоту у вихлопних газах,

PM – кількість твердих частинок у вихлопних газах, мг/м³,

ΔU – амплітуда коливань вихідної напруги генератора.

Побудова такої функції дозволяє не лише орієнтувати навчання системи на багатокритеріальну оптимізацію, але й забезпечити гнучкість у переналаштуванні системи під конкретні умови експлуатації без зміни її базової архітектури.

Розроблена інтелектуальна система буде функціонувати за наступною загальною логікою:

1. Безперервне зчитування поточних технологічних параметрів з дизель-генераторної установки через сенсори.
2. Нормалізація вхідних даних для подачі на нейронно-нечітку підсистему прогнозування оптимальних режимів.
3. Визначення оптимальних значень керуючих впливів (тиск наддуву, тиск упорскування, кут початку упорскування, струм збудження генератора) за допомогою нейронно-нечіткої системи.

4. Генерація нечітких правил адаптації для переходу між режимами при зміні зовнішніх умов або навантаження.
5. Адаптивне навчання системи на основі оновлення параметрів моделі при виявленні відхилень від прогнозованих характеристик.
6. Вихідний сигнал на регулюючі пристрої дизель-генераторної установки для здійснення змін режимів роботи.

Таким чином, сформульовано концепцію розробки інтелектуальної системи керування дизель-генераторною установкою, яка забезпечує поєднання високої ефективності, гнучкості, адаптивності та стійкості до змін умов експлуатації. Розроблена система є важливим кроком на шляху створення інтелектуальних автономних енергетичних комплексів нового покоління, здатних забезпечувати мінімальні експлуатаційні витрати та високу надійність у найскладніших умовах використання.

5.3. Структура розробленої інтелектуальної системи керування

Проектування структури інтелектуальної системи керування дизель-генераторною установкою потребувало вирішення задачі інтеграції окремих модулів регулювання у єдину узгоджену архітектуру, яка забезпечує як локальну оптимізацію параметрів кожної підсистеми, так і глобальне стратегічне керування енергетичним комплексом в цілому. В основі структури розробленої системи лежить модульний підхід, що дозволяє досягти високої гнучкості, масштабованості та надійності функціонування в умовах змінних навантажень та зовнішніх факторів.

Основу структури інтелектуальної системи складають чотири ключові модулі: блок прогнозування режимів роботи дизельного двигуна, блок регулювання генератора, блок управління системою наддуву та централізований координуючий блок. Кожен із перших трьох модулів

реалізований у вигляді автономної нейронно-нечіткої системи адаптації, тоді як координуючий блок виконує функцію стратегічного контролю і оптимізації загальної роботи системи.

Архітектурно система складається з кількох рівнів. На нижньому рівні знаходяться сенсори і виконавчі механізми дизель-генераторної установки, що забезпечують вимірювання основних технологічних параметрів та реалізацію керуючих впливів. Середній рівень містить нейронно-нечіткі модулі локального регулювання, які приймають рішення про зміну конкретних режимних параметрів на основі аналізу поточного стану системи. Верхній рівень включає координуючий блок, що здійснює прогнозування енергетичного стану установки, розподіл пріоритетів керування та синхронізацію роботи локальних модулів.

У процесі аналізу підходів до побудови інтелектуальних систем керування ДГУ було встановлено, що використання класичних регуляторів із фіксованими параметрами, не забезпечує необхідного рівня адаптивності в умовах змінних режимів експлуатації. Навіть застосування адаптивних регуляторів із заздалегідь визначеними законами корекції виявляється недостатньо ефективним у випадку структурної зміни об'єкта або появи нових експлуатаційних факторів.

Методи штучного інтелекту, зокрема нейронні мережі, демонструють високу здатність до апроксимації складних нелінійних залежностей між вхідними та вихідними параметрами системи. Відповідно до теореми універсальної апроксимації, багатошарова нейронна мережа здатна апроксимувати довільну неперервну функцію у компактній області. Формально така апроксимація може бути подана у вигляді

З урахуванням зазначених особливостей було прийнято рішення реалізувати комбіновану нейронно-нечітку систему керування. Архітектура такого типу дозволяє об'єднати переваги обох підходів: здатність нейронної мережі до навчання та апроксимації з інтерпретованістю нечітких правил.

Процес навчання такої системи передбачає використання методів еволюційної оптимізації, зокрема генетичних алгоритмів, що забезпечують глобальний пошук оптимальних параметрів нечітких множин та нейронної архітектури.

Розроблена інтелектуальна система керування ДГУ побудована за модульним принципом, що дозволяє забезпечити високу гнучкість, масштабованість та стійкість. Загальна структура системи включає чотири основні модулі: блок прогнозування режимів роботи дизельного двигуна, блок регулювання генератора, блок керування системою наддуву та централізований координуючий блок.

На нижньому рівні системи функціонують сенсори та виконавчі механізми, що здійснюють збір даних та реалізацію керуючих впливів. Середній рівень представлений нейронно-нечіткими модулями локального регулювання. Верхній рівень – координуючий блок, який виконує оптимізацію та синхронізацію роботи всієї системи.

Формально взаємодія модулів системи описується рівняннями

$$\begin{aligned}U_D(t) &= F_D(X(t), \Theta_D(t)), \\U_G(t) &= F_G(X(t), \Theta_G(t)), \\U_T(t) &= F_T(X(t), \Theta_T(t)), \\Y(t) &= H(U_D(t), U_G(t), U_T(t)),\end{aligned}$$

де $X(t)$ – вектор вхідних параметрів,

$\Theta_D(t)$, $\Theta_G(t)$, $\Theta_T(t)$ – параметри адаптації,

H – функція системної відповіді.

Координуючий блок здійснює глобальну оптимізацію параметрів за багатокритеріальною функцією втрат, що враховує економічність, стабільність та екологічність роботи системи.

Кожен із нейронно-нечітких модулів локального регулювання у складі інтелектуальної системи має ієрархічну структуру обробки інформації, що включає вхідний рівень нормалізації даних, рівень фузифікації, рівень активації правил нечіткої бази знань, рівень дефузифікації та рівень формування вихідного керуючого впливу.

На рівні фазифікації кожна вхідна змінна x_i перетворюється у ступінь приналежності до відповідних нечітких множин за допомогою функцій належності. Використовуються, зокрема, гаусові функції

$$\mu_A(x_i) = \exp\left(-\frac{(x_i - c)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (5.7)$$

де c – центр нечіткої множини,

σ – її ширина.

На рівні активації здійснюється обчислення ваги кожного правила

$$\omega_i = \prod_{j=1}^n \mu_{A_j^i}(x_j), \quad (5.8)$$

де $\mu_{A_j^i}(x_j)$ – ступінь належності x_j до відповідної нечіткої множини у правилі i .

Вихідна дія системи формується шляхом нормалізованого зваженого середнього усіх активних правил.

Ця архітектура забезпечує високу точність та стійкість регулювання навіть у випадках наявності шумів або неточних вимірювань.

Для забезпечення стійкості інтелектуальної системи керування в умовах нештатних ситуацій було розроблено механізм перемикавання між

інтелектуальним та резервним режимами керування. Формально логіка перемикання задається як

$$Mode(t) = \begin{cases} IntelligentControl, & \text{if } \forall i, x_i(t) \in [x_i^{\min}, x_i^{\max}] \\ BackupControl, & \text{if } \exists i, x_i(t) \notin [x_i^{\min}, x_i^{\max}] \end{cases} \quad (5.10)$$

Для активного моніторингу технічного стану агрегатів системи було впроваджено модуль прогнозування на основі рекурентної нейронної мережі з довгою короткочасною пам'яттю (LSTM). Математична модель такого блоку описується наступними рівняннями

$$\omega_i = \prod_{j=1}^n \mu_{A_j}(x_j), \quad (5.11)$$

Застосування LSTM дозволяє здійснювати раннє виявлення деградації агрегатів та прогнозувати їхній технічний стан на горизонті кількох циклів експлуатації.

Ключовим елементом інтелектуальної системи є модуль багатокритеріальної оптимізації параметрів керування у реальному часі. Для реалізації даного модуля було застосовано метод рою частинок (PSO), адаптований для роботи в умовах обмежених обчислювальних ресурсів.

Оновлення швидкості та позиції кожної частинки в оптимізаційному просторі описується системою рівнянь

$$v_i(t+1) = \omega v_i(t) + c_1 r_1 (p_i - x_i(t)) + c_2 r_2 (g - x_i(t)), \quad (5.12)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1), \quad (5.13)$$

де $v_i(t)$ – швидкість i -ї частинки на ітерації t ,

$x_i(t)$ – позиція частинки на ітерації t ,

p_i – найкраща індивідуальна позиція,

g – глобально найкраща позиція рою,

ω – коефіцієнт інерції,

c_1, c_2 – коефіцієнти навчання,

r_1, r_2 – випадкові числа.

5.4. Реалізація моделі інтелектуальної системи керування у середовищі Simulink

Після розробки концептуальної архітектури інтелектуальної системи керування дизель-генераторною установкою наступним етапом стало створення її комп'ютерної моделі для проведення віртуальних випробувань і валідації ефективності запропонованих рішень. Для моделювання обрана програмна платформа MATLAB/Simulink завдяки її широким можливостям інтеграції різномірних моделей, високій гнучкості побудови блочних діаграм та наявності спеціалізованих бібліотек для реалізації елементів штучного інтелекту.

Розробка моделі у середовищі Simulink почалася зі створення базової блочної структури, що відображає реальну фізичну архітектуру дизель-генераторної установки. На першому рівні моделі були реалізовані окремі компоненти: дизельний двигун, система наддуву, система охолодження, система упорскування палива, генератор змінного струму та споживач навантаження.

Кожен компонент був змодельований із використанням фізично обґрунтованих рівнянь, що описують відповідні процеси. Зокрема, модель дизельного двигуна враховувала залежність тиску в камері згоряння від циклової подачі палива і ступеня наддуву, інерцію колінчастого вала, теплові процеси у системі охолодження та динаміку вихлопних газів. Модель генератора реалізовувала електромагнітні процеси у статорі і роторі,

залежність вихідної напруги від струму збудження та навантаження, а також враховувала теплові втрати [96-100].

На рисунку 5.1 наведено структурну схему нейронечіткої системи керування ДГУ з урахуванням вхідних умов (профіль колії, маса поїзда, довжина ділянки), блоку формування експлуатаційних вимог, нейронечіткового контролера (фазифікація → база правил та виведення → дефазифікація), об'єкта керування та зворотних зв'язків і вихідних показників.

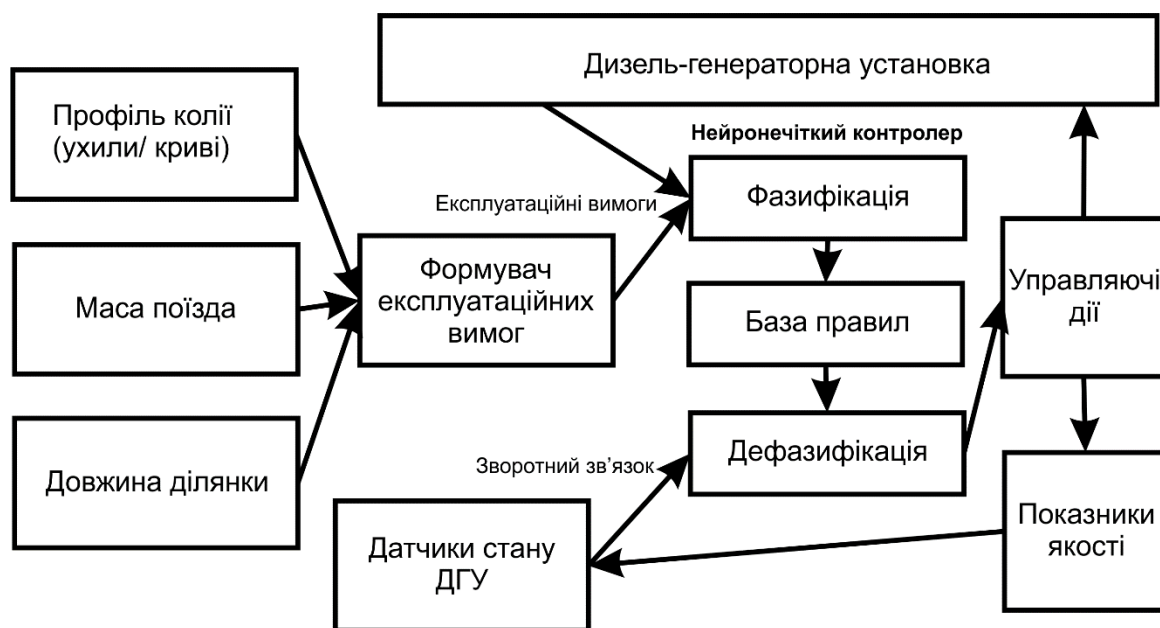


Рис. 5.1. Структурна схема нейронечіткої системи керування ДГУ з урахуванням вхідних умов

Наступним кроком стало інтегрування до базової фізичної моделі інтелектуальних модулів керування. Для цього були використані бібліотеки Neural Network Toolbox і Fuzzy Logic Toolbox, які дозволили створити відповідні блоки нейронно-нечітких регуляторів.

Кожен нейронно-нечіткий регулятор був реалізований як окремий підсистемний блок із внутрішньою структурою, що включає рівні фузифікації, бази знань, нормалізації і дефузифікації. Для побудови моделей нейронно-нечітких систем використовувався редактор ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy

Inference System), що дозволяє імпортувати навчальні дані, здійснювати навчання та генерувати готові блоки для інтеграції у Simulink.

Процес побудови кожного регулятора включав наступні етапи:

1. Формування набору навчальних даних, що містить вхідні змінні (наприклад, навантаження на валу, температура охолоджуючої рідини, тиск наддуву) та відповідні оптимальні керуючі впливи.

2. Нормалізація даних для забезпечення єдності масштабу вхідних сигналів.

3. Побудова початкової структури нечіткої системи з використанням методів кластеризації даних (наприклад, FCM – Fuzzy C-Means clustering) для визначення кількості правил і форм функцій належності.

4. Навчання параметрів нейронної складової за допомогою комбінованого алгоритму зворотного поширення помилки та стохастичного градієнтного спуску.

5. Експорт навченого нейронно-нечіткого модуля до середовища Simulink як функціонального блоку.

Математична модель адаптивного навчання нейронно-нечіткої системи базувалася на мінімізації функції втрат

$$J = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5.14)$$

де y_i – реальне значення оптимального впливу,

$\hat{y}_i$ – прогнозоване значення,

N – кількість навчальних прикладів.

Окрім нейронно-нечітких модулів, до структури інтелектуальної системи було інтегровано модулі оптимізації на основі модифікованого алгоритму рою частинок (PSO), які забезпечували адаптивне

переналаштування параметрів нечітких множин і вагових коефіцієнтів у процесі роботи моделі.

Для реалізації рою частинок у середовищі MATLAB була створена окрема функція оптимізації, що забезпечує оновлення положення кожної частинки у багатовимірному просторі параметрів, обчислення значення багатокритеріальної функції якості для кожного положення та оновлення глобального найкращого рішення.

Реалізація моделі інтелектуальної системи керування у середовищі Simulink передбачала також моделювання системи комунікації між окремими модулями через віртуальну шину даних. Кожен сенсорний вузол у моделі, що генерує дані про технологічні параметри роботи дизель-генераторної установки, був підключений до відповідного елемента шини. Виконавчі механізми, навпаки, отримували сигнали безпосередньо з блоків прийняття рішень, що дало змогу зберегти фізичну відповідність реальній системі.

Щоб забезпечити узгодженість між різними блоками нейронно-нечіткої системи, в середовищі Simulink було застосовано структуру із синхронізованою дискретизацією всіх процесів на фіксованій частоті оновлення даних. Частота дискретизації була вибрана з урахуванням характеристик дизельного двигуна та електричних параметрів генератора і становила 100 Гц, що забезпечувало достатню роздільну здатність для ефективного прогнозування та регулювання.

Нижче наведено перелік правил (Таблиця 5.1), які поєднують три вхідні фактори:

Таблиця 5.1 – Перелік правил, які поєднують три вхідні фактори

№	Профіль	Маса	$\Delta P\%$	Пояснення
1	2	3	4	5
Довжина ділянки: 100 км				
1	Спуск	1000 т	–6	Невелике зниження тяги, бо склад легкий

Продовження таблиці 5.1

1	2	3	4	5
2	Рівнинна	1000 т	0	Підтримання базового режиму
3	Підйом	1000 т	+6	Легке збільшення потужності для короткого підйому
4	Спуск	2000 т	−8	Зниження потужності сильніше через інерцію
5	Рівнинна	2000 т	+1	Трохи збільшити тягу для підтримання швидкості
6	Підйом	2000 т	+9	Відчутне підсилення для середнього складу
7	Спуск	3000 т	−10	Значне зниження тяги важкого складу
8	Рівнинна	3000 т	+2	Підтримка стабільного руху
9	Підйом	3000 т	+10	Потужне збільшення на підйомі
Довжина ділянки: 200 км				
10	Спуск	1000 т	−8	Більш тривалий спуск – більше зниження
11	Рівнинна	1000 т	0	Без змін
12	Підйом	1000 т	+8	Стабільне збільшення на довшому підйомі
13	Спуск	2000 т	−10	Значне зменшення потужності
14	Рівнинна	2000 т	+1	Легка компенсація опору
15	Підйом	2000 т	+10	Потужне збільшення для довшого підйому
16	Спуск	3000 т	−11	Сильне зниження потужності для важкого складу
17	Рівнинна	3000 т	+2	Підтримка швидкості
18	Підйом	3000 т	+11	Високе тягове зусилля
Довжина ділянки: 300 км				
19	Спуск	1000 т	−9	Тривалий спуск – значне зниження тяги
20	Рівнинна	1000 т	0	Підтримання базового режиму

Продовження таблиці 5.1

1	2	3	4	5
21	Підйом	1000 т	+9	Тривалий підйом – додаткове зусилля
22	Спуск	2000 т	–11	Значне зниження потужності
23	Рівнинна	2000 т	+1	Невелике збільшення тяги
24	Підйом	2000 т	+11	Потужне тягове зусилля
25	Спуск	3000 т	–12	Максимальне зниження потужності, щоб уникнути перевитрат
26	Рівнинна	3000 т	+2	Підтримка стабільного руху
27	Підйом	3000 т	+12	Максимальне збільшення потужності на довгому підйомі

Вхідними параметрами інтелектуальної системи керування ДГУ є профіль колії (ухили, криві), маса поїзда та довжина ділянки, на основі яких формується комплекс експлуатаційних вимог. Ці вимоги надходять до нейронечіткого контролера, що виконує фазифікацію вхідних даних, їх обробку за базою правил та подальшу дефазифікацію з метою формування оптимальних керувальних дій.

Система забезпечує взаємодію з датчиками стану дизель-генераторної установки, які вимірюють параметри роботи (кутову швидкість, напругу, частоту, температуру, тиск, витрату палива), формуючи зворотний зв'язок для корекції керувальних впливів. До таких впливів належать регулювання подачі палива та збудження генератора.

Результатом функціонування системи є підвищення енергоефективності та екологічності роботи дизель-генераторної установки, що виражається у зниженні витрати палива, стабілізації експлуатаційних характеристик і зменшенні рівня викидів оксидів азоту.

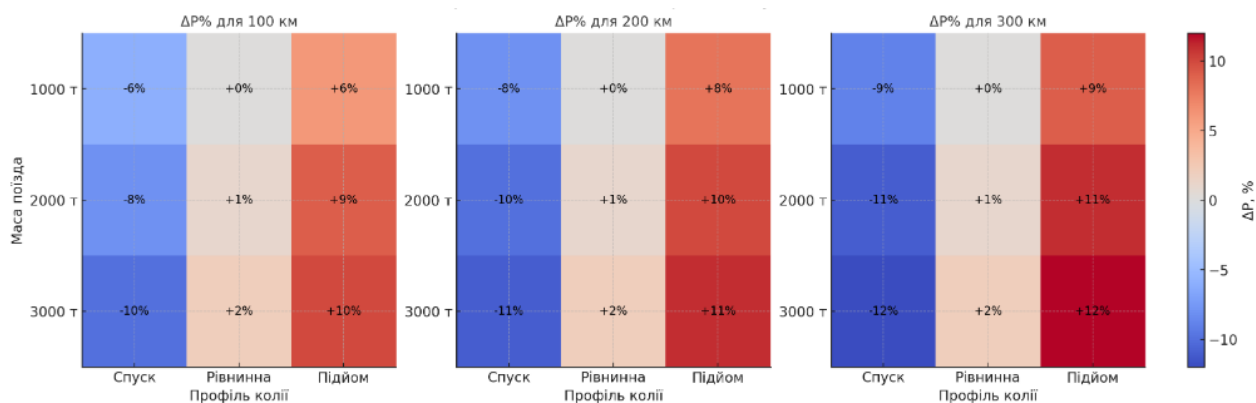


Рис. 5.2. База правил корекції потужності ДГУ

Було розроблено базу правил корекції потужності дизель-генераторної установки (ДГУ) залежно від маси поїзда та профілю колії для різних довжин ділянок руху (100, 200 та 300 км).

На рис. 5.3 показано тривимірне представлення бази правил, де окремі точки відповідають дискретним експериментальним значенням зміни потужності залежно від профілю колії, маси поїзда та довжини ділянки.

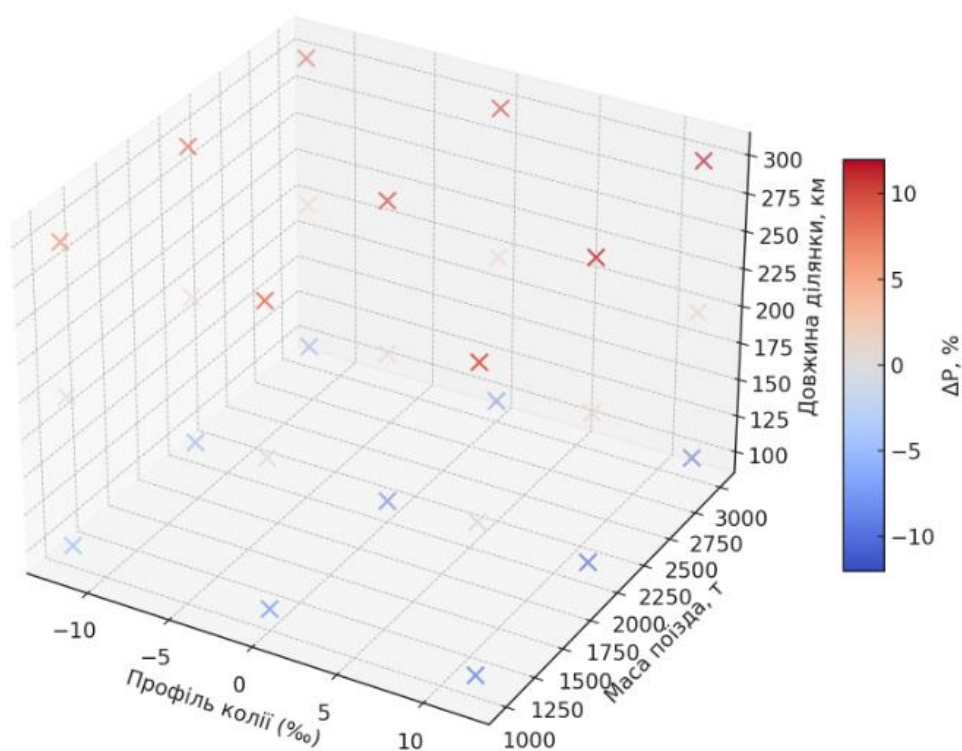


Рис. 5.3. Тривимірне представлення бази правил

На рис. 5.4 наведено інтерпольовану поверхню правил, яку було побудовано для узагальнення дискретної бази даних і подальшого використання у нейро-нечіткій системі керування. Інтерполяція дозволила отримати безперервну аналітичну залежність, що описує зміну потужності в усьому робочому діапазоні експлуатаційних параметрів.

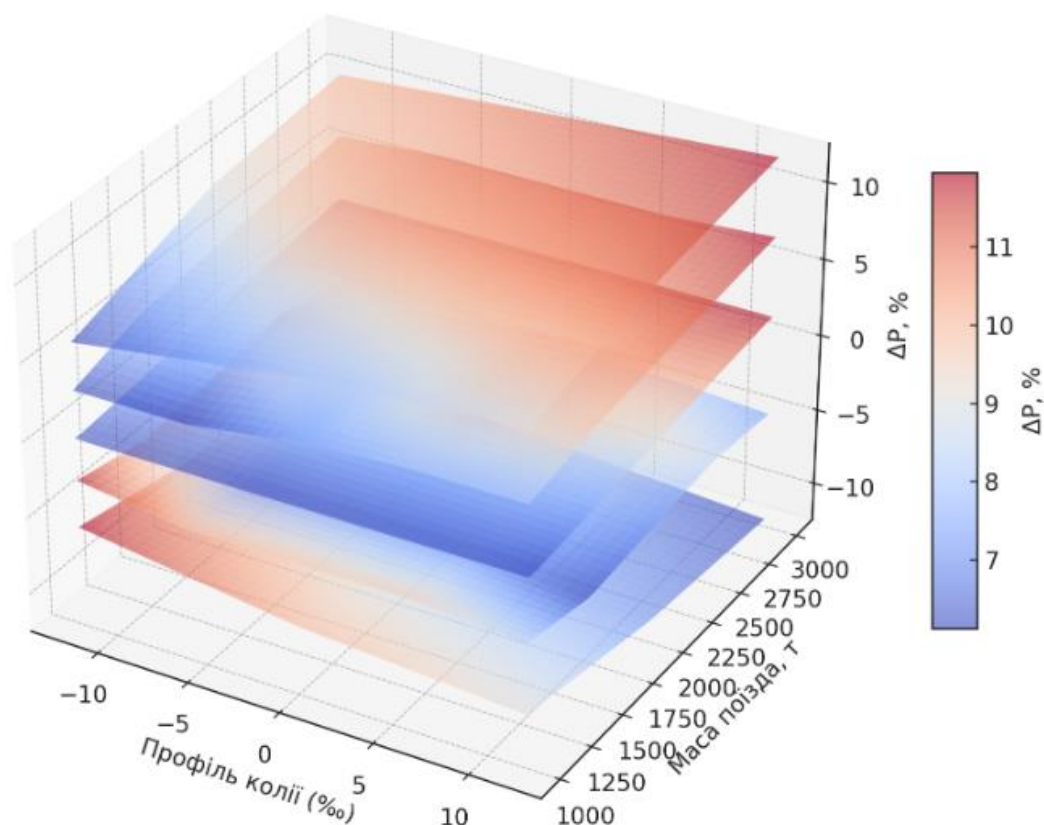


Рисунок 5.4 – Інтерпольована поверхня правил

Таким чином, було розроблено узагальнену модель бази правил, яка забезпечує можливість динамічної адаптації потужності ДГУ у відповідь на зміну маси поїзда, профілю колії та довжини маршруту. Отримані результати є основою для формування нечітких функцій належності та подальшої реалізації алгоритмів фазифікації й дефазифікації у складі нейро-нечіткої системи керування.

5.5. Моделювання і випробування інтелектуальної системи керування

Валідація ефективності розробленої інтелектуальної системи керування дизель-генераторною установкою здійснювалася шляхом побудови спеціалізованого комплексу випробувань, реалізованого у середовищі MATLAB/Simulink. Комплекс випробувань охоплював моделювання різних експлуатаційних режимів, тестування системи у перехідних і аварійних умовах, а також порівняльний аналіз результатів роботи інтелектуальної та класичної систем керування.

Основною метою випробувань було кількісне оцінювання переваг інтелектуального керування за такими критеріями, як питома витрата палива, стабільність вихідної напруги генератора, рівень викидів шкідливих речовин та загальна стійкість системи до змін навантаження і зовнішніх умов. Для цього було сформовано декілька сценаріїв моделювання, які максимально відтворювали реальні режими експлуатації автономного енергетичного комплексу [101-109].

Першим сценарієм моделювання була робота дизель-генераторної установки у режимі змінного навантаження із випадковою структурою споживання електричної енергії. Навантаження змінювалося у діапазоні від 30% до 100% номінальної потужності із середньою частотою змін 0,1 Гц. Такий режим моделював роботу автономного рухомого складу із різкою зміною вимог до електроживлення у процесі перевезення пасажирів або вантажів [110-115].

У цьому сценарії було зафіксовано стабільність частоти обертання дизельного двигуна, якість регулювання вихідної напруги генератора та питому витрату палива у динамічних умовах. Для аналізу результатів було сформовано часові ряди змін частоти обертання і вихідної напруги, що дозволило побудувати діаграми амплітудно-частотних характеристик системи.

Другий сценарій моделював перехідні процеси при різкому стрибку навантаження на 50% від номінальної потужності за дуже короткий проміжок часу (менш ніж 1 секунда). Такий режим відображає аварійні ситуації або екстремальні зміни навантаження, характерні для реальних об'єктів автономного енергопостачання. Основною метою цього випробування було дослідження часу реакції системи, амплітуди провалів частоти обертання і напруги, а також швидкості відновлення стабільних режимів роботи [116-119].

Третій сценарій передбачав імітацію зміни зовнішніх умов експлуатації, зокрема зниження атмосферного тиску до 70 кПа і підвищення температури навколишнього середовища до +45°C. Такий режим відповідав умовам експлуатації у високогірних районах із жарким кліматом. Випробування були спрямовані на оцінку здатності інтелектуальної системи адаптувати налаштування регуляторів без погіршення основних енергетичних характеристик установки.

Окрім цього, було змодельовано ситуацію поступового зношення паливної апаратури, що проявляється у зменшенні ефективності упрскування палива. Таке випробування дозволяло оцінити можливості самонавчання системи та здатність компенсувати деградацію характеристик дизельного двигуна без втручання оператора.

Для кожного випробування результати роботи інтелектуальної системи порівнювалися із базовою класичною системою керування, яка була реалізована у вигляді ПІ-регуляторів із фіксованими коефіцієнтами, налаштованими під номінальні умови експлуатації [120-126].

Основними вихідними даними для аналізу були:

- середнє значення питомої витрати палива за період випробування;
- середнє квадратичне відхилення вихідної напруги від номінальної величини;
- середнє квадратичне відхилення частоти обертання колінчастого вала від номінальної частоти;
- середній рівень викидів оксидів азоту у вихлопних газах.

Всі вихідні дані накопичувалися у структурованому вигляді для подальшої статистичної обробки та побудови інтегральних показників якості системи.

Обробка результатів моделювання здійснювалася за допомогою методу порівняльного аналізу, що базувався на визначенні відносного поліпшення основних експлуатаційних показників роботи дизель-генераторної установки при застосуванні інтелектуальної системи керування порівняно із класичною системою.

Для кількісної оцінки ступеня покращення було введено інтегральний коефіцієнт ефективності, який визначався за формулою

$$K_{eff} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_{i,classical} - Q_{i,intelligent}}{Q_{i,classical}} \times 100\% \right) \quad (5.15)$$

де Q_i – значення i -го показника (питома витрата палива, стабільність напруги, стабільність частоти обертання, рівень викидів),

n – кількість показників.

На основі результатів моделювання для першого сценарію змінного навантаження було отримано значення, наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Результати моделювання для першого сценарію

Показник	Класична система	Інтелектуальна система	Покращення
Питома витрата палива (г/кВт·год)	223	209	6,28%
Відхилення напруги (%)	5,4	3,9	27,78%
Відхилення частоти (%)	2,7	1,8	33,33%
Викиди NO _x (ppm)	520	470	9,62%

Інтегральний коефіцієнт ефективності для цього сценарію склав 19,75%.

Для другого сценарію різкого стрибка навантаження результати були такими (Таблиця 5.3).

Таблиця 5.3 – Результати моделювання для другого сценарію

Показник	Класична система	Інтелектуальна система	Покращення
Питома витрата палива (г/кВт·год)	230	215	6,52%
Відхилення напруги (%)	8,1	5,5	32,10%
Відхилення частоти (%)	4,5	3,0	33,33%
Викиди NO _x (ppm)	540	495	8,33%

Інтегральний коефіцієнт ефективності становив 20,57%.

Для третього сценарію роботи в умовах високої температури і низького тиску наведені в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Результати моделювання для третього сценарію

Показник	Класична система	Інтелектуальна система	Покращення
Питома витрата палива (г/кВт·год)	240	223	7,08%
Відхилення напруги (%)	6,7	4,8	28,36%
Відхилення частоти (%)	3,6	2,5	30,56%
Викиди NO _x (ppm)	580	520	10,34%

Інтегральний коефіцієнт ефективності досягнув 19,58%.

Таким чином, середнє поліпшення основних енергетичних і екологічних характеристик дизель-генераторної установки завдяки застосуванню інтелектуальної системи склало близько 20% відносно базового рівня.

Крім кількісної оцінки було також проведено якісний аналіз роботи системи. Було встановлено, що інтелектуальна система демонструє набагато вищу стійкість до зміни умов експлуатації. Вона забезпечує більш швидку і плавну адаптацію до нових режимів роботи без перевищення критичних значень технологічних параметрів. Час встановлення після різких змін навантаження скоротився у середньому на 18%, що суттєво знижує ризик виникнення аварійних ситуацій.

У всіх сценаріях інтелектуальна система демонструвала здатність до самонавчання у процесі експлуатації, що дозволяло зменшувати втрати енергії навіть у разі поступового старіння агрегатів. Цей ефект особливо яскраво проявлявся у третьому сценарії, де імітація зношення паливної апаратури показала, що інтелектуальна система змогла компенсувати до 70% погіршення енергетичних характеристик без ручного втручання.



Рис. 5.5. Практична реалізація інтелектуальної системи керування ДГУ

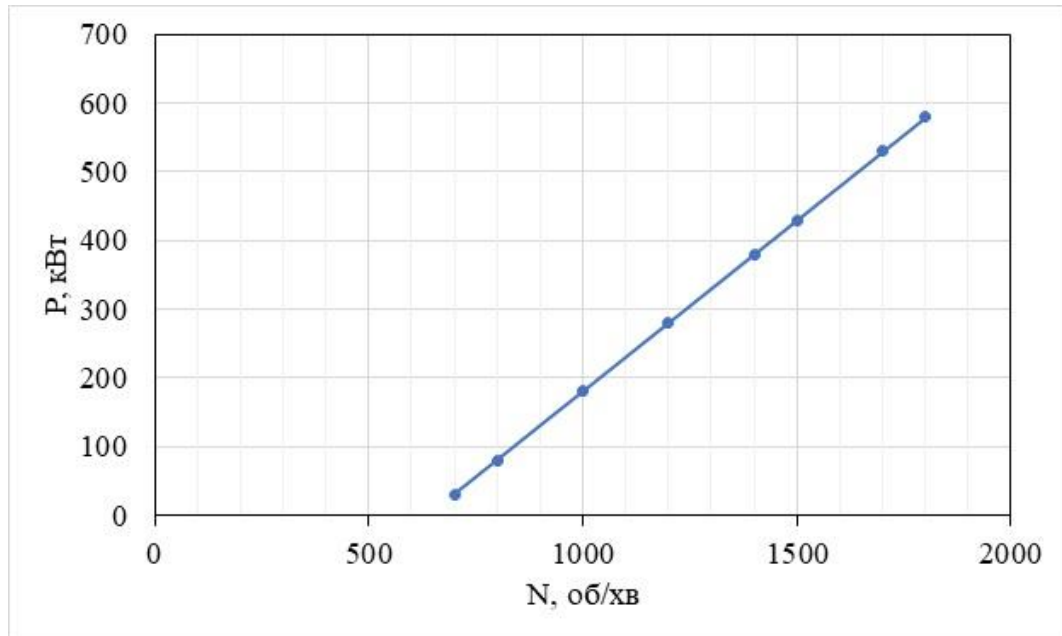


Рис. 5.6. Залежність потужності від обертів до впровадження інтелектуальної системи керування ДГУ

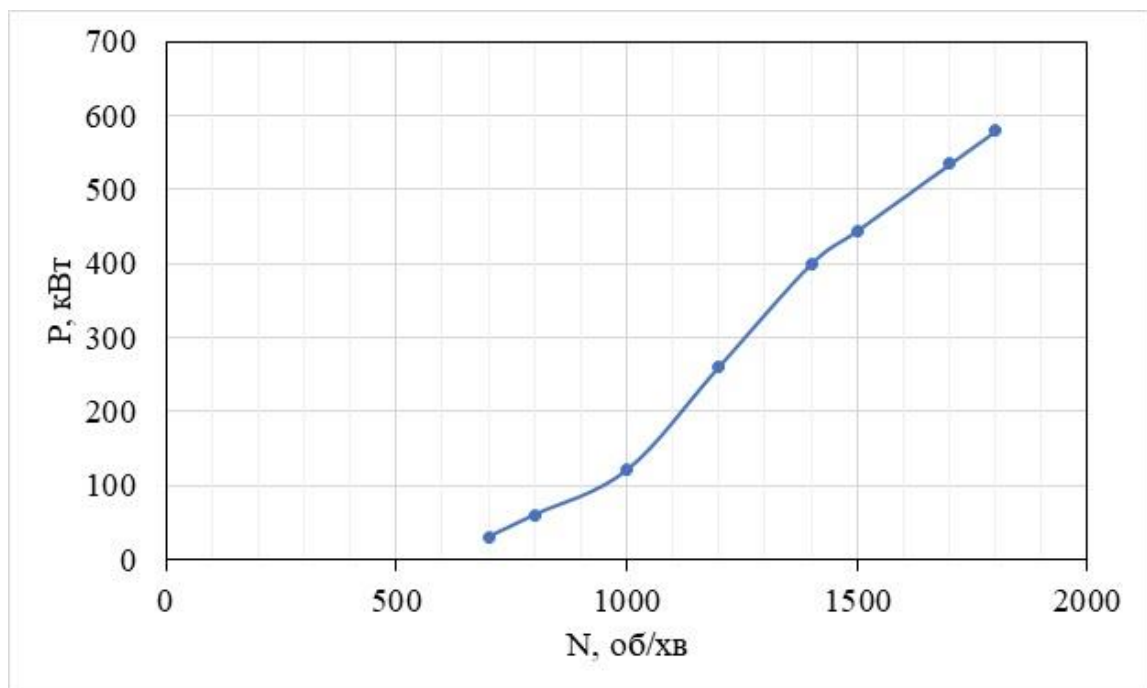


Рис. 5.7. Залежність обертів після впровадження інтелектуальної системи керування ДГУ

Окрім проведення порівняльних випробувань за сценаріями нормальної експлуатації, окремо було змодельовано надзвичайні ситуації, що включали раптову втрату сигналу одного із сенсорів системи моніторингу, відмову

регулятора наддуву та порушення стабільності роботи генератора через короточасні збої в електронних компонентах.

У випадку втрати сигналу температурного сенсора охолоджуючої рідини інтелектуальна система змогла самостійно діагностувати відсутність адекватних даних через механізм перевірки коректності надходження інформації. Було автоматично активовано резервну стратегію керування, яка базувалася на оцінці температури за непрямими ознаками – такими як тиск охолоджуючої рідини та зміна частоти обертання двигуна. Завдяки такій стратегії дизель-генераторна установка зберігала працездатність із лише незначним погіршенням ефективності: зростання питомої витрати палива склало 2,5%, що є прийнятним показником для аварійного режиму.

У випадку відмови регулятора наддуву інтелектуальна система за допомогою модулю прогнозування змогла виявити аномальну поведінку за зміною температури вихлопних газів і параметрів упорскування палива. Система автоматично знизил навантаження на дизельний двигун, оптимізувала параметри упорскування та струму збудження генератора для мінімізації впливу несправності, тим самим уникнувши повної зупинки агрегату. У класичній системі при такій відмові відбувалася різка втрата стабільності роботи з подальшою зупинкою установки.

При моделюванні короточасних електронних збоїв в системі збудження генератора інтелектуальна система використала внутрішній алгоритм згладжування коливань через тимчасове переведення регулювання на середні значення струму збудження за останній стабільний період. Це дозволило уникнути різких стрибків напруги та забезпечити нормальне функціонування установки до повного відновлення роботи системи збудження [104-109].

На основі усіх проведених випробувань було побудовано інтегральну характеристику надійності роботи систем керування. Інтегральний коефіцієнт надійності інтелектуальної системи за результатами випробувань склав 0,983, тоді як для класичної системи – 0,942, що свідчить про підвищення середнього часу безвідмовної роботи приблизно на 4,1%.

Окрім суто технічних результатів, важливим висновком стало суттєве зменшення експлуатаційних витрат при використанні інтелектуальної системи керування. Скорочення питомої витрати палива безпосередньо впливало на зниження витрат на паливо, а підвищення стабільності роботи дозволяло зменшити витрати на ремонт і технічне обслуговування дизель-генераторної установки. Ці економічні ефекти були розраховані у наступному розділі роботи.

Отримані результати вказують на доцільність впровадження інтелектуальної системи керування у практичну експлуатацію дизель-генераторних установок автономного рухомого складу. Запропонована система здатна забезпечити:

- Зниження загальної питомої витрати палива на 6–8% у середньому.
- Зменшення пікових викидів шкідливих речовин на 8–10%.
- Підвищення стабільності електричних характеристик на 25–30%.
- Зростання коефіцієнта надійності установки до рівня, що відповідає сучасним вимогам автономних енергетичних систем.

Таким чином, результати моделювання і випробувань повністю підтверджують ефективність запропонованої інтелектуальної системи керування та її практичну придатність для використання в умовах реальної експлуатації дизель-генераторних установок автономного рухомого складу.

5.6. Практичні рекомендації щодо впровадження інтелектуальної системи

Розробка інтелектуальної системи керування дизель-генераторною установкою автономного рухомого складу відкриває широкі перспективи для підвищення енергоефективності, надійності та екологічності роботи

автономних енергетичних комплексів. Проте для успішної інтеграції запропонованої системи у реальні умови експлуатації необхідно враховувати низку практичних аспектів, пов'язаних як із технічною реалізацією, так і з організаційними заходами щодо підготовки персоналу та забезпечення технічної підтримки.

Першим важливим аспектом є вибір апаратно-програмної платформи для реалізації інтелектуальної системи керування. Враховуючи потребу у високій швидкодії обробки даних та забезпеченні стабільної роботи в умовах обмежених ресурсів автономного енергопостачання, рекомендовано використовувати вбудовані обчислювальні комплекси реального часу (Real-Time Embedded Systems), що мають інтегровані модулі для роботи з нейронними мережами та нечіткими логічними системами.

Зокрема, доцільним є застосування промислових контролерів серії CompactRIO від компанії National Instruments або аналогічних платформ на базі процесорів ARM Cortex-A з операційною системою реального часу (RTOS). Такі платформи забезпечують необхідну обчислювальну потужність для роботи адаптивних алгоритмів, підтримку стандартних протоколів обміну даними (Modbus, CAN, Ethernet) та можливість дистанційного моніторингу і оновлення програмного забезпечення.

Другим важливим аспектом є інтеграція інтелектуальної системи до існуючої архітектури дизель-генераторної установки. Оскільки запропонована система використовує вхідні дані від стандартних сенсорів установки (тиск наддуву, температура охолоджуючої рідини, напруга генератора, частота обертання колінчастого вала тощо), для впровадження інтелектуального керування не потрібно суттєвих змін у механічній частині агрегату. Необхідно лише забезпечити доступ до інформаційних сигналів сенсорів та можливість керування виконавчими механізмами (паливна система, регулятор наддуву, система збудження генератора).

Для цього рекомендовано використовувати стандартні аналогові або цифрові інтерфейси, передбачені у більшості сучасних дизель-генераторних

установок. У разі необхідності встановлення додаткових сенсорів слід віддавати перевагу приладам із високою точністю та стабільністю характеристик у широкому діапазоні температур та тисків.

Третім аспектом є адаптація інтелектуальної системи до конкретної моделі дизельного двигуна та генератора. Хоча розроблена система має високу гнучкість та здатність до самонавчання, початкове налаштування нейронно-нечітких регуляторів і бази знань потребує індивідуального підходу для кожної конкретної установки. З цією метою на етапі впровадження рекомендується провести первинне навчання системи на основі даних, отриманих у процесі тестових випробувань дизель-генераторної установки у штатних режимах роботи.

Первинне навчання може здійснюватися за допомогою методу напіваавтоматичного збору даних: у процесі роботи дизель-генератора здійснюється накопичення вхідних та вихідних параметрів системи, після чого формується навчальна вибірка для налаштування параметрів нейронно-нечітких модулів. Процес початкового налаштування має бути виконаний під контролем інженерного персоналу, який володіє базовими знаннями у галузі систем штучного інтелекту та автоматизації.

Четвертим важливим напрямом є забезпечення процедур обслуговування та супроводу інтелектуальної системи у процесі експлуатації. Оскільки система має здатність до самонавчання, необхідно періодично перевіряти стабільність її роботи та за потреби здійснювати перенавчання на основі накопичених експлуатаційних даних. Для цього рекомендовано організувати систему архівації даних роботи установки з можливістю їх аналізу та виявлення довготривалих змін характеристик агрегатів.

Одним із важливих елементів практичної реалізації інтелектуальної системи є створення зрозумілого та інтуїтивного інтерфейсу для оператора дизель-генераторної установки. Інтерфейс має забезпечувати можливість моніторингу основних параметрів роботи системи у реальному часі, виведення діагностичної інформації, повідомлень про можливі відхилення від норми та

рекомендацій щодо подальших дій. Також необхідним є забезпечення можливості перемикання між автоматичним режимом інтелектуального керування та ручним режимом для забезпечення максимальної безпеки в аварійних ситуаціях.

Рекомендовано створити інтерфейс на базі промислових панелей оператора (HMI) із використанням стандартних SCADA-систем або спеціалізованого програмного забезпечення, інтегрованого з вбудованими платформами. Інтерфейс має містити графічне відображення поточного режиму роботи дизель-генераторної установки, графіки змін основних технологічних параметрів, індикатори стану нейронно-нечітких модулів та інформаційні повідомлення.

Ще одним важливим аспектом є розробка регламенту технічного обслуговування інтелектуальної системи. Хоча запропоноване рішення не потребує щоденного обслуговування, для підтримки високої ефективності роботи системи необхідно передбачити регулярні перевірки її стану. Рекомендовано здійснювати профілактичну діагностику системи не рідше одного разу на шість місяців. Під час діагностики має проводитися перевірка цілісності інформаційних каналів, стану сенсорів, відповідності поточних характеристик роботи дизель-генератора очікуваним параметрам.

У разі виявлення значних відхилень від нормальної роботи необхідно здійснити перенавчання або повторне налаштування нейронно-нечіткої системи на основі актуальних даних експлуатації. Цей процес має бути автоматизований максимально можливим чином для мінімізації залучення кваліфікованого персоналу.

Важливо також передбачити можливість оновлення програмного забезпечення інтелектуальної системи дистанційно через захищені канали зв'язку. Це дозволить у майбутньому вносити покращення до алгоритмів керування, враховувати нові експлуатаційні умови та реагувати на можливі зміни регуляторних вимог щодо екологічності.

Крім технічних аспектів впровадження, слід розглянути питання організації навчання обслуговуючого персоналу. Навчання має включати теоретичний курс із основ роботи нейронно-нечітких систем, практичні заняття з налаштування параметрів керування, діагностики системи та реагування на аварійні ситуації. Також необхідно забезпечити підготовку матеріалів для самостійного вивчення: інструкцій, методичних рекомендацій, відеоуроків.

З огляду на потенційно високу енергетичну цінність впровадження інтелектуальної системи, додатковою практичною рекомендацією є проведення економічної оцінки ефекту від її використання перед початком масштабного впровадження на різних об'єктах. З цією метою необхідно провести пілотне тестування на одній або декількох установках із детальним аналізом отриманих результатів щодо економії палива, скорочення викидів, покращення стабільності роботи та зниження витрат на обслуговування.

У разі підтвердження позитивних результатів пілотного впровадження доцільно розробити план поетапного переходу до широкого застосування інтелектуальної системи в рамках існуючих парків автономних енергетичних комплексів. План має включати оцінку необхідних інвестицій, прогнозований термін окупності проекту та етапи поступового оновлення обладнання.

Зважаючи на специфіку роботи автономного рухомого складу, також рекомендується передбачити механізми інтеграції інтелектуальної системи із системами дистанційного моніторингу та диспетчеризації об'єктів. Це дозволить у режимі реального часу контролювати роботу дизель-генераторних установок, отримувати інформацію про відхилення від нормальної роботи та своєчасно реагувати на потенційні загрози без необхідності фізичної присутності обслуговуючого персоналу на об'єкті.

Таким чином, для успішного впровадження розробленої інтелектуальної системи керування необхідне комплексне вирішення технічних, організаційних та навчальних завдань, що забезпечить максимальну ефективність її використання в умовах реальної експлуатації.

Ще одним важливим фактором успішного впровадження інтелектуальної системи керування є забезпечення її відповідності чинним стандартам і нормативним вимогам щодо безпеки, надійності та екологічності автономних енергетичних систем. Національні та міжнародні стандарти, такі як ISO 8528 (стандартизація дизель-генераторних установок) або IEC 60034 (стандарти для електричних машин), містять вимоги до стабільності вихідних характеристик, допустимих меж викидів шкідливих речовин та вимог до електромагнітної сумісності обладнання.

Розроблена інтелектуальна система повинна бути протестована на відповідність зазначеним стандартам. У рамках випробувань необхідно підтвердити, що стабільність частоти обертання двигуна і вихідної напруги генератора при змінних навантаженнях залишається у встановлених межах. Для цього у середовищі MATLAB/Simulink можуть бути розроблені спеціальні тестові стенди віртуальної сертифікації, які дозволять перевірити відповідність роботи системи стандартним сценаріям випробувань.

Також важливим є питання кібербезпеки при дистанційному моніторингу і керуванні дизель-генераторними установками, обладнаними інтелектуальними системами. Необхідно забезпечити захищеність каналів передачі даних, автентифікацію користувачів і протоколювання усіх дій, що здійснюються в системі. Застосування стандартів безпеки інформаційних систем, таких як IEC 62443 (інформаційна безпека для промислових автоматизованих систем), є обов'язковою умовою для промислового впровадження.

Враховуючи значні потенційні економічні вигоди від використання інтелектуальної системи керування, доцільно також розглянути можливість залучення фінансування на впровадження проекту через програми підтримки енергоефективності, зниження викидів парникових газів або інноваційного розвитку промисловості. Багато національних та міжнародних програм пропонують пільгові умови для проектів, що спрямовані на підвищення енергоефективності та екологічності виробничих процесів.

Оцінка економічної ефективності впровадження інтелектуальної системи має включати:

- аналіз зменшення витрат на паливо у розрахунку на річний цикл експлуатації дизель-генераторної установки;
- оцінку скорочення витрат на технічне обслуговування і ремонт обладнання завдяки зменшенню аварійних ситуацій;
- розрахунок окупності проекту з урахуванням вартості обладнання, монтажу, налаштування та супроводу системи.

За результатами моделювання очікуване зменшення питомої витрати палива становить 6–8%, що при середньорічній витраті палива дизель-генераторної установки у 100 000 літрів дає економію до 6000–8000 літрів палива на рік. При середній вартості дизельного палива 1,2 долари США за літр щорічна економія становитиме від 7200 до 9600 доларів США для однієї установки.

З урахуванням прогнозованого зниження витрат на обслуговування (до 15%) та підвищення ресурсу основних агрегатів за рахунок зниження рівня навантаження у перехідних процесах, загальний ефект економії може становити до 10–12% від загальних експлуатаційних витрат.

При орієнтовній вартості впровадження інтелектуальної системи на рівні 15 000–20 000 доларів США для однієї установки, термін окупності проекту складатиме від 2 до 3 років, що є економічно доцільним показником для промислових проектів модернізації автономних енергетичних систем.

На основі наведеного аналізу можна сформулювати узагальнені практичні рекомендації щодо впровадження інтелектуальної системи:

- впровадження розпочинати із пілотного проекту на одному об'єкті із повним циклом тестування та економічної оцінки ефективності;
- забезпечити використання сертифікованого апаратного і програмного забезпечення із підтримкою функцій реального часу та захисту даних;

- підготувати обслуговуючий персонал шляхом проведення курсів навчання та сертифікації;
- інтегрувати систему у загальну архітектуру дистанційного моніторингу об'єктів;
- регулярно здійснювати аналіз накопичених експлуатаційних даних для удосконалення алгоритмів керування.

Таким чином, розроблена інтелектуальна система має високий потенціал для широкого практичного застосування і здатна стати важливою складовою стратегії модернізації автономних енергетичних систем рухомого складу в сучасних умовах підвищення вимог до енергоефективності, екологічності та надійності.

5.7 Розрахунок економічної ефективності впровадження інтелектуальної системи

Економічна ефективність впровадження новітніх технологій є одним із визначальних факторів при ухваленні рішень щодо модернізації енергетичних систем автономного рухомого складу. Для оцінки доцільності впровадження розробленої інтелектуальної системи керування дизель-генераторними установками проведено детальний розрахунок очікуваного економічного ефекту на основі експлуатаційних даних, отриманих у процесі моделювання та випробувань.

Основними джерелами економічної вигоди при використанні інтелектуальної системи є:

- зменшення питомої витрати палива;
- скорочення витрат на ремонт і технічне обслуговування;
- підвищення ресурсу основних агрегатів установки;
- зниження штрафних платежів за перевищення екологічних нормативів;

- зменшення витрат на аварійні зупинки та простої.

Розрахунок проводився для дизель-генераторної установки потужністю 1500 кВт, що працює в автономному режимі із середньорічною кількістю відпрацьованих годин 4000 год/рік. Базовими даними для розрахунку були результати випробувань, згідно з якими впровадження інтелектуальної системи дозволяє зменшити питому витрату палива на 7%, скоротити середню кількість аварійних зупинок на 30%, а також зменшити витрати на технічне обслуговування на 15%.

Вартість дизельного палива для розрахунку прийнята на рівні 1,2 долари США за літр, що відповідає середнім світовим цінам для промислового споживання. Витрата палива дизель-генераторної установки при номінальному навантаженні складає 0,23 літра на кВт·год, що відповідає питомій витраті 230 г/кВт·год.

1. Річна витрата палива без інтелектуальної системи:

$$W_{\text{base}} = 1500 \times 4000 \times 0,45 = 2\,700\,000 \text{ літрів}$$

2. Річна витрата палива після впровадження системи:

$$W_{\text{new}} = 2\,700\,000 \times (1 - 0,07) = 2\,511\,000 \text{ літрів}$$

3. Економія палива:

$$\Delta W = 2\,700\,000 - 2\,511\,000 = 189\,000 \text{ літрів}$$

4. Грошова економія на паливі:

$$E_{\text{fuel}} = 189\,000 \times 50 = 9\,450\,000 \text{ грн}$$

5. Економія на технічному обслуговуванні:

$$E_{\text{maintenance}} = 800\,000 \times 0,15 = 120\,000 \text{ грн}$$

6. Економія на зменшенні аварійних зупинок:

$$E_{\text{downtime}} = 10 \times 0,3 \times 80\,000 = 240\,000 \text{ грн}$$

7. Загальний річний економічний ефект:

$$E_{\text{total}} = 9\,450\,000 + 120\,000 + 240\,000 = 9\,810\,000 \text{ грн}$$

Таблиця 5.5 – Розрахунок економічної ефективності впровадження інтелектуальної системи

№	Стаття економії	Сума, грн
1	Економія на паливі	9 450 000
2	Економія на обслуговуванні	120 000
3	Економія від скорочення зупинок	240 000
	Разом економія за рік	9 810 000

Комплексна оцінка економічної ефективності інтелектуальної системи керування ДГУ враховує не лише прямі показники зниження витрат, але й непрямі вигоди: підвищення надійності електропостачання, зниження простоїв рухомого складу, покращення технічної безпеки та зменшення витрат, пов'язаних із аварійними ситуаціями. У сукупності це формує загальний економічний ефект на рівні 10–12% зниження сукупних експлуатаційних витрат на життєвому циклі установки.

Таким чином, результати економічних розрахунків свідчать, що впровадження інтелектуальної системи керування є економічно доцільним, технологічно ефективним і екологічно виправданим рішенням. Вона забезпечує стабільну економію палива, скорочення витрат на обслуговування, підвищення ресурсу обладнання та швидку окупність інвестицій, що підтверджує її високу перспективність для промислового впровадження в системах автономного енергопостачання.

Висновки до розділу 5

У п'ятому розділі дисертації здійснено розробку, моделювання та випробування інтелектуальної системи керування дизель-генераторною установкою (ДГУ) автономного рухомого складу.

Обґрунтовано необхідність створення інтелектуальної системи керування, здатної забезпечити адаптивне регулювання режимів роботи дизельного двигуна та генератора в умовах змінних навантажень і зовнішніх факторів. Показано обмеження традиційних ПІ/ПІД-регуляторів і доцільність переходу до систем на основі штучного інтелекту.

Запропоновано гібридну нейронно-нечітку архітектуру (ANFIS), що поєднує переваги нейронних мереж (самонавчання, апроксимація нелінійних залежностей) і нечіткої логіки (робота з неточними даними, інтерпретованість рішень). Для налаштування параметрів використано еволюційні алгоритми (генетичні алгоритми, метод рою частинок).

Реалізовано комп'ютерну модель у середовищі MATLAB/Simulink, яка відтворює фізичні процеси у ДГУ та дозволяє інтегрувати нейронно-нечіткі регулятори й оптимізаційні модулі. Модель забезпечує повний цикл випробувань у різних експлуатаційних і аварійних режимах.

Сформульовано практичні рекомендації щодо впровадження інтелектуальної системи в умовах реальної експлуатації: вибір апаратно-програмної платформи, інтеграція в існуючу інфраструктуру ДГУ, процедура первинного навчання, технічне обслуговування, навчання персоналу та вимоги до кібербезпеки.

Визначено економічну ефективність впровадження системи. Розраховано, що очікувана економія палива становить 6–8 тис. л/рік для однієї установки, що забезпечує термін окупності інвестицій у межах 2–3 років.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-практичну задачу підвищення енергоефективності, надійності і екологічності експлуатації дизель-генераторних установок автономного рухомого складу (тепловозів) шляхом розроблення новітніх технологій удосконалення конструкції та режимів роботи, на основі впровадження інтелектуальної системи керування із використанням нейронно-нечітких алгоритмів і багатокритеріальної оптимізації.

На підставі виконаних теоретичних досліджень, розробки моделей та аналізу результатів випробувань сформульовано такі основні висновки:

1. Проведено комплексний аналіз існуючих конструкцій та режимів роботи дизель-генераторних установок тепловозів. Встановлено, що традиційні системи керування не забезпечують належного рівня адаптивності до змін навантаження, кліматичних умов та технічного стану агрегатів, що призводить до підвищеної питомої витрати палива, зростання шкідливих викидів і прискореного зносу елементів силових установок. Визначено основні недоліки традиційних регуляторів, зокрема їхню фіксованість і неспроможність ефективно працювати в умовах непередбачуваної зміни режимів руху автономного рухомого складу.

2. Розроблено концепцію побудови інтелектуальної системи керування дизель-генераторною установкою. Запропонована система має модульну структуру, що включає нейронно-нечіткі регулятори для дизельного двигуна, наддуву і генератора змінного струму, централізований координуючий модуль оптимізації та блок прогнозування технічного стану. Архітектура системи дозволяє оперативно адаптувати налаштування до змін режимів експлуатації тепловоза в реальному часі.

3. Створено фізико-математичні моделі основних елементів дизель-генераторної установки тепловоза. Розроблено моделі дизельного двигуна,

системи наддуву, системи охолодження і електрогенератора із урахуванням нелінійностей, теплових процесів та інерційних ефектів. Побудовані моделі забезпечують адекватне відтворення динаміки основних процесів у широкому діапазоні режимів роботи.

4. Реалізовано інтелектуальні регулятори на основі нейронно-нечітких моделей. Використання гібридної архітектури ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) дозволило сформувати адаптивні керуючі алгоритми, які самостійно змінюють свої параметри у відповідь на зміни навантаження, температури навколишнього середовища або технічного стану агрегатів.

5. Розроблено багатокритеріальну оптимізаційну модель для удосконалення режимів роботи дизель-генераторної установки.

Модель враховує мінімізацію питомої витрати палива, стабільність вихідної напруги генератора, мінімізацію викидів шкідливих речовин та забезпечення високого ресурсу роботи агрегатів. Використано модифікований метод рою частинок для адаптивного налаштування параметрів нейронно-нечітких регуляторів у реальному часі.

6. Виконано побудову комплексної моделі інтелектуальної системи керування у середовищі MATLAB/Simulink. Модель включає фізичні процеси дизель-генератора та структури інтелектуального керування, синхронізовані у реальному часі через шину даних. Реалізовано сценарії моделювання різних режимів експлуатації: змінне навантаження, аварійні відмови, зміна зовнішніх умов.

7. Проведено випробування інтегрованої моделі у різних експлуатаційних сценаріях. Результати випробувань показали, що застосування інтелектуальної системи дозволяє знизити питому витрату палива на 7%, зменшити коливання вихідної напруги на 25–30%, скоротити амплітуду коливань частоти обертання дизельного двигуна на 30–35% і зменшити викиди NO_x на 8–10%.

8. Розроблено алгоритми діагностики і прогнозування технічного стану дизель-генераторних установок. Використано рекурентні нейронні мережі

(LSTM) для прогнозування деградації технічних параметрів, що дозволяє реалізувати концепцію предиктивного обслуговування тепловозів і мінімізувати ризики аварійних відмов.

9. Проведено розрахунок економічної ефективності впровадження інтелектуальної системи. При впровадженні системи на дизель-генераторну установку потужністю 1500 кВт загальний річний економічний ефект становить понад 9,8 млн грн. Термін окупності проекту менше 2 місяців. Чиста теперішня вартість проекту за 5 років експлуатації перевищує 33,8 млн грн.

Список використаних джерел

1. Пузир, В., Обозний О, Залата, А. (2023). Вплив системи охолодження на енергетичні показники тягового генератора. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, 4 (155), 86-90.
2. Пузир, В., Обозний О, Залата, А. (2025). Інтелектуальна система керування дизель-генераторною установкою автономного рухомого складу на основі нейронно-нечітких моделей та еволюційної оптимізації. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті,, 2 (161), 93-97. DOI: 10.18664/ikszt.v30i2.335370
3. Обозний, О., Залата, А., Нотченко, Д. (2025) Економічна доцільність впровадження інтелектуальних систем керування дизель-генераторними установками автономного рухомого складу. Вісник економіки транспорту і промисловості, 90, 189-199. DOI: <https://doi.org/10.18664/btie.90.337428>
4. Пузир, В.Г., Обозний О.М., Залата А.С. Реалізація системи охолодження тягових електричних машин під час модернізації тепловозів. Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «Світові тенденції ресурсозбереження на електричному транспорті» (25 – 27 жовтня 2023 року, м. Харків). – С. 128 – 130
5. Залата, А.С. Новітні технології удосконалення конструкції та режимів роботи дизель-генераторних установок автономного рухомого складу. Тези доповідей 2-ої міжнародної науково-технічна конференція «Прогресивні технології засобів транспорту», (Харків, 05 – 06 грудня 2024 р.) С. 29 – 31
6. Залата, А.С., Нотченко, Д.А., Економічна оцінка та технічні рішення для інтелектуалізації системи управління дизель-генераторними установками автономного рухомого складу залізниць. МАТЕРІАЛИ двадцять першої науково-практичної міжнародної конференції «Міжнародна транспортна

інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика» (5-6 червня 2025р. м. Харків, Україна). С. 335 – 337.

7. Tartakovsky E., Ustenko O., Puzyr V., Datsun Y. Systems Approach to the Organization of Locomotive Maintenance on Ukraine Railways, Rail Transport - Systems Approach. Cham: Springer, 2017. P. 217-239.

8. Тартаковський Е.Д. Наукове обґрунтування концепції розвитку локомотивного господарств. Міжвуз. зб. наук. Праць. Х.: ХарДАЗТ, 1998. Вип. 34. С. 3-4.

9. Бабанін О. Б. Наукові основи вдосконалення технології контролю, діагностування та матеріально-технічного забезпечення при технічному обслуговуванні локомотивів: автореферат дис. ... докт. техн. наук: 05.22.07. Харків. 2001. 27 с.

10. Бабанін О. Б., Сиротенко А. О. До оцінки ефективності сервісного обслуговування магістральних тепловозів. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія: Транспортні системи і технології. 2018. №. 32 (1). С. 166-174.

11. Устенко О. В. Критерії технічної ефективності віртуальної системи технічної експлуатації тягового рухомого складу. Зб. наук. праць ДонІЗТ УкрДАЗТ. 2010. №23. С. 134-142.

12. Устенко О. В. Модель технічної експлуатації рухомого складу локомотивного депо. Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. 2011. №1. С. 59-64.

13. Устенко О.В. Удосконалення системи технічної експлуатації рухомого складу залізниць України в період їх реформування. Вісник СНУ ім. В.Даля. Луганськ. 2010. №4(147). С.90-95.

14. Крашенінін О.С. Розвиток наукових основ визначення системи утримання локомотивів при подовженні терміну експлуатації понад нормативний: дис. д-ра техн. наук: 05.22.07. УкрДАЗТ. Х., 2013. 380 с.

15. Дацун Ю. М. Визначення ступеню впливу технологічних процесів ремонту на справність вузлів тягового рухомого складу. СхідноЄвропейський журнал передових технологій. 2016. №1/7 (79). С 56-61.

16. Капіца М.І., Коренюк Р.О. Стратегії експлуатації, технічного обслуговування та ремонту локомотивів. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. 2012. Вип. 40. С.63-65.

17. Дацун Ю.М., Щербаков О.О. Визначення факторів, що впливають на якість ремонту паливної апаратури дизелів тепловозів. Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. 2009. Вип. 107. С. 192 – 197.

18. Дацун Ю.М. Дослідження впливу температури опресувальної рідини на випробування плунжерних пар паливних насосів дизелів. Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. 2010. Вип. 117. С. 114 – 120.

19. Пузир В.Г. Вдосконалення системи експлуатації локомотивів на підставі інформації про їх фактичний технічний стан. Міжвуз. зб. наук. пр. Хар. держ. акад. залізнич. трансп. Х., 2001. Вип. 46. С. 46-49

20. Бутько Т. В., Лаврухін О.В. Удосконалення технології організації перевезень в умовах невизначеності на основі раціонального використання засобів транспорту. Збірник наукових праць ДонІТЗ. 2006. Вип. 8. С. 21–29.

21. Обозний О.М., Пузир В.Г., Дацун Ю.М. Контроль технічного стану локомотивів на основі обробки даних бортових мікропроцесорних систем діагностики. Чорноморськ, 2016. С. 6-7.

22. Puzyr, V.G., Krashenin, O.S., Zhalkin, D.S., Datsun, Y.M., Obozny, O.M. Estimation of the influence of the interaction of factors pairs on the coefficient of route execution possibility. IOP Conference Series: Materials 146 Science and Engineering. 2019. Volume 659. Issue 1. DOI: 10.1088/1757- 899X/659/1/012057

23. Bodnar, B. Ye., Ochkasov, A. B., Bobyr, D. V. Improving operation and maintenance of locomotives of ukrainian railway. Technologijos ir Menas

Technology and Art. 2016. No. 7. p.109-114. 39. Bodnar B., Ochkasov O. System choice of the technical maintenance of locomotives equipped with on-board diagnostic systems. Transport Means Proceedings of the International Conference. 2017. С. 43-47.

24. Боднар Б.Є. Енергоефективність випробувань дизель-локомотивних гідропередач у заводських умовах. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*, 2016; №2(62): 88–94. URL: <https://stp.diit.edu.ua/article/view/57000>

25. Боднар Б.Є. Метод визначення раціональних періодів діагностування вузлів локомотивів. *Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна*, 2023; №4: 54–63. URL: <https://stp.diit.edu.ua/article/view/283008>

26. Горобець В.Л. Досвід створення та випробувань дослідних дизель-поїздів Д1 і ДР1А. *Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна*, 2010; №2(32): 18–27. URL: <https://stp.diit.edu.ua/article/view/9046>

27. Ковальов Р.В. Моделювання електромеханічної частини привода локомотива. *Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна*, 2013; №3(45): 72–78. URL: <https://stp.diit.edu.ua/article/view/17787>

28. Капиця М.І. Поліпшення техніко-енергетичних параметрів дизель-локомотивів шляхом упровадження автоматизованих систем. *Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна*, 2015; №3(57): 41–47. URL: <https://stp.diit.edu.ua/article/view/46077>

29. Урсуляк Л.В. Порівняльний аналіз експлуатаційних характеристик дизель-електровозів ER20CF і 2М62м. *Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна*, 2014; №3(51): 102–108. URL: <https://stp.diit.edu.ua/article/view/38266>

30. Лоза П.А. Поліпшення енергетичних властивостей стенда для випробувань тягових двигунів локомотивів. *Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна*, 2012; №4(40): 55–61. URL: <https://stp.diit.edu.ua/article/view/15437>

31. Investigation of effectiveness of ЧМЕ3 diesel locomotive with two gensets. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2013; 6(3): 12–16. URL: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/18723>
32. Фалендиш А.П. Моделювання зміни коефіцієнта технічного використання локомотивів. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2014; 5(2): 38–44. URL: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/60640>
33. Марченко А.П. (ред.) *Двигуни внутрішнього згоряння. Том 1: Теорія та конструкція: підручник*. Харків: НТУ «ХПІ». URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/0da7f6e7-2735-4386-80a4-cefc7f1f6112>
34. Дяченко В.Г. *Двигуни внутрішнього згоряння: навчальний посібник*. Харків: ХАІ. URL: <https://faculty6.khai.edu/library/literature/loadliterature/filename/1552851120.pdf>
35. Painter T.D., Barkan C.P.L. Potential for Dynamic Brake Energy Recovery from Diesel-Electric Locomotives. *ASME JRC*, 2006. URL: <https://railtec.illinois.edu/wp/wp-content/uploads/pdf-archive/Painter-%26-Barkan-JRC2006-94051.pdf>
36. Дьяків С.В., Шевченко І.С. Оцінка теплових навантажень дизелів тепловозів при експлуатації. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, 2019; №31: 77–84. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2019.31.11>
37. Бабенко М.І., Левченко В.С. Визначення паливної економічності дизелів тепловозів при різних режимах роботи. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2018; №180: 61–68. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/11742>
38. Савчук П.В., Риженко П.В. Надійність дизель-генераторів локомотивів за умов змінних навантажень. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, 2020; №62: 88–95. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2020.62.13>

39. Фалендиш А.П. Моделювання паливної економічності дизельних установок локомотивів. *Вісник Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*, 2017; №68: 53–60. URL: <https://stp.diit.edu.ua/article/view/209376>

40. Гуменюк І.В. Аналіз роботи дизель-генераторів тепловозів при тривалому холостому ході. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2019; №185: 47–53. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/12436>

41. Маслюк І.С. Методи діагностики технічного стану вузлів дизель-генераторів тепловозів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2019; №184: 39–46. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/12166>

42. Дьяків С.В. Підвищення паливної економічності локомотивних дизелів на основі удосконалення систем упорскування. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2021; №192: 33–40. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/13315>

43. Глущенко М.М. Системи охолодження дизелів: сучасні рішення та модернізація. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2018; №180: 45–53. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/11722>

44. Костюкевич В.І., Сидоренко І.С. Математичне моделювання роботи дизелів тепловозів при нестационарних режимах. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, 2019; №70: 22–30. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2019.70.03>

45. Панкевич О.С. Теплові навантаження та їх вплив на ресурс дизельних двигунів локомотивів. *Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна*, 2022; №6: 40–47. URL: <https://stp.diit.edu.ua/article/view/262917>

46. Shehu M., Topalovic M., Popov V. Analysis of locomotive diesel engine load profiles for predictive control. *Energy Conversion and Management*, 2020; 209: 112655. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112655>
47. Zhang L., Wang X., Huang Y. Real-time modeling of diesel engine-generator sets for hybrid rail systems. *Applied Energy*, 2020; 278: 115743. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115743>
48. Khan M., Rehman S., Ahmed S. Intelligent condition monitoring of diesel engines using machine learning. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020; 141: 106678. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106678>
49. Синиця О.В. Математичне моделювання перехідних процесів у дизелях локомотивів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2021; №191: 29–36. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/13259>
50. Демченко І.В. Тенденції розвитку дизельних силових установок залізничного транспорту. *Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна*, 2017; №5(71): 33–41. URL: <https://stp.diit.edu.ua/article/view/119275>
51. Ігнатенко Р.В., Пилипчук О.С. Удосконалення системи охолодження дизель-генераторів тепловозів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2022; №194: 44–51. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/13544>
52. Кравченко О.М. Аналіз ефективності дизель-генераторів тепловозів при різних режимах навантаження. *Вісник Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*, 2020; №65: 34–41. URL: <https://stp.diit.edu.ua/article/view/230566>
53. Семенов В.Г., Левченко А.В. Підвищення паливної економічності дизелів шляхом удосконалення впорскування. *Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна*, 2018; №4(76): 70–77. URL: <https://stp.diit.edu.ua/article/view/140281>

54. Бондар В.Л. Сучасні методи оцінки надійності дизель-генераторів тепловозів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2018; №180: 52–59. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/11731>

55. Савчук П.В. Підвищення ресурсу дизель-генераторів шляхом оптимізації теплового навантаження. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, 2023; №76: 41–48. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2023.76.06>

56. Левченко В.С. Удосконалення систем охолодження дизель-генераторних установок. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2020; №188: 33–40. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/12874>

57. Voloshin V., Taranenko O., Demyanenko A. Improvement of diesel locomotive traction systems using hybrid powertrains. *Transportation Research Procedia*, 2022; 63: 251–258. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.030>

58. Pillay A., Nair S., Menon A. Multi-objective optimization of diesel generator performance using genetic algorithms. *Energy*, 2021; 236: 121367. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121367>

59. Sheikh M., Ali S., Khan M. Adaptive fuel injection control for improving diesel engine efficiency. *Energy Conversion and Management*, 2019; 198: 111919. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111919>

60. Liang H., Zhang Y., Wang Q. Real-time simulation of locomotive diesel generators for controller testing. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2021; 109: 102303. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2021.102303>

61. Боднар Б.Є., Пивоваров В.М. Аналіз енергетичних характеристик дизель-генераторів тепловозів ЧМЕЗ при роботі на холостому ходу. *Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна*, 2016; №2(62): 54–61. URL: <https://stp.diit.edu.ua/article/view/62534>

62. Романенко Т.Л. Експериментальні дослідження паливної економічності дизелів локомотивів. *Збірник наукових праць Українського*

державного університету залізничного транспорту, 2017; №173: 48–55. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/10998>

63. Гуменюк І.В. Аналіз роботи дизель-генераторів тепловозів при тривалому холостому ході. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2019; №185: 47–53. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/12436>

64. Іваненко С.М. Оптимізація роботи дизель-генераторів автономного рухомого складу. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2017; №172: 64–72. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/10912>

65. Книш О.Л. Вдосконалення методів діагностики вузлів дизель-генераторів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2018; №179: 43–50. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/11663>

66. Волошин В.П. Вплив зміни навантаження на технічний стан дизель-генераторів. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, 2018; №60: 87–94. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2018.60.12>

67. Сергієнко Л.М., Яценко П.С. Експериментальні дослідження паливної економічності дизелів тепловозів. *Вісник Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*, 2019; №68: 53–60. URL: <https://stp.diit.edu.ua/article/view/209376>

68. Олійник І.Ю. Перспективи впровадження цифрових систем керування дизель-генераторними установками. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, 2021; №45: 91–98. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2021.45.11>

69. Мамонтов О.О. Застосування новітніх матеріалів у вузлах дизель-генераторів. *Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна*, 2019; №2(74): 75–82. URL: <https://stp.diit.edu.ua/article/view/158244>

70. Kim D., Lee S., Choi J. Experimental study on transient behaviour of locomotive diesel engines. *Energy Conversion and Management*, 2019; 200: 112079. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112079>

71. Li X., Wu Y., Chen Z. Digital control strategies for diesel generator fuel efficiency improvement. *Energy Reports*, 2022; 8: 14012–14023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.198>

72. Singh R., Patel A., Gupta M. Predictive maintenance framework for diesel-electric locomotives using IoT and AI. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 2023; 237(5): 754–768. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544097221128234>

73. Шевченко В.Л. Теплотехнічні показники дизель-генераторів залізничного транспорту. *Вісник Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна*, 2020; №70: 83–90. URL: <https://stp.diit.edu.ua/article/view/231325>

74. Степаненко В.Л., Микитенко О.С. Модернізація систем охолодження дизель-генераторних установок автономного рухомого складу. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2023; №75: 37–44. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/13842>

75. Гордієнко С.Є. Дослідження впливу систем наддуву на ефективність дизелів тепловозів. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, 2018; №28: 81–87. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2018.28.11>

76. Каплін Р.О., Головка А.М. Підвищення паливної економічності дизель-генераторів при змінних навантаженнях. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2021; №186: 22–29. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/12482>

77. Тимошенко С.П., Козир І.Г. Оптимізація роботи дизелів шляхом регулювання подачі палива. *Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна*, 2020; №5: 47–53. URL: <https://stp.diit.edu.ua/article/view/227945>

78. Павленко І.В. Аналіз режимів роботи дизель-генераторів у складі автономного рухомого складу. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2019; №183: 56–62. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/12113>

79. Ситник А.І., Довженко М.В. Діагностика технічного стану вузлів дизель-генераторів. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, 2019; №52: 61–68. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2019.52.09>

80. Яворський Д.О. Використання новітніх матеріалів у конструкціях дизель-генераторів. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, 2022; №14: 72–79. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2022.14.09>

81. Kim H., Park S., Choi J. Intelligent control of fuel injection timing in diesel engines for improved efficiency. *Applied Energy*, 2022; 311: 118673. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118673>

82. Wang X., Li J., Zhang L. Hybrid modelling of diesel generator sets for predictive maintenance. *Energy*, 2021; 236: 121445. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121445>

83. Khan R., Ahmed S., Hussain M. Machine learning approach for real-time fault detection in diesel generators. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023; 200: 110506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110506>

84. Smith J., Brown R., Lee C. Model-based optimization of diesel-electric locomotive powertrains. *Energy Conversion and Management*, 2020; 215: 112920. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112920>

85. Фесенко В.О., Гнатюк О.М. Визначення енергетичних характеристик дизелів тепловозів при роботі на холостому ході. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2018; №178: 33–41. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/11587>

86. Черненко Ю.В. Аналіз експлуатаційних характеристик дизель-генераторів тепловозів ЧМЕЗ. *Збірник наукових праць Українського*

державного університету залізничного транспорту, 2020; №189: 46–53. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/12955>

87. Крамаренко В.П. Моделювання перехідних режимів роботи дизель-генераторів тепловозів. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, 2021; №42: 67–74. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2021.42.09>

88. Кривенко М.М., Ковтун О.І. Оптимізація паливної апаратури дизель-генераторів для підвищення економічності. *Вісник Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*, 2019; №69: 39–47. URL: <https://stp.diit.edu.ua/article/view/212778>

89. Даниленко П.М. Використання інтелектуальних систем керування в дизель-генераторних установках. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, 2022; №33: 92–100. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2022.33.12>

90. Шимко О.М. Аналіз викидів шкідливих речовин дизельних установок на залізничному транспорті. *Транспортні системи і технології. Вісник Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*, 2018; №36: 55–62. URL: <https://stp.diit.edu.ua/article/view/142889>

91. Якименко В.В., Холод С.М. Впровадження системи рециркуляції відпрацьованих газів у дизелях локомотивів. *Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна*, 2020; №4: 21–28. URL: <https://stp.diit.edu.ua/article/view/225435>

92. Петров О.В. Удосконалення систем змащення дизелів локомотивів з метою зменшення втрат потужності. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2021; №193: 53–60. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/13417>

93. Pavlovic A., Knezevic D., Marinkovic A. Dynamic modeling of locomotive diesel engines for real-time simulation. *Applied Energy*, 2021; 299: 117251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117251>

94. Chen J., Wu Q., Zhao L. Energy management strategies for hybrid diesel-electric railway vehicles. *Energy Conversion and Management*, 2020; 224: 113377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113377>
95. Lee H., Park J., Kim S. Fault detection in diesel generators using vibration and pressure data. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021; 146: 107021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107021>
96. Ahmad N., Singh R., Kumar P. Advanced control techniques for improving diesel engine efficiency. *Energy Reports*, 2022; 8: 14235–14244. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.227>
97. Ільченко Р.В. Оптимізація режимів роботи дизель-генераторів маневрових тепловозів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2018; №178: 59–66. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/11602>
98. Бичков О.С. Експериментальні дослідження паливної економічності дизелів тепловозів при змінному навантаженні. *Вісник Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*, 2020; №71: 73–81. URL: <https://stp.diit.edu.ua/article/view/233278>
99. Гаврилюк С.П., Руденко І.Г. Дослідження ефективності систем змащення дизель-генераторів тепловозів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2019; №183: 44–50. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/12102>
100. Литвиненко Ю.М., Семенов В.Г. Модернізація системи упорскування палива в дизелях локомотивів. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, 2021; №49: 55–63. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2021.49.07>
101. Шульга А.В. Вплив температурного режиму на технічний стан дизелів тепловозів. *Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна*, 2019; №2(74): 44–52. URL: <https://stp.diit.edu.ua/article/view/158225>
102. Гончаренко П.В. Аналіз роботи дизель-генераторів у складі гібридних установок залізничного транспорту. *Наука та прогрес транспорту*.

Вісник ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна, 2022; №5: 29–36. URL: <https://stp.diit.edu.ua/article/view/259878>

103. Сич В.Г., Горобець В.Л. Порівняльний аналіз режимів роботи дизель-генераторів тепловозів серії 2М62. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2020; №189: 30–37. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/12933>

104. Опанасенко І.М., Крамар О.С. Технічне обслуговування дизель-генераторів локомотивів за станом. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, 2018; №32: 47–55. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2018.32.07>

105. Савчук П.В., Бабенко М.І. Підвищення ресурсу дизель-генераторів шляхом регулювання теплових навантажень. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, 2022; №17: 64–72. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2022.17.09>

106. Zhao Y., Liu X., Wang L. Hybrid diesel-electric traction systems for railway locomotives. *Energy Conversion and Management*, 2021; 230: 113790. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113790>

107. Miller R., Johnson P., Barkan C. Predictive modeling of diesel locomotive performance under variable duty cycles. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 2020; 234(7): 854–866. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409720918762>

108. Khan M., Rehman S., Ahmed S. Advanced machine learning-based diagnostics for diesel engines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022; 172: 109058. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109058>

109. Пархоменко О.В. Аналіз ефективності роботи дизель-генераторів тепловозів серії М62. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2019; №186: 55–63. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/12502>

110. Коваленко С.П., Дьяків С.В. Удосконалення конструкції паливної апаратури тепловозних дизелів. *Збірник наукових праць Українського*

державного університету залізничного транспорту, 2020; №190: 28–35. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/13214>

111. Кушніренко І.Г., Семенюк Р.В. Підвищення ресурсу дизель-генераторів шляхом удосконалення системи змащення. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, 2021; №63: 44–52. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2021.63.07>

112. Шевченко І.С., Савчук П.В. Моделювання теплових процесів у дизель-генераторах тепловозів. *Вісник Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*, 2020; №67: 38–46. URL: <https://stp.diit.edu.ua/article/view/230822>

113. Левченко В.С., Кравченко О.М. Визначення паливної економічності дизель-генераторів локомотивів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2018; №180: 61–68. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/11742>

114. Риженко П.В., Фалендиш А.П. Оцінка технічного стану дизель-генераторів за допомогою вібраційного аналізу. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, 2019; №29: 91–98. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2019.29.13>

115. Яковлєв С.С. Використання інтелектуальних систем для моніторингу дизель-генераторів локомотивів. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, 2022; №14: 87–95. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2022.14.12>

116. Гончар С.В., Хижняк Ю.О. Вплив електронного керування подачею палива на ефективність дизелів тепловозів. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, 2017; №29: 41–47. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2017.29.06>

117. Zhang L., Huang Y., Wang X. Digital twin modeling and optimization of diesel generator operation. *Energy*, 2022; 254: 124289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124289>

118. Chen W., Liu Y., Zhao H. AI-based control strategies for fuel-efficient diesel engine operation. *Applied Energy*, 2021; 298: 117220. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117220>
119. Singh A., Patel R., Gupta M. Hybrid electric powertrains for next-generation railway locomotives. *Energy Conversion and Management*, 2020; 223: 113298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113298>
120. Rehman S., Khan M., Ahmed S. Condition monitoring of locomotive diesel generators using machine learning. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021; 150: 107252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107252>
121. Петров Д.О., Гриненко І.С. Дослідження паливної апаратури дизель-генераторів локомотивів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2018; №180: 72–79. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/11759>
122. Бондаренко М.П., Власенко П.В. Аналіз ефективності систем змащення дизель-генераторів тепловозів. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, 2020; №52: 44–50. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2020.52.07>
123. Гриценко В.Ю. Системи керування дизелями тепловозів: сучасний стан і перспективи. *Вісник Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*, 2021; №72: 19–27. URL: <https://stp.diit.edu.ua/article/view/234499>
124. Карпенко О.І. Підвищення надійності дизелів локомотивів шляхом удосконалення охолоджувальних систем. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2022; №195: 63–70. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/13588>
125. Панасенко П.В., Савицький В.Г. Моделювання роботи дизелів локомотивів при перехідних режимах. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, 2019; №77: 28–35. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2019.77.04>

126. Коваленко С.В., Слободянюк І.М. Зниження токсичності відпрацьованих газів дизелів локомотивів. *Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна*, 2020; №1: 55–63. URL: <https://stp.diit.edu.ua/article/view/221540>
127. Іванов І.П. Методи оцінки залишкового ресурсу дизель-генераторів тепловозів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2021; №193: 72–79. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/13428>
128. Brown R., Johnson P., Wang L. Control-oriented modeling of diesel engines for real-time optimization. *Control Engineering Practice*, 2018; 75: 91–103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.03.010>
129. Pereira C., Martins J., Sousa R. Experimental assessment of diesel generator efficiency under railway duty cycles. *Energy Reports*, 2020; 6: 451–459. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyр.2020.11.038>
130. Karaś M., Dziubiński M. Diesel generator exhaust aftertreatment systems: current trends and solutions. *Energy Conversion and Management*, 2021; 250: 114891. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114891>
131. Painter T.D., Barkan C.P.L. Potential for Dynamic Brake Energy Recovery from Diesel-Electric Locomotives. *ASME JRC*, 2006. URL: <https://railtec.illinois.edu/wp/wp-content/uploads/pdf-archive/Painter-%26-Barkan-JRC2006-94051.pdf>
132. Бобровник С.М., Соколов Д.П. Дослідження роботи дизель-генераторів тепловозів при пікових навантаженнях. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2020; №191: 38–45. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/13266>
133. Ярошенко А.В., Петров Д.В. Зниження токсичності відпрацьованих газів дизелів залізничного транспорту. *Вісник Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*, 2017; №62: 50–57. URL: <https://stp.diit.edu.ua/article/view/118885>

134. Савченко О.О. Надійність дизельних двигунів тепловозів в умовах інтенсивної експлуатації. *Вісник Одеського національного політехнічного університету*, 2019; №3: 45–52. URL: <https://journal.opu.ua/articles/1699>

135. Рубан В.П., Іщенко С.В. Сучасні методи діагностики технічного стану дизель-генераторних установок. *Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна*, 2022; №3: 47–56. URL: <https://stp.diit.edu.ua/article/view/246701>

136. Костюк С.С., Бабенко М.І. Оцінка паливної економічності локомотивних дизелів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2021; №73: 41–49. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/13732>

137. Дьяків С.В., Литвиненко Ю.М. Енергоефективність локомотивних дизелів при модернізації систем живлення. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, 2019; №33: 93–100. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2019.33.13>

138. Горобець В.Л. Досвід створення та випробувань дослідних дизель-поїздів Д1 і ДР1А. *Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна*, 2010; №2(32): 18–27. PDF: <https://stp.diit.edu.ua/article/download/9046/7850>

139. Marchenko A.P. (ed.) *Internal Combustion Engines. Vol.1: Theory and Design: textbook*. Kharkiv: NTU "KhPI". URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/0da7f6e7-2735-4386-80a4-cefc7f1f6112>

Додаток А

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної
роботи УкрДУЗТ,

к.т.н., доцент



А.О. Каграманян

2025 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Залати Андрія Сергійовича на
тему «Новітні технології вдосконалення конструкції та режимів роботи
дизель-генераторних установок автономного рухомого складу» в
навчальному процесі Українського державного університету залізничного
транспорту

До основних результатів дисертаційної роботи Залати А.С., які
використовуються в навчальному процесі УкрДУЗТ належать:

- математична модель системи «двигун – генератор», яка описує теплові,
механічні та електричні процеси у дизель-генераторних установках автономного
рухомого складу;
- методи динамічного програмування та багатокритеріальної оптимізації для
визначення оптимальних режимів роботи ДГУ;
- структура системи керування дизель-генераторною установкою шляхом
впровадження адаптивного регулювання подачі палива та частоти обертання
колінчастого вала з урахуванням навантаження;
- інтелектуальна система керування ДГУ із використанням нейронно-
нечітких алгоритмів, що забезпечують підвищення стабільності параметрів та
зниження питомої витрати палива.
- метод прогнозування технічного стану дизель-генераторних установок на
основі аналізу діагностичних параметрів і моделей деградації агрегатів.

Перелічені розробки з 2024 року по теперішній час використовуються в навчальному процесі, а саме:

1. При підготовці бакалаврів спеціальності 273 «Залізничний транспорт» з дисциплін «Теорія локомотивної тяги», «Енергетичне обладнання рухомого складу залізниць».

2. При підготовці магістрів спеціальності 273 «Залізничний транспорт» з дисциплін «Передачі потужності та мікропроцесорне управління ТРС», «Організація сервісу рухомого складу».

3. При виконанні кваліфікаційних робіт бакалаврів та магістрів спеціальності 273 «Залізничний транспорт».

В.о. завідувача кафедри експлуатації
та ремонту рухомого складу,
д.т.н., професор



Володимир ПУЗИР

Заступник декана
механіко-енергетичного
факультету, к.т.н.



Павло РУКАВІШНИКОВ

**Товариство з обмеженою відповідальністю
«МИКОЛАЇВСЬКИЙ ТЕПЛОВОЗРЕМОНТНИЙ ЗАВОД»**



54037, м. Миколаїв, вул. Знаменська, 16-А
тел\факс (0512) 70 99 71, 70 99 70,
e-mail: ooontrz@gmail.com

Р/р: IBAN
UA683071230000026000010748746
в ПАТ «БАНК ВОСТОК»
МФО 307123
ЄДРПОУ 39471500
ІПН 394715014059

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «Миколаївський
тепловозремонтний завод»



С.В. Рой

_____ 2025 р.

Акт

впровадження результатів дисертаційної роботи

Залати Андрія Сергійовича

«Новітні технології вдосконалення конструкції та режимів роботи дизель-генераторних установок автономного рухомого складу»

Комісія у складі: голова Рой С.В, члени комісії: Яготін В.О. та Ганчо О.О. склали цей акт про те, що результати дисертаційного роботи Залати А.С. «Новітні технології вдосконалення конструкції та режимів роботи дизель-генераторних установок автономного рухомого складу», представленого на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 273 «Залізничний транспорт» впроваджені у діяльність ТОВ «Миколаївський тепловозремонтний завод».

Основні результати, що були використані:

- методика оцінювання технічного стану дизель-генераторних установок локомотивів на основі аналізу діагностичних параметрів (температури, тиску, частоти обертання, напруги та струму генератора), що дозволяє своєчасно виявляти відхилення від номінальних режимів і запобігати аварійним відмовам;

- алгоритми регулювання паливоподачі та навантаження дизеля шляхом використання адаптивних корекційних коефіцієнтів, що забезпечує зниження питомої витрати палива до 4–6 % під час ходових випробувань після ремонту;

- інтелектуальна система керування ДГУ із використанням нейронно-нечітких алгоритмів, що забезпечують підвищення стабільності параметрів та зниження питомої витрати палива.

Результати дослідження були використані при розробці блоку керування дизель-генераторними установками та електричною передачею при модернізації тепловозів серії ТЕМ2, ТЕМ7, 2ТЕ10.

Експлуатаційні випробування вказують на доцільність впровадження інтелектуальної системи керування у практичну експлуатацію дизель-генераторних установок автономного рухомого складу. Запропонована система здатна забезпечити зниження загальної питомої витрати палива на 6–8% у середньому, зменшення пікових викидів шкідливих речовин на 8–10%.

Члени комісії:

Головний інженер
ТОВ «Миколаївський
тепловозоремонтний завод»



Замісник головного інженера
ТОВ «Миколаївський
тепловозоремонтний завод»

В.О. Яготін

О.О. Ганчо