

Український державний університет залізничного транспорту
Міністерство освіти і науки України

Український державний університет залізничного транспорту
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ПАНЧЕНКО ВЛАДИСЛАВ ВАДИМОВИЧ

УДК 629.4.083:001.76

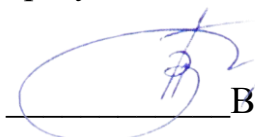
ДИСЕРТАЦІЯ

РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ФОРМУВАННЯ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ МЕТОДІВ, ТЕХНОЛОГІЙ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЛОКОМОТИВІВ

05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів
27 – Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

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

 В.В. ПАНЧЕНКО

Науковий консультант

ПАНЧЕНКО Сергій Володимирович
доктор технічних наук, професор

Харків – 2025

АНОТАЦІЯ

Панченко В.В. Розвиток наукових основ формування ресурсозберігаючих методів, технологій та технічних засобів експлуатації локомотивів – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів (273 – залізничний транспорт). – Український державний університет залізничного транспорту, МОН України, Харків, 2025.

Дисертація присвячена вирішенню науково-прикладної проблеми формування ресурсозберігаючих технологій експлуатації локомотивів шляхом подальшого розвитку науково-обґрунтованих методів, моделей та технічних засобів моніторингу у реальному часі технічного стану тягового рухомого складу.

Актуальність роботи обумовлена тим, що залізничний транспорт знаходиться у процесі активної модернізації, що зумовлено необхідністю підвищення ефективності перевезень, зниження експлуатаційних витрат та впровадження екологічно безпечних технологій. Важливою складовою цього процесу є розробка та впровадження ресурсозберігаючих методів, технологій і технічних засобів експлуатації локомотивів, що дозволяють суттєво знизити споживання пального та електроенергії, мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище та підвищити надійність рухомого складу. Актуальність теми дисертаційного дослідження зумовлена зростанням вартості енергоресурсів, зокрема внаслідок війни в Україні, необхідністю зменшення впливу залізничного транспорту на довкілля, зношеністю локомотивного парку, впровадженням цифрових технологій у сферу управління локомотивами, розвитком та впровадженням відновлюваних джерел енергії в енергосистему країни. Відсутність комплексного наукового підходу до формування ресурсозберігаючих методів експлуатації

локомотивів сповільняє процес інтеграції енергоефективних технологій та ускладнює адаптацію залізничного транспорту до сучасних умов.

У вступі наведено загальну характеристику дисертаційної роботи, зазначено її актуальність, зв'язок із науковими темами, сформульовано мету, завдання досліджень, представлене практичне значення роботи і наукову новизну.

В першому розділі виконаний аналіз проблеми ресурсозбереження при експлуатації тягового рухомого складу залізниць. Розглянуті методи та засоби реалізації ресурсозберігаючих технологій.

Проаналізовані умови роботи та причини відмов тягових електричних машин локомотивів. Виокремлені та класифіковані за частотою у відсотках п'ять основних причин відмов тягових електродвигунів. Розглянуто світовий досвід впровадження систем моніторингу енергоефективності локомотивів.

У другому розділі виконане моделювання впливу перехідних процесів та аварійних режимів роботи на технічний стан тягових електродвигунів локомотивів.

Розроблено математичну модель електричних перехідних процесів у трифазному дворівневому автономному інверторі напруги та його навантаженні, яка дозволила виявити вплив технічного стану обмоток статора асинхронного двигуна на спектральний склад струму системи «перетворювач частоти–асинхронний двигун».

Запропоновано систему операторних рівнянь відносно шуканих струмів і напруг, що дає змогу автоматично враховувати поточну конфігурацію комутуючих перемикачів.

Розроблена математична модель системи «перетворювач частоти–асинхронний двигун», що враховує як циклічність роботи перетворювача частоти так і різні етапи комутації його вентилів, що забезпечує виключення режиму автоколивань і небезпечних перенапруг при регулюванні частоти обертання електроприводу.

Синтезовано двофазну імітаційну модель тягового асинхронного двигуна в нерухомій системі координат, що дозволило отримати характеристики частоти обертання, електромагнітного моменту та трифазного струму при прямому пуску. Отримані залежності частоти обертання та електромагнітного моменту з яких випливає, що відхилення напруги однієї фази на 2% призводить до зниження частоти обертання та значних коливань як електромагнітного моменту, так і частоти обертання, що призводить до втрат активної потужності, нерівномірного споживання електроенергії та старіння ізоляції за рахунок додаткового нагріву обмоток двигуна.

Розроблено імітаційну модель векторного керування з просторово векторною широтно-імпульсною модуляцією тяговим асинхронним електроприводом, що дозволило дослідити аварійні режими, які можуть виникати в тяговому асинхронному електроприводі з тяговим електродвигуном АД914-У і виконати порівняння з номінальним режимом його роботи.

В третьому розділі визначено склад комплексу завад, які створюють електричний фон для спостереження тестового струму в обмотці тягового електродвигуна, що дозволило шляхом аналізу спектрального складу цих завад встановити діапазон частот ($f=1,992\text{кГц}\div 19,44\text{кГц}$), у якому їхня спектральна щільність найменша.

Розроблено математичну процедуру оцінювання параметрів тестового сигналу, що дозволило шляхом комп'ютерного моделювання випадку застосування синусоїдного тестового сигналу визначити точнісні характеристики цієї процедури в широкому діапазоні інтенсивності завади і ступеня перекриття сигналу і завади за часом.

Знайдено вираз для функції правдоподібності вимірювального струму тестування обмотки статора тягового електродвигуна, що дозволило запропонувати можливий шлях математичної обробки результатів

вимірювань, який призводить до зменшення впливу імпульсних завад на отримані величини інформаційних параметрів.

Отримано співвідношення для розрахунку амплітуди та початкової фази тестового струму які враховують величини спектральної щільності, часу початку та тривалості імпульсної завад.

Визначено вирази для меж Крамера - Рао для оцінки амплітуди та початкової фази синусоїди при її спостереженні на фоні суміші імпульсної та неперервної шумових завад, що дає змогу додатково об'єктивізувати визначення граничних технічних можливостей як нових, так і сучасних систем і пристроїв, що використовують синусоїдні інформаційні сигнали.

В четвертому розділі в ході вирішення проблеми синтезу базової обчислювальної структури пристрою завадостійкого приймання зондувального сигналу моніторингу технічного стану асинхронних електродвигунів в умовах дії складної адитивної завади, чотири компоненти якої є структурно-детермінованими, а п'ята являє собою широкопasmовий гаусівський шум, визначено критерій оптимальності приймання, а також сформовано відповідну цьому критерію цільову функцію та оптимізовано її вигляд з урахуванням взаємних кореляційних зв'язків компонентів адитивної суміші сигналу та завад.

Отримано модифікації цільової функції, які відповідають наявності або відсутності корисного сигналу у вхідній сигнально-завадовій суміші. Як наслідок, задачу виявлення корисного сигналу зведено до задачі розрізнення двох псевдосигналів, утворених як суми структурно-детермінованих компонентів завади та корисного сигналу або як сума тільки зазначених компонентів завади.

Проведено синтез пристрою оптимального приймання зондувального сигналу контролю технічного стану асинхронних тягових електродвигунів.

У ході вирішення проблеми моніторингу якості роботи тягових двигунів локомотивів сформовано систему диференціальних рівнянь

відносно шуканих струмів і напруги, що враховує поточний стан їхніх електричних параметрів.

Розроблено математичну модель, яка дає змогу провести аналітичний або числовий опис струму в будь-якій вітці схеми заміщення двигуна. Отримані в ході розрахунків рівняння залишаються справедливими для будь-якої форми тестової напруги. Це дає змогу знайти аналітичний опис напруги на будь-якому елементі як самого двигуна, так і кола його живлення.

Сформовано узагальнений критерій оцінки ефективності процесу експлуатації тягового рухомого складу, що дозволило розробити і показати на конкретному прикладі покрокові рекомендації щодо застосування узагальненого функціонально - статистичного критерію оцінювання ефективності процесу контролю та управління, здійснюваного САУ.

Виконано синтез нейрорегулятора швидкості тягового електродвигуна на основі авторегресії з середнім NARMA-L2, реалізованого в бібліотеці Deep Learning Toolbox середовища Matlab. В Simulink була розроблена імітаційна модель векторного керування тяговим асинхронним електродвигуном АД914-У. У результаті імітаційного моделювання встановлено, що система з нейрорегулятором показує кращі показники регулювання частоти обертання та електромагнітного моменту в перехідних процесах, однак при стрибкоподібному накиданні навантаження має місце значна пульсація напруги U_{sq} .

У п'ятому розділі проведено кореляційно-регресійний аналіз впливу наявності магістральних локомотивів та вантажних вагонів на обсяг перевезення вантажів. Встановлено, що в перерахунку на річний обсяг вантажних перевезень, рівень впливу парку магістральних локомотивів на забезпечення безперебійного перевезення майже в два рази вищий за вплив експлуатаційного парку вагонів на цей процес.

Проведений аналіз показників роботи залізниці встановив, що очікування формування (розформування) та відправлення вантажного поїзду

склало близько 33 % тривалості обігу вагона і, насамперед, через нестачу локомотивів, а простоювало з різних причин одночасно близько 70 % експлуатаційного парку вагонів. Зроблено висновок, що на сьогодні пріоритетним завданням при формуванні технічної політики залізничної галузі на середньостроковий період є впровадження інноваційних заходів, що дають змогу продовжити експлуатаційні можливості діючого локомотивного парку.

Досліджено та обґрунтовано доцільність використання методів кореляційно-регресійного аналізу для побудови економіко-математичної моделі, що адекватно визначає вплив збільшення обсягів вантажних перевезень на величину ВВП ПКС за рахунок продовження «життєвого циклу» вантажних локомотивів (макроекономічний аспект). Визначено залежність величини ВВП ПКС України від обсягів вантажних перевезень вітчизняним колісним транспортом. Встановлено, що в досліджуваній ситуації понад 45 % загальної варіабельності величини ВВП ПКС України пояснюється зміною загальних обсягів вантажних перевезень залізничним і автомобільним транспортом. Економічна інтерпретація параметрів моделі дозволяє визначити, що збільшення обсягів вантажних перевезень на 1 од. вантажу призводить до збільшення величини ВВП ПКС України в середньому на 0,0674 од. в доларах США. Використання моделі дало можливість отримати прогнозну оцінку зростання ВВП ПКС України за рахунок збільшення обсягів вантажних перевезень п'ятдесятьма локомотивами за умови продовження їхнього строку експлуатації на п'ять років в обсязі 8893,7 тис. дол. США, тобто 1778,3 тис. дол. щорічно.

Визначено, що сукупний економічний ефект у результаті збільшення обсягів вантажних перевезень п'ятдесятьма локомотивами, обладнаних вітчизняними системами контролю їх технічного стану, за п'ять років очікується в розмірі 3765,50 млн. грн.; загальна рентабельність цього інноваційного заходу складає 1,21 (доходи в 1,21 раза перевищують суму

витрат); розроблення та впровадження вітчизняних систем на п'ятдесяти локомотивах порівняно з закупками аналогів іноземного виробництва дасть економію понад 32,6 тис. дол. США.

Практичне значення отриманих результатів роботи підтверджене відповідним актом впровадження в регіональній філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця» (м. Харків). Також, результати отримані в дисертаційній роботі, використовуються в освітньому процесі Навчально-наукового центру освіти дорослих Українського державного університету залізничного транспорту при наданні освітніх послуг з підвищення кваліфікації за категоріями: начальник, головний інженер, заступники начальників, інженер технічного відділу локомотивних служб, тепловозремонтних заводів, служб приміських перевезень та підприємств локомотивного господарства АТ «Укрзалізниця». Крім того, результати дисертаційної роботи впроваджено: в навчальний процес кафедри «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» механіко-енергетичного факультету Українського державного університету залізничного транспорту а також у процес підготовки випускних кваліфікаційних робіт бакалаврів і магістрів на механіко-енергетичному факультеті за освітніми програмами “Електропостачання та ресурсозберігаючі технології”, “Електричний транспорт” спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка та «Електровози та електропоїзди» спеціальності 273 Залізничний транспорт.

Ключові слова: ресурсозберігаючі технології, «життєвий цикл» локомотивів, тяговий електродвигун, імпульсна завада, завадостійкий пристрій.

ABSTRACT

Panchenko V. V. Development of Scientific Foundations for the Formation of Resource-Saving Methods, Technologies, and Technical Means for Locomotive Operation – A Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.22.07 – Rolling Stock of Railways and Train Traction (273 – Railway Transport). – Ukrainian State University of Railway Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2025.

The dissertation is dedicated to addressing the scientific and applied problem of forming resource-saving technologies for locomotive operation by further developing scientifically grounded methods, models, and technical means for real-time monitoring of the technical condition of traction rolling stock.

The topicality of the research is driven by the ongoing modernization of railway transport, necessitated by the need to enhance transportation efficiency, reduce operational costs, and implement environmentally safe technologies. A crucial component of this process is the development and implementation of resource-saving methods, technologies, and technical means for locomotive operation, which significantly reduce fuel and electricity consumption, minimize environmental impact, and increase rolling stock reliability.

The relevance of the topic is further reinforced by the rising cost of energy resources, particularly due to the war in Ukraine, the need to mitigate the environmental impact of railway transport, the aging locomotive fleet, the introduction of digital technologies in locomotive management, and the development and integration of renewable energy sources into the country's energy system. The lack of a comprehensive scientific approach to the formation of resource-saving locomotive operation methods slows down the integration of energy-efficient technologies and complicates the adaptation of railway transport to modern conditions.

The introduction provides a general overview of the dissertation, outlining its relevance, connection to scientific research themes, introduces research aim and objectives, as well as the practical significance and scientific novelty of the study.

The first chapter presents an analysis of the problem of resource conservation in the operation of traction rolling stock on railways. It examines the methods and means for implementing resource-saving technologies.

The working conditions and causes of failures in locomotive traction electric machines have been analyzed. Five primary causes of traction motor failures have been identified and classified by frequency in percentage terms. Additionally, the chapter reviews global practices in implementing locomotive energy efficiency monitoring systems.

The second chapter focuses on modeling the impact of transient processes and emergency operating modes on the technical condition of locomotive traction electric motors.

A mathematical model of electrical transients in a three-phase two-level autonomous voltage inverter and its load has been developed. This model has enabled the identification of the influence of the stator winding technical condition on the spectral composition of the current in the «frequency converter–asynchronous motor» system.

A system of operational equations for the sought currents and voltages has been proposed, allowing for the automatic consideration of the current configuration of switching elements.

A mathematical model of the «frequency converter–asynchronous motor» system has been designed, taking into account both the cyclic operation of the frequency converter and various switching stages of its valves. This ensures the elimination of self-oscillation modes and dangerous overvoltages during speed control of the electric drive.

A two-phase simulation model of the traction asynchronous motor in a stationary coordinate system has been synthesized. This model allows for the

determination of rotation frequency, electromagnetic torque, and three-phase current characteristics during direct start-up. The obtained dependencies of rotation frequency and electromagnetic torque indicate that a 2% voltage deviation in one phase leads to a decrease in rotation frequency and significant fluctuations in both electromagnetic torque and rotation frequency. These fluctuations result in active power losses, uneven electricity consumption, and insulation aging due to additional heating of the motor windings.

A simulation model of vector control with space-vector pulse-width modulation for the traction asynchronous electric drive has been developed. This model enables the study of emergency operating modes that may occur in the traction asynchronous electric drive with the AD914-U traction motor and allows for a comparative analysis with its nominal operating mode.

The third chapter focuses on identifying the set of interferences that create the electrical background for observing the test current in the winding of a traction electric motor. By analyzing the spectral composition of these interferences, the frequency range ($f = 1.992 \text{ kHz} \div 19.44 \text{ kHz}$) with the lowest spectral density was determined.

A mathematical procedure for estimating the parameters of the test signal has been developed. Through computer modeling of the case involving a sinusoidal test signal, the accuracy characteristics of this procedure were determined across a wide range of interference intensity and varying degrees of temporal overlap between the signal and interference.

An expression for the likelihood function of the measured test current in the stator winding has been derived. This allowed for the proposal of a mathematical processing approach that reduces the influence of impulse noise on the obtained values of informational parameters.

Equations for calculating the amplitude and initial phase of the test current have been obtained, incorporating spectral density values, the start time, and the duration of impulse interference.

Expressions for the Cramér-Rao bounds of amplitude and initial phase estimates of a sinusoid observed in the presence of a mixture of impulse and continuous noise interferences have been derived. This makes it possible to further objectify the determination of the ultimate technical capabilities of both new and modern systems and devices that utilize sinusoidal informational signals.

The fourth chapter addresses the problem of synthesizing the computational structure of a noise-resistant receiver for the probing signal used in monitoring the technical condition of asynchronous electric motors under complex additive interference. Four components of this interference are structurally determined, while the fifth is broadband Gaussian noise.

As part of this analysis, an optimality criterion for signal reception has been determined, and a corresponding objective function has been formulated and optimized, considering the mutual correlation relationships between the components of the additive mixture of signal and interference.

Modifications of the objective function were derived, distinguishing between cases where the useful signal is present or absent in the input signal-interference mixture. As a result, the problem of detecting the useful signal was reduced to the task of distinguishing between two pseudo-signals—one formed as the sum of the structured interference components and the useful signal, and the other consisting of the interference components only.

A synthesis of an optimal receiver for the probing signal used in monitoring the technical condition of asynchronous traction electric motors has been performed.

To address the problem of monitoring traction motor performance in locomotives, a system of differential equations has been developed, describing the current state of electrical parameters such as currents and voltages.

A mathematical model has been developed to allow analytical or numerical representation of the current in any branch of the equivalent circuit of the motor. The derived equations remain valid for any form of test voltage, enabling an

analytical description of the voltage at any element of both the motor and its power circuit.

A generalized efficiency assessment criterion for the operation of traction rolling stock has been developed. This criterion allowed for the creation of step-by-step recommendations on the application of a functional-statistical criterion for assessing control and monitoring efficiency in automated control systems (ACS).

The synthesis of a neuro-regulator for the traction motor speed was performed using an NARMA-L2 autoregressive model, implemented via the DeepLearningToolbox in Matlab. A simulation model of vector control for the AD914-U asynchronous traction motor was developed in Simulink.

Simulation results showed that the system with the neuro-regulator provided better speed regulation and electromagnetic torque control during transient processes. However, when subjected to a sudden load application, significant voltage pulsations (U_{sq}) were observed.

In the fifth chapter, a correlation-regression analysis has been conducted to examine the impact of the availability of mainline locomotives and freight wagons on the volume of freight transportation. It has been determined that, when recalculated on an annual basis, the influence of the mainline locomotive fleet on ensuring uninterrupted transportation is nearly twice as high as the influence of the operational wagon fleet on this process.

An analysis of the railway performance indicators revealed that the waiting time for the formation (and disbanding) and dispatch of a freight train accounted for approximately 33% of the wagon cycle time, primarily due to a shortage of locomotives, while, for various reasons, about 70% of the operational wagon fleet was idle simultaneously. Based on these findings, it was concluded that a priority task in forming the technical policy of the railway sector for the medium term is the implementation of innovative measures that will extend the operational capabilities of the existing locomotive fleet.

The feasibility of employing correlation-regression analysis methods has been investigated and substantiated for constructing an economic-mathematical model that adequately determines the impact of increasing freight transportation volumes on the GDP of the Transport Complex (PCS) through the extension of the “life cycle” of freight locomotives (macroeconomic aspect). A dependency was established between the GDP of Ukraine’s Transport Complex and the volumes of freight transportation carried out by domestic wheeled transport.

It was further established that, in the situation under study, more than 45% of the total variability in the GDP of Ukraine’s Transport Complex is explained by changes in the overall volumes of freight transportation by both railway and road transport. The economic interpretation of the model parameters indicates that an increase in freight transportation volumes by one unit of cargo results in an average increase in the GDP of Ukraine’s Transport Complex by 0.0674 units in US dollars. The application of the model made it possible to obtain a forecast estimate of the growth of Ukraine’s Transport Complex GDP due to increased freight transportation volumes by fifty locomotives – provided that their service life is extended by five years – amounting to 8,893.7 thousand US dollars, i.e., 1,778.3 thousand US dollars annually.

It has been determined that the total economic effect resulting from the increased freight transportation volumes by fifty locomotives equipped with domestic systems for monitoring their technical condition is expected to reach 3,765.50 million UAH over five years; the overall profitability of this innovative measure is 1.21 (revenues exceed costs by a factor of 1.21); moreover, the development and implementation of domestic systems on fifty locomotives, as opposed to purchasing foreign-made analogs, will yield savings of over 32.6 thousand US dollars.

The practical significance of the obtained research results is confirmed by an official implementation act at the Southern Railway regional branch of JSC «Ukrzaliznytsia» (Kharkiv). Additionally, the results of the dissertation research

are applied in the educational process of the Educational and Scientific Center for Adult Education at Ukrainian State University of Railway Transport for advanced training programs targeted at professionals, including heads, chief engineers, deputy heads, engineers of the technical department of locomotive services, diesel locomotive repair plants, suburban transportation services, and locomotive enterprises of JSC «Ukrzaliznytsia»

Furthermore, the dissertation results have been incorporated into the educational process at the Department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering, and Electromechanics of the Mechanical and Energy Faculty of Ukrainian State University of Railway Transport. They are also used in the preparation of final qualification theses for bachelor's and master's students at the Mechanical and Energy Faculty within the educational programs «Electric Power Supply and Resource-Saving Technologies», «Electric Transport» under specialty 141 – Electrical Power Engineering, Electrical Engineering, and Electromechanics, and «Electric Locomotives and Electric Trains» under specialty 273 – Railway Transport.

Keywords: *resource-saving technologies, locomotive life cycle, traction electric motor, impulse interference, interference-resistant device.*

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Супрун О. Д., Семененко О. І., Панченко В. В., Семененко Ю. О. Дослідження електромагнітних перехідних процесів у частотно-керованому електроприводі перемикальних пристроїв трансформаторів тягових підстанцій. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2017. № 6. С. 25–36. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v0i6.119929>

2. Акімов О. І., Заїка Л. В., Панченко В. В., Панютін О. М. Розподілення тягових підстанцій по дистанціях електропостачання при впровадженні швидкісного руху. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2018. Вип. 181. С.43–50. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.181.2018.156417>

3. Ананьєва О. М., Бабаєв М. М., Давиденко М. Г., Панченко В. В. Оптимальне приймання інформаційних сигналів в умовах дії п'ятикомпонентної завади. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2021. № 1. С. 24–29. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v26i1.229062>.

4. Панченко В. В., Туренко О. Г. Дослідження прямого пуску тягового асинхронного електродвигуна за допомогою імітаційної моделі. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2021. № 3. С. 3–6. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v26i3.240446>

5. Панченко В. В., Харін Р. О. Дослідження втрат енергії в сонячній електростанції на тяговій підстанції. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2021. Вип. 196. С. 149–160. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.242262>

6. Панченко В. В., Туренко О. Г. Дослідження роботи тягового асинхронного двигуна при несиметрії живильної напруги та аварійних режимах роботи. *Збірник наукових праць Українського державного*

університету залізничного транспорту. 2021. Вип. 198. С. 145–150. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256648>

7. Панченко С. В., Балака Є. І., Панченко В. В., Резуненко М. Є. Еволюція транспорту та сучасна проблема української залізниці. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2022. Вип. 199. С. 89–98. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.199.2022.258816>

8. Панченко С. В., Балака Є. І., Панченко В. В., Резуненко М. Є. Вплив подовження «життєвого циклу» локомотивів на ВВП країни та економіку залізничної галузі. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2022. Вип. 200. С. 36–48. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.200.2022.262696>

9. Ананьєва О. М., Бабаєв М. М., Давиденко М. Г., Панченко В. В. Моделювання електричних перехідних процесів у частотно-керованому асинхронному двигуні *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2022. № 2. С. 23–33. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v27i2.259696>

10. Луценко І. М., Рухлова Ю. Н., Кириченко М. С., Панченко В. В., Циган П. С. Підвищення енергоефективності режимів розподільчих мереж із фотоелектричними станціями. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. Дніпро : НТУ «ДП», 2023. №1 (193). С. 99–106. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-1/099> (видання індексується в базі Scopus, Q3)

11. Панченко С. В., Панченко В. В., Туренко О. Г. Дослідження аварійних режимів роботи тягового асинхронного електропривода. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2023. Вип. 203. С. 56–63. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.203.2023.277955>

12. Панченко В. В., Харін Р. О. Моделювання та техніко-економічний розрахунок роботи сонячної електростанції на тяговій підстанції.

Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2023. № 2. С. 3–13. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i2.283295>

13. Панченко В. В., Харін Р. О. Дослідження впливу деградації сонячних панелей на ефективність роботи сонячної електростанції. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 3. С. 73–82. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i3.290140>

14. Ананьєва О. М., Бабаєв М. М., Давиденко М. Г., Панченко В. В. Частотна локалізація та оцінювання параметрів сигналу тестування обмотки статора трифазного асинхронного двигуна. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 4. С. 28–37. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i4.296413>.

15. Ананьєва О. М., Бабаєв М. М., Давиденко М. Г., Панченко В. В. Оцінювання параметрів неперервного зонduючого сигналу при тестуванні обмотки статора трифазного асинхронного двигуна. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 2. С. 52–60. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v29i2.307682>

16. Ананьєва О. М., Бабаєв М. М., Давиденко М. Г., Панченко В. В. Синтез пристрою оцінювання параметрів синусоїдного сигналу, адитивно змішаного з одиночною імпульсною завадою. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 3. С. 25–32. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v29i3.313625>

17. Панченко В. В., Туренко О. Г. Синтез нейрорегулятора NARMA-L2 для системи тягового асинхронного електропривода. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2024. Вип. 208. С. 180–187. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.208.2024.308623>

18. Buriakovskiy S. G., Maslii A. S., Panchenko V. V., Pomazan D. P., Denis I. V. The research of the operation modes of the diesel locomotive CHME3 on the imitation model. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2018. No. 2.

P. 59–62. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.2.10>. (видання індексується в базі *Web of Science*)

19. Panchenko S., Ananieva O., Babaiev M., Davidenko M., Panchenko V. Synthesis of a device for anti-jamming reception of signals of tonal rail circuits on the background of additive five-component interference. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3, Issue 9 (111). P. 94–102. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235835> (видання індексується в базі *Scopus*, Q3)

20. Відмовостійкий колійний індуктивний датчик : пат. 127127 Україна : МПК B61L1/08, B61L25/00, G08G7/00; № а201906666 ; заявл. 20.06.2019 ; опубл. 10.05.2023, Бюл. № 23.

Публікації у виданнях інших держав

21. Mezitis M., Panchenko V., Yatsko S., Vashchenko A., Sidorenko A., Sansyzbajeva Z. Selection of mathematical model of on-board capacity energy storage as element of hybrid traction unit of motor car rolling stock. *Journal of Measurements in Engineering*. 2021. Vol. 9, № 2. P. 71–86. <https://doi.org/10.21595/jme.2021.21818> (видання індексується в базі *Scopus* Q3, закордонне видання)

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

22. Buriakovskiy S., Maslii A., Pomazan D., Panchenko V., Overianova L., Omelianenko H. Multi-criteria Quality Evaluation of Energy Storage Devices for Rolling Stock Using Harrington's Desirability Function. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. 2020. P. 158–163. <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160105>. (включено до наукометричної бази *Scopus*)

23. Panchenko V. V., Masliy A. S., Kharin R. O. Prospects of introducing alternative sources of energy on Ukrainian railways : International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport. *IOP Conf. Series: Materials Science*

and Engineering. 2020. P. 1–10. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012008> (включено до наукометричної бази Scopus)

24. Akimov A. I., Akimova J. A., Panchenko V. V., Odiehov M. M. The composite functional statistical criterion for evaluating the effectiveness of the automatic control process and system. Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series : Materials Science and Engineering, International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport (EET 2020) 18th-20th November, Kharkiv, Ukraine. [Citation A. I. Akimov] *et al* 2021. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1021. P. 1–6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012001> (включено до наукометричної бази Scopus)

25. Яцько С. І., Карпенко Н. П., Панченко В. В., Ващенко Я. В. Розвиток обладнання розподільних пристроїв тягового електропостачання. Частина I. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2017. Вип. 172. С. 37–48

26. Plakhtii O., Trubchaninova K., Panchenko V., Anannieva O. Improving the Energy Efficiency of Railway Electrical Traction by Creating Smart Grid System. *ICTE in Transportation and Logistics 2019 (Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure)*. 2019. P. 337–343. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_42

27. Панченко В. В., Харін Р. О Модернізація систем електропостачання залізниць шляхом застосування альтернативних джерел енергії. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті* : тези стендових доповідей та виступів учасників 32-ї міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті" (Харків, 24–25 жовтня, 2019 р.). Харків : УкрДУЗТ, 2019. № 4 (додаток). С. 36–37.

28. Бабаєв М. М., Панченко В. В., Туренко О. Г. Дослідження роботи тягового електродвигуна 1AL4668DT у програмному комплексі Ansys.

Інформатика, управління та штучний інтелект : тези дев'ятої міжнародної науково-технічної конференції. Харків : НТУ "ХПІ", 2022. С.12

29. Балака Є. І., Панченко В. В., Резуненко М. Є. Подовження «життєвого циклу» локомотивів шляхом їх модернізації як фактор впливу на економічний розвиток. *Міжнародні економічні відносини. Сталий розвиток України в умовах глобалізації та Європейської економічної інтеграції : проблеми, перспективи, ефективність. ФЕНІКС-2022* : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, 31 травня 2022 р. Харків : НТУ «ХПІ», 2022. С. 67–70

30. Балака Є. І., Панченко В. В., Резуненко М. Є. Пріоритетний напрямок технічної політики Укрзалізниці в теперішній період. *Технологія-2022* : XXV матеріали міжнар. наук.-техн. конф., 27 травня 2022 р., м. Сєверодонецьк / укл. : Тарасов В. Ю., Зубцов Є. І. Сєверодонецьк : Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля, 2022. С. 118–119.

31. Панченко С. В., Балака Є. І., Панченко В. В., Резуненко М. Є. Ефективність автоматизації оперативного контролю технічного стану локомотивів. *Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика* : матеріали 18-ї науково-практичної міжнародної конференції (2-3 червня 2022 р.). Харків : УкрДУЗТ, 2022. С. 94–96

32. Панченко В. В., Туренко О. Г. Застосування штучних нейронних мереж в системі керування тяговим електроприводом. *Стан та перспективи розвитку електричного транспорту* : матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції, 23-25 листопада 2022 р. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. С. 158–160

33. Панченко В. В., Туренко О. Г. Порівняльний аналіз типів регуляторів для керування електродвигунами змінного струму. *Матеріали шістнадцятої міжнародної науково-практичної конференції «Інтегровані*

інтелектуальні робототехнічні комплекси» ІТРК-2023, 23-24 травня. Київ : НАУ, 2023. С.221–222.

34. Панченко С. В., Панченко В. В., Туренко О. Г. Аналіз роботи системи тягового асинхронного електропривода електрорухомого складу з різними типами регуляторів швидкості. *Матеріали П'ятнадцятої міжнародної науково-практичної конференції студентів і молодих вчених імені Георгія Кірти «Сучасні транспортні технології»* : збірник наукових праць / під загальною редакцією І. Кравця, О. Возняка ; НУЛП. Львів. 2023. С.74–76

35. Ananieva O. M., Babaiev M. M., Panchenko V. V., Davydenko M. H. Justification of the selection of the frequency range for the location of the test signal of the stator windings of a three-phase asynchronous electric motor. *Інформатика, управління та штучний інтелект* : тези одинадцятої міжнародної науково-технічної конференції. Харків : НТУ "ХП", 2024. С.4

36. Спосіб ідентифікації поїзда під час руху : пат. 133387 Україна : МПК B61L1/00, B61L25/02. № u201808240 ; заявл. 26.07.2018 ; опубл. 10.04.2019, Бюл. № 7.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	27
ВСТУП	28
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ	40
1.1 Особливості впливу подовження «життєвого циклу» локомотивів на економіку залізничної галузі	40
1.2 Сучасні методи та засоби формування ресурсозберігаючих технологій експлуатації ТРС	54
1.2.1 Методи ресурсозбереження	57
1.2.2 Засоби реалізації ресурсозберігаючих технологій на залізничному транспорті	62
1.2.3 Узагальнення та перспективи подальшого розвитку	64
1.3 Аналіз умов функціонування та причин відмов тягових електричних машин	65
1.3.1 Умови функціонування ТЕМ	65
1.3.2 Причини відмов ТЕМ	67
1.3.3 Методи виявлення та аналізу відмов ТЕМ	69
1.3.4 Рекомендації для запобігання відмовам ТЕМ	72
1.4 Методи та засоби моніторингу енергоефективності роботи тягового рухомого складу залізниць	73
1.4.1 Параметри енергоефективності роботи ТРС	73
1.4.2 Методи моніторингу енергоефективності	77
1.4.3 Засоби моніторингу енергоефективності	80
1.4.4 Практичне застосування систем моніторингу енергоефективності	84
1.4.5 Проблеми та перспективи розвитку методів і засобів	86

моніторингу	
1.5 Впровадження відновлювальних джерел енергії в системи електропостачання локомотивів	89
1.6 Проблеми та перспективи розвитку ресурсозберігаючих технологій експлуатації локомотивів	93
1.7 Висновки по розділу 1	99
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ТА АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ НА ТЕХНІЧНИЙ СТАН ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ЛОКОМОТИВІВ	104
2.1 Математична модель електричних перехідних процесів у частотно-керуваному двигуні	104
2.2 Математичне моделювання характеру комутаційних і робочих процесів в перетворювачах частоти системи ПЧ-АД	119
2.3 Імітаційне моделювання пускових та несиметричних режимів роботи асинхронних тягових двигунів	137
2.4 Моделювання електромагнітних процесів в аварійних режимах роботи ТЕД	145
2.5 Висновки по розділу 2	150
РОЗДІЛ 3. ФОРМУВАННЯ ЗАВАДОСТІЙКИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ МОНІТОРИНГУ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АСИНХРОННИХ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ	153
3.1 Частотна локалізація тестових сигналів асинхронних ТЕД	153
3.2 Оцінювання параметрів синусоїдного тестового сигналу асинхронних ТЕД	167
3.3 Синтез пристрою оцінювання параметрів зондувального синусоїдного сигналу, адитивно змішаного з одиночною імпульсною завадою	182
3.4 Визначення меж Крамера - Рао для амплітуди та фази синусоїди, адитивно змішаної з одиночним шумовим імпульсом	193

завади

3.5 Висновки по розділу 3	202
РОЗДІЛ 4 РЕАЛІЗАЦІЯ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ НА ДІЛЬНИЦЯХ ЗАЛІЗНИЦЬ В УМОВАХ ДІЇ СКЛАДНИХ ЗАВАД	204
4.1 Синтез пристрою контролю технічного стану асинхронних ТЕД в умовах дії п'ятикомпонентної адитивної завади	204
4.1.1 Формування цільової функції	204
4.1.2 Формалізація завдання розрізнення двох сигналів	210
4.1.3 Процедура й технічна реалізація оброблення сигналу	212
4.1.4 Чисельна оцінка завадостійкості розробленого пристрою	217
4.2 Розробка математичної моделі контролю технічного стану ТЕД в умовах дії складних завад	221
4.3 Формування узагальненого критерію оцінки ефективності процесу експлуатації тягового рухомого складу	233
4.3.1. Оцінка ефективності процесу контролю та управління, здійснюваного системою автоматичного управління	233
4.3.2 Розробка рекомендацій щодо застосування узагальненого функціонально-статистичного критерію оцінки ефективності процесу та САУ	240
4.4 Синтез нейрорегулятора NARMA-L2 для системи ПЧ-АД	244
4.5 Висновки по розділу 4	252
РОЗДІЛ 5 ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ЕКСПЛУАТАЦІЙНОМУ ПАРКУ ЛОКОМОТИВІВ	255
5.1 Сучасна проблема української залізниці щодо визначення актуального завдання з модернізації локомотивів експлуатаційного парку та обґрунтування необхідності невідкладного її вирішення	255
5.2 Джерела отримання економічного ефекту від впровадження	268

ресурсозберігаючих методів, технологій та технічних засобів експлуатації локомотивів

5.3 Методичний підхід до оцінки економічної ефективності функціонування залізничної галузі внаслідок збільшення «життєвого циклу» локомотивів 276

5.4 Визначення приросту економічного ефекту АТ «Укрзалізниця» при впровадженні ресурсозберігаючих технологій експлуатації вантажних локомотивів 280

5.5 Висновки по розділу 5 283

ВИСНОВКИ 286

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 292

Додаток А Акти впровадження результатів дисертації 327

Додаток Б Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації 333

Додаток В Моделювання асинхронного ТЕД АД914У у середовищі ANSYS 341

Додаток Г Динамічна модель асинхронного ТЕД АД914У в середовищі ANSYS 347

Додаток Д Чисельна оцінка завадостійкості пристрою оптимального приймання зондувального сигналу контролю технічного стану асинхронних ТЕД 348

Додаток Е Визначення меж Крамера - Рао оцінок амплітуди та початкової фази тестового сигналу 355

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- ARM - Advanced RISC Machine
- Big Data – технології великих даних
- ELM – extremal learning machines
- IoT – Інтернет речей
- RFID – радіочастотна ідентифікація
- UWB – ультраширокопосмуговий датчик
- SVM – метод опорних векторів
- АД – асинхронний електродвигун
- АІН – автономний інвертор напруги
- ВВП ПКС – валовий внутрішній продукт з урахуванням паритету
купівельної спроможності
- ЕРС – електрорушійна сила
- ЕМП – електромеханічний перетворювач
- ТЕМ – тягова електрична машина
- ТЕД – тяговий електричний двигун
- ТО – технічне обслуговування
- САУ – система автоматичного управління і контролю
- ТРК – тональне рейкове коло
- ТРС – тяговий рухомий склад
- ЛІВПМ – ізольований логарифм відношення правдоподібності, узятий
з від'ємним знаком
- МСВ – мінімальне середньоквадратичне відхилення
- ПІ – пропорційно-інтегральний регулятор
- ПК – персональний комп'ютер
- ПЧ-АД – перетворювач частоти для асинхронного двигуна
- ШІ – штучний інтелект
- ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

ВСТУП

Актуальність теми. Україна, як одна з провідних держав у галузі залізничного транспорту в Європі, має великий потенціал для впровадження ресурсозберігаючих технологій в процесі експлуатації локомотивів. Однак специфічні умови, в яких знаходиться залізнична галузь країни, висувають низку викликів, які підкреслюють необхідність дослідження та розвитку наукових основ у цій сфері.

Залізнична галузь України функціонує в умовах обмежених фінансових ресурсів, значного зношення тягового рухомого складу (ТРС) і високих витрат на його утримання. Близько 70% локомотивів мають вік понад 30 років, що перевищує нормативні терміни служби. В таких умовах подовження життєвого циклу локомотивів є ключовим завданням. Ефективна експлуатація локомотивів шляхом впровадження ресурсозберігаючих методів і технологій дозволить зменшити експлуатаційні витрати, підвищити надійність роботи ТРС і уникнути значних витрат на його оновлення.

Україна є імпортозалежною щодо енергоресурсів, і залізничний транспорт споживає значну частину електроенергії та дизельного пального. Зростання цін на енергоресурси та їх дефіцит, спричинений воєнними діями та кризами, вимагають пошуку способів зниження енергоспоживання. Ресурсозберігаючі технології, які включають системи моніторингу енергоефективності та оптимізації експлуатаційних режимів роботи, дозволяють скоротити витрати енергії та знизити собівартість перевезень.

Більшість залізничних колій, систем тягового енергопостачання та локомотивів в Україні експлуатуються у зношеному стані. Це спричиняє надмірно високу частоту технічних відмов, що тягне за собою зниження швидкості руху поїздів та зростання ризиків аварій. У таких умовах критично важливим є впровадження систем моніторингу технічного стану ТРС у

реальному часі для попередження аварійних ситуацій і планування ремонтних робіт.

Україна активно інтегрується у світові екологічні тренди, спрямовані на скорочення викидів парникових газів та впровадження енергоефективних технологій. Локомотиви, особливо дизельні, є джерелом значних викидів CO₂, що суперечить цілям сталого розвитку та європейським екологічним стандартам. Застосування ресурсозберігаючих технологій дозволить не лише знизити енергоспоживання, а й зменшити екологічний вплив залізничного транспорту.

Руйнування транспортної інфраструктури внаслідок воєнних дій на території України підвищує важливість залізничного транспорту для перевезення пасажирів, військових вантажів та гуманітарної допомоги. В таких умовах надійність роботи ТРС стає критично важливою. Ресурсозберігаючі технології можуть забезпечити стабільність роботи локомотивів навіть у складних умовах завад та обмежених ресурсів.

Євроінтеграційний курс України передбачає модернізацію залізничної галузі відповідно до вимог ЄС, зокрема у сфері енергоефективності, екологічної безпеки та управління життєвим циклом транспортних засобів. Розробка нових наукових підходів до ресурсозбереження в експлуатації локомотивів сприятиме інтеграції залізничної системи України до європейської транспортної мережі.

Україна має потужний науково-технічний потенціал у галузі матеріалознавства, електротехніки та автоматизації. Використання цього потенціалу для створення нових технологій діагностики, моніторингу та управління технічним станом локомотивів дозволить розробити конкурентоспроможні рішення, які можуть бути застосовані як на національному, так і на міжнародному рівні.

Отже, дослідження спрямоване на розвиток ресурсозберігаючих технологій у сфері експлуатації локомотивів, є надзвичайно актуальним для

України з огляду на економічні, енергетичні, екологічні та соціальні виклики. Впровадження таких технологій дозволить не лише покращити функціонування залізничної галузі, а й сприятиме сталому розвитку транспортної інфраструктури в умовах інтеграції до ЄС і подолання наслідків військових дій.

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

Дисертаційна робота виконувалась відповідно до Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року, затвердженої розпорядженням Кабінету Міністрів України (КМУ) від 07.04.2021 р. № 321-р., наукових досліджень в рамках грантової програми «UK-Ukraine R&I twinning» за темою «Комплексна оптимізація залізничних вантажних перевезень в Україні: залізничні шпали, рухомий склад та логістика» (ДР № 0123U102700), у якому автор брав участь як відповідальний виконавець, та науково-дослідних робіт, у яких автор брав участь як виконавець, а саме: «Система стандартів безпеки праці. Вимоги безпеки під час технічного обслуговування і ремонту вантажних вагонів та рефрижераторного рухомого складу» (ДР №0122U000287) та «Розроблення програмного забезпечення для убезпечення конфіденційної інформації» (ДР №0125U001109).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є вирішення науково-прикладної проблеми формування ресурсозберігаючих технологій експлуатації локомотивів шляхом впровадження інноваційних методів і технічних засобів моніторингу та контролю у реальному часі технічного стану їхнього тягового обладнання.

Для досягнення заданої мети в роботі поставлено такі задачі наукових досліджень:

- провести аналіз сучасних вітчизняних і закордонних методів і технічних засобів експлуатації локомотивів та існуючих наукових підходів щодо їхнього удосконалення;

- розробити математичну модель електричних перехідних процесів у частотно-керованому асинхронному ТЕД, що дозволить провести аналітичний та числовий опис технічного стану обмоток статора АД шляхом аналізу спектрального складу струму ПЧ – АД;
- розробити імітаційну модель АД для аналізу пускових та несиметричних режимів роботи і формування зразкових баз даних системи моніторингу його технічного стану в процесі експлуатації;
- провести імітаційне моделювання процесу векторного керування асинхронним ТЕД для дослідження впливу аварійних режимів експлуатації двигунів на їхні енергетичні показники, робочі характеристики та життєвий цикл;
- запропонувати завадостійкі методи моніторингу та контролю технічного стану асинхронних ТЕД в умовах дії складних завад;
- провести синтез пристрою оцінювання параметрів зондувального синусоїдного сигналу, адитивно змішаного з одиночною імпульсною завадою, для виявлення пошкоджень обмоток асинхронного ТЕД у реальному часі;
- провести синтез пристрою оптимального приймання зондувального сигналу обмоток тягових двигунів на тлі адитивної п'ятикомпонентної завади для здійснення моніторингу технічного стану ТЕД під час експлуатації;
- розробити математичну модель процесу розповсюдження зондувальних сигналів, що дозволить провести аналітичний та числовий опис їхніх параметрів у будь-якій вітці схеми заміщення тягового двигуна постійного струму і контролювати його технічний стан під час експлуатації;
- розробити метод моніторингу ТЕД постійного струму для вчасного виявлення можливих ушкоджень двигунів у процесі експлуатації та вжиття заходів щодо їх усунення;

- синтезувати нейрорегулятор NARMA-L2 для системи векторного керування ТЕД для визначення показників характеристик двигунів з метою оптимізації режимів їхньої роботи;

- удосконалити систему моніторингу електрообладнання локомотивів для підвищення її завадостійкості та точності контролю технічного стану ТЕД у реальному часі та енергоефективності експлуатації в умовах локомотивного депо;

- провести техніко-економічне обґрунтування ефективності впровадження ресурсозберігаючих методів, технологій та технічних засобів в експлуатаційному парку локомотивів.

Об'єкт дослідження – процес експлуатації тягового рухомого складу в умовах дії обмежень щодо наявності енергетичних та матеріальних ресурсів.

Предмет дослідження – завадостійкі методи і технічні засоби моніторингу та контролю в реальному часі технічного стану тягового обладнання локомотивів.

Методи дослідження. Проведені дослідження базуються на використанні таких методів: теорія електричних кіл, теорія диференціальних рівнянь та чисельні методи розрахунків для моделювання електричних перехідних процесів у частотно-керованому асинхронному двигуні; теорія електричних машин, теорія прямого та зворотного комплексного перетворення Фур'є, використання пакетів моделювання ANSYS, MathCAD, Matlab/Simulink для моделювання впливу перехідних процесів і аварійних режимів роботи на технічний стан тягових двигунів локомотивів; теорія оптимального приймання сигналів і математична статистика для синтезу пристрою оптимального приймання зондувального сигналу контролю технічного стану ТЕД; методи гармонічного аналізу для створення моделей завад, що впливають на роботу систем моніторингу ТЕД; основи теорії нейронних мереж для синтезу нейрорегулятора NARMA-L2 асинхронного ТЕД.

Наукова новизна одержаних результатів.

Розвинуто наукові основи з формування ресурсозберігаючих технологій експлуатації локомотивів шляхом впровадження інноваційних методів і технічних засобів моніторингу та контролю у реальному часі технічного стану їхнього тягового обладнання, що дозволить подовжити «життєвий цикл» локомотивів і забезпечить збільшення обсягів перевезень вантажів у сучасних умовах.

Вперше:

- розроблено математичну модель електричних перехідних процесів у частотно-керованому асинхронному ТЕД, що дозволило провести аналітичний та числовий опис технічного стану обмоток статора АД шляхом аналізу спектрального складу струму ПЧ – АД;

- розроблено імітаційну модель АД, яка дозволяє виконати аналіз пускових та несиметричних режимів роботи для формування зразкових баз даних системи моніторингу його технічного стану в процесі експлуатації;

- запропоновано завадостійкий метод моніторингу та контролю технічного стану асинхронних ТЕД в умовах дії складних завад, що дозволило виявляти пошкодження двигунів на ранній стадії їх утворення;

- синтезовано пристрій оцінювання параметрів зондувального синусоїдного сигналу, адитивно змішаного з одиночною імпульсною завадою, що дозволило виявляти пошкодження обмоток асинхронного ТЕД у реальному часі;

- запропоновано метод моніторингу ТЕД постійного струму, який базується на введенні в кола живлення двигунів зонduючого гармонічного сигналу і спостереження викликаного ним струму, що дозволило вчасно виявляти їх можливі ушкодження в процесі експлуатації та вживати заходів щодо їх усунення;

- розроблено математичну модель процесу розповсюдження зондувальних сигналів, що дозволило провести аналітичний та числовий

опис їхніх параметрів у будь-якій вітці схеми заміщення тягового двигуна постійного струму і виконати синтез пристрою контролю його технічного стану під час експлуатації в умовах дії завад.

Дістали подальшого розвитку:

- імітаційна модель процесу векторного керування асинхронним ТЕД, що дозволило дослідити результати впливу аварійних режимів експлуатації двигунів на їхні енергетичні показники, робочі характеристики та життєвий цикл;

- синтез нейрорегулятора NARMA-L2 для системи векторного керування ТЕД, що дозволило визначити показники регулювання частоти обертання та електромагнітного моменту ТЕД як в перехідних процесах, так і при стрибкоподібному накиданні навантаження з метою оптимізації режимів роботи двигуна.

Удосконалено:

- пристрій оптимального приймання зонduючого сигналу обмоток тягових двигунів на тлі адитивної п'ятикомпонентної завади, що дозволило визначити їхні характеристики та здійснювати моніторинг технічного стану ТЕД під час експлуатації;

- систему моніторингу електрообладнання локомотивів, що дозволило підвищити її завадостійкість і точність контролю технічного стану ТЕД в реальному часі та енергоефективність в умовах локомотивного депо.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблений комплекс ресурсозберігаючих завадостійких методів та засобів контролю технічного стану тягового обладнання локомотивів дає змогу у реальному часі в умовах наявності складних завад здійснювати моніторинг та контроль ефективності роботи ТЕД у процесі експлуатації. Це дозволило:

- скоротити витрати електроенергії на тягу поїздів шляхом оптимізації режимів роботи ТЕД;

- за рахунок виявлення ушкоджень ТЕД на ранній стадії завадити появи аварійних режимів їх роботи та зупинці поїздів на ділянках залізниць;
- здійснювати технічне обслуговування та ремонт ТЕД за фактичним станом.

Розроблені імітаційні моделі пускових, несиметричних і аварійних режимів роботи асинхронних ТЕД дозволяють сформувати зразкові бази даних для наступного контролю та моніторингу їхнього технічного стану в процесі експлуатації.

Визначення залежності обсягів вантажних залізничних перевезень від кількості магістральних локомотивів та вантажних вагонів експлуатаційного парку дозволило адекватно оцінити вплив збільшення обсягів вантажних перевезень на величину ВВП ПКС за рахунок подовження «життєвого циклу» вантажних локомотивів.

Удосконалено та запатентовано відмовостійкий колійний індуктивний датчик (Патент України 127127), який може бути використано у системах для контролю стану ділянки залізничної колії (вільно, зайнято), системах контролю та обліку роботи транспортних засобів, пристроях рахунку осей, вимірювання швидкості та прискорення рухомого складу.

Практичне значення отриманих результатів підтверджене відповідними актами впровадження на підприємствах у регіональній філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця» (м. Харків) та в навчальний процес кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки і Навчально-наукового центру освіти дорослих Українського державного університету залізничного транспорту (Додаток А).

Особистий внесок здобувача. Усі результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, отримані особисто здобувачем, або за його безпосередньої участі. У роботах, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить: [1] – визначення характеру комутаційних процесів в системи ПЧ-АД; [2] – визначення середньорічного споживання електричної енергії на

тягу при впровадженні швидкісного руху; [3] – формування виразу цільової функції відповідно до визначеного критерію оптимальності; [4] – імітаційна модель асинхронного двигуна в нерухомій системі координат; [5] – визначення річних втрат потужності сонячної електростанції тягової підстанції; [6] – моделювання впливу несиметрії мережі на характеристики тягового асинхронного двигуна; [7] – порівняльний аналіз показників роботи залізничного та автомобільного транспорту України; [8] – алгоритм прогнозування зростання ВВП ПКС під впливом збільшення обсягів перевезень вантажів завдяки подовженню «життєвого циклу» локомотивів; [9] – отримання виразу для визначення струму конденсатора трифазного, автономного, дворівневого інвертора напруги через струми фаз навантаження; [10] – врахування додаткових втрат потужності, спричинених дією вищих гармонік струму в обладнання електротехнічного комплексу фотоелектричної станції; [11] – розроблення імітаційної моделі векторного керування з просторово векторною ШІМ тяговим асинхронним електроприводом; [12] – розроблення 3D моделі та дослідження роботи статичної фотоелектричної системи встановленої на даху тягової підстанції; [13] – одержання характеристик фотоелектричної станції за зміни температурного режиму та ступеня опромінення фотомодулів; [14] – отримання діаграми зайнятості частотної області струмами завад; [15] – визначення часових співвідношень між сигналом та імпульсною завадою з урахуванням початку та кінця інтервалу спостереження; [16] – конкретизація сформованої цільової функції стосовно ситуацій наявності та відсутності зондувального сигналу; [17] – реалізація алгоритму навчання нейромережі регулятора на основі авторегресії з ковзаючим середнім NARMA-L2; [18] – визначення спектру вхідних параметрів та задавання їхніх величин для блоку пульту керування моделі тепловозу ЧМЕЗ; [19] – синтез оптимального приймаючого пристрою інформаційних сигналів тональних рейкових кіл, які спостерігаються на фоні адитивної п'ятикомпонентної завади; [20] –

розроблення функціональної схеми реєстратора відмовостійкого колійного індуктивного датчика; [21] – аналіз фаз роботи пристрою накопичення енергії у разі його бортового розміщення при оптимізації пікового споживання тягової потужності електропоїзда метрополітену; [22] – проведений аналіз застосування різних типів накопичувачів енергії на рухомому складі; [23, 27] – дослідження варіантів впровадження альтернативних джерел в системи електропостачання рухомого складу залізниць та 3D модель будівлі тягової підстанції з інстальованими сонячними панелями; [24] – визначення узагальненого критерію оцінки ефективності, який характеризує інформаційну спроможність процесу автоматичного управління і контролю тягового рухомого складу; [25] – проведений аналіз систем накопичення тягової енергії локомотивів; [26] – розроблення концепції інтелектуальної системи тягового електропостачання, яка забезпечує моніторинг і керування переданням електроенергії до тягової мережі; [28, 32] – моделювання двигуна постійного струму в програмному комплексі ANSYS та дослідження можливостей використання нейрорегулятора в системі керування тяговим електроприводом; [29-31] – оцінка якісних властивостей кореляційно-регресійної моделі залежності обсягів вантажних залізничних перевезень від кількості магістральних локомотивів та вантажних вагонів експлуатаційного парку та вартісна оцінка доцільності впровадження системи контролю технічного стану вітчизняних локомотивів; [33, 34] – порівняльний аналіз різних типів регуляторів швидкості та часові характеристики активної та реактивної потужностей тягового електродвигуна локомотива з нейрорегулятором швидкості та ПП-регулятором швидкості; [35] – аналіз можливості формування тестового сигналу в діапазоні частот струму, завади мають малі амплітуди; [36] – визначення переліку параметрів кожної з рухомих одиниць, які визначаються за допомогою точкових колійних датчиків. Дослідження, висвітлені в усіх наукових працях, проводилися в УкрДУЗТ.

Апробація результатів дисертації. Основні матеріали результатів дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та отримали схвалення на 12 наукових конференціях: 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT 2019) (Czech Republic, Ceske Budejovice); IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS 2020) (Ukraine, Kyiv); International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport (EET 2020) (Ukraine, Kharkiv); 32 Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» (Україна, м. Харків); 9 Міжнародній науково-технічній конференції «Інформатика, управління та штучний інтелект», НТУ «ХПІ», 2022 (Україна, м. Харків); Міжнародній науково-практичній конференції ФЕНІКС-2022 «Міжнародні економічні відносини. Сталий розвиток України в умовах глобалізації та Європейської економічної інтеграції: проблеми, перспективи, ефективність» НТУ «ХПІ», 2022 (Україна, м. Харків); XXV Міжнародній науково-технічній конференції «Технологія-2022», Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, 2022 (Україна, м. Сєвєродонецьк); 18 Науково-практичній міжнародній конференції «Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика», УкрДУЗТ, 2022 (Україна, м. Харків); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Стан та перспективи розвитку електричного транспорту», ХНУМГ, 2022 (Україна, м. Харків); 16 Міжнародній науково-практичній конференції «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси», ІТРК, НАУ, 2023 (Україна, м. Київ); 15 Міжнародній науково-практичній конференції студентів і молодих вчених імені Георгія Кірпи «Сучасні транспортні технології», НУ ЛП, 2023 (Україна, м. Львів), 11 Міжнародній науково-технічній конференції «Інформатика, управління та штучний інтелект» НТУ «ХПІ», 2024 (Україна, м. Харків).

У повному обсязі результати дисертаційної роботи обговорені та схвалені на розширеному семінарі кафедри електроенергетики,

електротехніки та електромеханіки УкрДУЗТ.

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи і результати досліджень опубліковані в 36 наукових працях: 21 основній праці, з яких 16 статей у наукових фахових виданнях України; 4 наукових статтях, що індексуються наукометричними базами даних SCOPUS та/або WoS (з них 3 – третього квартилю (Scopus Q3) та 1 – WoS); 1 – в іноземному періодичному науковому виданні; 1 патенті України на винахід та 15 публікаціях, які додатково відображають наукові результати досліджень.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація має вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел з 257 найменувань і 5 додатків. Повний обсяг дисертації складає 358 сторінок, у тому числі 326 сторінок основного тексту, 20 таблиць, 86 рисунків, 32 сторінки додатків.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ

1.1 Особливості впливу подовження «життєвого циклу» локомотивів на економіку залізничної галузі

Продовження життєвого циклу локомотивів є вкрай важливим питанням для залізниць України, що включає економічну, військову, екологічну, безпекову та культурну складові. Питання продовження життєвого циклу локомотивів розглядались в наступних роботах [40], [73], [74], [97] [122], [152], [194], [211].

Економічна ефективність в даному контексті безперечно є ключовим фактором. Купівля нових локомотивів є суттєвим капіталовкладенням, яке може стати справді серйозним тягарем для залізничних компаній. Натомість, ремонт та модернізація старих локомотивів потенційно є більш економічно вигідними рішеннями [44].

В умовах війни, яка суттєво вплинула на інфраструктуру, логістику та економіку країни, подовження життєвого циклу локомотивів стає критичним питанням для залізничної галузі України. Залізничний транспорт продовжує відігравати ключову роль у перевезенні пасажирів та вантажів, зокрема гуманітарного, військового характеру. У цих умовах АТ «Укрзалізниця» стикається з необхідністю забезпечення безперервної роботи рухомого складу в умовах скорочення або обмеження ресурсів, що робить подовження життєвого циклу локомотивів пріоритетним завданням.

Війна призвела до значних збитків, що ускладнює можливості оновлення рухомого складу за рахунок придбання нових локомотивів. За

оцінками експертів, капітальні вкладення в оновлення локомотивного парку на сучасному етапі є обмеженими через необхідність фінансування інших пріоритетних потреб, таких як відновлення інфраструктури та допомога постраждалим регіонам [18]. У цих умовах модернізація та продовження терміну служби існуючих локомотивів дозволяє суттєво зекономити кошти, необхідні для забезпечення сталого функціонування залізничної галузі.

Іншою причиною важливості продовження життєвого циклу локомотивів є зниження доступності комплектуючих та запасних частин, що обумовлено воєнними діями. Війна в Україні порушила постачання запчастин з-за кордону та призвела до труднощів із ремонтом техніки. Замість заміни локомотивів на нові, залізничні підприємства змушені адаптувати старий рухомий склад, модернізуючи його з використанням доступних матеріалів та компонентів. Такий підхід сприяє підтриманню працездатності локомотивів, незважаючи на обмежений доступ до нових технічних рішень.

Крім того, продовження життєвого циклу локомотивів відіграє значну роль у забезпеченні мобільності населення в умовах війни. Залізничний транспорт залишається одним із найнадійніших способів релокації людей у безпечніші регіони, особливо враховуючи перебої в інших видах транспорту [198]. Завдяки модернізації та ремонту старих локомотивів залізничні компанії можуть забезпечувати перевезення навіть за умови інтенсивного використання рухомого складу та зростання потреб у перевезеннях [16].

Зважаючи на вищезазначене, продовження життєвого циклу локомотивів в умовах війни в Україні є не тільки економічно вигідним, але й стратегічно важливим завданням, яке забезпечує безперервність перевезень та стійкість залізничної галузі. Модернізація існуючого рухомого складу дозволяє ефективніше використовувати наявні ресурси, зберігаючи фінансову стабільність залізничних компаній та підтримуючи життєво важливу транспортну функцію залізниці в умовах військових дій.

Екологічна стійкість також є важливим аргументом на користь продовження життєвого циклу локомотивів. Видобуток та використання додаткових енергетичних ресурсів необхідних для виготовлення нових локомотивів здійснює негативний вплив на довкілля. Результати дослідження [228], опублікованого в журналі *Environmental Science and Technology* показують, що продовження життєвого циклу старих локомотивів знижує вуглецевий слід на 25%. Крім того, модернізація старих локомотивів може включати встановлення більш сучасних двигунів та систем управління, що зменшує забруднення навколишнього середовища.

Безпека та надійність експлуатації локомотивів є ще одним важливим аспектом. Регулярні ремонти та технічне обслуговування (ТО) старих локомотивів продовжать їх безпечну експлуатацію. Оновлення систем керування, удосконалення гальмівних систем та інших критичних вузлів підвищує надійність і стійкість роботи рухомого складу, що підтверджено низькою досліджень в області безпеки на залізничному транспорті [147], [69], [71].

Підтримка працездатності інфраструктури та наявності робочих місць також є вагомим фактором для продовження життєвого циклу локомотивів. Завантаження роботою локомотиворемонтних заводів, де проводиться ТО та модернізація, буде забезпечувати робочими місцями населення регіонів, що позитивно вплине на економіку України [10].

Крім того, важливими є також і питання збереження історичної та культурної спадщини. Деякі старі типи локомотивів становлять історичне значення і є частиною культурної спадщини країни. Їх відновлення та збереження допоможе зберегти історію залізниць для молодого покоління. [86].

Подовження життєвого циклу локомотивів є актуальною питанням для залізничної галузі, оскільки забезпечує гнучке та ефективне управління наявним рухомим складом, мінімізуючи витрати на оновлення основних

фондів, що є особливо гострим питанням в умовах війни [19]. Сучасний ринок залізничних перевезень стикається з низкою викликів, таких як зростання вартості енергоносіїв, потреба у зниженні експлуатаційних витрат та впровадження екологічних стандартів. Подовження терміну служби локомотивів сприяє економічній стабільності підприємств, які не завжди можуть дозволити собі часту заміну рухомого складу через високу вартість нових локомотивів.

На користь актуальності продовження життєвого циклу локомотивів говорять кілька основних факторів:

- економічні чинники грають ключову роль у формуванні підходів до подовження життєвого циклу локомотивів. Заміна локомотивного парку потребує залучення значних інвестицій або кредитування, які є непосильними для багатьох залізничних компаній, особливо в країнах зі значною зношеністю інфраструктури таких як Україна. У зв'язку з цим, продовження терміну служби за рахунок модернізації, ТО та капітального ремонту дозволяє суттєво зменшити витрати на експлуатацію, зберігаючи функціональність та безпечність рухомого складу [46], [182];

- зростаюча увага до питань дотримання екологічних стандартів у залізничній галузі також є вагомим фактором, який впливає на актуальність подовження життєвого циклу локомотивів. Світовий досвід показує, що, зокрема, провідні Європейські країни та США дедалі більше зосереджуються на зниженні викидів парникових газів, вводячи більш суворі екологічні норми та стандарти. Це змушує залізничні компанії адаптувати свій рухомий склад до нових екологічних вимог. Модернізація старих локомотивів з урахуванням нових екологічних стандартів є більш вигідною економічно аніж придбання нового рухомого складу [194];

- удосконалення технологій та впровадження нових матеріалів також впливає на збільшення тривалості експлуатації локомотивів. Сучасні методи діагностики та прогнозного ТО (predictive maintenance) дозволяють

ефективніше підтримувати технічний стан локомотивів, запобігаючи поломкам та збільшуючи життєвий цикл. Це особливо важливо для залізничних компаній, які внаслідок різних причин, мають обмежені фінансові можливості для оновлення рухомого складу, але можуть інвестувати кошти у проекти з модернізації, які підвищують ефективність використання наявного парку [138];

- зростання попиту на перевезення залізницею, як вантажні, так і пасажирські, є ще одним чинником, який посилює потребу в подовженні життєвого циклу локомотивів. Залізниця як вид транспорту залишається одним з найефективніших за співвідношенням обсягів до енергоефективності та екологічності, особливо на великих відстанях. Подовження терміну служби локомотивів дозволяє задовольнити зростаючий попит на перевезення без значних капітальних витрат [153].

Термін «життєвий цикл» для транспортних засобів охоплює всі етапи існування засобу – від його створення до утилізації. Життєвий цикл включає етапи проектування, виробництва, експлуатації, обслуговування, модернізації та, нарешті, виведення з експлуатації та утилізації. Такий підхід дозволяє оцінювати як технічну ефективність, так і економічну доцільність використання транспортного засобу на кожному етапі, що критично важливо для прийняття рішень про його модернізацію чи заміну [40].

Життєвий цикл транспортного засобу лежить в основі розробки економічних і технічних стратегій, оскільки допомагає оптимізувати витрати на його обслуговування та експлуатацію. У цьому контексті поняття життєвого циклу включає оцінку обсягів амортизаційних відрахувань, витрат на ремонти, модернізацію та виведення з експлуатації. Згідно з дослідженнями [20], [200], [256] ефективне управління життєвим циклом локомотивів може знизити загальні витрати на їх утримання до 30%.

Окрім економічних аспектів та технічних аспектів, життєвий цикл технічних засобів включає врахування екологічних вимог та енергетичних

стандартів, які стають все більш важливими у транспортній сфері. Зокрема, за даними дослідження [228], включення екологічної оцінки на кожному етапі життєвого циклу дозволяє знизити вплив на довкілля та скоротити витрати на утилізацію та переробку компонентів.

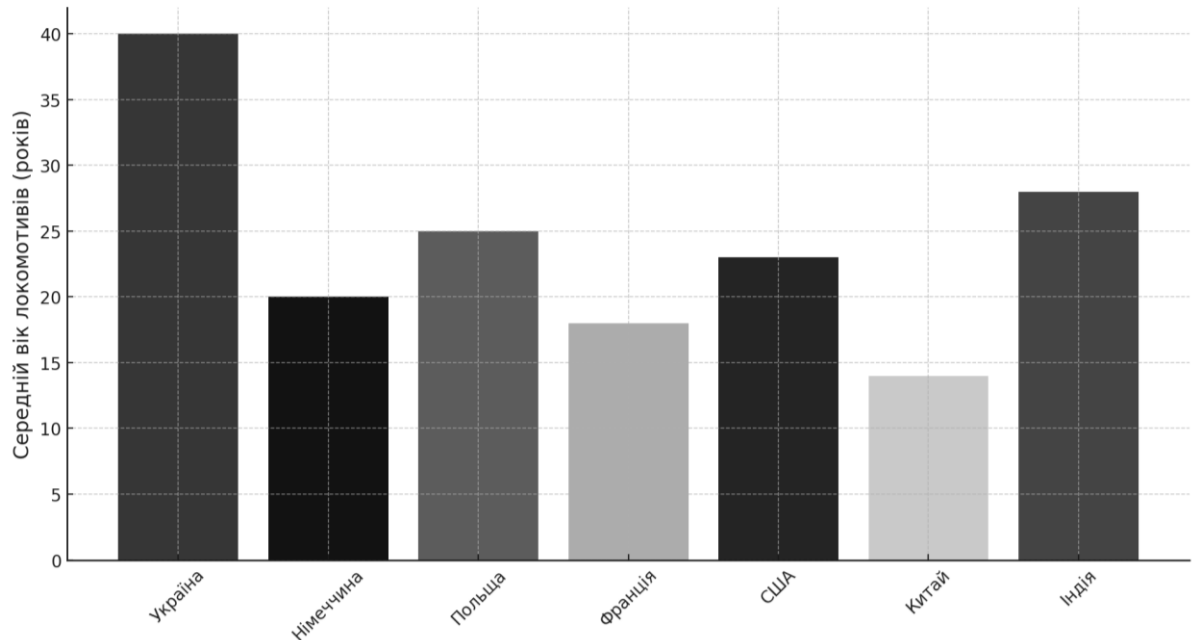


Рисунок 1.1 – Середній вік локомотивів в різних країнах

Рисунок 1.1 демонструє середній вік локомотивів в різних країнах світу. Найвищий середній вік локомотивів спостерігається в Україні (40 років), тоді як найнижчий – у Китаї (13 років). Це є наслідком різних економічних спроможностей, політики з питань утилізації, дії зовнішніх факторів та розвитку локального локомотивобудування. Оновлення локомотивного парку в Україні має включати впровадження сучасних ресурсозберігаючих технологій, залучення міжнародної фінансової допомоги та партнерств і використання державних програм для фінансування цього процесу.

Таким чином, життєвий цикл технічних транспортних засобів це концепція, яка дозволяє комплексно підходити до управління ресурсами та витратами на всіх етапах існування транспортного засобу, забезпечуючи його максимальну ефективність та відповідність сучасним стандартам.

Спираючись на вищевикладене, життєвий цикл залізничного локомотива також включає низку етапів, кожен із яких має важливе значення для забезпечення довготривалої ефективності, надійності та економічності експлуатації. В цьому контексті основними етапами життєвого циклу локомотива є проектування, виробництво, введення в експлуатацію, експлуатація, ТО та ремонти, модернізація, а також виведення з експлуатації та утилізація. Кожен з етапів має визначену тривалість, яка залежить від ряду технічних, експлуатаційних і економічних факторів, а також від умов використання локомотива [40].

Етапи проектування та виробництва залізничного локомотива зазвичай займають кілька років і включають розробку технічних специфікацій, проведення досліджень і випробувань, підбір матеріалів та комплектуючих. Це період, коли визначається потенційна тривалість експлуатації локомотива і встановлюються технічні параметри, які впливатимуть на його надійність та термін експлуатації. Після цього локомотив проходить етап введення в експлуатацію, коли відбуваються перевірки на відповідність державним нормам і стандартам безпеки [76].

Етап експлуатації є найдовшим у життєвому циклі локомотива і може тривати до 30-40 років залежно від умов роботи та якості обслуговування. Під час експлуатації локомотиви підлягають регулярному технічному обслуговуванню і періодичним ремонтам [206], що дозволяє підтримувати їх у належному стані і продовжувати термін служби. ТО включає як дрібні ремонти і заміну зношених деталей, так і капітальні ремонти, які значно продовжують термін служби локомотива. Зокрема, капітальні ремонти здійснюються через кожні 8-10 років і можуть включати повну заміну або модернізацію важливих компонентів [199].

Модернізація є ще одним важливим етапом життєвого циклу локомотивів, який зазвичай відбувається на другій половині їх експлуатації. Модернізаційні заходи спрямовані на покращення технічних характеристик

та відповідність новим екологічним вимогам, що дозволяє продовжити життєвий цикл ще на 10-15 років. За даними досліджень [213], модернізація значно знижує експлуатаційні витрати і підвищує ефективність локомотивів [150], що є особливо актуальним для залізничних компаній у контексті зростання вимог до екологічності та енергоефективності транспорту [175], [115].

На останньому етапі життєвого циклу локомотив виводиться з експлуатації та підлягає утилізації [173]. Цей етап передбачає демонтаж компонентів та їхню переробку або утилізацію, що дозволяє знизити негативний вплив на навколишнє середовище. Процес утилізації зазвичай проводиться з дотриманням усіх екологічних норм, які можуть значно різнитися залежно від країни та регіону [245].

Слід відзначити, що тривалість кожного етапу життєвого циклу локомотива багато в чому залежить від умов експлуатації. Наприклад, локомотиви, які працюють у важких кліматичних умовах або на маршрутах з інтенсивним рухом, потребують частішого обслуговування і ремонту, що може скоротити їхній життєвий цикл. Також значну роль відіграє якість технічного обслуговування і своєчасність модернізаційних заходів, які здатні суттєво подовжити термін служби локомотивів.

Загальна тривалість життєвого циклу локомотива визначається комплексом взаємопов'язаних чинників, які впливають на зношення обладнання, витрати на обслуговування, модернізацію та виведення з експлуатації. Ці чинники можна умовно поділити на технічні, експлуатаційні, економічні та організаційні.

Для прикладу, застосування сучасних конструкційних матеріалів і технологій впливає на довговічність вузлів і агрегатів локомотива. Наприклад, використання композитних матеріалів для зниження ваги з одночасним підвищенням міцності зменшує зношення компонентів. Так, у дослідженні [112] розглядаються компоненти високошвидкісних поїздів

виготовлені із композитів, що дозволяє відчутно зменшити вагу та покращити характеристики.

Технологічна досконалість під час виробництва впливає на точність складання та ресурс комплектуючих. Високоякісне обладнання забезпечує довшу експлуатацію без потреби в частому ремонті.

Сучасні локомотиви оснащуються електронними системами управління, що дозволяє мінімізувати зношення механічних компонентів. Так, у дослідженні [250] описується вдосконалений алгоритм для системи протиковзного контролю локомотивів, що працюють у складних умовах. Впровадження енергозберігаючих технологій також подовжує життєвий цикл завдяки зниженню навантаження на основні системи [62].

На зношення також суттєво впливають частота та інтенсивність використання локомотива. Робота в умовах великої кількості зупинок, високих навантажень, або в екстремальному кліматі прискорює зношення.

Використання низькоякісного палива може спричинити пошкодження систем подачі палива або двигуна. Як показано в [235], низька якість мастильних матеріалів призводить до підвищеного зношення рухомих частин локомотива.

Робота в умовах високої вологості, низьких або високих температур, а також агресивного навколишнього середовища (наприклад, поблизу морських портів) сприяє корозії металевих компонентів і зниженню ресурсу матеріалів [162].

На рисунку 1.2 показані результати узагальненого аналізу впливу різних чинників на тривалість життєвого циклу локомотива.



Рисунок 1.2 – Вплив чинників на тривалість життєвого циклу локомотива

Крім того, як було зазначено вище, усі відображені чинники взаємопов'язані: наприклад, якість технічного обслуговування залежить від економічних і організаційних чинників, а тривалість експлуатації без ремонту визначається конструктивними та експлуатаційними аспектами [236]. Для максимізації життєвого циклу локомотива доцільно впроваджувати комплексні програми управління ресурсами.

Слід відзначити, що подовження життєвого циклу локомотивів супроводжується низкою ризиків і обмежень:

- подовження терміну служби локомотива може стати причиною критичного зношення основних конструктивних елементів, таких як кузов, рама та ходова частина. Навіть в процесі модернізації існує ризик виникнення, мікропошкоджень або корозії, які можуть спричинити аварійні ситуації в майбутньому.

Наприклад, згідно з дослідженням, проведеним компанією Alstom, після 25–30 років експлуатації понад 40% деталей потребують заміни через втрату механічних властивостей [240];

- процес модернізації не завжди дозволяє інтегрувати новітні технології, які доступні в сучасних локомотивах. Це може обмежити

функціональність та ефективність модернізованого рухомого складу у порівнянні з новими моделями, які обладнані передовими системами управління та діагностики [113];

- експлуатаційні витрати на старі локомотиви можуть зрости через необхідність частішого ТО та ремонтів. Це може зменшити очікувану економію від подовження життєвого циклу.

До прикладу, дослідження проведені в роботі [81] показують, що після 20 років експлуатації витрати на обслуговування можуть зрости на 15–25% через зношення вузлів і підвищену складність ремонту.

Якщо термін служби локомотива після модернізації є недостатньо тривалим для повної окупності інвестиційних вкладень, це може призвести до додаткового фінансового навантаження. Дана ситуація може виникнути, якщо прогнозований залишковий ресурс рухомого складу виявився завищеним;

- попри проведені ремонтні роботи, ризик відмов вузлів та обладнання на старих локомотивах залишається вищим, ніж у нового тягового рухомого складу (ТРС). Це може призвести до затримок у перевезеннях пасажирів та вантажів і стати причиною додаткових витрат на усунення несправностей.

За даними Американської асоціації залізниць, відмови локомотивів віком понад 25 років трапляються на 18% частіше, ніж у нових моделей, навіть після модернізації [111].

Старі локомотиви, навіть модернізовані, матимуть нижчі експлуатаційні характеристики в порівнянні із новими, що потенційно може обмежувати швидкість перевезень і зменшувати пропускну здатність залізниці;

- старі локомотиви, навіть після модернізації, не завжди відповідають сучасним екологічним стандартам та вимогам [219]. Особливо це стосується обсягів викидів парникових газів і споживання енергії [176].

Європейські екологічні стандарти (наприклад, Stage V) вимагають значно менших обсягів викидів, які досить складно забезпечити на модернізованих дизельних двигунах старих локомотивів [208];

- деякі країни вводять обмеження на експлуатацію старих локомотивів, незалежно від їх технічного стану. Це може обмежувати ефективність стратегій подовження життєвого циклу. До того ж, нові локомотиви з сучасними технологіями, такими як автоматизація та підвищена енергоефективність, можуть забезпечувати вищу продуктивність, що створює конкурентну перевагу для компаній, які інвестують у нові моделі [181].

Зведені результати аналізу оцінки ризиків у відсотковому еквіваленті наведені на рисунку 1.3. Як видно, технічне зношення обладнання та проблеми з безпекою (по 25%) мають найвищий вплив на експлуатацію локомотивів. Економічні виклики складають 20%, тоді як зниження ефективності та екологічні ризики оцінюються у 15% і 10% відповідно. Моральне старіння та соціальні ризики мають найменший вплив — по 5%

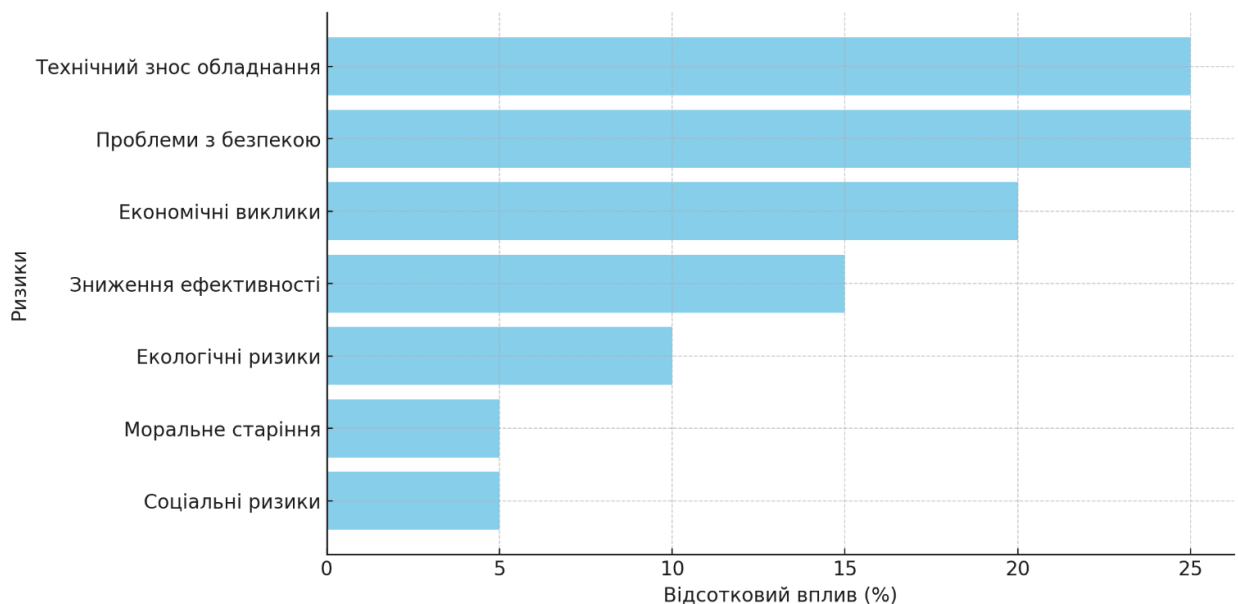


Рисунок 1.3 – Оцінка ризиків продовження життєвого циклу локомотивів

Аналіз міжнародного досвіду подовження життєвого циклу локомотивів показує, що цей крок є важливим елементом стратегій багатьох

залізничних компаній у різних країнах світу. Така практика дозволяє зменшувати витрати, оптимізувати використання основних фондів і забезпечувати стабільність залізничних перевезень. Міжнародний досвід демонструє успішні моделі модернізації локомотивів, які можуть бути корисними для впровадження в інших країнах, зокрема в Україні.

Так, у США широко застосовується практика модернізації локомотивів у рамках програм подовження життєвого циклу [71]. Наприклад, компанія GE Transportation здійснює ремоторизацію старих локомотивів, замінюючи двигуни на сучасні енергоефективні моделі. Особливостями даної програми є встановлення двигунів із низьким рівнем викидів, що відповідають стандартам EPA Tier 4 та оснащення локомотивів системами автоматичного керування та діагностики.

Як результат, за даними Американської асоціації залізниць, такі модернізації дозволяють продовжити термін служби локомотивів на 15–20 років і знизити витрати на обслуговування до 25% порівняно з експлуатацією старих моделей без модернізації [111].

У країнах Європейського Союзу модернізація локомотивів проводиться із врахуванням суворих екологічних вимог [63], [109].

Наприклад, у Німеччині компанія Deutsche Bahn проводить оновлення старих локомотивів для забезпечення відповідності діючим стандартам Stage V щодо викидів парникових газів. В рамках цієї роботи Deutsche Bahn вже модернізувала понад 200 локомотивів серії BR 218 та укомплектувала їх новими двигунами та системами контролю енергоспоживання. Результатами проведеної роботи стали: зниження рівня викидів на 30%, підвищення енергоефективності на 15% та продаж модернізованих локомотивів меншим залізничним компаніям, що збільшило прибутки від вторинного використання техніки [142].

Індія, де залізничний транспорт є основним видом перевезень, продовжує впроваджувати масштабні програми модернізації через

обмеження фінансових ресурсів на придбання нового рухомого складу. Так, компанія Indian Railways розробила кілька програм для оновлення старих локомотивів.

Оновлення відбувається шляхом оснащення дизельних локомотивів новими електричними генераторами для переходу на гібридну технологію та використання елементів із подовженим ресурсом.

Ця індійська програма фактично дозволила збільшити життєвий цикл локомотивів на 10-15 років при відчутно менших витратах, ніж на придбання нового ТРС [107].

У Японії модернізація локомотивів поєднується з впровадженням інноваційних технологій, таких як автоматизовані системи управління та гібридні технології [184]. Компанія JR East модернізувала кілька серій японських локомотивів, доукомплектувавши їх літій-іонними батареями для роботи в режимі гібридного руху.

Результатами впровадження даної програми в Японії стали:

- зниження витрат на пальне на 20–25%;
- мінімізація шумового забруднення;
- розширення можливостей роботи на непідготовлених ділянках із недостатньою електрифікацією [106].

В Австралії модернізація локомотивів проводиться з урахуванням світового досвіду та кліматичних і географічних умов країни. В дослідженні [230] вказано на ефективність використання алгоритмів штучного інтелекту (ШІ) для контролю швидкості. Впровадження цієї технології дозволило зменшити споживання дизельного пального на шахтних локомотивах у Західній Австралії. Моделі демонструють значне скорочення витрат енергії (15-20%) при збереженні допустимого часу руху.

Австралійська компанія Aurizon модернізувала старі локомотиви для використання в умовах підвищеної температури та високого рівня пилу, характерних для місцевих вантажних перевезень. В рамках програми було

здійснено установку нових систем охолодження двигунів та заміну зношених компонентів із використанням матеріалів, стійких до корозії. В результаті дане рішення забезпечило підвищення надійності локомотивів і продовжило їх термін служби на 10 років, що стало вигідним для регіональних залізничних компаній.

1.2 Сучасні методи та засоби формування ресурсозберігаючих технологій експлуатації ТРС

В умовах війни, зростаючих цін на енергоносії, посилення екологічних стандартів та збільшення конкуренції між видами транспорту залізнична галузь стикається із завданням підвищення економічної ефективності та зменшення негативного впливу на довкілля. У цьому контексті впровадження ресурсозберігаючих технологій на ТРС стає критично важливим.

Згідно зі звітами та прогнозами International Union of Railways (UIC), енергоефективність залізничного транспорту може бути збільшена на 30% завдяки модернізації ТРС та впровадженню сучасних ресурсозберігаючих технологій. Це, у свою чергу, дозволить зменшити собівартість перевезень пасажирів та вантажів, підвищити конкурентоспроможність залізничного транспорту та зменшити викиди в навколишнє середовище.

Для оцінки ефективності впровадження ресурсозберігаючих технологій використовуються наступні ключові критерії:

1. Енергоспоживання:

- зменшення витрат палива або електроенергії на одиницю виконаної роботи [216], [171], [241];
- використання показників питомих витрат енергії, які дозволяють оцінити ефективність енергозберігаючих заходів. На рисунку 1.4

показана тенденція зменшення питомого зменшення споживання палива/енергії внаслідок реалізації заходів із модернізації.

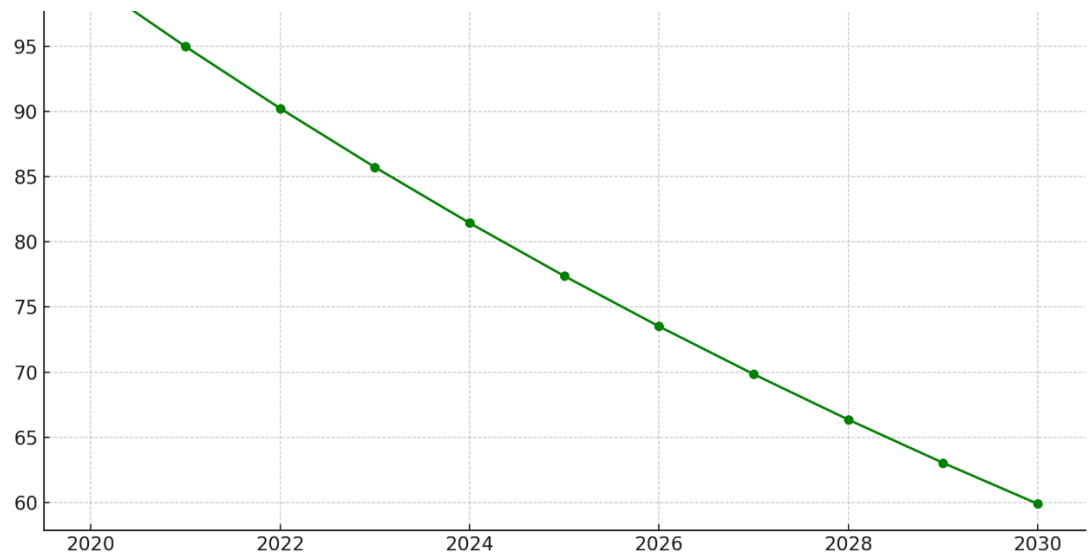


Рисунок 1.4 – Зменшення споживання палива/енергії внаслідок модернізації

2. Ефективність ТО:

- скорочення частоти та тривалості ремонтів за рахунок впровадження діагностичних систем [81];
- зменшення витрат на запасні частини та матеріали [183], [124].

3. Довговічність техніки:

- подовження життєвого циклу основних вузлів і агрегатів локомотива [90], [152], [121];
- зменшення рівня амортизації завдяки використанню новітніх матеріалів [168], [248].

4. Екологічність:

- скорочення викидів шкідливих речовин та парникових газів завдяки застосуванню сучасних екологічних двигунів та систем очищення вихлопних газів [57], [145]

5. Економічна ефективність:

- зниження загальних витрат на експлуатацію та технічне обслуговування.
- підвищення рентабельності перевезень за рахунок економії енергоресурсів [84], [117].

В теперішній час залізничні компанії в багатьох країнах активно впроваджують сучасні технології, спрямовані на зменшення ресурсоспоживання та покращення ТО ТРС.

Наприклад, у країнах ЄС широко використовуються локомотиви з системами рекуперативного гальмування [214], яка дає можливість повертати до 20% витраченої енергії в мережу [220]. На японських високошвидкісних поїздах застосовуються електродвигуни з технологією надпровідності, що забезпечує високу енергоефективність та суттєве зниження втрат енергії [105], а США впроваджує системи прогнозного обслуговування локомотивів, в основі яких лежить аналіз великих масивів даних (Big Data) [224].

До найпоширеніших тенденцій розвитку ресурсозберігаючих технологій на транспорті можна віднести:

1. Електрифікацію та перехід до гібридних технологій. Використання електричних або гібридних локомотивів, що працюють на комбінації електроенергії та альтернативного палива, стає дедалі більш поширеним. Це дозволяє значно зменшити залежність від викопних ресурсів [232];

2. Використання альтернативних та відновлювальних джерел енергії. Наприклад, локомотиви на базі водневих паливних елементів використання яких впроваджується в Німеччині здійснюють мінімальний вплив на навколишнє середовище [98]. Ці локомотиви в найближчому майбутньому можуть замінити дизельні локомотиви на неелектрифікованих ділянках [126];

3. Покращення матеріалів і конструктивних елементів. Використання легких композитних матеріалів та зносостійких сплавів

дозволяє зменшити масу локомотиву, зменшити споживання палива або електроенергії та збільшити термін служби основних вузлів [91];

4. Цифровізацію процесів обслуговування. Моніторингові системи, системи інтернету речей (IoT) та машинного навчання забезпечують постійний контроль даних [197], отриманих з датчиків стану основних параметрів локомотиву, що дозволяє спрогнозувати час та місце можливої відмови та оптимізувати графіки ТО [158], [163].

1.2.1 Методи ресурсозбереження

Ресурсозберігаючі методи управління тяговими режимами рухомого складу включають різноманітні стратегії, спрямовані на зниження енергоспоживання, підвищення ефективності процесу гальмування та оптимізацію роботи тягового обладнання. Ключовими методами ресурсозбереження є:

1. Оптимізація швидкості шляхом використання стратегій, таких як режим максимального прискорення, постійної швидкості, інерційного руху та максимального гальмування, дозволяє зменшити витрати енергії. Наприклад в дослідженні [165] вказано, що оптимізація траєкторії руху може знизити енергоспоживання до 19,2%. Для прикладу в роботі [78] розроблено імітаційну модель тепловоза ЧМЕЗ, що складається з дизеля з регулятором кількості обертів колінчастого валу, тягового генератора постійного струму незалежного збудження та тягового електричного приводу. Проведене тестування роботи імітаційної моделі на профілі ділянки шляху Харків - Мерефа, при цьому основними обмеженнями є час руху, який для даного перегону не повинен перевищувати 45 хв., а також максимальна допустима швидкість, яка для вантажних потягів складає 80км/год. Отримані результати

показують залежність витрат палива локомотива від режиму ведення потяга машиністом при виконанні однакової роботи, тобто однакового часу руху по перегону. Отримані в ході дослідження результати показують, що існує потреба у створенні системи автоматичного керування з використанням регулятора швидкості, який би більш точно відпрацьовував задану тахограму, а також оптимізації режимів ведення поїзда. Крім того, може застосовуватись оптимізація двох швидкісних профілів (глобального та локального) забезпечує ефективне зниження енергоспоживання за рахунок точного коригування траєкторії руху на підставі параметрів ділянки [229].

2. Регулювання гальмівної енергії шляхом використання рекуперативного гальмування, яке дозволяє повертати енергію в контактну мережу або використовувати її для зарядки акумуляторів у гібридних локомотивах [48], [148] [243].

У гібридних локомотивах гальмівна енергія може зберігатися у суперконденсаторах, маховиках, або акумуляторах для подальшого використання при розгоні [77], [180], [232], [237];

3. Гібридні тягові установки:

- використання гібридних, дизель-електричних локомотивів із батареями акумуляторів забезпечує суттєву економію палива до 22,9% порівняно зі звичайними локомотивами [88], [222].

4. Використання температурного моніторингу:

- системи автоматичного керування та контролю за температурою тягового трансформатора знижують енергоспоживання систем охолодження і сприяють зменшенню рівня шуму [229].

5. «Розумні» системи керування локомотивом:

- впровадження алгоритмів керування на базі нечіткої логіки для гнучкого регулювання потужності в умовах постійно-змінних навантажень [133] та систем управління електроприводами залізничного транспорту, яка враховує кривизну колії та

автоматично регулює швидкість для підвищення безпеки та автоматизації [155]

6. Спільне керування кількома поїздами:

- узгодження перевізної роботи декількох поїздів на одній ділянці з урахуванням енергетичних можливостей зменшує загальне споживання енергоресурсів [189].

Результати оцінки методів ресурсозбереження на транспорті в числовому еквіваленті зведені до таблиці 1. Для їх оцінки були використані такі показники: економія енергії, зменшення викидів у навколишнє середовище та зниження витрат на експлуатацію у відсотковому еквіваленті.

Таблиця 1.1 – Результати оцінки методів ресурсозбереження на транспорті

Метод	Економія енергії, %	Зменшення викидів, %	Зниження витрат на експлуатацію, %
Оптимізація швидкості	10-15	8-12	5-10
Регулювання гальмівної енергії	20-30	15-20	10-15
Використання гібридної тяги	25-35	20-25	15-20
Використання температурного моніторингу	5-10	3-5	3-5
«Розумні» системи керування локомотивом	15-25	10-15	10-20
Спільне керування кількома поїздами	20-30	18-22	15-25

Слід відзначити, що використання інтелектуальних систем контролю та моніторингу технічного стану локомотивів, як елементу розумних систем керування, є важливим компонентом сучасних підходів до ресурсозбереження у залізничній галузі. Інтелектуальні системи дозволяють підвищити ефективність експлуатації локомотивів, мінімізувати витрати на технічне обслуговування та ремонт, а також збільшити термін служби обладнання. На сьогодні існує кілька основних методів та технологій в цій сфері.

Використання бездротових мереж датчиків для моніторингу в режимі реального часу технічного стану обладнання [165] забезпечує розподілений збір і обробку даних на рівні вузлів, що дозволяє оперативно виявляти несправності [164]

Застосування інтелектуальних транспортних систем на основі методів глибокого навчання (Deep Learning) та автоенкодерів дозволяють прогнозувати несправності, зокрема в підшипниках локомотивів, на основі аналізу вібраційних сигналів [120].

Поєднання сигналів із датчиків та застосування статистичних методів обробки дозволяє точно відслідковувати зношення вузлів та компонентів, таких як колеса високошвидкісних поїздів, тим самим забезпечуючи вчасне ТО [247]. До того ж, існують способи ідентифікації під час руху, при якому за допомогою точкових колійних датчиків систем залізничної автоматики визначають параметри кожної з рухомих одиниць - швидкість, прискорення та міжосьову відстань, згідно з корисною моделлю, поряд з існуючим точковим колійним датчиком додатково розміщують вагомір, яким визначають вагу кожної рухомої одиниці, а отримані дані про міжосьові відстані та вагу кожної рухомої одиниці передають через мережу передачі даних до АСК ВП УЗ (Є), на основі яких з бази даних АСК ВП УЗ (Є) визначають тип (номер) рухомих одиниць і їх вагу, причому ідентифікацію

поїзда виконують по співпадінню типу (номеру) рухомих одиниць та/або їх ваги [41].

Використання інтелектуальних платформ для управління технічним станом і обслуговуванням парку локомотивів дозволяє зменшити кількість технічних збоїв і оптимізувати графіки ТО [166].

Застосування інтелектуальних систем з прогнозуванням деградації компонентів, які оцінюють залишковий термін служби ключових вузлів, що знижує ризики виникнення несправностей та аварій та зменшує витрати на ремонт [186].

Використання нових матеріалів і технологій на локомотивах також є одним із суттєвих факторів ресурсозбереження, підвищення енергоефективності та зменшенні впливу на навколишнє середовище.

Так, застосування більш легких матеріалів, таких як композити, дозволяє знизити вагу локомотива, що покращує, в середньому, паливну ефективність на 6-8% за кожне зниження ваги на 10% [134].

Використання новітніх термоелектричних матеріалів забезпечує підвищення енергоефективності шляхом утилізації відходів тепла [249].

Застосування літій-іонних акумуляторів і суперконденсаторів для зберігання та повторного використання енергії, втраченої під час гальмування, зменшує витрати палива та підвищує ефективність систем [88], [180].

1. Здійснення переходу на альтернативні палива, такі як біодизель, метанол і диметиловий ефір [52], знижує залежність від викопного палива і зменшує викиди в атмосферу.

Впровадження електронних систем контролю для оптимізації кута випередження впорскування палива дозволяє значно покращити паливну економічність і знизити токсичність вихлопних газів [110], [58];

Інтеграція систем збереження та повторного використання енергії гальмування знижує енергетичні втрати [217].

1.2.2 Засоби реалізації ресурсозберігаючих технологій на залізничному транспорті

Засобам реалізації ресурсозберігаючих технологій на залізничному транспорті присвячена низка наукових робіт на досліджень, аналіз яких наведений нижче.

В роботі [149] розглядається використання енергоефективних електричних синхронних двигунів із постійними магнітами, у поєднанні з рекуперативним гальмуванням, що дозволяє ефективно знижувати втрати енергії локомотиву.

В дослідженні [128] стверджується що одним із найефективніших та доступних засобів з енергозбереження на залізничному транспорті без впливу на графік руху є еко-драйвінг, або оптимізація руху локомотиву та стратегії енергоефективного керування поїздами, які базуються на попередньому аналізі маршруту й умов експлуатації.

Ефективність інтеграції накопичувачів енергії, таких як суперконденсатори та літій-іонні батареї, для повторного використання енергії, що генерується під час гальмування розглянута в роботі [127]. Крім того, в роботі [77] розглянуто метод оцінювання якості пристроїв накопичення енергії ПНЕ на основі функції бажаності Харрінгтона, який дозволяє здійснювати порівняльний аналіз показників ПНЕ. Цю методику рекомендовано для вибору найкращого ПНЕ або їх комбінацій залежно від вимог до ПНЕ у певному типі рухомого складу

Питання впровадження цифрових систем управління споживанням енергії, які дозволяють здійснювати прогнозування та оптимізацію енергетичних ресурсів у режимі реального часу розглянуті в роботах [246], [136], В роботах [201, 223, 177, 147] розглядаються питання покращення енергоефективності, зменшення залежності від традиційних видів палива та

зниження викидів за рахунок використання водневих паливних елементів та гібридних систем на локомотивах.

В дослідженнях [95] та [250] .Railway track and structures, 101] проаналізовані питання впровадження систем регулювання тертя в зоні «колесо-рейка» для зниження зносу та витрат енергії, а також розглянуті питання довговічності залізничних локомотивних систем.

На рисунку 1.5 показані частки зменшення енергоспоживання при впровадженні різних засобів реалізації ресурсозберігаючих технологій на залізничному транспорті. Як видно, найбільший вплив має використання локомотивів з водневими паливними елементами та гібридними системами (40%), далі йде впровадження цифрових систем управління енергоспоживанням (22,5%) і впровадження накопичувачів енергії (20%). Використання енергоефективних електродвигунів (15%) та еко-драйвінг (10%) демонструють менш виражений ефект, проте залишаються важливими складовими загального процесу енергозбереження.

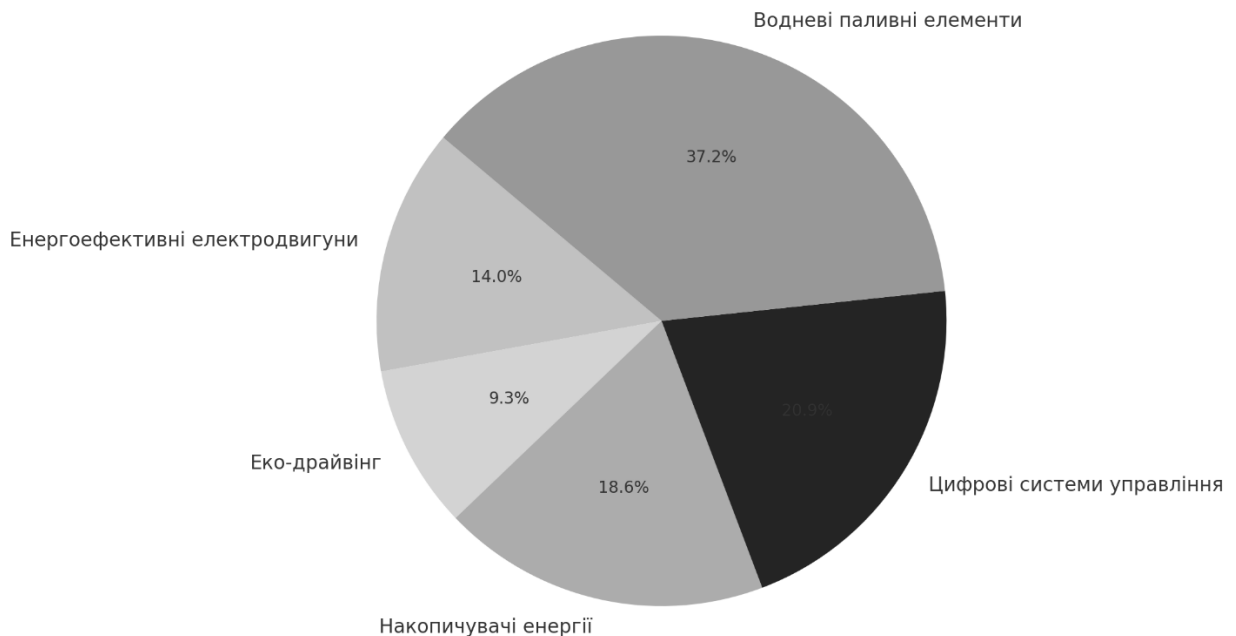


Рисунок 1.5 – Зменшення енергоспоживання за рахунок використання різних засобів ресурсозберігаючих технологій на залізничному транспорті

1.2.3 Узагальнення та перспективи подальшого розвитку

Впровадження ресурсозберігаючих технологій на ТРС стикається з кількома суттєвими проблемами. Головною з них є висока вартість капітальних інвестицій яка стримує багато залізничних компаній від модернізації локомотивного парку. Інфраструктурні обмеження такі як відсутність адаптованих енергосистем, або розгалуженої мережі зарядних станцій для гібридних та електричних локомотивів також створюють суттєві перешкоди для інтеграції новітніх рішень. Крім того, існують перешкоди у впровадженні через низький рівень підготовки персоналу до роботи із сучасними передовими технологіями та неефективну державну політику, включаючи стимулювання і підтримку стартапів та інновацій і впровадження екологічних стандартів. Не слід забувати й про складнощі технічного характеру, наприклад, недостатню надійність прототипів нових систем або відсутність випробуваних рішень які додатково уповільнюють процес модернізації.

Для подолання існуючих проблем та перешкод необхідно зосередити увагу на кількох напрямках наукових досліджень. По-перше, слід активно розвивати технології зберігання енергії, такі як акумуляторні системи та суперконденсатори [77], які здатні зменшити втрати енергії під час гальмування і забезпечити її повторне використання. По-друге, важливим є розробка прогнозуючих систем управління енергоспоживанням, а також систем моніторингу стану рухомого складу для оптимізації тягових процесів. Ці системи можуть включати елементи ШІ. Також необхідно широко впроваджувати двигуни на основі альтернативних джерел енергії, таких як водневі паливні елементи, які мають значний потенціал для заміни традиційних дизельних двигунів.

Новітні ресурсозберігаючі технології мають значний потенціал для трансформації процесу експлуатації ТРС.

Продовження електрифікації залізничної мережі залишається одним із основних напрямків покращення ресурсозбереження. Крім того, поширення використання гібридних локомотивів, які поєднують дизельні двигуни з батареями, дасть змогу суттєво знизити витрати пального. Подальше поширення систем рекуперативного гальмування дозволить повторно використовувати електричну енергію, що значно зменшує її сукупні витрати.

Застосування цифрових платформ для моніторингу стану обладнання та прогнозування несправностей сприятиме зниженню витрат на обслуговування та підвищенню надійності роботи локомотивів. У майбутньому, глибока інтеграція технологій III та Інтернету речей (IoT) дозволить створити повністю автоматизовані системи управління енергією, що сприятиме сталому розвитку залізничного транспорту [131].

1.3 Аналіз умов функціонування та причин відмов тягових електричних машин

1.3.1 Умови функціонування ТЕМ

Тягові електричні машини (ТЕМ) є головною складовою частиною сучасного залізничного транспорту, оскільки саме вони забезпечують перетворення електричної енергії в механічну потрібну для руху потягів. Їх експлуатація характеризується високими вимогами до надійності, стійкості до перевантажень і довговічності, оскільки несправності таких систем можуть спричиняти серйозні наслідки, включаючи зупинки руху та значні економічні втрати [118], [127].

ТЕМ зазвичай функціонують у досить складних умовах, які часто стають причиною їх прискореного зносу та потенційного виходу із ладу. Великі механічні навантаження, температурні коливання, електромагнітні поля, а також негативний вплив зовнішнього середовища створюють перешкоди для їх довготривалої експлуатації [66]. Зокрема, під час руху потяга відбуваються постійні зміни швидкості та навантаження, що створює важкі умови експлуатації для компонентів електричної машини, включаючи обмотки, підшипники та колекторний вузол [65].

Дослідження умов функціонування та причин відмов ТЕМ є критично важливим для підвищення їх надійності та розробки ефективних стратегій ресурсозбереження.

Розглянемо основні умови функціонування ТЕМ:

1. Механічні навантаження. Постійна зміна ваги поїзду, зокрема під час перевезення вантажів або роботи на ухилах та в кривих, створюють значні механічні навантаження на конструктивні елементи тягового електродвигуна. Вібрації від нерівностей та стиків колій також сприяють підвищеному зношенню таких вузлів, як підшипники та ротор [127];
2. Температурні перепади. Температурні коливання в процесі роботи електричних машин можуть із часом спричинити термічне пошкодження ізоляційних матеріалів. Постійне нагрівання обмоток при високих струмах та недостатнє охолодження є одними з основних факторів, що впливають на швидкість деградації ізоляції [66];
3. Електромагнітні впливи. Високі значення пускових струмів, стрибки та коливання напруги спричиняють додаткові перенапруги в обмотках, що може стати причиною локального перегріву та пошкодження ізоляції. Крім того, змінні магнітні поля створюють вихорові струми, які є причиною збільшення втрат енергії в металевих елементах [65];

4. Вплив зовнішнього середовища. Умови навколишнього середовища, такі як пил, волога, екстремальні температури та агресивні хімічні речовини, можуть суттєво впливати на довговічність ТЕМ. Проникнення пилу та вологи в середину електричної машини може стати причиною корозії компонентів і зниження ефективності теплообміну. Захист від цього забезпечується герметичністю конструкції корпусу, але брак або його недосконале виконання може привести до поломки;
5. Режим роботи. Часті зупинки та пуски локомотивів, особливо у важких умовах маневрової роботи, створюють повторно-короткочасні навантаження на ТЕМ. Це збільшує ймовірність втомного зношення механічних і електричних компонентів [50].

Загалом, умови функціонування тягових електричних машин вимагають розробки надійних конструкцій і регулярного технічного обслуговування для мінімізації зносу та підвищення експлуатаційної довговічності. Ефективне управління цими факторами є критично важливим для забезпечення стабільної роботи електричних машин та уникнення несподіваних відмов.

1.3.2 Причини відмов ТЕМ

Відмови ТЕМ є результатом взаємодії різних факторів, пов'язаних із конструктивними особливостями, умовами експлуатації та зовнішнім середовищем. Вивчення цих причин дозволяє ідентифікувати найбільш уразливі компоненти та розробити ефективні заходи для підвищення їхньої надійності.

Деградація ізоляції обмоток є однією з найбільш поширених причин виходу з ладу тягових машин. Постійне нагрівання через високі струми, локальний перегрів під час роботи та пришвидшене старіння ізоляційних матеріалів сприяють втраті їх діелектричних властивостей. Цей процес може прискорюватися через наявність вологи та забруднень, що спричиняє часткові розряди та руйнування ізоляції [191].

Зношення підшипників є однією із причин відмови ТЕМ. Підшипники є механічно уразливими елементами через постійні вібрації та удари, які виникають під час руху. Недостатнє змащення або забруднення підшипників сприяє підвищенню тертя, що приводить до перегріву та зношення [233]. Пошкодження підшипників може також бути наслідком неправильного монтажу або конструктивних дефектів [167].

Щітки та колектори також знаходяться під впливом постійного механічного та електричного зносу. Основними проблемами є нерівномірне зношення щіток, утворення задирів на поверхні колектора та забруднення продуктами зношення. Це може привести до виникнення електричної дуги і втрати контакту між щітками та колектором і, як наслідок, до виходу із ладу колекторно-щіткового вузла [99].

2. Надмірне навантаження, неправильна робота системи охолодження або часті пускові струми можуть викликати перегрів та пошкодження обмоток. Це приводить до зниження механічної міцності ізоляції та ризику короткого замикання між витками обмоток [169].

Тривала експлуатація може стати причиною утворення тріщин та деформацій в роторі або статорі. Такі дефекти виникають через циклічні механічні навантаження, вібрації та термічний стрес. Деформації ротору часто спричиняють втрату рівноваги та прискорення зношення інших частин ТЕМ;

Зовнішнє середовище також впливає на експлуатацію ТЕМ. Пил, волога та хімічні речовини, можуть проникати всередину машини,

викликаючи корозію та забруднення електричних контактів [255], [162]. Це особливо актуально для локомотивів, які працюють у несприятливих погодних умовах або в агресивному середовищі.

На рисунку 1.6 відображені результати аналізу причин відмов тягових електродвигунів локомотивів в залежності від їх частоти у відсотковому еквіваленті. Як бачимо, найпоширенішими причинами відмов є електричні та механічні причини, розглянуті вище.

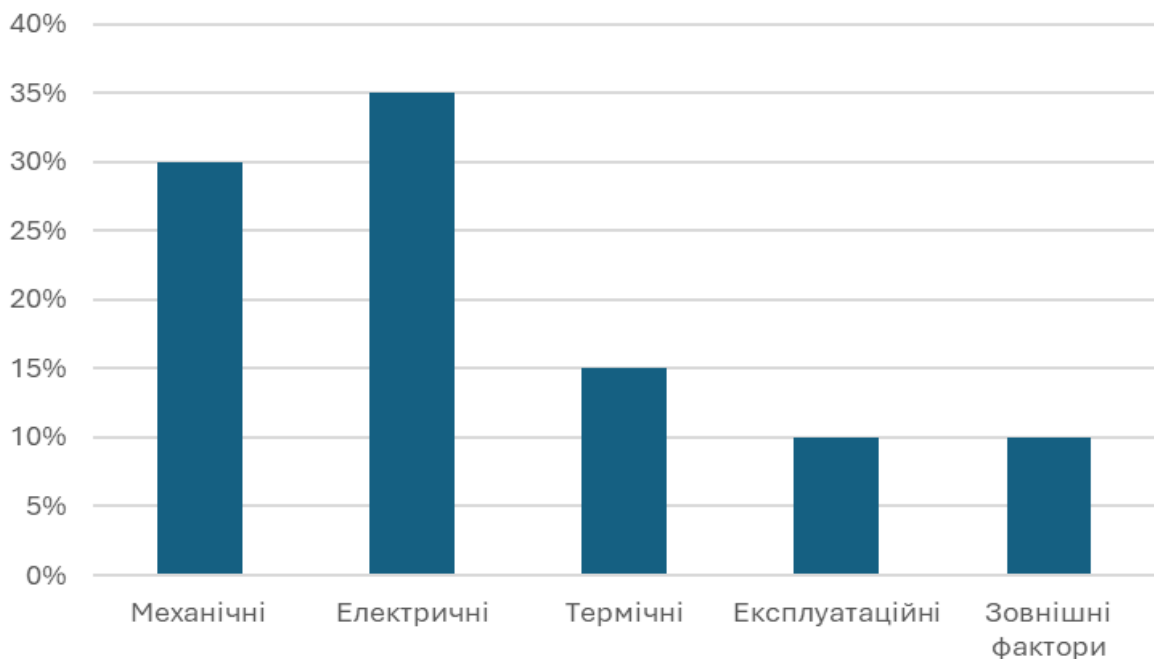


Рисунок 1.6 – Оцінка причин відмов тягових електродвигунів за їх частотою у відсотках

1.3.3 Методи виявлення та аналізу відмов ТЕМ

Ефективне виявлення та аналіз причин відмов ТЕМ є критично важливими для підтримки їх надійності, зменшення часу простою та зниження витрат на ремонт та обслуговування. Сучасні методики

діагностики дозволяють ідентифікувати потенційні несправності ще до їхнього виникнення, що забезпечує попередження відмов на початкових етапах [132].

Вібраційний аналіз є одним із найпоширеніших методів діагностики механічних несправностей, таких як зношення підшипників, розбалансування ротора чи неправильна установка компонентів. Сучасні системи аналізу вібрацій дозволяють ідентифікувати аномальні частоти, пов'язані з дефектами, і розробляти плани ремонту. Дослідження [87] та [226] показали, що метод вібраційного аналізу може значно зменшити ймовірність раптових збоїв у роботі електродвигунів.

Тепловізійний аналіз дозволяє виявляти перегрівання обмоток, підшипників або інших вузлів ТЕМ. Перегрів машини є ознакою надмірного навантаження, погіршення властивостей ізоляції або несправностей у системі охолодження [144]. Своєчасний аналіз температурних аномалій допомагає уникнути серйозних пошкоджень [254].

Для виявлення деградації ізоляції широко використовуються методи, такі як тестування опору ізоляції або вимірювання коефіцієнта поглинання [156]. Ці методи дозволяють оцінити поточний стан ізоляційного матеріалу та визначити конкретні місця його пошкоджень. Використання такого підходу може запобігти виникненню коротких замикань в обмотках ТЕМ [68].

Аналіз змін значень струму та напруги дозволяє виявляти несправності, такі як замикання витків, нерівномірне завантаження фаз ТЕМ або проблеми з колектором [221]. Цей метод показує високу ефективність при діагностиці проблем у щітково-колекторному вузлі та обмотках ротора [51].

Одним із базових методів для виявлення очевидних дефектів, зношення чи корозії є регулярний візуальний контроль компонентів, таких як щітки, колектор, підшипники та корпус. Це дозволяє швидко виявити та усунути несправності та запобігти можливому виходу із ладу ТЕМ.

Інтеграція систем Інтернету речей (IoT) для моніторингу технічного стану тягових машин дозволяє в реальному часі отримувати дані про їх роботу. Подібні системи аналізують комплекс даних у режимі реального часу [70], що дозволяє швидко реагувати на відхилення та аномалії. Використання IoT у діагностиці сприяє значному підвищенню ефективності ТО ТЕМ [154].

Для оцінки ефективності методів виявлення відмов тягових електричних машин можна використовувати такі параметри, як швидкість виявлення відмов, точність виявлення (чутливість), обсяг необхідних ресурсів (часу, затрат) та зниження ймовірності відмов завдяки їх застосуванню. Результати оцінки зведено до таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Оцінка ефективності виявлення відмов ТЕМ

Метод виявлення відмов	Швидкість виявлення, %	Точність виявлення, %	Обсяг необхідних ресурсів, %	Зниження ймовірності відмов, %
1. Вібраційний аналіз	80	90	60	70
2. Тепловізійний аналіз	70	85	70	60
3. Тестування опору ізоляції	60	75	50	50
4. Аналіз змін значень струму та напруги	85	95	65	75
5. Візуальний контроль	50	60	40	30
6. Інтеграція систем моніторингу технічного стану	90	95	80	85

1.3.4 Рекомендації для запобігання відмовам ТЕМ

Запобігання відмовам ТЕМ вимагає системного підходу, який охоплює вдосконалення конструкцій, регулярне ТО та впровадження сучасних систем та технологій моніторингу поточного стану вузлів та компонентів. Рекомендаціями для мінімізації ризиків виникнення несправностей можуть бути наступні:

- використання високоякісних ізоляційних матеріалів з підвищеною термічною стійкістю, що дозволить знизити ймовірність прискореної деградації;
- вдосконалення конструкцій підшипників і застосування стійких до зношування матеріалів, що знизить ризик механічних дефектів;
- регулярне ТО, яку включає контроль стану ізоляції, очищення від забруднень, змащення підшипників та перевірку щітково-колекторного вузла дасть можливість вчасно виявити та усунути потенційні проблеми до їхнього розвитку. Особлива увага має приділятися ефективності роботи систем охолодження для запобігання перегріву компонентів;
- застосування систем моніторингу в реальному часі для аналізу параметрів роботи ТЕМ (включаючи температуру, вібрації, стуми напруги та інші параметри) допомагає оперативно ідентифікувати аномалії. Такий метод значно скорочує час реагування на можливі несправності;
- використання прогнозуючих алгоритмів, заснованих на аналізі статистичних даних і поточних умов роботи, які дозволяють заздалегідь передбачати зношування вузлів та планувати графік профілактичних ремонтів. Це є особливо ефективним для мінімізації ризиків виникнення несподіваних відмов;

- контроль умов роботи ТЕМ, таких як температурні режими, запобігання надмірним навантаженням і скорочення, за можливості, кількості пусків/зупинок, дозволяє суттєво знизити ризик термічних та механічних пошкоджень. Додаткова увага має приділятися захисту обладнання від пилу, вологи та дії агресивних хімічних речовин;
- підвищення кваліфікації персоналу, відповідального за обслуговування та експлуатацію ТЕМ. Навчання має включати сучасні методи діагностики та правила безпечної експлуатації.

Отже, запобігання відмовам ТЕМ можливе завдяки поєднанню якісних матеріалів, сучасних систем моніторингу, регулярному технічному обслуговуванню та оптимізації умов експлуатації. Реалізація цих рекомендацій сприятиме підвищенню надійності обладнання, зменшенню експлуатаційних витрат і забезпеченню стабільності роботи залізничного транспорту.

1.4 Методи та засоби моніторингу енергоефективності роботи ТРС залізниць

1.4.1 Параметри енергоефективності роботи ТРС

Енергоефективність була і залишається однією із головних компонентів сучасної залізничної галузі, яка спрямована на забезпечення сталого розвитку транспорту. Оптимізація процесів енергоспоживання ТРС дозволяє не лише знизити експлуатаційні витрати, але й суттєво знизити екологічний вплив, зокрема, скоротити обсяг викидів парникових газів. В умовах світових тенденцій до зменшення залежності від викопних джерел

енергії та поширення використання відновлювальних джерел енергії, підвищення енергоефективності залізничного транспорту стає пріоритетним завданням [94].

На сьогодні залізничний транспорт, на відміну від автомобільного та авіаційного, має певну перевагу завдяки широкому використанню електричної тяги. Проте, навіть за таких умов, існує суттєвий потенціал для зниження енерговитрат за рахунок оптимізації режимів експлуатації, вдосконалення технічних характеристик ТРС, а також впровадження сучасних методів та засобів моніторингу енергоефективності.

Метою моніторингу енергоефективності є своєчасне виявлення зон підвищених енергетичних витрат, аналіз впливу умов експлуатації на споживання енергії та подальша розробка рекомендацій для їх мінімізації. Це дає можливість забезпечити раціональне використання енергоресурсів, підтримувати стабільну роботу тягових систем і знижувати загальні витрати на експлуатацію.

Завдання моніторингу включають:

- збір і аналіз даних щодо обсягів споживання енергії тяговими двигунами у реальних умовах роботи;
- виявлення дії ключових факторів, які впливають на енергоефективність, таких як профіль колії, вага складу, режим експлуатації;
- оцінку ефективності існуючих режимів роботи та розробку рекомендацій щодо їх оптимізації;
- інтеграцію сучасних засобів моніторингу з автоматизованими системами управління ТРС.

Ефективний моніторинг дозволяє реалізувати проактивний підхід до управління енерговитратами, що є важливим для підтримки конкурентоспроможності залізничного транспорту в умовах сучасної військової економіки та посилення екологічних стандартів.

Оцінка параметрів енергоефективності включає аналіз основних показників, впливу умов експлуатації та визначення зон енерговтрат.

Споживання електричної енергії є базовим параметром, який відображає загальний обсяг енергії, необхідний для забезпечення роботи локомотива. В роботі [204] в результаті проведеного дослідження вказано, що застосування систем рекуперативного гальмування дозволяє знизити споживання енергії на 20-30% та, відповідно, підвищити енергоефективність ТРС.

Витрати палива є критичним показником для дизельних локомотивів. В дослідженнях [178], [100] проводився аналіз ефективності використання гібридного ТРС. Такі системи дозволяють знизити витрати палива на 10-15% порівняно з традиційними двигунами.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) системи який визначає відсоток використаної енергії, що перетворюється на корисну роботу також є одним із основних показників енергоефективності. В роботі [49] шляхом порівняльного аналізу встановлено, що за рахунок використання сучасних локомотивів де цей показник може досягати 85-90% можна досягти оптимізації споживання енергії залізничної тягової системи.

В дослідженні [187] вказується на ефективність використання алгоритмів енергозберігаючого управління для локомотивів які працюють в режимі частих пусків та зупинок, характерних для маневрових операцій. Подібні умови експлуатації ТРС значно підвищують енергоспоживання внаслідок додаткового навантаження на всі системи локомотива, однак застосування алгоритмів енергозберігаючого управління допомагає оптимізувати витрати енергії [257].

Крім того, нерівності колій, погодні умови та перепади температур можуть спричиняти додаткові енергетичні втрати. В роботі [179] аналізується зменшення маси осей залізничних транспортних засобів шляхом використання порожнистих сталевих конструкцій або композитних

матеріалів, що призводить до зниження енергоспоживання та витрат на обслуговування колій. Застосування легких матеріалів у конструкції локомотивів допомагає зменшити ці втрати, особливо на маршрутах із частими підйомами.

3. Без застосування систем рекуперації енергії значна частина енергії втрачатиметься у вигляді тепла під час гальмування. Так, в роботі [143] зроблено огляд використання суперконденсаторів у залізничних системах для підвищення напруги та покращення рекуперації енергії гальмування, зокрема, їх моделювання та розміри. В дослідженні [239] пропонується оптимальна методологія розміщення суперконденсаторів у міських залізничних системах для підвищення енергоефективності та зменшення пікової потужності, а також оцінюється економічна ефективність рішень. Оцінка зменшення рівня витрат енергії при експлуатації ТРС з бортовими накопичувачами енергії, таких як суперконденсатори, зроблена в роботі [146].

Неефективні перетворювачі енергії або застарілі двигуни можуть втрачати до 15-20% енергії. В дослідженні [80] розглянуто використання нових типів дизель-генераторних установок, таких як двигуни зі вільним поршнем, які дозволяє значно підвищити енергоефективність дизельних локомотивів. В роботі [234] представлено високоефективні технології для тягових двигунів залізничних транспортних засобів, зокрема асинхронних (АМ) та синхронних двигунів із постійними магнітами (СДПМ). Нові розробки знижують втрати на 63% для АМ та забезпечують ефективність до 98% для СДПМ. Заміна таких компонентів на сучасні високоефективні двигуни знижує ці втрати [149].

На високошвидкісних маршрутах аеродинамічний опір становить до 40% усіх енергетичних втрат. В роботі [190] аналізується вплив покращення аеродинамічного опору локомотивів і поїздів на споживання енергії. Особливий акцент зроблено на регіональних та приміських поїздах, де є

значний потенціал для покращень. В дослідженні [116] використовується багатокритеріальна оптимізація для зменшення аеродинамічного опору та оптимізації дизайну головної частини локомотива. В цілому, покращення аеродинамічного дизайну локомотивів дозволяє суттєво зменшити ці втрати.

Отже, аналіз параметрів енергоефективності роботи тягового рухомого складу підкреслює необхідність системного підходу до зменшення втрат енергії. Основна увага має бути приділена оптимізації споживання енергії, модернізації обладнання та впровадженню інноваційних технологій для мінімізації зон енерговитрат.

1.4.2 Методи моніторингу енергоефективності

Раціональний моніторинг енергоефективності роботи ТРС базується на використанні передових методів, які поєднують аналітичні моделі, інтелектуальні системи, аналіз великих даних та оцінку за експлуатаційними показниками.

Математичне моделювання дозволяє оцінювати енергетичні витрати на основі експлуатаційних даних та параметрів руху. Моделі оптимального контролю, які враховують такі фактори, як опір руху, потужність двигуна та профіль колії, допомагають зменшити енерговитрати, особливо на маршрутах з частими підйомами. Так, у статті [161] досліджено кілька моделей, включаючи методи нейронних мереж (RBF і BP) і методи опорних векторів (SVM), для прогнозування енергоспоживання локомотивів на основі експлуатаційних даних. SVM виявився найточнішим методом із середньою абсолютною похибкою 2,01%. В роботі [215] запропонована модель, яка аналізує динаміку руху та енергетичні потоки в системах дизель-електричних локомотивів. Ефективність оцінюється шляхом симуляції реальних

маршрутів із врахуванням динаміки руху та споживання пального. Крім того, такі моделі з успіхом застосовувалися для зниження енергоспоживання у метрополітенах, де було продемонстровано скорочення до 15% витрат енергії [231].

Інтелектуальні системи на основі штучного інтелекту (ШІ) забезпечують автоматичний контроль енерговитрат у режимі реального часу. Наприклад, розроблені системи, які відслідковують енергоспоживання кожного локомотива і оптимізують режими його роботи залежно від профілю маршруту. Наприклад, в статті [230] пропонується метод контролю енергоефективності, що базується на алгоритмі ШІ, який використовує нейронні мережі для оптимізації швидкості поїзда. Використання цієї системи зменшило споживання дизельного пального на маршрутах у Західній Австралії. В роботі [72] запропоновано нову методологію контролю енергоспоживання з використанням штучних нейронних мереж та адаптивних алгоритмів, що забезпечує автоматичне управління енергоспоживанням у складних системах з високою точністю. Випробування таких систем показали значне зниження витрат енергії та підвищення стабільності роботи тягового обладнання [188].

Технології великих даних дозволяють аналізувати великі обсяги інформації з тягових систем. Дані про витрати пального, електроспоживання, частоту зупинок і профілю шляху і швидкості обробляються для створення точних прогнозів [78]. Це допомагає визначати зони високих енерговитрат та розробляти заходи для їх мінімізації. В статті [222] описуються підходи до модернізації тягових систем дизель-електричних локомотивів, включаючи використання великих даних для управління мікропроцесорними системами та покращення ефективності зчеплення колеса з рейкою. В роботі [160] описується архітектура платформи великих даних для локомотивних систем, яка аналізує дані з різних джерел для підвищення ефективності організації руху, технічного обслуговування та безпеки експлуатації локомотивів. Аналіз

даних з бортових систем допомагає ідентифікувати нерівності колій, які спричиняли додаткові енергетичні втрати, та в подальшому усунути їх [203].

Експлуатаційні дані, такі як витрати енергії, рекуперативне гальмування, використання тягових двигунів, є основою для оцінки ефективності. Наприклад, аналіз даних рекуперативного гальмування в роботі [119] показав, що за умов ефективного використання збереженої енергії можна досягти зниження енергоспоживання на 20-30%.

Крім того, широко застосовуються методи обчислення коефіцієнта ефективності для окремих компонентів тягового обладнання. Наприклад, оцінка ефективності електродвигунів показує, що модернізація застарілих моделей може зменшити втрати енергії на 10-15% [75].

На рисунку 1.7 показані результати оцінки ефективності методів моніторингу енергоефективності тягового рухомого складу за критеріями зниження споживаної енергії, швидкості виявлення оптимальних параметрів, зниження експлуатаційних витрат, вартості впровадження та стійкості до змін в умовах експлуатації.

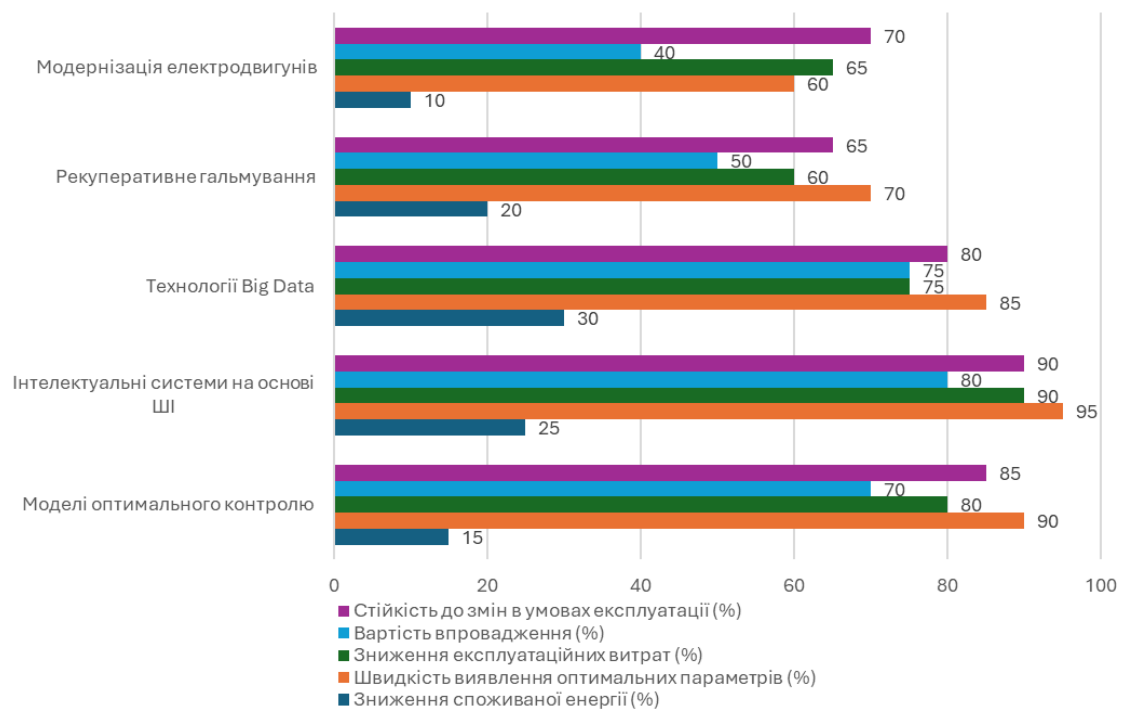


Рисунок 1.7 – Результати аналізу ефективності методів енергоефективності

Таким чином, в основі сучасних методів моніторингу енергоефективності лежить інтеграція сучасних аналітичних моделей, ІІТ, технологій Big Data та аналізу експлуатаційних даних. Їх широке впровадження сприятиме значному скороченню енергоспоживання, підвищенню ефективності та зниженню витрат на залізничному транспорті.

1.4.3 Засоби моніторингу енергоефективності

Моніторинг енергоефективності роботи ТРС залізниць потребує комплексних рішень, які включають апаратні та програмні засоби. Важливими є збір, аналіз і використання інформації з метою оптимізації енергоспоживання та підвищення ефективності.

Сучасні системи моніторингу оснащені датчиками для вимірювання температури, струму, напруги, швидкості, частоти обертання та інших параметрів роботи тягового обладнання. В роботі [238] описується система моніторингу двигуна локомотива на основі бездротових ультраширококутових (UWB) датчиків, що вимірюють температуру та тиск. Дослідження [96] описує інтегровану систему моніторингу для вантажних поїздів, яка використовує датчики для контролю температури підшипників, стану коліс і гальм, а також передачу даних через бездротові мережі для забезпечення безпеки та ефективності експлуатації. Висока точність цих пристроїв дозволяє оперативно виявляти аномалії у роботі систем, мінімізуючи ризики виникнення відмов. Крім того, запатентовані корисні моделі відмовостійких колійних датчиків [14], що можуть бути використані у системах для контролю стану ділянки залізничної колії (вільно, зайнято), у

системах контролю та обліку роботи транспортних засобів, у пристроях рахунку осей, вимірювання швидкості та прискорення рухомого складу.

Застосування GPS-технологій дозволяє відслідковувати в реальному часі місцезнаходження локомотивів, аналізувати профіль шляху та заздалегідь виявляти ділянки з підвищеним енергоспоживанням. Так, в роботі [252] представлено систему моніторингу залізничного вантажного транспорту, яка використовує GPS і GPRS для реального часу моніторингу розташування локомотивів і двостороннього зв'язку з диспетчерським центром. В статті [210] описується використання GPS, GIS і GSM для віддаленого моніторингу та керування локомотивами, що дозволяє оперативно отримувати дані про їх стан, місцезнаходження та пробіг. Ця інформація є основною для оптимізації траєкторії руху та використання енергії.

Цифрові лічильники, інтегровані в тягові системи, забезпечують точний облік електроенергії яка споживається локомотивом, включаючи обсяги рекуперативного гальмування. Наприклад, в роботі [253] описано систему запису споживання енергії локомотивами, яка замінює традиційні електrolічильники на сучасні пристрої для точного вимірювання та аналізу електроспоживання під час роботи локомотивів, а дослідження [253] присвячене системі моніторингу енергоспоживання локомотивів із використанням мікроконтролерів ARM, бездротових модулів GPRS і LCD-дисплеїв для збору, аналізу та зберігання даних про спожиту енергію. Отримані дані використовуються цими системами для оцінки ефективності системи в реальному часі.

Аналізатори енергетичних параметрів та програмні платформи акумулюють та обробляють дані з датчиків і лічильників для формування інформативних звітів. Вони забезпечують візуалізацію ключових параметрів, таких як витрати енергії, середня енергоефективність і зони аномальних показників. Наприклад, програмні рішення для управління

енергоспоживанням локомотивів сприяють зниженню витрат на 10-15% [203].

Вбудовані в програмне забезпечення прогнозуючі алгоритми дозволяють оцінити майбутні обсяги енергоспоживання на базі статистичних даних і змінних умов експлуатації. Так, у роботі [242] запропоновано модель на основі довготривалої пам'яті (LSTM) для прогнозування періодичного енергоспоживання. Модель враховує час як змінну для захоплення періодичності, що значно підвищує точність у порівнянні з ARMA і ARFIMA. Це забезпечує процес підтримки прийняття рішень і щодо оптимізації маршрутів і графіків роботи. Крім того, раціональним рішенням є впровадження систем моніторингу з бортовими та наземними інформаційними комплексами.

Сучасні локомотиви можуть оснащуватись інтегрованими інформаційними системами, які отримують дані з датчиків і передають їх на сервери для подальшого зберігання та обробки. Це дозволяє оптимізувати енергоспоживання під час руху на основі реальних умов маршруту [231].

Інформаційні системи, інтегровані з локомотивами, використовуються для централізованого моніторингу та аналізу роботи всього залізничного парку. Вони підтримують обмін даними між локомотивами, підстанціями та диспетчерськими центрами, забезпечуючи синхронізацію та ефективну роботу системи. До прикладу, в роботі [185] розглядається система моніторингу на базі бездротового зв'язку та GPS, яка дозволяє збирати та аналізувати дані про рух і стан локомотивів у реальному часі. Вона забезпечує передачу даних до центральної станції для управління та аналізу. А в рамках проекту InteGRail [104] представлена інтегрована інформаційна система для аналізу та моніторингу даних, отриманих із різних залізничних систем, що забезпечує підтримку управлінських рішень.

На рисунку 1.8 наведені результати ефективності засобів моніторингу енергоефективності ТРС.

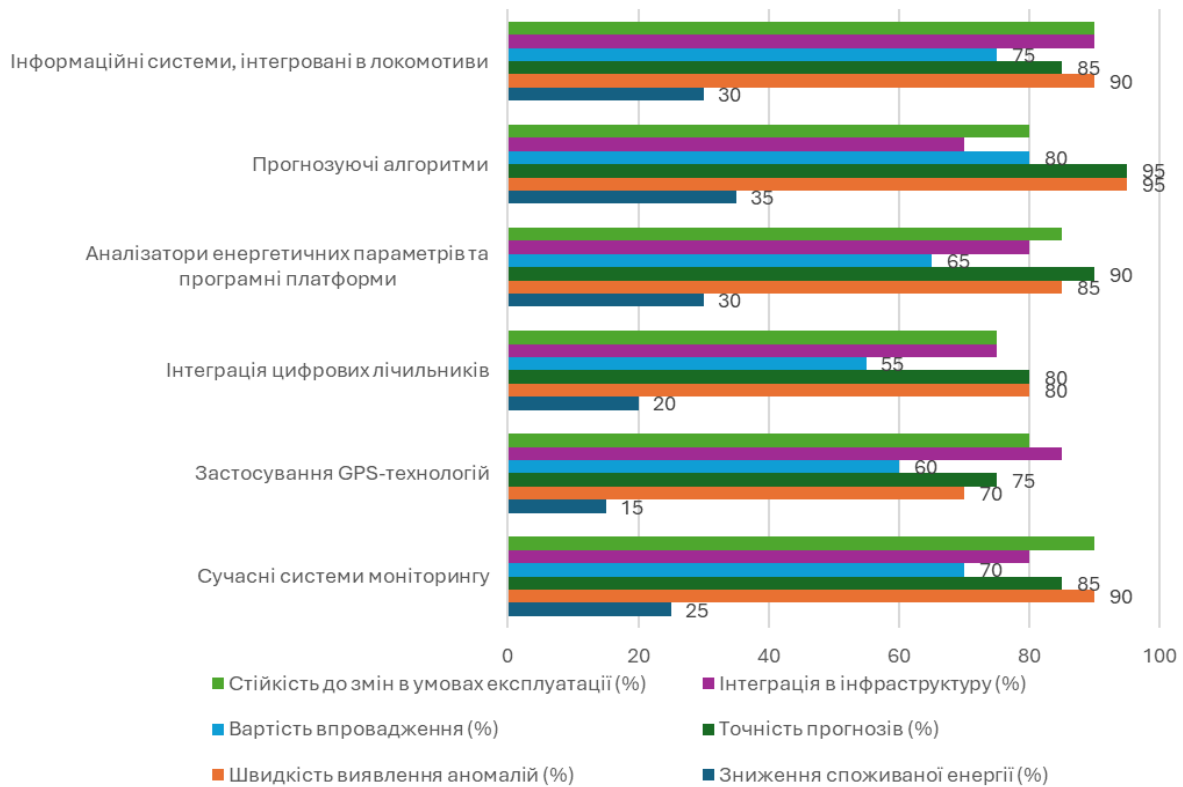


Рисунок 1.8 - Результати ефективності роботи засобів моніторингу енергоефективності ТРС

Аналіз проводився за низкою факторів, таких як зниження споживаної енергії, швидкість виявлення аномалій, точність прогнозів, вартість впровадження, можливість інтеграції в існуючу інфраструктуру та стійкість до змін в умовах експлуатації.

У підсумку системи моніторингу енергоефективності, які включають сучасні цифрові датчики, GPS-системи, лічильники енергії та програмні платформи, забезпечують точний аналіз і візуалізацію даних. Інтеграція цих засобів з бортовими та наземними комплексами дозволяє підвищити енергоефективність, знизити витрати та забезпечити стабільну роботу залізничного транспорту.

1.4.4 Практичне застосування систем моніторингу енергоефективності

Системи моніторингу енергоефективності активно впроваджуються у залізничній галузі для зниження витрат енергії, оптимізації експлуатаційних процесів та мінімізації впливу на навколишнє середовище [83]. Міжнародний досвід проектування та розробки та успішні приклади реалізації, а також аналіз економічних і екологічних ефектів від впровадження цих систем вказують на їхню ефективність і перспективність.

Сучасні моніторингові системи використовуються для реєстрації споживання енергії та оцінки ефективності роботи тягових систем [196]. Наприклад, у в дослідженні [189] висвітлено, що в рамках реалізації проекту Seam4us розроблено систему моніторингу енергії та навколишнього середовища для станцій метро Барселони. В цій системі використовується мережа бездротових датчиків для збору інформації в режимі реального часу, що покращує управління енергоспоживанням та екологічну ефективність. В роботі [205] розроблено методологію оцінки енергетичних потоків у системах метро, включаючи облік енергоспоживання рухомого складу в депо. Система Tyne and Wear Metro побудована за таким принципом використовується у Великій Британії.

Швейцарія впровадила аналіз даних з бортових систем для оптимізації графіків руху поїздів і зменшення енергетичних втрат. Це дозволило підвищити ефективність використання електроенергії у залізничній мережі [170]. Крім того на Швейцарській федеральній залізниці використовується інтегрована система для переналаштування графіків руху в реальному часі. Система дозволяє уникати непотрібних зупинок і скорочувати енергоспоживання, мінімізуючи повторні прискорення.

В роботі [93] розглянуто впровадження бортових накопичувачів енергії в метро Мадрида які разом із оптимізацією профілів швидкості поїздів

дозволили зекономити до 25% енергії на маршрутах між станціями, а у дослідженні [202] використовується нейронна мережа для моделювання енергоспоживання в метро Валенсії. Модель дозволяє оцінювати різні сценарії роботи та знаходити оптимальні налаштування для зменшення споживання енергії.

Дослідження на швидкісних поїздах показали, що зменшення ваги рухомого складу та впровадження аеродинамічних рішень може скоротити енергоспоживання на 15-20% [244]. Також, в роботі [251] аналізується застосування систем збереження енергії на борту (рекуперація гальмування) у поєднанні з оптимізацією ваги рухомого складу. Стверджується, що такий підхід дозволяє зменшити втрати енергії під час розгону поїзда на 45%

У Польщі система планування вантажних перевезень на основі енергоефективності дозволила оптимізувати використання локомотивів і маршрутизацію поїздів, що зменшило витрати енергії на 12% [114]. Крім того, в статті [176] аналізується ефективність використання енергії в польському секторі вантажного транспорту. Вивчається залежність витрат енергії від вантажопідйомності та впливу зовнішніх факторів, таких як ціни на паливо та конкурентоспроможність

Впровадження систем моніторингу в Італії дозволяє залізничним операторам значно скоротити витрати на енергоресурси. Так, у метро Неаполя використання систем оптимізації руху дозволило зекономити до 1,2 млн євро щороку [75]. А в роботі [102] описується синхронізована система вимірювання для моніторингу якості енергії на залізничних лініях Італії. Система використовує GPS для забезпечення точності даних та їх синхронізації між різними станціями.

Рекуперативне гальмування та використання накопичувачів енергії дозволяють значно зменшити викиди CO₂, що робить залізничний транспорт більш екологічно чистим. Впровадження таких технологій у мережах DC-систем знизило викиди на 15-20% [225]. В роботі [172] оцінено технічну та

економічну ефективність використання рекуперативного гальмування в дизель-електричних вантажних потягах. Результати показують, що системи накопичення енергії роблять такі інвестиції доцільними і сприяють декарбонізації залізничного транспорту.

Системи моніторингу сприяють швидкому виявленню несправностей та зниженню рівня зносу тягових двигунів і інших компонентів, що продовжує термін їх служби. Так в роботі [218] розглядається система онлайн-моніторингу для асинхронних тягових двигунів (SCIM), яка базується на аналізі струмів, вібрацій та температур. Цей підхід дозволяє перейти від планового обслуговування до обслуговування за фактичним станом. А в статті [139] запропоновано метод моніторингу підшипників тягових двигунів на основі аналізу вібрацій та температури, що дозволяє швидко ідентифікувати потенційні несправності та запобігати аваріям.

Таким чином, системи моніторингу енергоефективності демонструють високу ефективність у зниженні витрат енергії та викидів, а також у покращенні експлуатаційних показників залізничного транспорту. Досвід впровадження цих систем у різних країнах свідчить про їхню здатність не лише знижувати витрати, але й сприяти сталому розвитку галузі.

1.4.5 Проблеми та перспективи розвитку методів і засобів моніторингу

Системи моніторингу енергоефективності та технічного стану в залізничній галузі є важливими елементами сучасного транспортного комплексу. Проте їх розвиток стикається з низкою технічних, організаційних та економічних викликів, які вимагають інноваційних підходів і технологій.

Одним із головних викликів на сьогодні є інтеграція нових систем у вже існуючу залізничну інфраструктуру. Застаріле обладнання та відсутність

уніфікованих протоколів передачі даних створюють перешкоди для ефективного впровадження сучасних рішень. Наприклад, розробка систем, які базуються на Інтернеті речей (IoT), вимагає повної модернізації мережі збору даних, оскільки традиційні засоби діагностики не відповідають сучасним стандартам точності та швидкості обробки інформації [137], [113].

Організаційні проблеми включають недостатню координацію між відділами, які відповідають за експлуатацію та обслуговування тягового рухомого складу. Брак кваліфікованого персоналу, здатного працювати з новими технологіями, також є бар'єром для їх впровадження [151]. В роботі [82] аналізується наявність програм навчання для різних категорій працівників залізничного транспорту в Європі, зокрема виявляються прогалини у підготовці кадрів для роботи з новими технологіями. Крім того, в статті [212] досліджується нестача кваліфікованих кадрів у залізничній індустрії Великобританії, зокрема інженерів і економістів. Запропоновано стратегії для вирішення проблеми, включаючи наймання за кордоном, перекваліфікацію працівників та створення програми розвитку навичок.

Адаптація систем моніторингу вимагає оновлення апаратного забезпечення, вдосконалення аналітичних алгоритмів і впровадження єдиних стандартів передачі даних. Наприклад, впровадження RFID-технологій дозволяє значно підвищити швидкість збору даних про технічний стан тягового рухомого складу [137]. Дотримання сучасних стандартів, таких як ISO 50001 (енергоменеджмент), є обов'язковим для забезпечення європейської інтеграції та підвищення ефективності моніторингових систем.

Останні дослідження акцентують увагу на використанні штучного інтелекту (ШІ) та великих даних для прогнозування стану технічного обладнання. Наприклад, аналітичні платформи з використанням машинного навчання можуть прогнозувати потенційні відмови на основі аналізу статистичних даних і умов експлуатації. Крім того, автоматизовані системи, такі як 3D-сканери та ультразвукові датчики, дозволяють швидко і точно

визначати дефекти у складних механізмах. В роботі [140] розроблено прототип системи прогнозування відмов вантажних потягів з використанням правил і дерев рішень. Цей підхід дозволяє інтегрувати прогнозування в існуючі локомотивні системи без необхідності масштабних технологічних змін. Також, в дослідженні [103] розглядається використання екстремальних машин навчання (ELM) для прогнозування відмов залізничних систем на основі даних транспортних подій. Як стверджує автор, цей метод показав високу точність у прогнозуванні до 98% операційних збоїв.

Перспективним напрямом є впровадження мобільних платформ, які використовують дрони для моніторингу стану колій і важкодоступних ділянок. В дослідженні [130] описується система моніторингу залізничного коридору за допомогою дронів із використанням технологій глибокого навчання. Система здатна виявляти та класифікувати інфраструктурні об'єкти, такі як рейки, шпали та кріплення, з високою точністю. В статті [227] пропонується до використання система моніторингу колій на основі комп'ютерного зору та зображень, отриманих дронами. Система забезпечує високу надійність і точність виявлення дефектів колій. Такі технології не лише підвищують ефективність обслуговування, але й знижують витрати на діагностику та ремонт.

Отже, впровадження та розвиток систем моніторингу в залізничній галузі мають стратегічне значення для підвищення енергоефективності, зниження експлуатаційних витрат та забезпечення безпеки. Впровадження останніх технологічних рішень, таких як системи моніторингу, IoT, ШІ та засоби автоматизації, дозволяють вирішувати існуючі технічні та організаційні виклики, створюючи основу для майбутнього сталого розвитку галузі.

1.5 Впровадження відновлювальних джерел енергії в системи електропостачання локомотивів

Цей підхід спрямований на зменшення енергоспоживання рухомого складу залізниць від традиційних джерел енергії, шляхом його перерозподілу в бік альтернативних джерел, зниження викидів парникових газів та підвищення енергоефективності.

Одним із заходів в цьому напрямку є використання сонячних батарей та вітрогенераторів, що дозволяє забезпечити електропостачання залізничної інфраструктури та власні потреби будівель та споруд залізниць.

На рисунку 1.9 показана структурна схема взаємодії локомотиву із зовнішніми системами. Дана схема включає кілька функціональних блоків, пов'язаних між собою. В свою чергу, мікропроцесорний датчик, система ідентифікації локомотивів та колійні датчики відносяться до системи локомотивного депо.



Рисунок 1.9 – Структура взаємодії локомотиву із зовнішніми системами

Основними елементами схеми є ресурсозберігаюча система керування локомотивом яка забезпечує оптимізацію використання енергоресурсів та підвищення ефективності управління локомотивом; система моніторингу локомотива яка відповідає за відстеження стану локомотива в реальному часі, діагностику несправностей і аналіз його роботи; система електропостачання з ВДЕ яка є джерелом електроенергії для роботи допоміжних систем локомотива з альтернативних джерел енергії; мікропроцесорний комплекс, що виконує обробку даних від різних систем, здійснює керування процесами та забезпечує взаємодію між компонентами; система ідентифікації локомотивів яка визначає конкретний локомотив у депо для реєстрації його стану та характеристик, колійні датчики, які контролюють проходження локомотива, збирають інформацію про його рух та стан колійної інфраструктури. Останні три системи працюють в межах локомотивного депо – основного об'єкта, який забезпечує експлуатацію та обслуговування локомотивів.

Зазначена структурна схема демонструє інтегровану систему управління локомотивом, де центральним елементом є локомотив, функціонально-пов'язаний з різними підсистемами. Вони взаємодіють через мікропроцесорний комплекс та датчики, що дозволяє в реальному часі реалізовувати моніторинг, ідентифікацію, оптимізацію ресурсів та ефективне управління енергоспоживанням.

Важливим елементом даної схеми є система електропостачання локомотивного депо з інтегрованими ВДЕ. Широке впровадження ВДЕ, зокрема на залізницях України, розглянуте в низці робіт, дозволяє заощаджувати енергоресурси та забезпечити стаке зростання рівня ресурсозбереження на залізничному транспорті.

Так, в роботі [29] проведений аналіз можливості застосування альтернативних джерел енергії в системах електропостачання залізниць України, а саме: Розглянуто можливості розташування фотоелектричних

модулів на дахах та території тягових підстанцій та визначені можливості зменшення споживання енергії на власні потреби за рахунок використання сонячних батарей.

В роботі [195] розглянуті сучасні передумови використання нетрадиційних джерел енергії для електропостачання нетягових споживачів, розраховано кількість сонячних панелей та визначено їх здатність забезпечити додаткову потужність тягової підстанції, змодельовано генерацію електричної енергії сонячною електростанцією, встановленою на даху тягової підстанції з урахуванням фактору затінення для кожного сезону. Визначено, що річна генерація енергії від такої сонячної електростанції становитиме 13,92 МВт щорічно, що є достатнім для забезпечення власних потреб будівлі тягової підстанції.

В дослідженні [31] проведено аналіз втрат в сонячній електростанції постійного струму № 18 м. Зміїв Харківської області зі всіма кліматичними умовами даного регіону. Проаналізовано показники енергоефективності інверторів, які використовують на даних сонячних електростанціях. Згідно з експериментальними даними на основі програмного комплексу PVsyst виміряно втрати енергії та проведений розрахунок зменшення викидів CO₂ в сонячній електростанції.

В роботі [22] розроблений метод зниження рівнів електромагнітних завад, що генеруються інверторами фотоелектричних станцій, шляхом реалізації запропонованого схемного рішення та алгоритму навантаження мережевих інверторів у нестабільних режимах який може бути застосований до фотоелектричної станції інтегрованої до системи електропостачання (СЕП) залізниці. Такий підхід сприятиме зменшенню втрат електроенергії та електромагнітного впливу на обладнання, викликаного дією вищих гармонік. Врахування встановлених закономірностей впливу вищих гармонік дозволить оцінювати вплив відповідних показників на додаткове нагрівання ізоляції елементів СЕП, визначати відповідні електромагнітні пошкодження

та надавати рекомендації щодо врахування цих режимів при розрахунках і виборі обладнання для фотоелектричних станцій. Однак, в результаті досліджень електромагнітних процесів в системи автоматичного регулювання напівпровідникового перетворювача з двосторонньою широтно-імпульсною модуляцією виявлена можливість придушення вищих гармонік без зміни його силової частини та отримані вирази для визначення факторів пульсацій для різних значень коефіцієнту демпфування та регульованого параметра.

В роботі [32] досліджено трекерну систему сонячної електростанції, встановленої на даху тягової підстанції залізниці. Розраховано щорічну генерацію та щорічні втрати з різними типами трекерів у сонячній електростанції. Проведено порівняльний аналіз доцільного використання трекерів на сонячній електростанції. За експериментальними даними на основі програмного комплексу PVsyst виміряно енергію, що передається до мережі в різних варіантах кріпильних конструкцій (статичних і динамічних). Отримано графіки генерації та втрат у трекерних системах за 25 років експлуатації.

В роботі [30] розглядаються особливості, пов'язані зі старінням і деградацією сонячних фотоелектричних систем. Розглянуто і проаналізовано багато факторів старіння, включаючи температуру, вологість, пил, тріщини панелей. Проводилися моделювання та знімалися характеристики сонячної електростанції яка встановлена на даху тягової підстанції №18 м. Зміїв. Крім того, досліджено вплив факторів старіння на продуктивність сонячних фотоелектричних модулів, включаючи термін служби, ефективність, деградацію матеріалу, перегрів і невідповідність. Шляхом моделювання роботи станції встановлено, що Фактор деградації сонячних панелей за 20 років використання становитиме 7,8 %, а втрати за рахунок невідповідності панелей складатимуть 2,72 %. На 30 рік використання панелей деградація 11,8 % при невідповідності панелей у 6,1 %.

Отже крім деградаційних процесів, для ефективної роботи сонячної електростанції у складі СЕП залізниці потрібно дотримуватися певних умов експлуатації, а саме: електростанція потребує ефективного охолодження (вентиляції); панелі необхідно розміщувати з технологічними зазорами, місце встановлення панелей має передбачати наявність технологічних проходів, для недопущення взаємного затінення панелей між ними має бути передбачена достатня відстань.

1.6 Проблеми та перспективні напрямки розвитку ресурсозберігаючих технологій експлуатації локомотивів

Впровадження ресурсозберігаючих технологій в процес експлуатації локомотивів має на меті зниження енергоспоживання, покращення екологічних показників та оптимізацію витрат. Однак розвиток цих технологій супроводжується низкою перешкод, які потребують комплексного підходу до вирішення даного питання, а саме:

1. Технічні обмеження. Технології, такі як системи рекуперативного гальмування, стикаються з проблемами ефективного збереження енергії, оскільки поточні системи акумуляції енергії мають обмежену ємність і тривалість роботи. Наприклад, в роботі [129] детально розглянуті технічні та логістичні виклики використання батарей для локомотивів. Основними проблемами є обмежений простір для установки батарей, складність інтеграції з існуючими системами та висока вартість модернізації. В статті [64] досліджуються теплові характеристики літій-іонних батарей для гібридних локомотивів. Зазначається про необхідність складного управління температурою для уникнення термічного розгону таких акумуляторів;

2. Високі початкові витрати. Впровадження інновацій, таких як гібридні локомотиви та системи накопичення енергії, потребує значних капіталовкладень. Це ускладнює їх адаптацію для компаній з обмеженим бюджетом [133]. Крім того, в дослідженні [123] аналізується вплив високоефективних технологій електропостачання на енергозбереження залізничних систем. Як зазначено в роботі, основними перешкодами до широкої інтеграції є висока початкова вартість впровадження та модернізації існуючої інфраструктури;

3. Недостатньо розвинута інфраструктура. Як зазначено в роботі [53], брак зарядних станцій для гібридних або електричних локомотивів створює бар'єри для їх масштабного впровадження, особливо у віддалених регіонах. А в дослідженні [170] пропонується підхід до покращення енергоефективності залізничних операцій через аналіз великих даних. Визначено, що на практиці такий метод аналізу даних стикається з обмеженнями через недостатній рівень розвитку інфраструктури збору та обробки даних. В статті [85] досліджується використання даних про погоду для управління енергоспоживанням обігріву стрілок. Виявлено, що модернізація інфраструктури може значно зменшити витрати енергії, але вимагає суттєвих інвестицій у нові технології управління. До того ж з розвитком швидкісного руху характер тягових навантажень і вихідні дані для проектування електрифікації залізниць змінилися, причому з підвищенням швидкості руху скоротився час переміщення тягового рухомого складу (ТРС) по фідерній зоні. При цьому висока встановлена потужність локомотивів, потрібна для досягнення максимальної швидкості, веде до виникнення піків навантажень. Цим навантаженням вже не можуть відповідати всі елементи тягових підстанцій, особливо трансформатори, розраховані на середньостатистичні навантаження. На сьогодні існують проблеми з підсиленням систем електропостачання СЕП і пошуком шляхів їх вирішення (рисунок 1.10).



Рисунок 1.10 – Шляхи підсилення СЕП

До таких шляхів відносять збільшення перерізу проводів контактної мережі КМ, застосування тягової мережі з екранувальними та підсилювальними проводами, пристроїв компенсації реактивної потужності і т. п.

Так, в роботі [1] виконане порівняння кількох варіантів довжин міжпідстанційної зони, встановлена оптимальна відстань між тяговими підстанціями для певної ділянки залізниці та визначене середньорічне електроспоживання на тягу.

4. Складність інтеграції в існуючу мережу. Перехід на нові технології, такі як використання суперконденсаторів або паливних елементів, вимагає значних змін у поточній інфраструктурі залізничного транспорту. Так, в роботі [108] розглядаються стратегії керування суперконденсаторами у системах рекуперації енергії. Основні виклики включають точне моделювання системи та інтеграцію до складу існуючих підстанцій. В

дослідженні [174] розроблено математичну модель суперконденсатора, при цьому стверджується, що головним недоліком математичних моделей суперконденсаторів є неможливість відтворення фізико-хімічних процесів, що відбуваються в суперконденсаторі під час фази накопичення енергії. Під час аналізу експериментальних даних встановлено, що використання саморозряду в моделях як інструменту для відтворення релаксації суперконденсаторі є некоректним, оскільки це не призводить до незворотних втрат накопиченої енергії, а лише до її перерозподілу всередині самого суперконденсаторі. Виявлено реакцію суперконденсаторі на зміну інтенсивності заряду, кількість безперервних циклів «заряд-розряд» або виникнення різких збурень у вигляді зміни його внутрішнього еквівалентного опору в межах 3–7 % (рис. 6, 7; табл. 3). При цьому зміна значень носила випадковий характер. Крім того, в статті [59] описане використання суперконденсаторів як допоміжного джерела енергії разом із паливними елементами. Як зазначено в дослідженні, головні перешкоди для впровадження пов'язані зі складністю управління потоком енергії для запобігання перенавантаженню системи.

Як видно з рисунку 1.11 найбільший вплив розвитку ресурсозберігаючих технологій експлуатації локомотивів мають високі початкові витрати від впровадження технологій (40%) та технічні обмеження, які існують в теперішній час (30%).

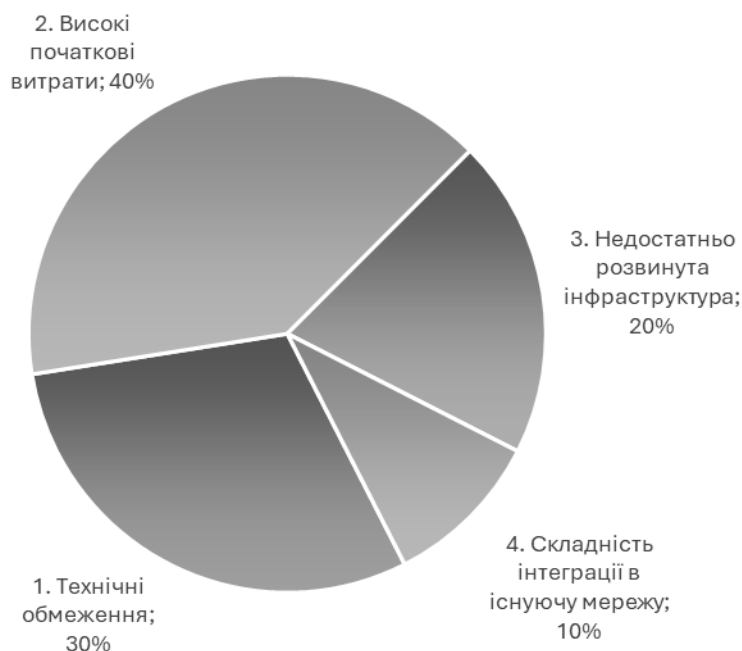


Рисунок 1.11 – Результати аналізу впливу перешкод на розвиток ресурсозберігаючих технологій на транспорті

Перспективними напрямками розвитку ресурсозберігаючих технологій експлуатації локомотивів вбачаються наступні:

1. Інтеграція гібридних систем. Гібридні локомотиви, які поєднують дизельні двигуни та акумуляторні батареї, дозволяють значно знизити витрати на паливо та викиди. Експериментальні Дослідження проведені в дослідженні [223] показали зниження споживання палива на 20% завдяки використанню цих систем. Розрахунки проведені в роботі [54] показують, що гібридизація локомотивів з акумуляторами дозволяє досягти економії пального до 60% на гірських маршрутах і до 20% на рівнинних, залежно від профілю шляху.

2. Розвиток систем моніторингу. Використання сучасних систем моніторингу дозволяє зменшити неефективне використання енергії. Так, проведені в роботі [207] дослідження фокусуються на оцінці енергоспоживання та якості електроенергії на борту потягів. Зібрані дані використовуються для визначення потенціалу енергозбереження та прийняття рішень щодо модернізації інфраструктури. Встановлено, що

використання систем моніторингу енергії та якості електроживлення на борту поїздів сприяє ідентифікації шляхів для значного зменшення енергетичних втрат. Це, своєю чергою, дозволяє ефективніше використовувати існуючу інфраструктуру та знижувати загальні експлуатаційні витрати. В роботі [89] визначені енергетичні характеристики залізничних транспортних систем постійного струму (3 кВ), оцінені рівні втрат електроенергії, зокрема в процесі рекуперативного гальмування та визначено, що інвестиції в технології моніторингу сприяють більш екологічній та економічно вигідній експлуатації залізничних мереж.

4. Рекуперативне гальмування та накопичення енергії. Використання рекуперативного гальмування з накопиченням енергії сприяє значному скороченню викидів CO₂ та зниженню експлуатаційних витрат, як зазначено в дослідженні [192]. Також, в роботі [101] на практиці оцінюється економія енергії у дизель-електричних поїздах завдяки рекуперативному гальмуванню. Результати демонструють щорічну економію в 3400 МВт·год і зменшення витрат на паливо на 425 000 доларів США для 34 поїздів.

3. Використання альтернативних видів палива. Розробка локомотивів, які працюють на альтернативних видах палива, зменшує залежність від викопної енергії та сприяє підвищенню екологічної стійкості. В дослідженні [56] пропонується система з аміачними паливними елементами для виробництва водню та електроенергії на борту локомотива. Аналіз демонструє ефективність 61.2% з мінімальними викидами CO₂, що робить цю систему екологічно вигідною. Крім того, в статті [135] моделюється використання природного газу як альтернативного палива для локомотивів. Результати показують зменшення викидів оксидів азоту і оптимізацію запалювання.

4. Вдосконалення паливних систем. Оптимізація процесів впорскування палива і аеродинамічних рішень у конструкції локомотивів дозволяє досягати економії до 8% пального [157]. У роботі [159] описано

модернізацію паливної системи локомотивів DF8B. Зміни включають використання нових форсунок і клапанів, що покращило економію пального та продовжило термін служби компонентів паливної системи.

Таким чином, ресурсозберігаючі технології в експлуатації локомотивів мають великий потенціал, однак для їх впровадження необхідно вирішити технічні, фінансові та інфраструктурні проблеми. Подальший розвиток цих технологій сприятиме зниженню витрат, покращенню екологічних показників та підвищенню ефективності роботи залізничного транспорту.

1.7 Висновки по розділу 1

1. Проаналізовані особливості впливу продовження «життєвого циклу» локомотивів на економіку залізничної галузі. Шляхом порівняльного аналізу встановлено, що середній вік локомотивів в Україні який становить 40 років, що більше ніж в 2 рази порівнянні з розвинутими країнами. Визначено, що модернізація локомотивів значно знижує експлуатаційні витрати і підвищує ефективність ТРС та дозволяє продовжити «життєвий цикл» ще на 10-15 років. Проаналізовані ключові чинники, які впливають на тривалість «життєвого циклу» локомотивів. Виявлено, що експлуатаційні умови, технічне обслуговування та технологічні особливості обладнання здійснюють найбільший вплив його тривалість. Виявлені ризики та обмеження, які уповільнюють та перешкоджають подовженню життєвого циклу локомотивів. Шляхом аналізу світового досвіду експлуатації, з'ясовано цей супроводжується технічними, економічними, екологічними та регуляторними ризиками. Для мінімізації цих ризиків залізничні компанії мають виконувати ретельний аналіз стану техніки, оцінку потенційних

витрат і вигід, а також враховувати довгострокові вимоги ринку та регуляторів та зовнішні фактори, такі як продовження військових дій.

Проаналізований в розділі 1 міжнародний досвід подовження життєвого циклу локомотивів свідчить про ефективність цього підходу за умови адаптації до конкретних умов експлуатації. Модернізація дозволяє знижувати витрати, підвищувати екологічність і покращувати експлуатаційні характеристики локомотивів. Для України корисним є впровадження подібних практик із врахуванням локальних технічних, економічних та екологічних факторів.

2. Проаналізовані сучасні методи та засоби формування ресурсозберігаючих технологій експлуатації ТРС. Встановлено, що основними критеріями ефективності цих технологій є енергоспоживання, ефективність ТО, довговічність техніки, екологічність та економічна ефективність. Проаналізовано світовий досвід в галузі ресурсозбереження на залізницях та виявлено, що сучасні тенденції в цій сфері включають подальшу електрифікацію та перехід до гібридних технологій, використання альтернативних та відновлювальних джерел енергії цифровізацію, моніторинг даних та впровадження інноваційних матеріалів, що сприяє подальшому розвитку залізничної галузі на принципах сталого розвитку. Зроблено огляд існуючих методів ресурсозбереження. Встановлено, що використання інтелектуальних систем контролю та моніторингу технічного стану локомотивів є важливим компонентом ресурсозбереження у залізничній галузі. Проаналізовано існуючі засоби реалізації ресурсозберігаючих технологій на залізничному транспорті та розглянуті перспективи подальшого розвитку в галузі ресурсозбереження. Встановлено, що застосування цифрових платформ для моніторингу стану обладнання та прогнозування несправностей сприятиме зниженню витрат на обслуговування та підвищенню надійності роботи локомотивів. В перспективі, глибока інтеграція технологій ШІ та IoT дозволить створити

повністю автоматизовані системи управління енергією, що сприятиме сталому розвитку залізничного транспорту.

3. Проведений аналіз умов функціонування та причин відмов ТЕМ, що дозволило визначити ключові фактори, які впливають на їх надійність, термін служби та ефективність роботи. Встановлено, що основними причинами відмов тягових електричних машин є деградація ізоляції, механічні дефекти, недоліки в системі охолодження та негативний вплив зовнішнього середовища. Зокрема, перевантаження, висока температура, часті цикли запуску та зупинки, а також вплив пилу і вологи спричиняють зношування компонентів, що в результаті призводить до зростання частоти відмов.

Зроблено огляд існуючих методів виявлення та аналізу відмов ТЕМ. Встановлено, що використання комбінованих методів, таких як вібраційна діагностика, тепловізійний аналіз та моніторинг даних у реальному часі, сприяє значному підвищенню ефективності ТО ТЕМ.

Розроблено комплекс рекомендацій для запобігання відмовам ТЕД. Встановлено, що запобігання відмовам ТЕМ можливе завдяки поєднанню якісних матеріалів, сучасних систем моніторингу, регулярному ТО та оптимізації умов експлуатації.

4. Досліджені методи та засоби моніторингу енергоефективності роботи ТРС залізниць. Виявлено, що застосування систем рекуперативного гальмування в поєднанні з накопичувачами дозволяє знизити споживання енергії на 20-30%, гібридні локомотиви порівняно з дизельними мають на 10-15% нижчі витрати палива, а заміна застарілих ТЕД на більш енергоефективні може суттєво знизити втрати енергії. Шляхом аналізу встановлено, що в основі сучасних методів моніторингу енергоефективності лежить інтеграція сучасних аналітичних моделей, ШІ, технологій Big Data та аналізу експлуатаційних даних.

Аналіз засобів моніторингу енергоефективності показав, що такі системи які включають сучасні цифрові датчики, GPS-системи, лічильники енергії та програмні платформи, забезпечують точний аналіз і візуалізацію даних. Інтеграція цих засобів з бортовими та наземними комплексами дозволяє підвищити енергоефективність, знизити витрати та забезпечити стабільну роботу залізничного транспорту.

5. Проаналізовані системи електропостачання залізниць, що містять у своєму складі відновлювальні джерела енергії. Визначено, що використання ВДЕ як засобу ресурсозбереження в Харківському регіоні, зокрема на тягових підстанціях, здатне покращити ефективність залізничного транспорту та знизити споживання електричної енергії на власні потреби. Крім того, запропонована концепція модернізації схеми живлення власних потреб тягової підстанції має підвищити надійність електропостачання споживачів власних потреб за рахунок інтеграції до схеми додаткового незалежного відновлювального джерела живлення;

6. Окреслені проблеми і перспективи розвитку ресурсозберігаючих технологій експлуатації локомотивів. З'ясовано, що ключовими перешкодами до впровадження таких технологій є технічні обмеження, високі початкові витрати, недостатній рівень розвитку інфраструктури і, як наслідок, складність інтеграції в існуючу залізничну мережу.

Виокремлені перспективні напрямки розвитку ресурсозберігаючих технологій експлуатації локомотивів, основними з яких є інтеграція гібридних систем, розвиток та удосконалення систем моніторингу енергії технічного стану локомотивів, рекуперативне гальмування в поєднанні з накопичувачами енергії, вдосконалення паливних систем та використання альтернативних видів палива.

За результатами всебічного аналізу масиву публікацій встановлено, що питанням використання заводо захищених систем моніторингу параметрів локомотивів не було приділено достатньої уваги. Це зумовлює необхідність

детального розгляду даного питання як одного з найбільш ефективних методів ресурсозберігаючих методів, технологій та технічних засобів експлуатації локомотивів.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ТА АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ НА ТЕХНІЧНИЙ СТАН ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ЛОКОМОТИВІВ

2.1 Математична модель електричних перехідних процесів у частотно-керованому асинхронному двигуні

Часові залежності струмів і напруг у колах зі складними комутаціями обумовлені багатьма факторами. Головним з цих факторів є довільний порядок комутацій одночасно багатьох ключів та довільний час перебування кола в кожній окремій комутаційній конфігурації. Для опису та подальшого створення пристроїв зі складними комутаціями треба мати достатньо повну, гнучку і прийнятно просту математичну модель електричних процесів в топологічних елементах кола. У другому розділі запропоновано та обґрунтовано таку модель у вигляді сукупності операторних виразів для струмів і напруг статичного трифазного перетворювача частоти для частотно-керованого асинхронного двигуна (ПЧ – АД). Сформовано та розв'язано систему операторних рівнянь відносно шуканих струмів і напруг, яка автоматично враховує поточну конфігурацію комутуючих перемикачів. Операторний опис пристрою забезпечує можливість гнучкої модифікації отриманих розрахункових співвідношень при відносно невеликих змінах в початковій схемі, а також забезпечує природний перехід до аналізу співвідношень між гармоніками процесів, що відбуваються у пристрої.

На сьогодні у частотно-керованих асинхронних двигунах знаходять широке застосування трифазні дворівневі автономні інвертори напруги, які порівняно з багаторівневими мають ряд недоліків, а саме, більш низький

ККД, меншу вихідну потужність та більший вміст вищих гармонік у навантаженні та мережі живлення.

Це обумовлює їх подальше дослідження з метою зниження рівня гармонік, підвищення ККД, а також забезпечення можливості довгострокового прогнозування надійності роботи в реальному масштабі часу.

Метою дослідження є моделювання електричних перехідних процесів у топологічних елементах кола трифазного дворівневого автономного інвертора напруги, що дасть змогу проводити аналіз динамічних режимів роботи пристроїв зі складними комутаціями [3].

Визначимо завдання розрахунку будь-якого струму та напруги у трифазному дворівневому автономному інверторі напруги та у його навантаженні (рисунок 2.1).

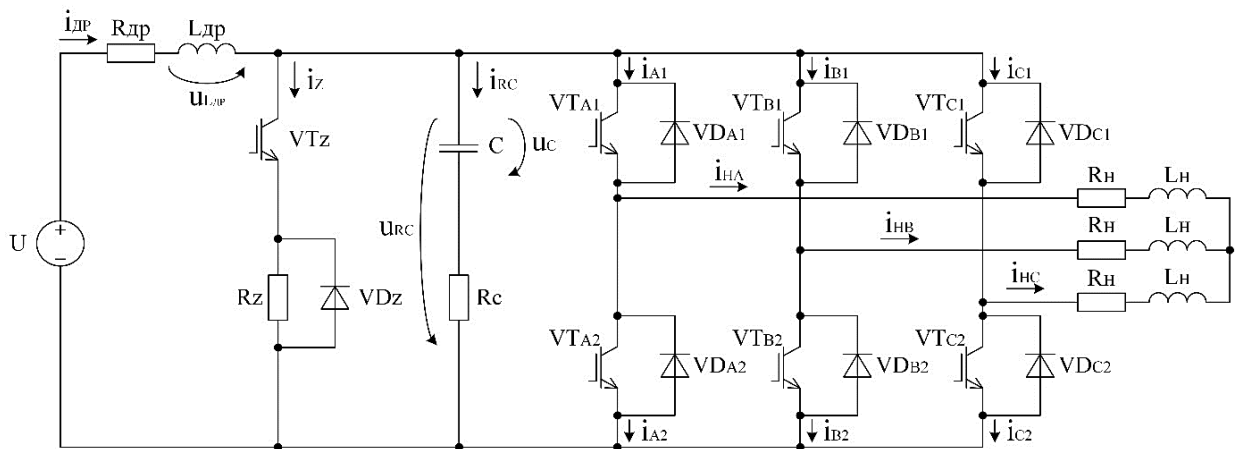


Рисунок 2.1 – Трифазний дворівневий автономний інвертор напруги

Ключі, що складаються з транзисторів і зворотних діодів VT_z , VT_{A1} , ..., VT_{C2} , VD_z , VD_{A1} , ..., VD_{C2} будемо вважати ідеальними (опір в замкненому положенні дорівнює нулю, в розімкненому він дорівнює нескінченності). Транзистори VT_{A1} , ..., VT_{C2} вважатимемо також ідеально синхронізованими:

коли верхній транзистор відкритий, нижній транзистор цієї фази закритий і навпаки. Опір діода VD_Z у зворотному вмиканні вважаємо нескінченним.

Інвертор живиться від джерела відомої постійної напруги U через згладжуючий дросель з індуктивністю L_{dp} і активним опором R_{dp} . Миттєве значення струму, що протікає через дросель, позначимо як i_{dp} . Коло захисту від перенапруг містить, крім транзистора VT_Z і діода VD_Z , ще й резистор R_Z . Через це коло протікає струм i_Z . Схема також включає конденсатор C і резистор R_C кола випрямленої напруги інвертора; струм через RC -коло позначено як i_{RC} . Навантаженням інвертора є три послідовні кола, утворені резисторами R_H та індуктивностями L_H ; ці кола з'єднані зіркою.

Через верхні транзисторні ключі протікають струми i_{A1} , i_{B1} , i_{C1} , через нижні – відповідно i_{A2} , i_{B2} , i_{C2} . Залежно від поточної комбінації замкнених та розімкнених ключів у фазах навантаження формуються різні величини струмів i_{HA} , i_{HB} та i_{HC} . Для приведення схеми, зображеної на рисунку 2.1, до зручного для розрахунку струмів вигляду, виконаємо два перетворення:

1) замінимо позначення ключових транзисторів VT_Z , VT_{A1} , VT_{B1} , VT_{C1} , VT_{A2} , VT_{B2} , VT_{C2} на позначення ідеальних ключів відповідно K_Z , K_A , K_B , K_C , $(1 - K_A)$, $(1 - K_B)$, $(1 - K_C)$. Ідентифікатори ключів служать одночасно і кодами стану кожного з них: верхні ключі замкнені при $K_A=1$, $K_B=1$, $K_C=1$, у цей же час $(1 - K_A)=0$, $(1 - K_B)=0$, $(1 - K_C)=0$, що означає розімкненість відповідних нижніх ключів;

2) замінивши напругу u_{RC} на колі CR_C на залежне джерело електрорушійної сили (ЕРС) e_{RC} , скористаємося відомим прийомом перенесення цього джерела до інших гілок схеми [33]. У результаті вихідну схему, подану на рисунку 2.1, можна фрагментувати на три залежні підсхеми, подані на рисунку 2.2

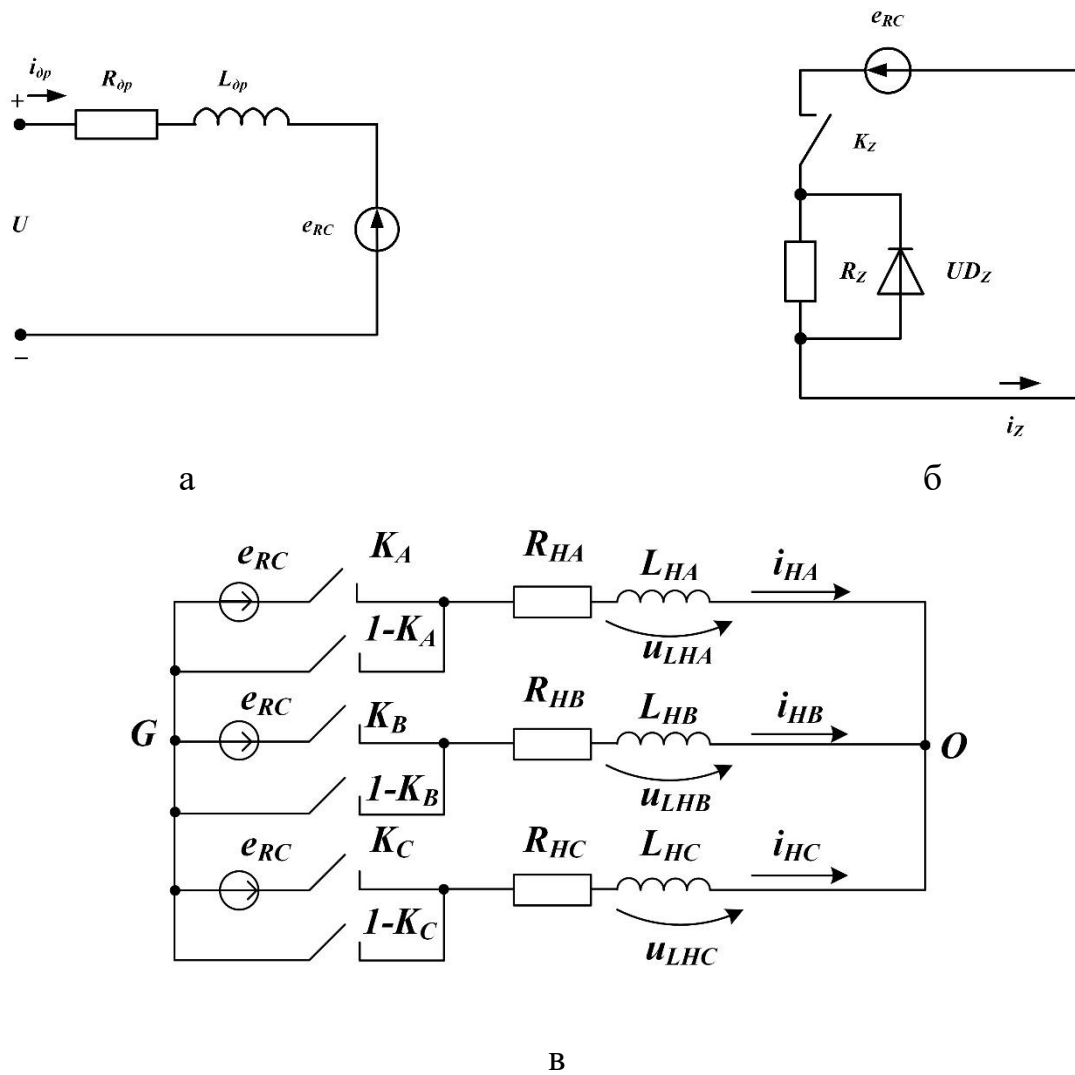


Рисунок 2.1 – Фрагменти залежних підсхем трифазного дворівневого автономного інвертора напруги

Тут e_{RC} є ЕРС, що залежить від струму i_{RC} згідно з рисунком 2.1, як

$$e_{RC}(i_{RC}) = u_{RC} = u_C + i_{RC} \cdot R_C. \quad (2.1)$$

Невідомими струмами є i_{dp} , i_Z , i_{RC} , i_{HA} , i_{HB} та i_{HC} . Їхні миттєві значення однозначно визначені законами Кірхгофа. Перше рівняння є сполучним між підсхемами:

$$i_{dp} = i_Z + i_{RC} + K_A \cdot i_{HA} + K_B i_{HB} + K_C i_{HC}. \quad (2.2)$$

Друге рівняння зв'язує струми у вузлі 0:

$$i_{HA} + i_{HB} + i_{HC} = 0. \quad (2.3)$$

Для підсхеми а (рисунок 2.2) згідно з другим законом Кірхгофа

$$U - e_{RC}(i_{RC}) = R_{op} \cdot i_{op} + u_{Lop}. \quad (2.4)$$

Для підсхеми б:

$$e_{RC}(i_{RC}) = K_Z \cdot i_Z \cdot R_Z + (1 - K_Z) \cdot R_q \cdot i_Z, \quad (2.5)$$

де R_q – опір ізоляції ключа K_Z .

Для замкненого контуру $G - e_{RC} - R_{HA} - L_{HA} - L_{HB} - e_{RC}$ (рисунок 2.2, в) справедлива рівність

$$e_{RC}(i_{RC}) \cdot K_A - e_{RC}(i_{RC}) \cdot K_B = i_{HA} R_{HA} + u_{LHA} - i_{HB} R_{HB} - u_{LHB}. \quad (2.6)$$

Аналогічно для замкненого контуру $G - e_{RC} - R_{HB} - L_{HB} - L_{HC} - e_{RC}$ маємо

$$e_{RC}(i_{RC}) \cdot K_B - e_{RC}(i_{RC}) \cdot K_C = i_{HB} R_{HB} + u_{LHB} - i_{HC} R_{HC} - u_{LHC}. \quad (2.7)$$

Знаходження невідомих струмів безпосередньо з системи рівнянь (2.2) – (2.7) потребує громіздких перетворень з фізично непрозорими проміжними співвідношеннями. Утримання контролю над їх фізичним змістом можна забезпечити здійснивши перехід від диференціальних рівнянь (2.2) – (2.7) до

операторних рівнянь, у яких компоненти будуть функціями комплексної частоти p і, як наслідок, можна буде оцінювати спектральний склад струмів і опорів.

Позначивши великими літерами операторні зображення струмів та використавши відомі [21, 33] операторні подання напруг на індуктивності та на конденсаторі, отримаємо такі операторні еквіваленти диференціальних рівнянь (2.2) – (2.7):

$$I_{op}(p) = I_Z(p) + I_{RC}(p) + K_A I_{HA}(p) + K_B I_{HB}(p) + K_C I_{HC}(p), \quad (2.8)$$

$$I_{HA}(p) + I_{HB}(p) + I_{HC}(p) = 0, \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \frac{U}{p} - \frac{u_C(0+)}{p} - I_{RC}(p) \left(R_C + \frac{1}{pC} \right) = \\ = R_{op} I_{op}(p) + pL_{op} I_{op}(p) - L_{op} i_{op}(0+), \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\frac{u_C(0+)}{p} + I_{RC}(p) \left(R_C + \frac{1}{pC} \right) = K_Z R_Z I_Z(p) + (1 - K_Z) R_q I_Z(p), \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} (K_A - K_B) \left[\frac{u_C(0+)}{p} + I_{RC}(p) \left(R_C + \frac{1}{pC} \right) \right] = \\ = I_{HA}(p) \cdot R_{HA} + pL_{HA} \cdot I_{HA}(p) - L_{HA} \cdot i_{HA}(0+) - \\ - I_{HB}(p) \cdot R_{HB} - pL_{HB} \cdot I_{HB}(p) + L_{HB} \cdot i_{HB}(0+), \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned}
& (K_B - K_C) \left[\frac{u_C(0+)}{p} + I_{RC}(p) \left(R_C + \frac{1}{pC} \right) \right] = \\
& = I_{HB}(p) \cdot R_{HB} + pL_{HB} \cdot I_{HB}(p) - L_{HB} \cdot i_{HB}(0+) - \\
& - I_{HC}(p) \cdot R_{HC} - pL_{HC} \cdot I_{HC}(p) + L_{HC} \cdot i_{HC}(0+), \quad (2.13)
\end{aligned}$$

де струми і напруги, що мають аргументом величину $t=0+$, є миттєвими значеннями відповідних величин, що мають місце в момент встановлення поточної комбінації положень ключів K_A , K_B і K_C .

Поставимо завдання первинного розрахунку струму $I_{HA}(p)$. Як проміжний етап зведемо систему рівнянь (2.8) – (2.13) до трьох рівнянь щодо струмів фаз навантаження. Визначимо з (2.10) струм конденсатора:

$$I_{RC}(p) = \frac{\frac{U}{p} - \frac{u_C(0+)}{p} - I_{RC}(p) \cdot \left(R_C + \frac{1}{pC} \right) + L_{op} \cdot i_{op}(0+)}{R_{op} + pL_{op}}. \quad (2.14)$$

З (2.11) знаходимо струм кола захисту:

$$I_Z(p) = \frac{\frac{u_C(0+)}{p} - I_{RC}(p) \cdot \left(R_C + \frac{1}{pC} \right)}{K_Z \cdot R_Z + (1 - K_Z) R_q}. \quad (2.15)$$

Підстановка рівнянь (2.14) і (2.15) у рівняння (2.8) дає вираз $I_{RC}(p)$ через струми фаз навантаження:

$$I_{RC}(p) = \frac{\frac{U}{p \cdot Z_{\partial p}(p)} - u_C(0+) \left[\frac{1}{pB} + \frac{1}{p \cdot Z_{\partial p}(p)} \right]}{D(p)} -$$

$$- \frac{\frac{L_{\partial p} \cdot i_{\partial p}(0+)}{Z_{\partial p}(p)} - K_A \cdot I_{HA}(p) - K_B \cdot I_{HB}(p) - K_C \cdot I_{HC}(p)}{D(p)}, \quad (2.16)$$

де

$$Z_{\partial p}(p) = R_{\partial p} + pL_{\partial p}, \quad (2.17)$$

$$B = K_Z \cdot R_Z + (1 - K_Z)R_q, \quad (2.18)$$

$$D(p) = \left(R_C + \frac{1}{pC} \right) \cdot \left[\frac{1}{B} + \frac{1}{Z_{\partial p}(p)} \right] + 1. \quad (2.19)$$

Підстановка виразу (2.16) у рівняння (2.12) і (2.13) усуває з розрахункових співвідношень всі струми, крім струмів навантаження:

$$(K_A - K_B) \cdot \frac{u_C(0+)}{p} + (K_A - K_B) \cdot \left(R_C + \frac{1}{pC} \right) \times$$

$$\times \left[Q(p) - \frac{\frac{L_{\partial p} \cdot i_{\partial p}(0+)}{Z_{\partial p}(p)} + K_A \cdot I_{HA}(p) + K_B \cdot I_{HB}(p) + K_C \cdot I_{HC}(p)}{D(p)} \right] =$$

$$= I_{HA}(p) \cdot (R_{HA} + pL_{HA}) - L_{HA} \cdot i_{HA}(0+) -$$

$$-I_{HB}(p) \cdot (R_{HB} + pL_{HB}) + L_{HB} \cdot i_{HB}(0+), \quad (2.20)$$

$$(K_B - K_C) \cdot \frac{u_C(0+)}{p} + (K_B - K_C) \cdot \left(R_C + \frac{1}{pC} \right) \times$$

$$\times \left[Q(p) - \frac{\frac{L_{\partial p} \cdot i_{\partial p}(0+)}{Z_{\partial p}(p)} + K_A \cdot I_{HA}(p) + K_B \cdot I_{HB}(p) + K_C \cdot I_{HC}(p)}{D(p)} \right] =$$

$$= I_{HB}(p) \cdot (R_{HB} + pL_{HB}) - L_{HB} \cdot i_{HB}(0+) -$$

$$-I_{HC}(p) \cdot (R_{HC} + pL_{HC}) + L_{HC} \cdot i_{HC}(0+), \quad (2.21)$$

$$Q(p) = \frac{U}{p \cdot Z_{\partial p}(p) \cdot D(p)} - \frac{u_c(0+) \cdot \left[\frac{1}{pB} + \frac{1}{pZ_{\partial p}(p)} \right]}{D(p)}. \quad (2.22)$$

Разом з рівнянням (2.9) рівняння (2.20) та (2.21) дають систему рівнянь для струмів фаз навантаження. Виразимо з (2.9) $I_{HB}(p) = -I_{HA}(p) - I_{HC}(p)$ і підставимо $I_{HB}(p)$ у (2.20) та (2.21). Після приведення подібних отримаємо, що

$$(K_A - K_B) \cdot \frac{u_C(0+)}{p} + (K_A - K_B) \cdot Z_{RC}(p) \times$$

$$\begin{aligned}
& \times \left[Q(p) - \frac{I_{HA}(p) \cdot (K_A - K_B) + I_{HC}(p)(K_C - K_B) + \frac{L_{\partial p} \cdot i_{\partial p}(0+)}{Z_{\partial p}(p)}}{D(p)} \right] = \\
& = I_A(p) \cdot [Z_{HA}(p) + Z_{HB}(p)] + I_{HC}(p) \cdot Z_{HB}(p) - \\
& - L_{HA} \cdot i_{HA}(0+) + L_{HB} \cdot i_{HB}(0+), \tag{2.23}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (K_B - K_C) \cdot \frac{u_C(0+)}{p} + (K_B - K_C) \cdot Z_{RC}(p) \times \\
& \times \left[Q(p) - \frac{I_{HA}(p) \cdot (K_A - K_B) + I_{HC}(p)(K_C - K_B) + \frac{L_{\partial p} \cdot i_{\partial p}(0+)}{Z_{\partial p}(p)}}{D(p)} \right] = \\
& = -I_{HA}(p) \cdot Z_{HB}(p) - I_{HC}(p)[Z_{HB}(p) + Z_{HC}(p)] - \\
& - L_{HB} \cdot i_{HB}(0+) + L_{HC} \cdot i_{HC}(0+), \tag{2.24}
\end{aligned}$$

де

$$\left. \begin{aligned} Z_{RC}(p) &= R_C + \frac{1}{pC}, \\ Z_{HA}(p) &= R_{HA} + pL_{HA}, \\ Z_{HB}(p) &= R_{HB} + pL_{HB}, \\ Z_{HC}(p) &= R_{HC} + pL_{HC}. \end{aligned} \right\} \tag{2.25}$$

Виразимо $I_{HC}(p)$ з рівняння (2.24) через $I_{HA}(p)$:

$$\begin{aligned}
I_{HC}(p) = I_{HA}(p) \cdot \frac{(K_A - K_B)(K_B - K_C) \frac{Z_{RC}(p)}{D(p)} - Z_{HB}(p)}{(K_B - K_C)^2 \cdot \frac{Z_{RC}(p)}{D(p)} + Z_{HB}(p) + Z_{HC}(p)} - \\
- \frac{(K_B - K_C) \left[\frac{u_C(0+)}{p} + Z_{RC}(p) \cdot Q(p) \right] + L_{HB} i_{HB}(0+)}{(K_B - K_C)^2 \cdot \frac{Z_{RC}(p)}{D(p)} + Z_{HB}(p) + Z_{HC}(p)} - \\
- \frac{L_{HC} i_{HC}(0+) - \frac{(K_B - K_C) Z_{RC}(p) L_{\partial p} i_{\partial p}(0+)}{Z_{\partial p}(p) \cdot D(p)}}{(K_B - K_C)^2 \cdot \frac{Z_{RC}(p)}{D(p)} + Z_{HB}(p) + Z_{HC}(p)}. \quad (2.26)
\end{aligned}$$

Введемо скорочені позначення:

$$M(p) = \frac{(K_A - K_B)(K_B - K_C) \frac{Z_{RC}(p)}{D(p)} - Z_{HB}(p)}{(K_B - K_C)^2 \cdot \frac{Z_{RC}(p)}{D(p)} + Z_{HB}(p) + Z_{HC}(p)}. \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned}
N(p) = \frac{(K_B - K_C) \left[\frac{u_C(0+)}{p} + Z_{RC}(p) \cdot Q(p) \right] + L_{HB} i_{HB}(0+)}{(K_B - K_C)^2 \cdot \frac{Z_{RC}(p)}{D(p)} + Z_{HB}(p) + Z_{HC}(p)} - \\
- \frac{L_{HC} i_{HC}(0+) - \frac{(K_B - K_C) Z_{RC}(p) L_{\partial p} i_{\partial p}(0+)}{Z_{\partial p}(p) \cdot D(p)}}{(K_B - K_C)^2 \cdot \frac{Z_{RC}(p)}{D(p)} + Z_{HB}(p) + Z_{HC}(p)}, \quad (2.28)
\end{aligned}$$

В результаті, можна записати, що

$$I_C(p) = I_A(p) \cdot M(p) - N(p). \quad (2.29)$$

Позначимо знаменник:

$$Y = \frac{(K_A - K_B)^2 \cdot Z_{RC}(p)}{D(p)} - \frac{(K_A - K_B) \cdot (K_B - K_C) Z_{RC}(p) M(p)}{D(p)} + \\ + Z_{HA}(p) + Z_{HB}(p) [1 + M(p)].$$

Підстановка останньої рівності рівняння (2.23) дає можливість визначити струм навантаження фази A :

$$I_{HA}(p) = \frac{(K_A - K_B) \cdot \frac{u_C(0+)}{p} + (K_A - K_B) \cdot Z_{RC}(p) \cdot Q(p)}{Y} + \\ + \frac{\frac{(K_A - K_B) \cdot (K_B - K_C) \cdot Z_{RC}(p) N(p)}{D(p)} + \frac{(K_A - K_B) \cdot Z_{RC}(p) \cdot L_{\partial p} i_{\partial p}(0+)}{D(p) Z_{\partial p}(p)}}{Y} + \\ + \frac{N(p) Z_{HB}(p) + L_{HA} i_{HA}(0+) - L_{HB} i_{HB}(0+)}{Y}. \quad (2.30)$$

Струм фази C навантаження знаходимо, підставивши розв'язок (2.30) у співвідношення (2.29), а струм фази B навантаження знаходимо за першим законом Кірхгофа:

$$I_B(p) = -I_A(p) - I_C(p). \quad (2.31)$$

Інші струми знаходяться з урахуванням поточної комбінації ключів K_A ,

K_B і K_C . Результати математичного моделювання у програмі MathCAD 15 роботи системи ПЧ–АД, а саме струмів та їхнього спектрального складу при симетричному навантаженні наведені на рисунках 2.3 та 2.4.

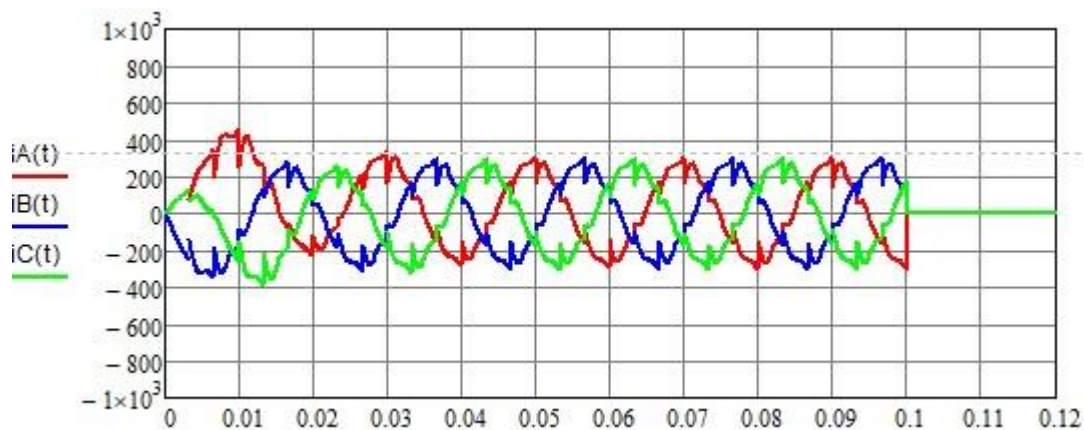


Рисунок 2.3 – Форми струмів в системі ПЧ–АД при симетричному навантаженні

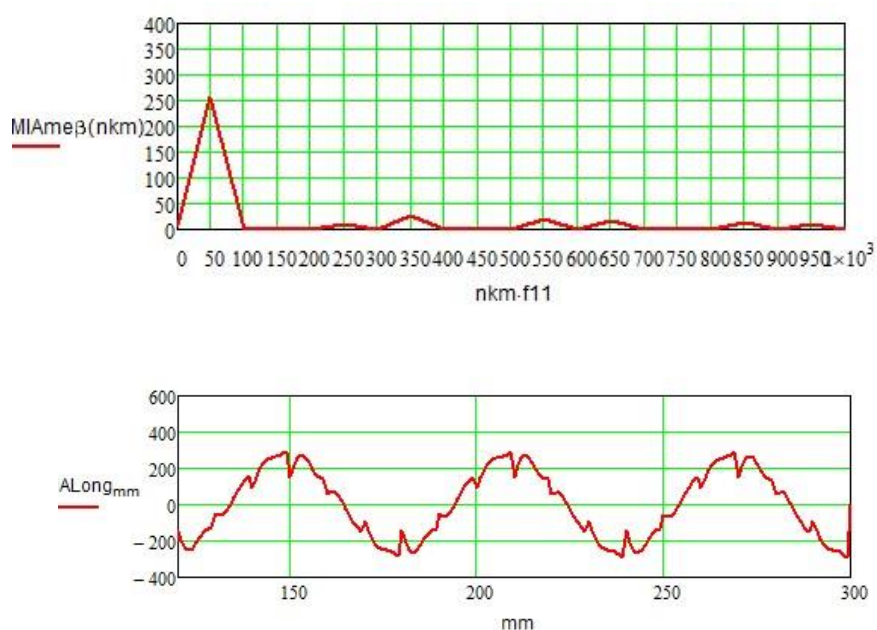


Рисунок 2.4 – Спектральний склад струму ПЧ–АД при симетричному навантаженні: $MIАme\beta(nkm)$ – комплексна амплітуда гармоніки; $nkm.f11$ – номер гармоніки струму

Результати математичного моделювання у програмі MathCAD 15 роботи ПЧ–АД, а саме форм струмів та їх спектрального складу при аварійному режимі роботи (обрив фази В) наведено на рисунках 2.5. та 2.6.

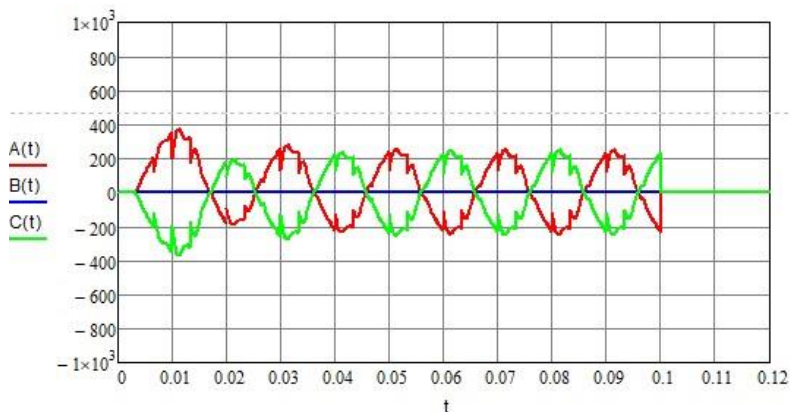


Рисунок 2.5 - Форми струмів в системі ПЧ–АД при обриві фази В

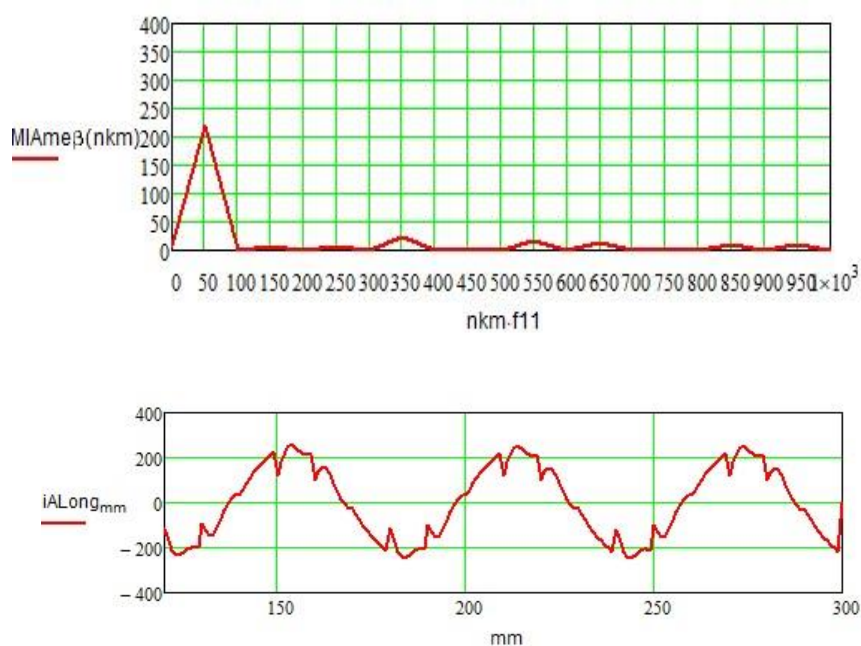


Рисунок 2.6 - Спектральний склад струму ПЧ–АД при обриві фази В:

$MI_{Ame\beta}(nkm)$ – комплексна амплітуда гармоніки;

$nkm.f11$ – номер гармоніки струму

Результати моделювання показують наявність змін у спектральному складі струмів статора при пошкодженні обмоток, що у подальшому дозволить створювати бази даних їх технічного стану залежно від виду пошкоджень.

У дворівневному інверторі (рисунки 2.1 та 2.2) завжди або $K_A - K_B = 1$, або $K_B - K_C = 1$. Відповідно струм $I_{RC}(p)$ знаходимо або з (2.12), або з (2.13), щоб уникнути поділу на нуль:

$$I_{RC}(p) = \frac{I_{HA}(p) \cdot Z_{HA}(p) - I_{HB}(p) \cdot Z_{HB}(p)}{(K_A - K_B) \cdot Z_{RC}(p)} - \frac{L_{HA} \cdot i_{HA}(0+) + L_{HB} \cdot i_{HB}(0+) - (K_A - K_B) \cdot \frac{u_C(0+)}{p}}{(K_A - K_B) \cdot Z_{RC}(p)} \quad (2.32)$$

або

$$I_{RC}(p) = \frac{I_{HB}(p) \cdot Z_{HB}(p) - I_{HC}(p) \cdot Z_{HC}(p)}{(K_B - K_C) \cdot Z_{RC}(p)} - \frac{L_{HB} \cdot i_{HB}(0+) + L_{HC} \cdot i_{HC}(0+) - (K_B - K_C) \cdot \frac{u_C(0+)}{p}}{(K_B - K_C) \cdot Z_{RC}(p)}. \quad (2.33)$$

Знання $I_{RC}(p)$ дозволяє знайти зображення напруги на RC -колі (рисунок 2.7):

$$U_{RC}(p) = I_{RC}(p) \cdot Z_{RC}(p) + \frac{u_C(0+)}{p}. \quad (2.34)$$

Відповідно до схеми, поданої на рисунку 2.2, б маємо

$$I_Z(p) = \frac{U_{RC}(p)}{K_Z \cdot R_Z + (1 - K_Z) \cdot R_q}. \quad (2.35)$$

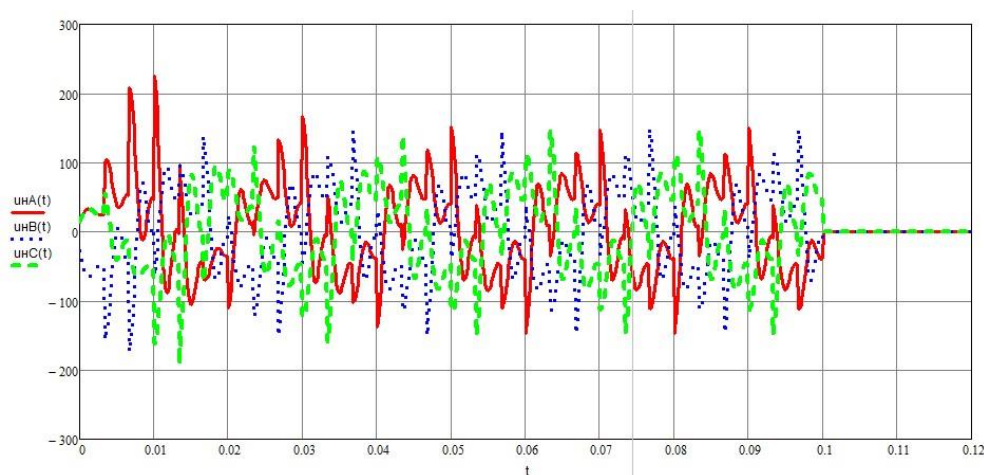


Рисунок 2.7 – Фазні напруги системи ПЧ–АД при симетричному навантаженні

Операторне зображення струму дроселя може бути отримано шляхом підстановки знайдених операторних зображень решти всіх струмів у вираз (2.8). За відносно невеликих змін у вихідній схемі, поданій на рисунку 2.1, отримані розрахункові співвідношення можуть бути модифіковані нескладним та прозорим для опису способом.

2.2 Математичне моделювання характеру комутаційних і робочих процесів в перетворювачах частоти системи ПЧ-АД

Розглянемо основні кількісні співвідношення, що характеризують процеси в системі ПЧ-АД [42]. Максимальне лінійне значення ЕРС двигуна дорівнює:

$$\sqrt{3}E_2 = \frac{6}{\pi} \cdot \frac{x_0^2}{x_2} \cdot I_n \cdot \cos Q \cdot \alpha. \quad (2.36)$$

Максимальне значення напруги на комутуючому конденсаторі визначається з виразу:

$$U_{c0} = \sqrt{3}E_2 \cdot \cos Q + I_n \cdot \sqrt{2x'_1 \cdot x_c} = \frac{6}{\pi} \cdot \frac{X_0^2}{X_2} \cdot I_n \cdot \cos^2 Q \cdot \alpha + I_n \sqrt{2x'_1 \cdot x_c}. \quad (2.37)$$

Відносна величина комутаційного перенапруження рівна відношенню напруги на конденсаторі до лінійної ЕРС двигуна:

$$\frac{U_{c0}}{\sqrt{3}E_2} = \cos Q + \frac{\sqrt{x_c}}{\alpha} \cdot \frac{\sqrt{2x'_1 \cdot x_2}}{x_0^2} \cdot \frac{\pi}{6} \cdot \frac{1}{\cos Q}. \quad (2.38)$$

Інтервал від початку розряду конденсаторів до початку комутації струмів у фазах асинхронного двигуна визначається як відношення максимального значення напруги на конденсаторі до напруги розряду конденсатора струмом перетворювача частоти

$$\lambda = \frac{2\sqrt{3}E_2 \cdot \cos Q + I_n \sqrt{2X'_1 X_c}}{I_n} \cdot C_K \cdot \alpha \cdot \omega_H = \frac{12}{\pi} \cdot \frac{x_0^2}{x_2} \cos^2 Q \cdot \frac{\alpha^2}{x_c} + \frac{\alpha}{\sqrt{x_c}} \cdot \sqrt{2x'_1} \quad (2.39)$$

Час комутації в кутових одиницях, визначуваний другим доданком (2.39) дорівнює:

$$\gamma = \frac{\alpha}{\sqrt{x_c}} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{2x'_1}. \quad (2.40)$$

E_2 - максимальне значення фазної ЕРС двигуна; U_{c0} - максимальне значення напруги на комутуючому конденсаторі, що встановлюється в кінці комутаційного процесу; $\frac{U_{c0}}{\sqrt{3}E_2}$ - відношення, що характеризує величину комутаційних перенапруг; I_n - струм на вході інвертора; Q - кут між векторами струму і потоку двигуна відповідно; ω і $\alpha = \frac{\omega}{\omega_n}$ - відповідно поточна частота в абсолютних і відносних одиницях;

$x'_1 = x_1 - \frac{x_0^2}{x_2}$ - індуктивний опір короткого замикання двигуна: $x_1 = x_2 = 3$;

$x_0 = 3,0$; $x'_1 = 0,2$; $x_C = \frac{1}{\omega \cdot C_K}$ - реактивний опір еквівалентного комутуючого

конденсатора; $C_K = 1,5C$ - еквівалентна ємність контуру комутації; λ - часовий інтервал (у кутових одиницях поточної частоти перетворювача частоти) від початку розряду конденсаторів до початку комутації струмів у фазах двигуна; γ - повний час (у кутових одиницях) комутації струмів у фазах двигуна.

Косинус кута Q між векторами струму і магнітного потоку представимо у вигляді

$$\cos Q = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega_2^2}}, \quad (2.41)$$

де $\omega_2 = \omega \frac{x_2}{r_2}$ - частота ковзання ω_2 у відносних одиницях, при

цьому за базову одиницю часу прийнята постійна часу ланцюга ротора при

розімкненому ланцюзі статора, тобто $t_\delta = \frac{L_2}{r_2} = \frac{x_2}{\omega_n \cdot r_2}$.

Можна зробити висновок, що характер комутаційних процесів в системі ПЧ-АД визначається:

- параметром схеми $\frac{\sqrt{x_c}}{\alpha}$ що характеризує ємність вузла комутації;
параметрами двигуна x_1 і x'_1 ;
- параметром режиму роботи приводу ω_2 , що характеризує зміну навантаження.

Природно, що для конкретного двигуна, у якого відомі параметри x_1 і x'_1 умова відсутності додаткового відкриття відсікаючих діодів визначається ємністю вузла комутації і параметрами режиму роботи приводу. Для оцінки умов виникнення комутації використовуємо залежність $\frac{\sqrt{x_c}}{\alpha} = f(\omega_2)$. Для різних параметрів двигуна отримуємо сімейство таких залежностей. З цього сімейства можливо знайти значення x_c що забезпечує надійну роботу ПЧ. При рішенні цієї задачі виходитимемо з того, що додаткове відкриття відсікаючого діода може відбутися, якщо напруга на комутуючому конденсаторі в контурі, що складається з цього закритого діода і провідного діода, стане менше лінійної напруги двигуна.

Для виключення явища додаткового відкриття діодів необхідне виконання наступних двох умов. Відповідно до першого з них величина напруги U_{c0} що встановлюється на конденсаторі в кінці процесу комутації, повинна бути більше максимального значення лінійною ЕРС двигуна, тобто

$$U_{c0} > \sqrt{3}E_2. \quad (2.42)$$

З обліком (6) дану умову можна переписати у вигляді:

$$\frac{\sqrt{x_c}}{\alpha} > \frac{6x_0^2}{\pi \cdot x_2 \cdot \sqrt{2x'_1}} \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+\omega_2^2}}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\omega_2^2}}. \quad (2.43)$$

Залежність $\frac{\sqrt{x_c}}{\alpha} = f(\omega_2)$ розрахуємо у відповідності (2.43) для вказаних вище параметрів двигуна приведена на рисунку 2.8 (крива 1). Відповідно до другої умови, величина комутаційного піку лінійної напруги двигуна в момент, віддалений на 60° від моменту закінчення комутації, не повинна перевищувати U_{c0} тобто

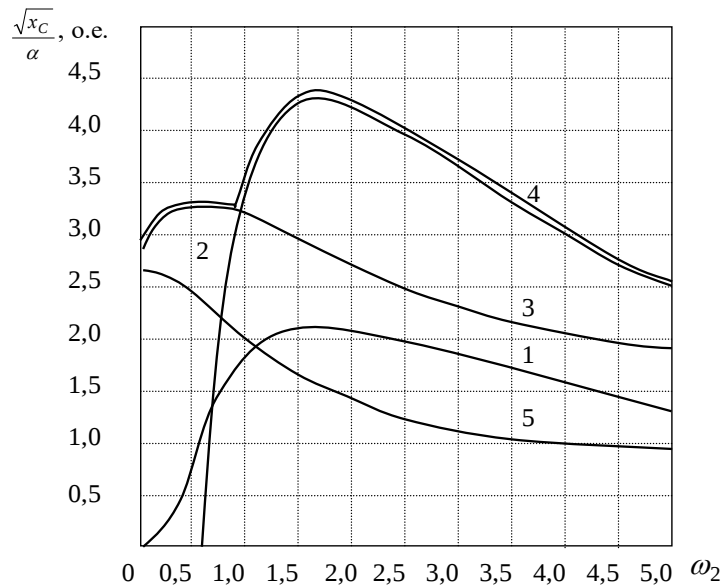
$$\sqrt{3}E_2 \cdot \cos Q + I_n \cdot \sqrt{2x'_1 \cdot x_c} > \sqrt{3}E_2 \cdot \cos\left(Q - \frac{\pi}{3}\right) + I_n \sqrt{2x'_1 \cdot x_c} \cdot \cos \frac{\pi}{3} \quad (2.44)$$

звідки з обліком (8) після перетворень отримуємо результуючий вираз:

$$\frac{\sqrt{x_c}}{\alpha} > \frac{6x_0^2}{\pi \cdot x_2 \cdot \sqrt{2x'_1}} \cdot \frac{(\sqrt{3}\omega_2 - 1)}{\sqrt{1+\omega_2^2}}. \quad (2.45)$$

Залежність $\frac{\sqrt{x_c}}{\alpha} = f(\omega_2)$, показана на рисунку 2.8 (крива 2). Співвідношення (2.45) є необхідною, але недостатньою умовою відсутності першого (через 60°) додаткового відкриття відсікаючого діода. Дійсно, при існуванні умови $\lambda + \gamma > \frac{\pi}{3}$ процеси комутації струмів у фазах в даній групі інвертора і лінійний перезаряд конденсаторів в іншій групі накладаються, а тривалість

інтервалу δ між закінченням процесу комутації в даній фазі і початком наступного процесу комутації стає менше $\frac{\pi}{3}$.



1 – 4 - за умови додаткового відкриття відсікаючих діодів,

5 – за умови завершеності комутаційних процесів

Рисунок 2.8 - Граничні залежності

При цьому до даного моменту максимуму піку (через 60°) напруга на конденсаторі зменшиться на величину $\frac{I_n \cdot x_c}{2\alpha} \cdot \left(\frac{\pi}{3} - \delta\right)$.

В цьому випадку умова відсутності першого додаткового відкриття відсікаючих діодів прийме вигляд:

$$\sqrt{3}E_2 \cdot \cos Q + I_n \cdot \sqrt{2x'_1 \cdot x_c} - \frac{I_n \cdot x_c}{2\alpha} \cdot \left(\frac{\pi}{3} - \delta\right) > \sqrt{3}E_2 \cos\left(Q - \frac{\pi}{3}\right) + \frac{I_n}{2} \sqrt{2x'_1 \cdot x_c}. \quad (2.46)$$

Звідки з урахуванням (2.39)

$$0 < \frac{\pi}{3} - \delta < \frac{12}{\pi} \cdot \frac{x_0^2}{x_2} \cdot \frac{\alpha^2}{x_c} \cdot \left[\cos^2 Q - \cos\left(Q - \frac{\pi}{3}\right) \right] + \sqrt{2x'_1} \cdot \frac{\alpha}{\sqrt{x_c}}. \quad (2.47)$$

Перетворимо (2.47) до вигляду:

$$\frac{2\pi}{3} - \delta < \frac{\pi}{3} + \frac{12}{\pi} \cdot \frac{x_0^2}{x_2} \cdot \frac{\alpha^2}{x_c} \cdot \left[\cos^2 Q - \cos\left(Q - \frac{\pi}{3}\right) \right] + \sqrt{2x_1'} \cdot \frac{\alpha}{\sqrt{x_c}}. \quad (2.48)$$

Враховуючи, що

$$\frac{2\pi}{3} - \delta = \lambda + \gamma = \frac{12}{\pi} \cdot \frac{x_0^2}{x_2} \cdot \cos^2 Q \cdot \frac{\alpha^2}{x_c} + \frac{\alpha}{\sqrt{x_c}} \cdot \left(1 + \frac{\pi}{2}\right) \cdot \sqrt{2x_1'}, \quad (2.49)$$

отримаємо:

$$\begin{aligned} & \frac{12}{\pi} \cdot \frac{x_0^2}{x_2} \cdot \cos^2 Q \cdot \frac{\alpha^2}{x_c} + \frac{\alpha}{\sqrt{x_c}} \cdot \left(1 + \frac{\pi}{2}\right) \cdot \sqrt{2x_1'} < \\ & < \frac{\pi}{3} + \frac{12}{\pi} \cdot \frac{x_0^2}{x_2} \cdot \frac{\alpha^2}{x_c} \cdot \left[\cos^2 Q - \cos\left(Q - \frac{\pi}{3}\right) \right] + \sqrt{2x_1'} \cdot \frac{\alpha}{\sqrt{x_c}}. \end{aligned} \quad (2.50)$$

З (15) гранична умова представлена у вигляді рівняння :

$$\frac{12}{\pi} \cdot \frac{x_0^2}{x_2} \cdot \left[\cos^2 Q - \cos\left(Q - \frac{\pi}{3}\right) \right] \cdot \left(\frac{\alpha}{\sqrt{x_c}} \right)^2 + \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{2x_1'} \cdot \frac{\alpha}{\sqrt{x_c}} - \frac{\pi}{3} = 0. \quad (2.51)$$

Вирішуючи рівняння (2.51) відносно величини $\frac{\alpha}{\sqrt{x_c}}$, з урахуванням

(2.41) отримуємо результуючий вираз:

$$\frac{\sqrt{x_c}}{\alpha} > \frac{12x_0^2(\sqrt{3}\omega_2 - 1)}{\pi x_2 \sqrt{1 + \omega_2^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2}{2} x_1' + \frac{8x_0^2(\sqrt{3}\omega_2 - 1)}{x_2 \sqrt{1 + \omega_2^2}} - \frac{\pi}{2} \sqrt{2x_1'}}}. \quad (2.52)$$

Залежність $\frac{\sqrt{x_c}}{\alpha} = f(\omega_2)$ відповідно нерівності (2.52), показана на рисунку 2.8 (крива 3). Оскільки умови (2.45) і (2.49) визначають відсутність одного і того ж явища – першого (через 60°) додаткового відкриття відсікаючого діода, то для того, щоб виключити це явище, необхідно для кожного значення ω_2 приймати жорсткіше з двох умов. Дійсно, аналіз комутаційних процесів показує, що режим, при якому $\lambda + \gamma > \frac{\pi}{3}$ (тобто

$\delta < \frac{\pi}{3}$), виникає при значеннях ω_2 менших величини, приблизно рівній одиниці.

Умову відсутності другого додаткового відкриття відсікаючого діода (через 120° після його виходу з роботи) можна сформулювати таким чином - напруга на комутуючому конденсаторі перед початком наступної комутації струмів у фазах в даній вентильній групі повинна бути більше лінійної напруги двигуна у цей момент, тобто з урахуванням (2.39):

$$\frac{\sqrt{x_c}}{\alpha} > \frac{12x_0^2 \cdot \cos Q \cdot \cos\left(Q - \frac{2\pi}{3}\right)}{\pi \cdot x_2 \cdot \sqrt{2x_1'}} \frac{\sqrt{x_c}}{\alpha} > \frac{6x_0^2}{\pi \cdot x_2 \cdot \sqrt{2x_1'}} \cdot \frac{\sqrt{3}\omega_2 - 1}{1 + \omega_2^2} \quad (2.53)$$

Таким чином, умови (2.45) і (2.53) співпадають (крива 2 на рисунку 2.8). Крива 4 на рисунку 2.8 відповідає другому етапу відкриття відсікаючого діода з урахуванням зменшення інтервалу комутації. При існуванні будь-якого режиму навантаження від холостого ходу ($\omega_2 = 0$) до перевантаження по струму ($\omega_2 = 5$) для виключення додаткового відкриття відсікаючих діодів

необхідно вибирати значення $\frac{\sqrt{x_c}}{\alpha}$ не менше максимального значення зі всіх кривих на рисунку 2.8. Згідно рисунком 2.8, необхідно прийняти $\frac{\sqrt{x_c}}{\alpha} = 4,385$. В цьому випадку, вже при значенні $\omega_2 = 3$ (номінальне навантаження) отримуємо 80% перенапруги (рисунок 2.9, крива 1), що є недопустимим при практичній експлуатації.

З приведенного вище аналізу для зниження перенапруг необхідно збільшувати ємність комутуючих конденсаторів порівняно зі значеннями, визначеними величиною $\frac{\sqrt{x_c}}{\alpha} = 4,385$. При цьому необхідно визначити верхню межу значення ємності конденсаторів.

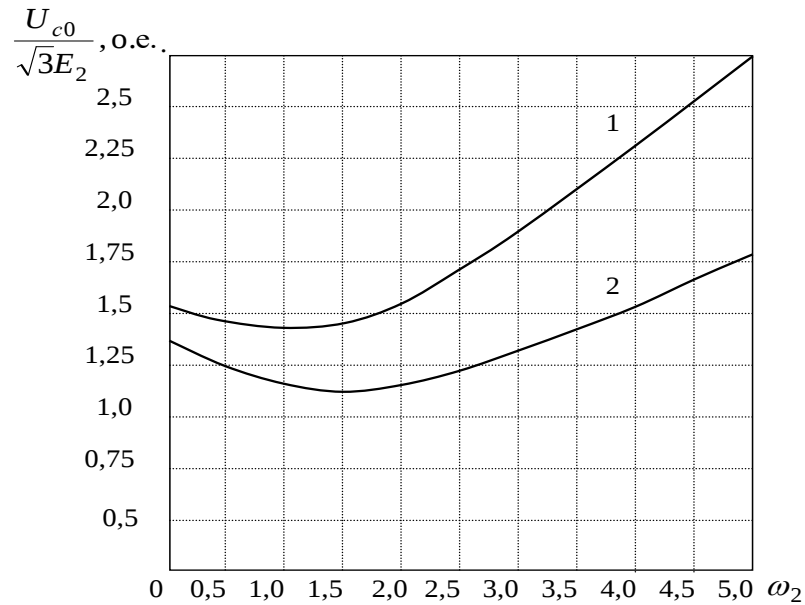
Верхнє граничне значення ємності визначається умовою, яку можна сформулювати наступним чином: сумарна тривалість інтервалу лінійного перезаряду конденсатора і тривалість інтервалу комутації струмів у фазах двигуна не повинні перевищувати тривалості інтервалу повторюваності комутаційних процесів в даній (анодній або катодній) групі вентилів перетворювача, тобто $\lambda + \gamma \leq \frac{2\pi}{3}$. Порушення даної умови викликає істотні зміни величини λ при щонайменшій зміні режиму, що у свою чергу обумовлює виникнення автоколивань в ТВД, які принципово не можуть бути усунені системою регулювання [9]. В результаті порушується нормальна робота ПЧ, тобто дана нерівність є визначальною умовою працездатності схеми з урахуванням (2.53) отримуємо:

$$\frac{12}{\pi} \cdot \frac{x_0^2}{x_2} \cdot \cos^2 Q \left(\frac{\alpha}{\sqrt{x_c}} \right)^2 + \left(1 + \frac{\pi}{2} \right) \cdot \sqrt{2x_1'} \cdot \frac{\alpha}{\sqrt{x_c}} - \frac{2\pi}{3} = 0. \quad (2.54)$$

Вирішуючи рівняння щодо величини $\frac{\alpha}{\sqrt{x_c}}$ отримуємо з урахуванням

(2.45)

$$\frac{\sqrt{x_c}}{\alpha} > \frac{24x_0^2}{\left[\sqrt{\left(1 + \frac{\pi}{2} \right)^2 2x_1' + \frac{32x_0^2}{x_2} \cdot \frac{1}{1 + \omega_2^2}} - \left(1 + \frac{\pi}{2} \right) \sqrt{2x_1'} \right] \cdot (1 + \omega_2^2) x_2 \pi}. \quad (2.55)$$



1 - за умови відсутності додаткового відкриття відсікаючих діодів, 2 – за умови завершеності процесів

Рисунок 2.9 – Залежності $\frac{U_{c0}}{\sqrt{3}E_2} = f(\omega_2)$ при виборі x_c

Залежність $\frac{\sqrt{x_c}}{\alpha} = f(\omega_2)$ побудована згідно (2.55), приведена на рисунку 2.8 (крива 5). При визначенні ємності за даною умовою слід мати на увазі, що найбільш важким є режим холостого ходу ($\omega_2 = 0$), оскільки саме в цьому режимі перезаряд конденсатора малим струмом може затягнутися до тривалості інтервалу повторюваності $\frac{\pi}{3}$. Режим холостого ходу дає значення

$$\frac{\sqrt{x_c}}{\alpha} = 2,725, \text{ що дозволяє істотно знизити перенапругу на двигуні (рисунк}$$

2.9 – крива 2).

Уточнимо вплив параметрів двигуна. Для цього побудуємо залежність

$$\frac{\sqrt{x_c}}{\alpha} = f(\omega_2) \text{ при } x_0 = var. \text{ На рисунку 2.10 приведені залежності}$$

$$\frac{\sqrt{x_c}}{\alpha} = f(\omega_2) \text{ за умови (2.55) для наступних значень } x_0 = 2,0; 2,5; 3,0. \text{ Оскільки}$$

найбільш небезпечним є режим холостого ходу ($\omega_2 = 0$), приведемо

залежність величини $\frac{\sqrt{x_c}}{\alpha} = f(x_0)$ для цього режиму (крива 1 на рисунку 2.10). Крива 1 з високою точністю апроксимується залежністю $\frac{\sqrt{x_c}}{\alpha} = 1.35(x_0) + 0,4$ (крива 2 на рисунку 2.10). По значеннях x_c , які визначаються із значень x_0 на рисунку 2.10 можна знайти величину комутаційних перенапруг на двигуні $\frac{U_{c0}}{\sqrt{3}E_2}$.

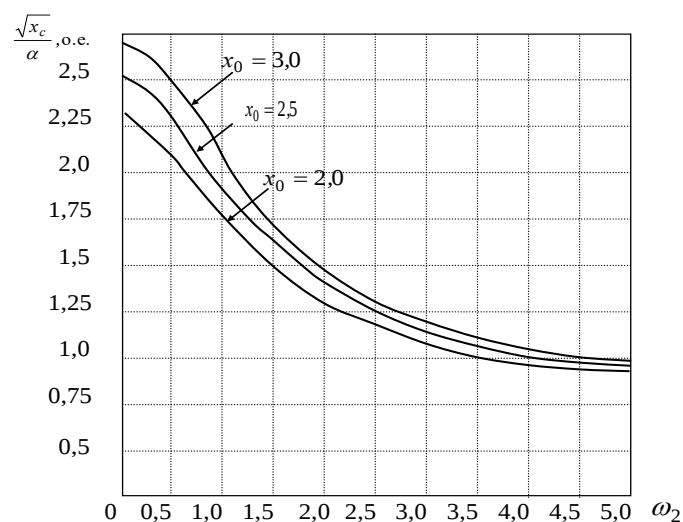


Рисунок 2.10 - Залежності граничних значень $\frac{\sqrt{x_c}}{\alpha} = f(\omega_2)$ для різних величин x_0

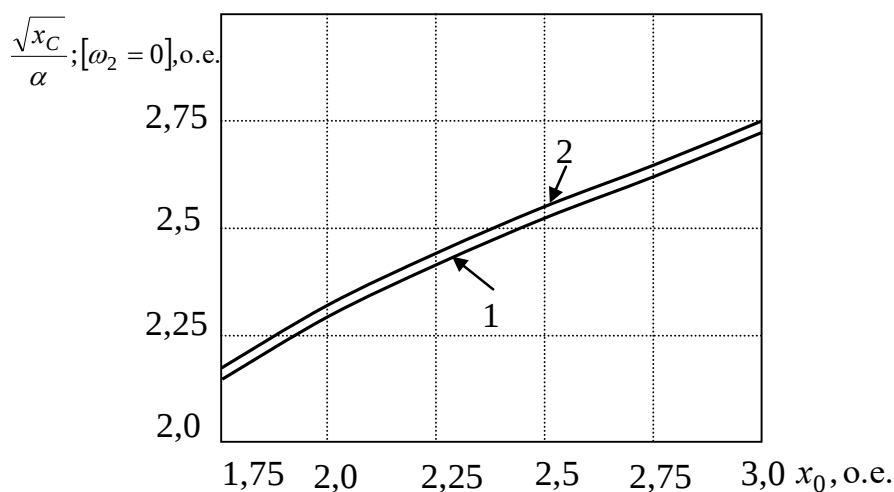


Рисунок 2.11 - Залежності $\frac{\sqrt{x_c}}{\alpha} = f(x_0)$ (крива 1) та апроксимуюча залежність (крива 2)

Відповідні залежності $\frac{U_{c0}}{\sqrt{3}E_2} = f(\omega_2)$ для різних значень x_0 приведені

на рисунку 2.11 ($x_0 = 3,0$ крива 1; $x_0 = 2,5$ - крива 2; $x_0 = 2,0$ - крива 3).

Для аналізу електромагнітних процесів в колі ПЧ і АД, розглянемо варіант використання трифазної мостової схеми (рисунок 2.13).

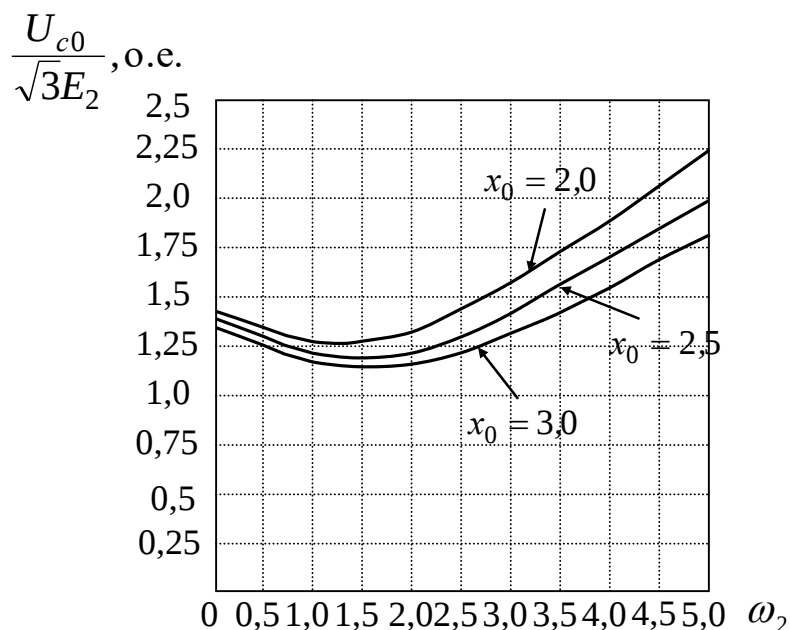


Рисунок 2.12 – Сімейство залежностей $\frac{U_{c0}}{\sqrt{3}E_2} = f(\omega_2)$ для різних значень x_0

Проведемо на початку якісний аналіз процесів, що відбуваються в перетворювачах частоти. Будемо виходити з допущення про можливість роздільного розгляду комутаційних і робочих процесів в перетворювачах частоти. Це допущення не приводять до помітних похибок в аналізі, оскільки тривалість робочого циклу і циклу комутації істотно різні. При використанні прийнятого допущення процеси в перетворювачах частоти можна розглядати для його схеми, що ідеалізується, в якій відсутні кола комутації і в якій тиристори представлені ідеальними повністю керованими ключами (рисунок 2.13), схема заміщення (рисунок 2.14). У цій схемі АД представлено

еквівалентною одиницею з параметрами x'_1, r_K, E_2 . Циклічність процесів в схемі в сталому режимі відповідає $\frac{\pi}{3}$. Проаналізуємо один цикл роботи даної схеми. У випадку коли включені тиристири VS1 і VS6 струм I_n протікає у фазах А і С перетворювача частоти. Конденсатори заздалегідь заряджені з полярністю, вказаною на рисунку 2.13.

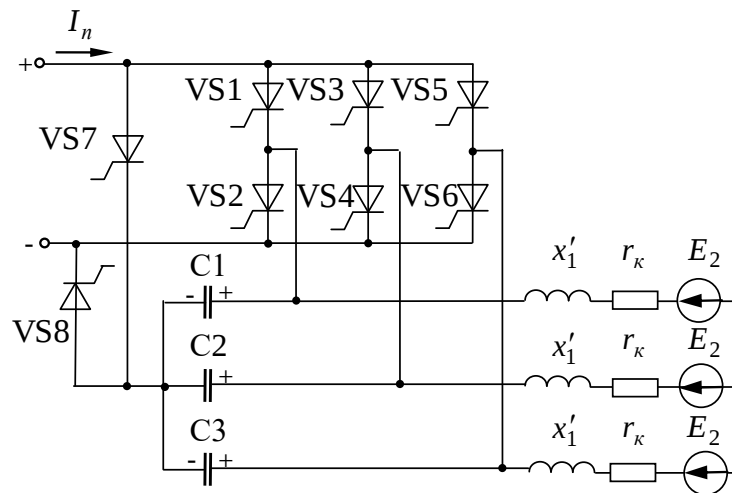


Рисунок 2.13 – Частотно-керований АД

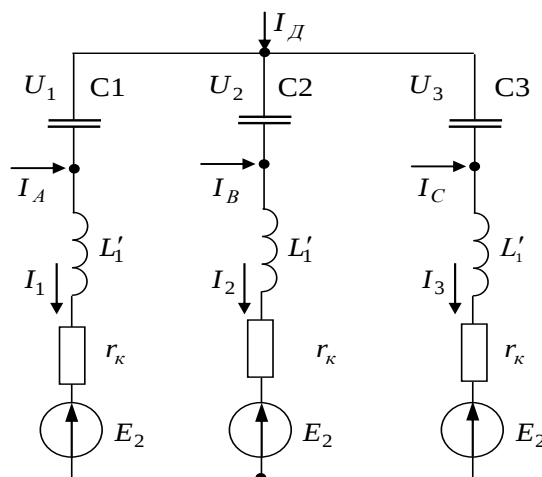


Рисунок 2.14 – Розрахункова схема заміщення

Для схеми, показаної на рисунку 2.14 запишемо рівняння рівноваги струмів і напруг в наступному вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_1 + C \cdot \frac{dU_1}{dt} = I_A; \\ I_2 + C \cdot \frac{dU_2}{dt} = I_B; \\ I_3 + C \cdot \frac{dU_3}{dt} = I_C; \\ I_A + I_B + I_C = 0; \\ U_1 + I_1 r_K + L'_1 \cdot \frac{dI_1}{dt} = U_2 + I_2 r_K + L'_1 \cdot \frac{dI_2}{dt}; \\ U_1 + I_1 r_K + L'_1 \cdot \frac{dI_1}{dt} = U_3 + I_3 r_K + L'_1 \cdot \frac{dI_3}{dt}. \end{array} \right. \quad (2.56)$$

Вирішення даної системи необхідно проводити з використанням персонального комп'ютера (ПК). Перетворимо систему диференціальних рівнянь до вигляду, зручного для використання. У системі струми I_A, I_B, I_C приймають три значення:

- I_n якщо включені тиристори VS1, VS3, VS5;

- I_n якщо включені VS2, VS4, VS6;

0, якщо не проводять відповідно VS1, VS2, VS3, VS4, VS5, VS6.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dU_1}{dt} = \frac{I_A - I_1}{C}; \\ \frac{dU_2}{dt} = \frac{I_B - I_2}{C}; \\ \frac{dU_3}{dt} = \frac{I_C + I_1 + I_2 - I_n}{C}; \\ \frac{dI_1}{dt} = \frac{U_2 - U_1 + r_K \cdot I_2 - r_K \cdot I_1}{L'_1} + \frac{dI_2}{dt}; \\ \frac{dI_2}{dt} = \frac{U_3 - U_2 - 2 \cdot r_K \cdot I_2 - r_K \cdot I_1 + I_n \cdot r_K}{L'_1} - 2 \cdot \frac{dI_2}{dt}. \end{array} \right. \quad (2.57)$$

Розрахунок на ПК достатньо провести для одного періоду вихідної частоти, протягом 12 – ти етапів, згідно таблиці 2.1. Використовуватимемо

різні значення струмів I_A, I_B і I_C . Розрахунок проведено за допомогою математичного пакету MATCAD, при вихідній частоті 20Гц , тривалості інтервалу $\gamma = \frac{\pi}{18}$ та таких параметрах перетворювача частоти:

$$K_1 = \frac{C}{L'_1} = 10; 25; 50; K_2 = \frac{r_K}{L'_1} = 0,35; L'_1 = 0,5.$$

Таблиця 2.1 - Послідовність роботи тиристорів в схемі на рисунку 2.13

Тиристори	$\frac{\pi}{3}$		$\frac{\pi}{3}$		$\frac{\pi}{3}$		$\frac{\pi}{3}$		$\frac{\pi}{3}$		$\frac{\pi}{3}$	
	$\frac{\pi}{3} - \gamma$	γ	$\frac{\pi}{3} - \gamma$	γ	$\frac{\pi}{3} - \gamma$	γ	$\frac{\pi}{3} - \gamma$	γ	$\frac{\pi}{3} - \gamma$	γ	$\frac{\pi}{3} - \gamma$	-
VS1	+										+	
VS2					+	+	+					
VS3			+	+	+							
VS4									+	+	+	
VS5							+	+	+			
VS6	+	+	+									
VS7		+				+				+		
VS8				+				+				

Результати розрахунку приведені на рисунку 2.15. Інтервал I починається з моменту відкриття тиристора VS7. При цьому починається перезаряд конденсатора через тиристор VS7. Інтервал I закінчується, коли струм в комутуючому контурі стає рівним нулю, тобто при $t_1 = \frac{\pi}{\beta}$,

де $\beta = \sqrt{\omega^2 - \alpha^2}$ - власна кутова частота комутуючого контура з урахуванням загасання;

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} - \text{те ж без урахування загасання};$$

$$\alpha = \frac{r}{2L} - \text{декремент загасання};$$

r - еквівалентний опір контуру комутації.

На інтервалі II всі вентиля закриті, струм в комутуючому конденсаторі рівний нулю, а напруга на ній залишається постійною. Інтервал III починається з моменту відкриття тиристора VS2. В цей час конденсатор C до заряджається через тиристори VS7 і VS2. Після до зарядження конденсатора C струми в контурі рівні нулю і напруга на конденсаторі незмінна. Інтервал V починається з моменту відкриття тиристора 8. Починається перезаряд конденсатора через вентиль 2' і тиристор VS8. На інтервалі V так само як і на інтервалі II струм рівний нулю, а напруга на конденсаторі незмінна. Після відкриття тиристора VS1 починається до заряджання конденсатора через тиристори VS1 та VS8.

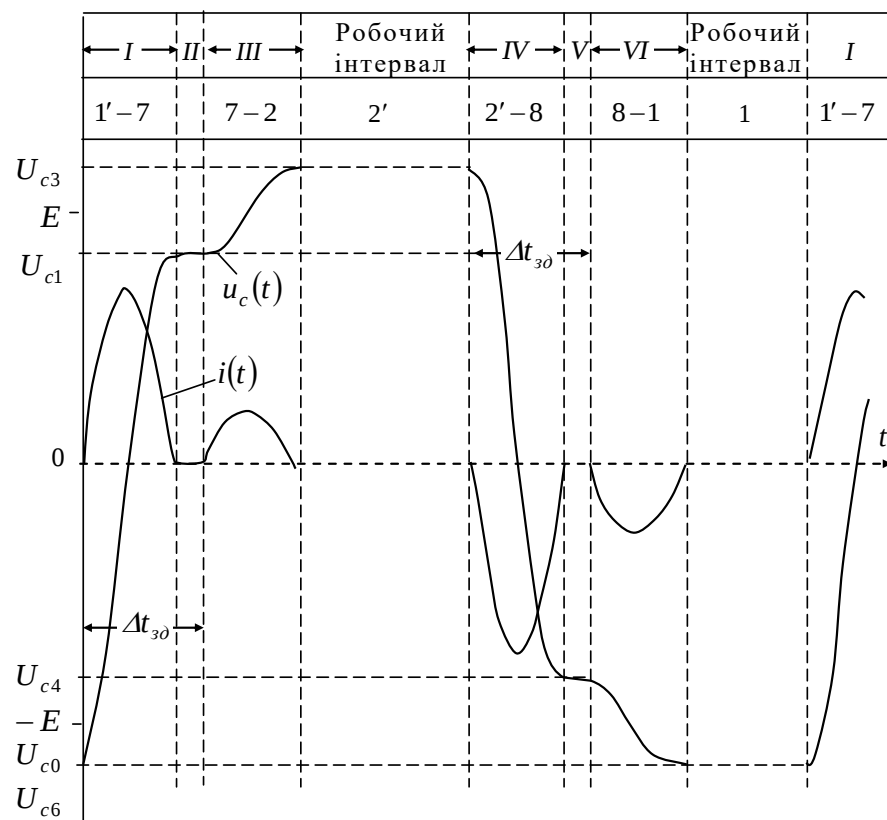


Рисунок 2.15 - Діаграма комутаційних процесів при роботі ПЧ

Далі до моменту відкриття тиристора VS7 струм в контурі рівний нулю, а напруга на конденсаторі незмінна.

У перетворювачі частоти з навантаженням на відміну від ненавантаженого варіанту роботи на I інтервалі при відкритті тиристора VS7 тиристор VS1 закривається не одразу, а залишається відкритим до тих пір, поки струм в комутуючому конденсаторі не досягає значення, рівного значенню струму навантаження. Тільки при цьому закривається тиристор VS1 і відкривається вентиль 1' через який проходить струм, рівний різниці струму комутації і струму навантаження.

Характер протікання комутаційних процесів на інтервалі II залежить від величини напруги на конденсаторі в кінці інтервалу I, тобто залежить від величини U_{c1K} . Тут можливі три режими роботи. Перший режим виникає, якщо напруга на конденсаторі в кінці інтервалу I менше напруги джерела живлення за вирахуванням падіння напруги на активному опорі контуру комутації, тобто у разі, коли $U_{c1K} < E - I_n r$. В цьому випадку на інтервалі II відбуватиметься заряд конденсатора струмом навантаження I_n . Тиристор VS2 відкривається через час Δt_{30} з моменту початку інтервалу I. На цьому і закінчується інтервал II. Другий режим роботи схеми також має місце при $U_{c1K} < E - I_n r$. Проте в цьому режимі через великі струми навантаження комутаційний інтервал II закінчується до відкриття тиристора VS2. Третій режим настає при $U_{c1K} > E - I_n r$. Цей режим відповідає максимальному струму навантаження, коли вентиль 2' відкривається відразу ж після закриття вентиля 1'. У цьому режимі комутаційний інтервал II відсутній.

Аналізуючи отримані часові діаграми, можна зробити висновок про те, що напруга на конденсаторі досягає максимального значення до кінця інтервалу III і, як правило, $U_{c3K} > E$. У зв'язку з цим максимальна пряма напруга на тиристорах VS1 і VS2 і максимальна зворотна напруга на вентилях 1' 2' Максимальна пряма напруга, прикладена до тиристора VS8 буде дорівнювати U_{c3K} . Максимальна зворотна напруга, прикладена до тиристора VS7 буде дорівнювати $U_{c3K} - E$. Таким чином в даному ПЧ

силові тиристори і вентиля, які шунтують їх, повинні бути вибрані на напругу джерела живлення E , а допоміжні тиристори – на пряму напругу U_{c3K} і зворотну напругу $U_{c3K} - E$.

Із збільшенням струму навантаження величина U_{c3K} збільшується. При цьому час, який надається для відновлення замикаючих властивостей тиристора зменшується і може знизитися до критичної величини, яка приблизно дорівнює $t = 30 \text{ мксек}$. Для забезпечення нормальної роботи перетворювача частоти слід вибирати час відновлення замикаючих властивостей не менше $60 - 120 \text{ мксек}$.

Слід звернути увагу також на ту обставину, що струм перетворювача частоти для даної схеми має явно виражений нелінійний характер. Як видно з приведених графіків наявність вільної складової струму викликає істотне спотворення кривої вихідного струму, що викликає збільшення втрат в двигуні. Спотворюється також крива напруги на конденсаторі, що істотно збільшує втрати в конденсаторі. Для придушення вільних коливань доцільно паралельно навантаженню включати так званий «комутаційний» випрямляч. У ряді випадків паралельно навантаженню доцільно включати додаткові фільтрові конденсатори [39, 43]. Подібні рішення, які забезпечують придушення високочастотних коливань, роблять схему ПЧ не тільки складнішою за її початковий варіант, але й складніше за варіант схеми ПЧ із конденсаторами. Оскільки простота схемної реалізації є вирішальною при визначенні базової схеми для ПЧ з покращеними технічними показниками, використання перетворювача частоти з відсіченими від навантаження комутуючими конденсаторами є більш актуальною.

Разом із цим, інтенсивно ведуться роботи по застосуванню інших типів електричних машин таких, як синхронні з постійними магнітами, реактивні індукторні, а також тягові двигуни з нетрадиційними магнітними системами. Перераховані типи тягових двигунів, завдяки успіхам у розвитку

напівпровідникової техніки, доведені до практичної реалізації в якості серійних зразків.

Також перспективним напрямком розвитку залізничної техніки є впровадження систем з лінійними електромеханічними перетворювачами (ЕМП), що можуть бути використані як на тяговому рухомому складі (тягові генератори тепловозів), так і у системах станційної автоматизації (приводи стрілочних переводів).

Вирішення цієї проблеми потребує ідентифікації параметрів рівнянь математичних моделей лінійного та вентильно-індукторного ЕМП. Для цього необхідно встановити залежності між потокозчепленням, з одного боку, та узагальненими координатами і їх похідними з іншого боку. Для цього в роботі [79] запропоновано провести комплекс цифрових експериментів і визначити ці залежності. Для визначення значення потокозчеплення було проведено розрахунок магнітного поля ЕМП в двовимірній постановці з використанням методу кінцевих елементів для плоскопаралельної задачі. За результатами аналізу магнітного поля визначені значення потокозчеплення ЕМП і значення електромагнітної сили або моменту.

Отримані в дослідженні результати дають змогу спростити розробку математичних моделей перспективних типів ЕМП, що мають значні не лінійності, із збереженням точності розрахунків.

2.3 Імітаційне моделювання пускових та несиметричних режимів роботи тягових двигунів

З точки зору теорії автоматичного керування, АД являє собою складний нелінійний багатовимірний об'єкт з великою кількістю

математичних моделей, що обумовлено різними формами математичного опису АД.

Для дослідження асинхронного двигуна була використана еквівалентна двофазна модель в нерухомій системі координат α, β . Вона створена шляхом розкладання просторових векторів фазних величин на ортогональні осі прямокутної системи координат α, β . При цьому вісь α співпадає з віссю a трифазної координатної системи a, b, c . [24]

Для отримання ортогональних складових вхідних сигналів статора із трифазних скористаємося координатним перетворенням Кларк (2.58):

$$\begin{cases} U_{\alpha} = U_A \\ U_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (U_B - U_C) \end{cases} \quad (2.58)$$

Система рівнянь, які описують роботу асинхронного двигуна в нерухомій системі координат α, β в операторній формі має вигляд:

$$\begin{cases} U_{1\alpha} = R_e \cdot (T_e \cdot p + 1) \cdot I_{1\alpha} - \frac{R_2' \cdot L_m}{L_2^2} \cdot \psi_{2\alpha} - \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\beta}; \\ U_{\beta} = R_e \cdot (T_e \cdot p + 1) \cdot I_{1\beta} - \frac{R_2' \cdot L_m}{L_2^2} \cdot \psi_{2\beta} + \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\alpha}; \\ 0 = (T_2 \cdot p + 1) \cdot \psi_{2\alpha} - L_m \cdot I_{1\alpha} - \frac{L_2}{R_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\alpha}; \\ 0 = (T_2 \cdot p + 1) \cdot \psi_{2\beta} - L_m \cdot I_{1\beta} - \frac{L_2}{R_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\beta}; \\ M_{EM} = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot (\psi_{2\alpha} \cdot I_{1\beta} - \psi_{2\beta} \cdot I_{1\alpha}); \\ \omega = \frac{1}{J \cdot p} \cdot (M_{EM} - M_C) \end{cases} \quad (2.59)$$

$$\text{де } R_e = R_1 + R_2' \cdot \frac{L_m^2}{L_2^2}; T_e = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_e}; T_2 = \frac{L_2}{R_2}; \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2} \quad (2.60)$$

Для моделювання був обраний тяговий асинхронний електродвигун АД914-У. Результати моделювання та отримані характеристики двигуна АД914-У в програмі ANSYS наведені у додатках В та Г, а паспортні дані в таблиці 2.2:

Таблиця 2.2 – Паспортні дані електродвигуна АД914-У

Найменування параметра	Значення
Номінальна лінійна напруга, В	1870
Частота струму статора, Гц	55,9
Потужність на валу, кВт	1200
Номінальний струм, А	450
Номінальний електромагнітний момент, Н·м	10400
Частота обертання ротора, об/хв	1110
ККД	0,955
Коефіцієнт потужності	0,870
Активний опір фази статора, Ом	0,0026
Активний приведений опір обмотки ротора, Ом	0,0181
Індуктивний опір фази статора, Ом	0,213
Індуктивний приведений опір обмотки ротора, Ом	0,161
Індуктивний опір намагнічуючого контура, Ом	6,48

Для отримання трифазного струму скористаємося зворотнім перетворенням Кларк:

$$\begin{cases} I_{1A} = I_{1\alpha}; \\ I_{1B} = -\frac{1}{2} \cdot I_{1\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{1\beta}; \\ I_{1C} = -\frac{1}{2} \cdot I_{1\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{1\beta}. \end{cases} \quad (2.61)$$

На основі системи рівнянь (2.59) в програмному середовищі Matlab Simulink була розроблена імітаційна модель асинхронного двигуна в нерухомій системі координат α, β (рисунок 2.16).

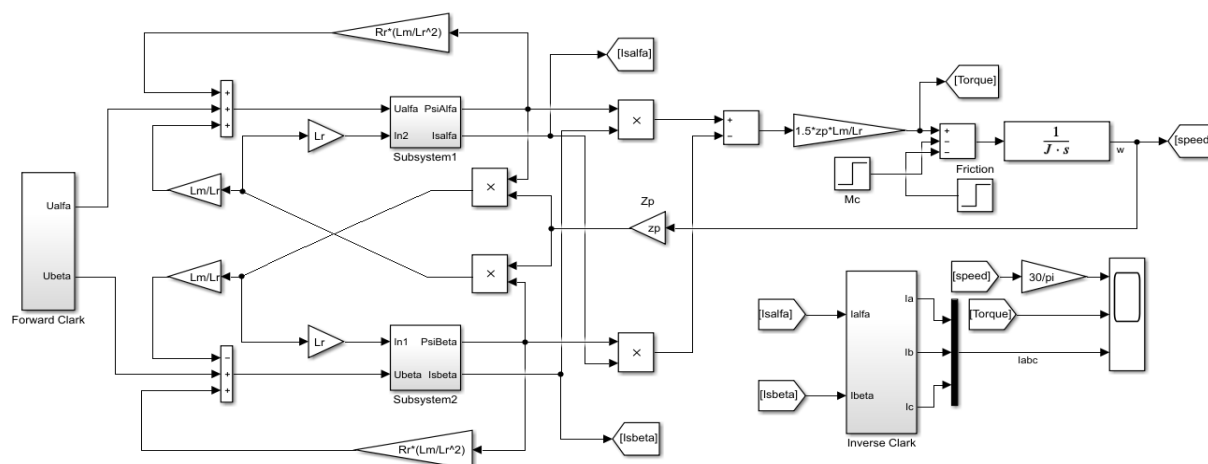


Рисунок 2.16 – Імітаційна модель асинхронного двигуна в нерухомій системі координат

При моделюванні динамічних процесів в нерухомій системі координат трифазний асинхронний двигун зводять до еквівалентної двофазної, у якій обмотки зміщені на 90° , що відповідає живленню двигуна синусоїдальною двофазною напругою з фазою у 90° . Основною відмінністю від існуючих математичних моделей є те, що в даній моделі було використане координатне перетворення 3ф/2ф для завдання трифазної напруги, що дозволить змодельовати несиметричність джерела живлення як по амплітуді, так і по фазі. Для того, щоб показати характеристику трифазного струму було використане координатне перетворення 2ф/3ф. Крім цього, блоком Friction було змодельовано процес тертя в двигуні. Значення тертя було прийнято як 1% від номінального електромагнітного моменту.

В результаті моделювання отримано характеристики швидкості обертання, електромагнітного моменту та трифазного струму при прямому пуску АД при симетричному режимі живлення (рисунок 2.17).

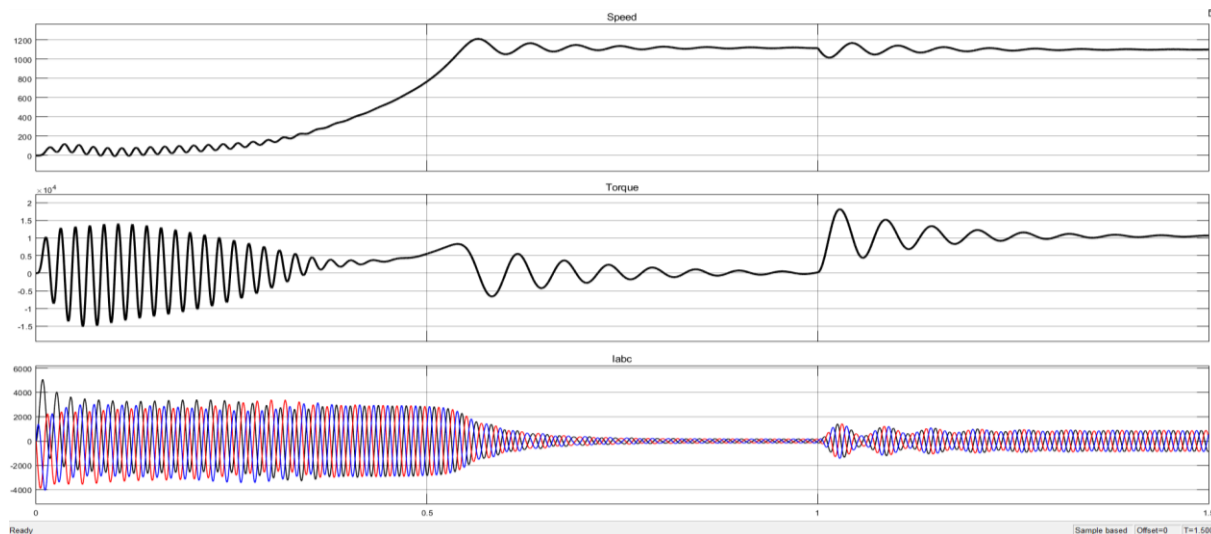


Рисунок 2.17 – Характеристики двигуна при симетричному режимі живлення

При несиметрії напруги в асинхронних електродвигунах виникають магнітні поля, що обертаються з подвійною синхронною швидкістю в протилежному напрямку обертання ротора. В результаті цього виникає гальмівний електромагнітний момент та нагрів двигуна за рахунок струмів подвійної частоти. Термін служби повністю навантаженого АД, який працює при несиметрії напруги 4% зменшується в 2 рази, при несиметрії 5% потужність двигуна зменшується на 5 - 10%.

Аналіз впливу несиметрії напруг на характеристики АД можна проводити з використанням методу симетричних складових, який базується на принципах лінеаризації та накладення симетричних складових напруг прямої $U_{пр}$, зворотної $U_{обр}$ та нульової U_0 послідовностей. [47].

У випадках, коли в системі первинних напруг присутня нульова послідовність, по обмотці статора АД протікають три однофазних струми нульової послідовності, які не створюють обертового магнітного поля і обертового моменту в АД. [25].

Для фази A напруги послідовностей визначаються зі співвідношень

$$\begin{aligned}
\vec{U}_{Anp} &= \frac{1}{3}(\vec{U}_A + a\vec{U}_B + a^2\vec{U}_C); \\
\vec{U}_{Azвор} &= \frac{1}{3}(\vec{U}_A + a^2\vec{U}_B + a\vec{U}_C);, \\
\vec{U}_{A0} &= \frac{1}{3}(\vec{U}_A + \vec{U}_B + \vec{U}_C).
\end{aligned}
\tag{2.62}$$

де $a = e^{-j2\pi/3}$ – одиничний вектор, множення на який дає кутовий зсув на 120° ; $\vec{U}_A, \vec{U}_B, \vec{U}_C$ – напруги фаз несиметричної системи. Вектори напруг $\vec{U}_{Bnp}, \vec{U}_{Cnp}$ визначаються вектором $\vec{U}_{Anp}$, вектори напруг $\vec{U}_{Bзвор}, \vec{U}_{Cзвор}$ – вектором $\vec{U}_{Azвор}$, вектори напруг $\vec{U}_{B0}, \vec{U}_{C0}$ – вектором $\vec{U}_{A0}$.

Несиметрія напруг характеризується коефіцієнтами несиметрії для зворотної та нульової послідовностей:

$$k_{звор, \%} = \frac{U_{Azвор}}{U_{An}} \cdot 100\%, \quad k_{0, \%} = \frac{U_{A0}}{U_{An}} \cdot 100\%,
\tag{2.63}$$

Нормально допустиме та гранично допустиме значення коефіцієнта несиметрії для зворотної послідовності в точках загального приєднання до електричних мереж нормується 2 та 4% відповідно. Однак, в системі тягового електропостачання змінного струму значення коефіцієнта несиметрії може сягати 6-12%.

Для імітаційного моделювання впливу несиметрії на АД було використане програмне забезпечення Ansys Simplorer (рисунок 2.18). Імітаційна модель складеться із джерела трифазної напруги, асинхронного двигуна, блоку завдання несиметрії фазної напруги джерела живлення (1) та блоку завдання моменту опору (2). У якості тестового двигуна був використаний тяговий асинхронний електродвигун АД914-У з параметрами наведеними на рисунку 2.19.

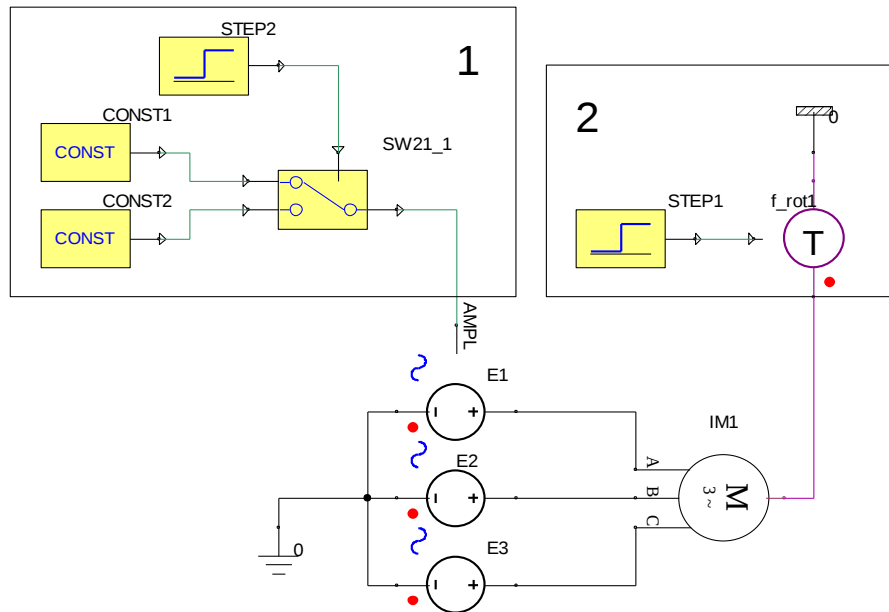


Рисунок 2.18 – Імітаційна модель асинхронного двигуна в нерухомій системі координат

Parameters - IM1 - Induction Machine

Parameters | Output / Display

Name: IM1 ☒ Show

Description	Name	Value	Units
Number of Pole Pairs	P	3	
Moment of Inertia	J	15	kgm2
Main Inductance	LM	0.018	H
Stator Resistance	R1	0.0226	ohm
Stator Leakage Inductance	LS1	0.0006078	H
Rotor Resistance (related to stator side)	R2	0.0181	ohm
Rotor Leakage Inductance (related to stator side)	LS2	0.0004594	H
Initial Current Stator Phase a	I1A0	0	A
Initial Current Stator Phase b	I1B0	0	A
Initial Current Stator Phase c	I1C0	0	A
Initial Current Rotor Phase a	I2A0	0	A
Initial Current Rotor Phase b	I2B0	0	A
Initial Current Rotor Phase c	I2C0	0	A
Initial Rotor Position	PHI0	0	deg
Initial Rotor Speed	N0	0	rpm

Рисунок 2.19 – Параметри тягового асинхронного двигуна АД914-У

Для моделювання несиметрії напруги використовується перемикач, який змінює значення фазної напруги з номінального ($U_n = 1100$ В) на понижену ($U = 1078$ В), що відповідає несиметрії у 2 % в момент часу $t = 1,4$ с. Результати моделювання приведені на рисунках 2.20-2.21.

На рисунку 2.20 показано графік частоти обертання АД при несиметрії напруги живлення. На рисунку 2.21 зображений порівняльний графік електромагнітного моменту при симетричному та несиметричному режимах живлення.

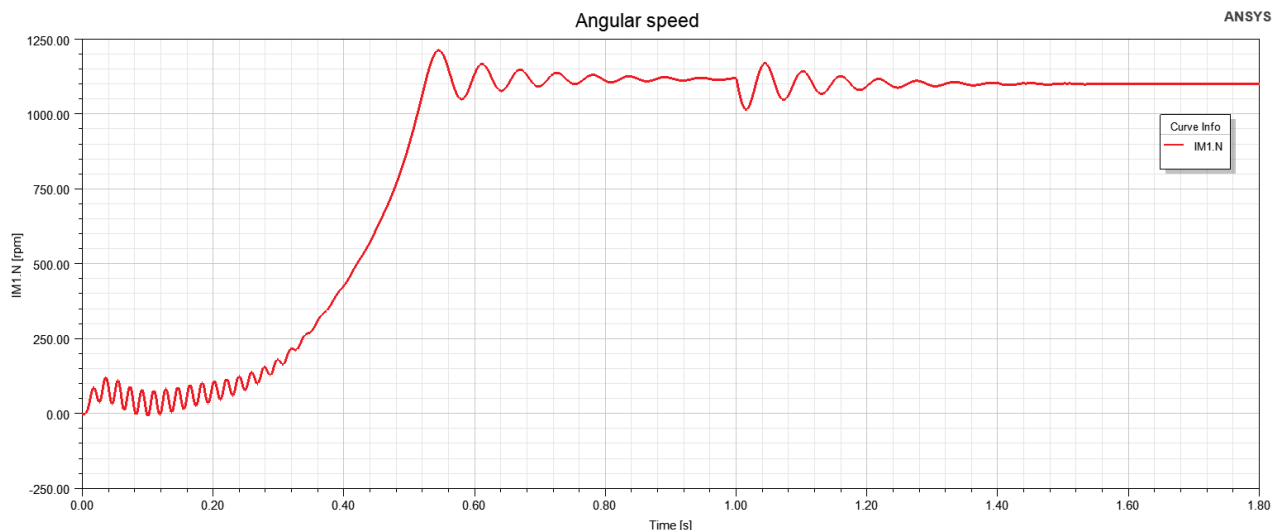


Рисунок 2.20 – Графік частоти обертання АД

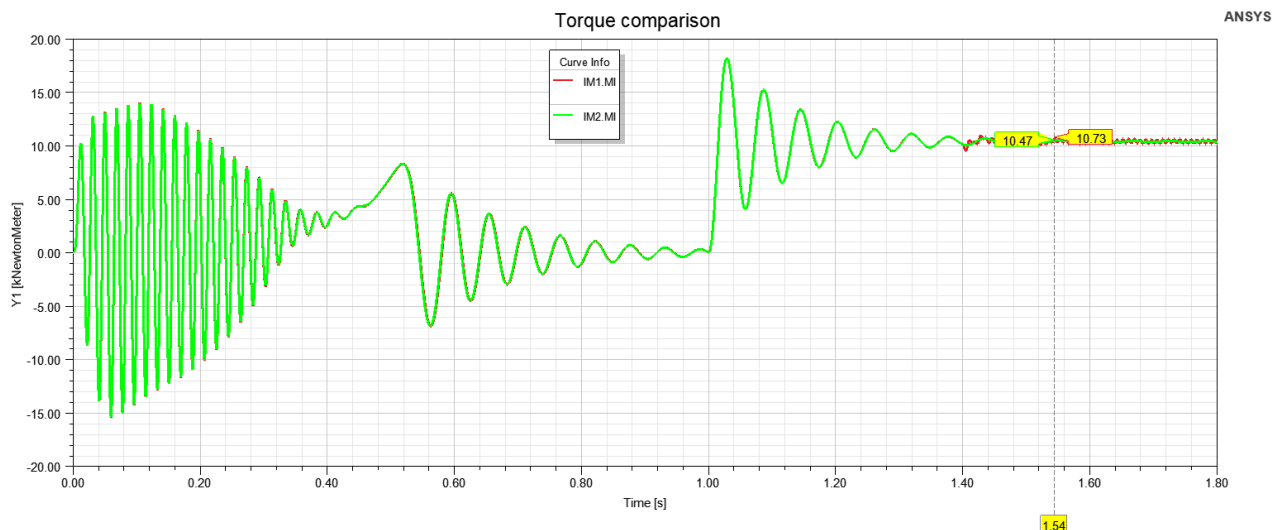


Рисунок 2.21 – Характеристика електромагнітного моменту при симетричному та несиметричному режимі живлення

З графіків видно, що відхилення напруги однієї фази на 4 % призводить до зниження частоти обертання в межах 1 об/хв та значних пульсацій електромагнітного моменту $\pm 5\%$ від номінального значення, що призводить

до втрат активної потужності, нерівномірного споживання електроенергії та старіння ізоляції за рахунок додаткового нагріву обмоток двигуна.

2.4 Моделювання електромагнітних процесів в аварійних режимах роботи ТЕД

Процес експлуатації ТЕД рухомого складу може супроводжуватися виникненням аварійних режимів, що характеризуються струмовими перевантаженнями та можуть призвести до пошкоджень у силових електричних колах і механічній частині електропривода. Тому дослідження процесів, що виникають при аварійних режимах, є актуальним, зокрема для створення систем діагностування та захисту тягового обладнання. Математичне (імітаційне) моделювання є оптимальним методом дослідження аварійних режимів, оскільки проведення натурних експериментів на реальних ТЕД ускладнене.

Для дослідження електромагнітних процесів при аварійних режимах, а саме при короткому замиканні силового ключа автономного інвертора напруги та зникненні напруги живлення, було розроблено імітаційну модель векторного керування з просторово векторною ШІМ тяговим асинхронним електроприводом [38], силова частина якої складається з тягового асинхронного електродвигуна АД914-У, дворівневого інвертора, вхідного фільтра, блока регулювання напруги ланки постійного струму (рисунок 2.22).

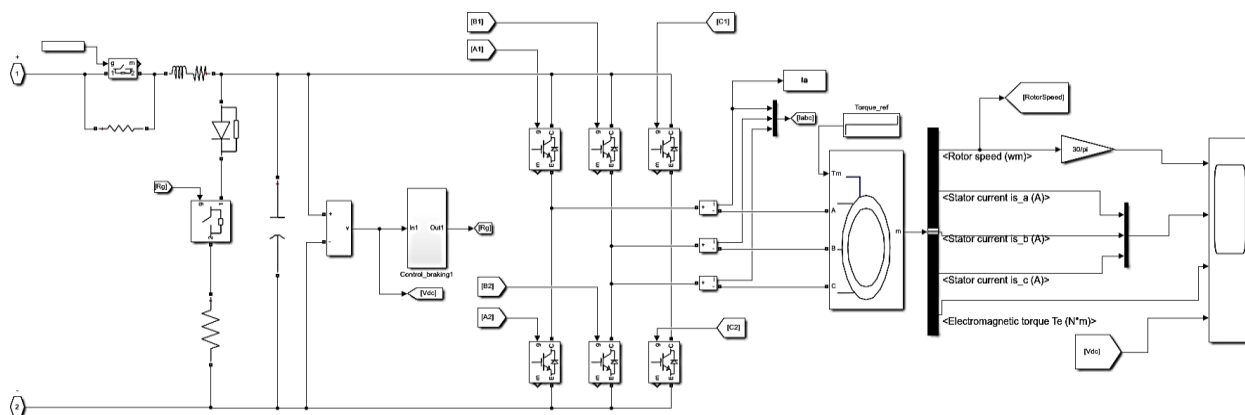


Рисунок 2.22 - Силова частина системи

Для аналізу змін електромагнітних процесів, що протікають під час аварійних режимів, насамперед необхідно провести імітаційне моделювання системи у нормальному режимі роботи. Як порівнювані параметри було обрано частоту обертання, фазні струми, електромагнітний момент і напругу ланки постійного струму (рисунок 2.23) і проведено Фур'є-аналіз струму фази А I_{sa} (рисунок 2.24).

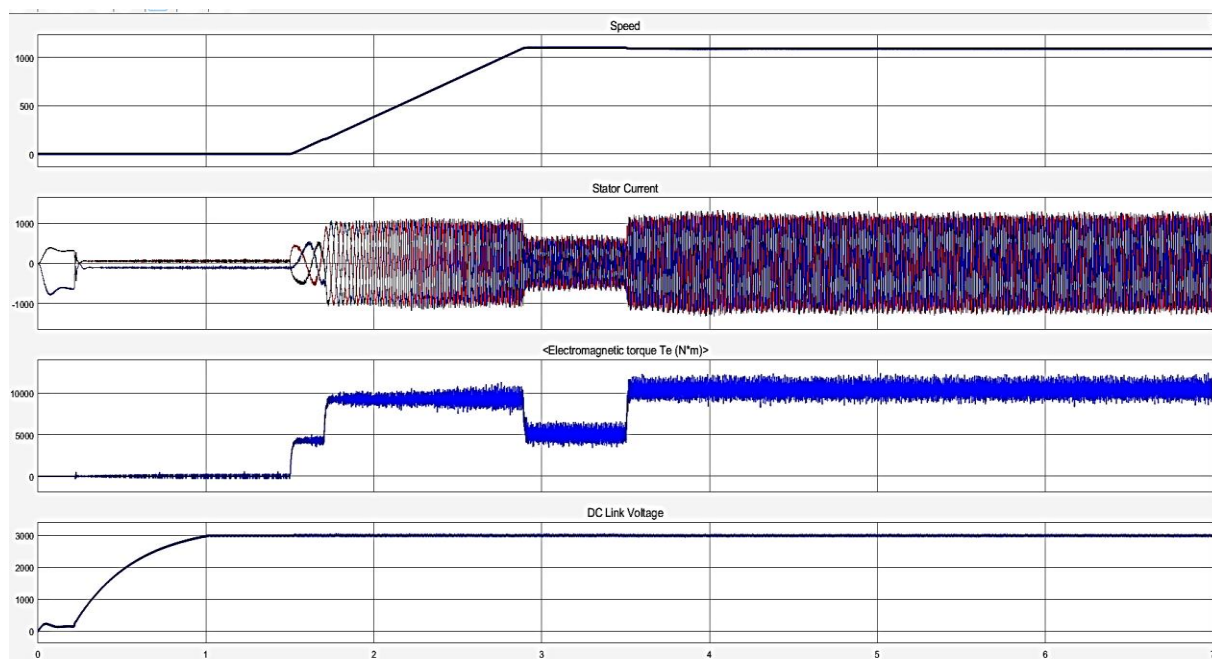


Рисунок 2.23 - Результати моделювання нормального режиму роботи

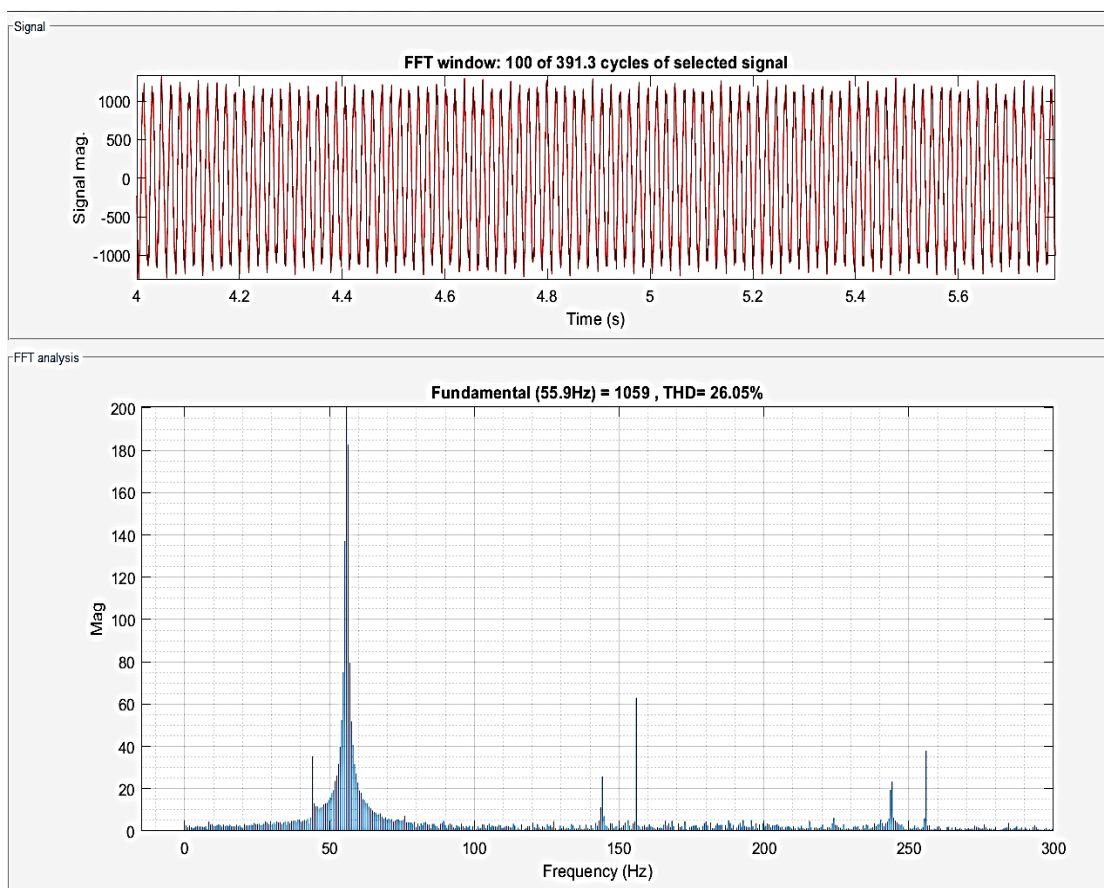


Рисунок 2.25 - Фур'є-аналіз струму I_{sa} нормального режиму роботи

Процес імітаційного моделювання відбувався за таким алгоритмом:

1. Заряджання конденсатора вхідного фільтра до напруги 3000 В і підтримка його значення гальмівним чопером.
2. Пуск з моментом опору $0,5M_n$, а після виходу на номінальну частоту обертання – збільшення до номінального значення.

У результаті аналізу коефіцієнт спотворення фазного струму склав 26 %.

Внутрішні та зовнішні короткі замикання в автономному інверторі напруги (АІН) є одними з найнебезпечніших аварійних режимів роботи асинхронного електропривода, оскільки можуть викликати не тільки пошкодження в електричних колах, але й механічне руйнування двигуна, редуктора та виконавчого органу. Під внутрішнім коротким замиканням розуміють вихід з ладу одного з силових ключів АІН, або внаслідок надходження хибного сигналу керування на силовий ключ. Під зовнішнім

коротким замиканням розуміють двофазне або трифазне замикання між собою вихідних фаз АІН.

Внутрішнє коротке замикання в моделі було реалізовано шляхом подачі хибного сигналу керування на закриття силового транзистора протягом 0,2 с. Результати моделювання електромагнітних процесів для цього випадку показані на рисунках 2.26 та 2.27.

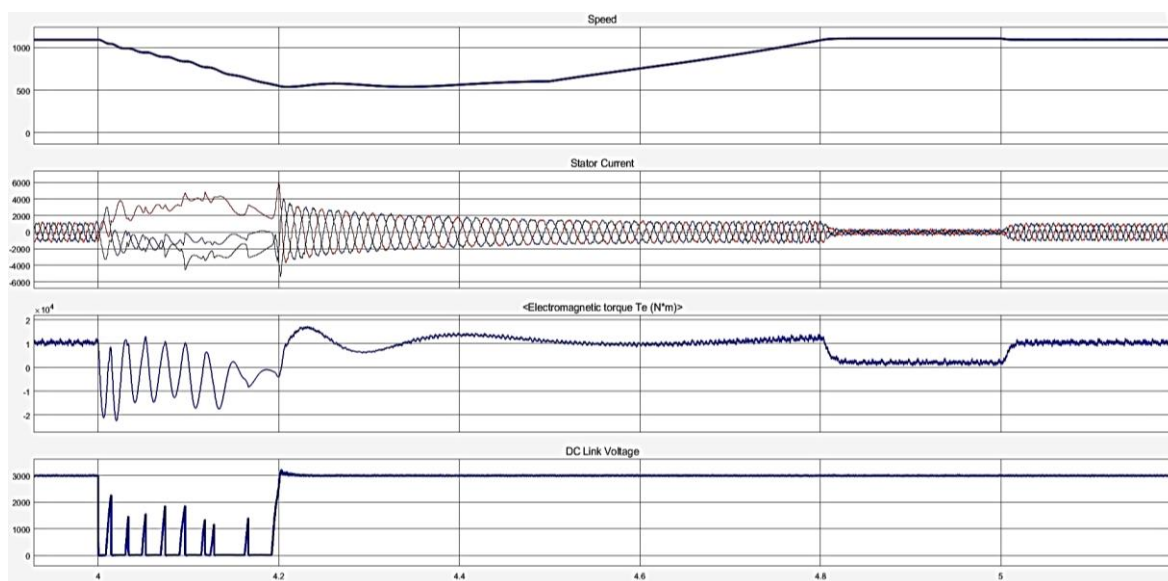


Рисунок 2.26 – Результати моделювання ТЕД при короткому замиканні силового транзистора АІН

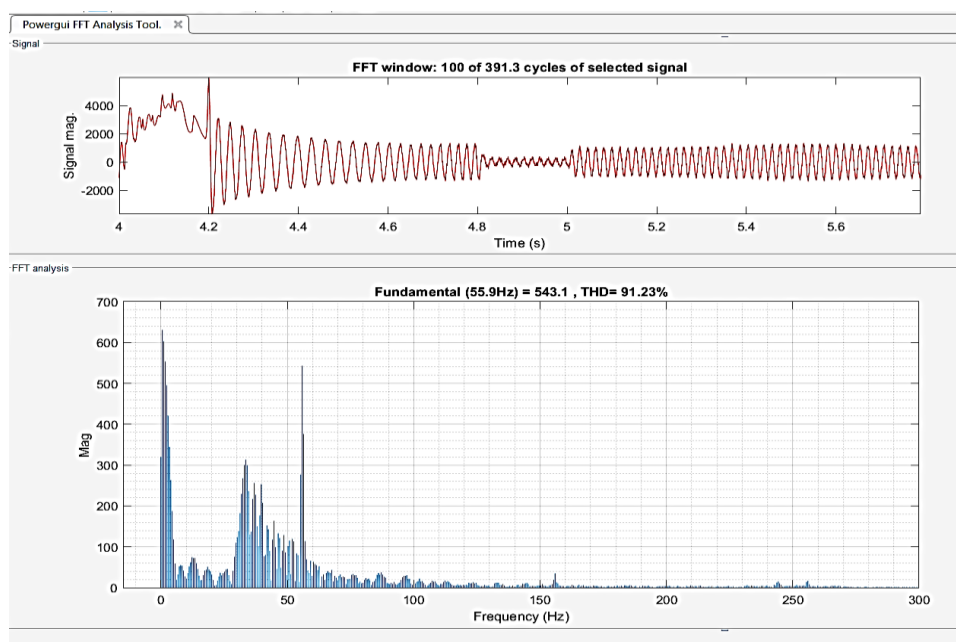


Рисунок 2.27 - Фур'є-аналіз струму I_{sa} при короткому замиканні силового транзистора АІН

Наведені осцилограми показують, що режим короткого замикання силового ключа характеризується малим часом протікання електромагнітних процесів і призводить до швидкого падіння частоти обертання, значних пульсацій моменту, пікового трикратного струмового перевантаження та появи субгармонік, амплітуди деяких навіть перевищують основну.

Під провалами напруги розуміють короткочасне часткове зниження, або повну втрату його діючого значення. При падінні напруги в асинхронному двигуні відбувається зниження його електромагнітного моменту залежно від тривалості падіння напруги. Найгіршим випадком провалу напруги є стрибкоподібне падіння напруги до нуля, що трапляється при відриві струмоприймача від контактної мережі. При цьому відбувається розряд конденсатора фільтра через силові ключі на двигун [47]. Результати моделювання електромагнітних процесів у системі при зникненні напруги живлення показані на рисунках 2.28 та 2.29.

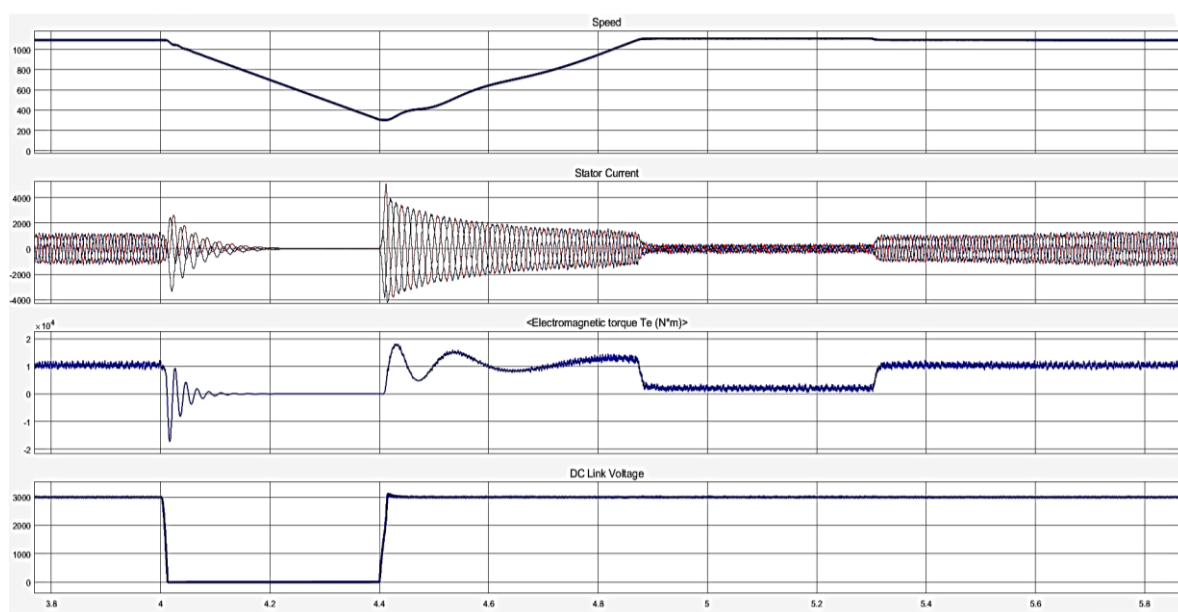


Рисунок 2.28 – Результати моделювання при зникненні напруги живлення

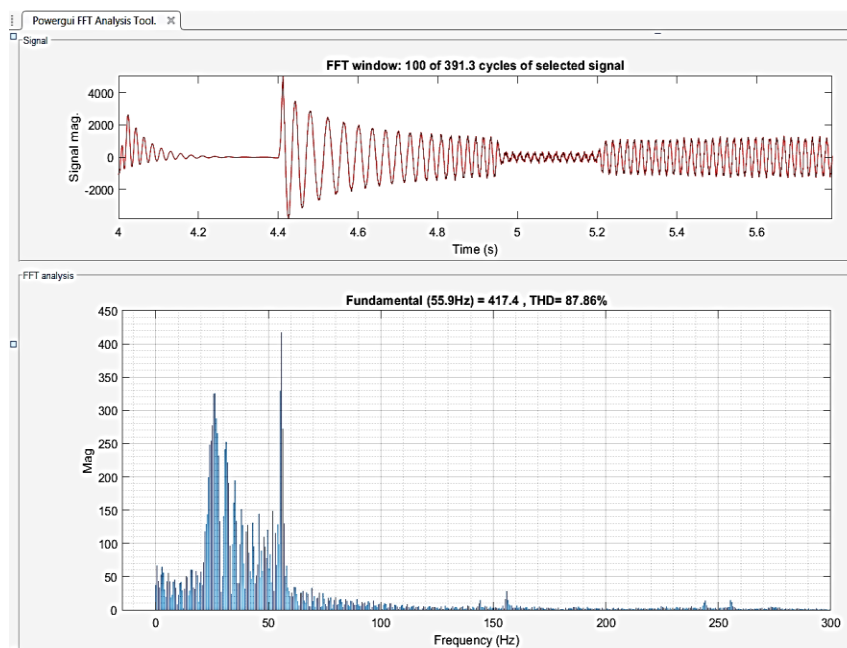


Рисунок 2.29 - Фур'є-аналіз струму I_{sa} при зникненні напруги живлення

Як видно з результатів, при зникненні напруги живлення відбувається різке зниження електромагнітного моменту, що призводить до «перекидання двигуна», а при відновленні напруги живлення – підвищення фазних струмів до рівня пускових, швидке підвищення напруги на конденсаторі фільтра. Фур'є-аналіз фазного струму з моменту зникнення напруги живлення і до повернення до номінального режиму показує зменшення амплітуди основної гармоніки на 60 %, появу значної кількості субгармонік з амплітудами, що не перевищують амплітуду основної.

2.5 Висновки по розділу 2

1. У ході вирішення проблеми моніторингу та довгострокового прогнозування якості роботи тягових двигунів локомотивів розроблено математичну модель електричних перехідних процесів у трифазному

дворівневого автономному інверторі напруги та його навантаженні, яка дозволила виявити вплив технічного стану обмоток статора АД на спектральний склад струму ПЧ–АД. Розроблена математична модель чітко визначає сукупність параметрів, які підлягають числовому оцінюванню. За відносно невеликих змін у вихідній схемі ПЧ–АД отримані розрахункові співвідношення можуть бути модифіковані до багаторівневих перетворювачів частоти нескладним та прозорим для опису способом.

2. Запропонована система операторних рівнянь відносно шуканих струмів і напруг, що дає змогу автоматично враховувати поточну конфігурацію комутуючих перемикачів.

3. Розроблена математична модель системи ПЧ-АД, що враховує як циклічність роботи перетворювача частоти так і різні етапи комутації його вентилів, що забезпечує виключення режиму автоколивань і небезпечних перенапруг при регулюванні частоти обертання електроприводу.

4. Синтезована двофазна імітаційна модель тягового асинхронного двигуна в нерухомій системі координат, що дозволило отримати характеристики частоти обертання, електромагнітного моменту та трифазного струму при прямому пуску.

5. В результаті імітаційного моделювання в програмному середовищі Simplorer прямого пуску АД при несиметричному режимі живлення були отримані залежності частоти обертання та електромагнітного моменту з яких випливає, що відхилення напруги однієї фази на 2% призводить до зниження частоти обертання та значних коливань як електромагнітного моменту, так і частоти обертання, що призводить до втрат активної потужності, нерівномірного споживання електроенергії та старіння ізоляції за рахунок додаткового нагріву обмоток двигуна.

6. Розроблено імітаційну модель векторного керування з просторово векторною ШІМ тяговим асинхронним електроприводом, що дозволило дослідити аварійні режими, які можуть виникати в тяговому асинхронному

електроприводі з тяговим електродвигуном АД914-У і виконати порівняння з номінальним режимом його роботи. Результати імітаційного моделювання показують, що проаналізовані аварійні режими навіть при короткочасній тривалості (0,2 с при короткому замиканні та 0,4 с при зникненні напруги живлення) здатні призвести до значних пошкоджень і спричинити зупинку електродвигуна. Обидва випадки призводять до кратних струмових перевантажень, збільшення спотворень фазного струму до 65 %, появи субгармонік з високими амплітудами (у випадку короткого замикання навіть вище основної гармоніки) і значних пульсацій електромагнітного моменту. Крім того, повернення з аварійного режиму до нормального на номінальні характеристики відбувалось при моменті, який складав 20 % номінального. Результати підтверджуються осцилограмами електромагнітних процесів в аварійних режимах роботи і в подальшому можуть бути використані при розробленні елементів захисту такої системи електропривода.

РОЗДІЛ 3

ФОРМУВАННЯ ЗАВАДОСТІЙКИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ МОНІТОРИНГУ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АСИНХРОННИХ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ

3.1 Частотна локалізація тестових сигналів асинхронних ТЕД

Надійна робота тягового електродвигуна протягом його терміну служби, а також тривалість самого цього терміну залежать від своєчасного виявлення несправностей або тенденцій до їх появи. Це досягається як прямим, так і непрямым контролем і, шляхом інтерпретації отриманих даних, винесенням діагностичних рішень. Електричні параметри обмоток двигуна несуть як пряму інформацію про їх стан, так і інформацію про технічний стан низки афілійованих вузлів. Електричні параметри обмотки контролюються шляхом вимірювання амплітуди та початкової фази адитивно внесеного до неї синусоїдного струму відомої частоти. Результати вимірювань можуть бути спотворені в результаті проникнення у вимірювальне коло імпульсної завади. Момент появи завади, її тривалість та спектральна щільність апріорі невідомі. Контроль електронних процесів і параметрів обмоток електродвигунів є основою технічно й економічно ефективної експлуатації електричного рухомого складу залізниць. Роботі контролюючих пристроїв заважають електромагнітні впливи зовнішніх і внутрішніх відносно двигуна чинників, які суттєво спотворюють електричні коливання, що несуть контрольну інформацію. Це створює передумови для похибок у прийнятті рішень щодо стану обмоток. Зростає насиченість електрорухомого складу новими електронними пристроями – джерелами завад, а також стають більш різноманітними електромагнітні коливання, які виникають в них. Тому

зростає й кількість завад для роботи контролюючих пристроїв. Через це зростає актуальність вирішення проблеми локалізації контрольного сигналу в завадовому оточенні та оцінювання інформаційних параметрів цього сигналу з урахуванням дії цих завад.

Нехай у якійсь з фаз обмотки статора ТЕД присутній штучно введений туди тестовий сигнал у вигляді струму з постійними параметрами [60]. Потужність цього сигналу вважатимемо настільки малою, що вона не впливає на обертальний момент двигуна. Інтервал спостереження $[T_1, T_2]$ струмових процесів в обмотці вважатимемо достатньо малим, щоб протягом нього параметри тягового струму теж були постійними. Сам цей тяговий струм утворений шляхом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) імпульсів постійної амплітуди.

За цих умов струм фази є сумою кількох складових:

1. Постійна складова I_0 . При живленні двигуна двополярною ШІМ-напругою вона може бути відсутня;
2. Власне живильна синусоїдна складова $i_{sp}(t)$;
3. Псевдопилкоподібна різниця $i_{ges}(t)$ між результатом інтегруючого перетворення ШІМ-напруги в струм $i_{out}(t)$ фазної обмотки і струмом $i_{sp}(t)$;
4. Складова $i_{tr}(t)$, викликана зубцевими гармоніками;
5. Імпульсна завада $i_p(t)$, викликана короткочасними процесами в живильній мережі (втрата контакту пантографа, наведення від грозових розрядів).

У підсумку струм однієї фази можна записати як

$$i(t) = s(t) + I_0 + i_{sp}(t) + i_{ges}(t) + i_{tr}(t) + i_p(t). \quad (3.1)$$

Кожне з коливань, що міститься в правій частині виразу (3.1), характеризується не тільки виглядом часової залежності, але й індивідуальною сукупністю параметрів, об'єднаною у вектор $\vec{\lambda}$. У

подальшому будемо вважати, що постійну складову I_0 відфільтровано, або вона була відсутня з самого початку (як при двополярній ШІМ). З урахуванням зазначеного вираз (3.1) набуває вигляду

$$i(t) = s(t, \vec{\lambda}_s) + i_{sp}(t, \vec{\lambda}_{sp}) + i_{ges}(t, \vec{\lambda}_{ges}) + i_{tr}(t, \vec{\lambda}_{tr}) + i_p(t, \vec{\lambda}_p). \quad (3.2)$$

Індекси при векторах параметрів повторюють індекси параметризованих струмів.

Живильний струм $i_{sp}(t, \vec{\lambda}_{sp})$ є синусоїдою з частотою f_{sp} , яка на практиці лежить у межах 2...60 Гц. Протяжність відрізка цієї синусоїди, який надходить під час спостереження, дорівнює $(T_2 - T_1)$ секунд. Відомо, що 95 % потужності такого відрізка (прямокутного імпульсу з синусоїдним заповненням) лежить у межах від $\left(f_{sp} - \frac{2}{T_2 - T_1}\right)$ до $\left(f_{sp} + \frac{2}{T_2 - T_1}\right)$ Герц.

Якщо $T_2 - T_1 = 1$ с, то нижньою межею ефективного спектра сигналу буде 0 при $f_{sp} = 2$ Гц, а верхньою межею буде 62 Гц при $f_{sp} = 60$ Гц.

Струм $i_{ges}(t, \vec{\lambda}_{ges})$ псевдопилкоподібної компоненти – це результат інтегрування живильної ШІМ-напруги індуктивно-резистивною фазною обмоткою. Оскільки інтегрування фізично відповідає низькочастотній фільтрації, то ширина смуги частот струму є меншою за ширину смуги частот напруги, що викликає цей струм. Отже, розрахунок ширини смуги частот напруги є розрахунком «у гіршому випадку». Ескіз спектра ШІМ-напруги подано на рисунку 3.1. На ньому як f_c позначена частота несучого пилкоподібного коливання ШІМ.

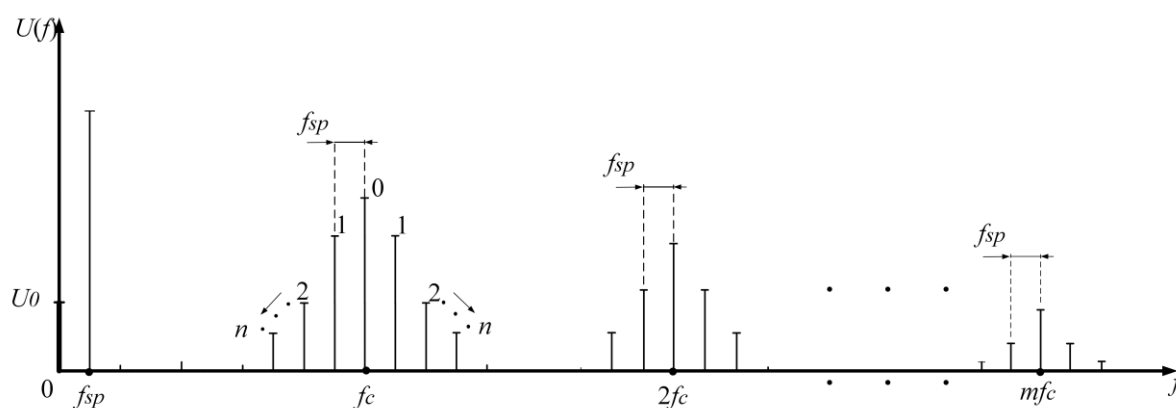


Рисунок 3.1 – Спектр ШІМ-напруги

Амплітуди гармонік змінюються за законом:

$$\frac{1}{m} \cdot J_n(0,5\pi m M), [7],$$

де $J_n(x)$ – функція Бесселя n -го порядку;

M – індекс модуляції ШІМ;

m – номер пелюстки спектра.

Вважатимемо, що $f_c = 20$ кГц, $M = 0,9$ (типове практичне сполучення в електроприводі) і виконаємо розрахунок гармонік для $m = 1$ (тобто першої пелюстки спектра). При цих початкових даних $x = 0,5\pi m M \approx 1,41$ отримуємо, що $J_0(x) \approx 0,567$; $J_1(x) \approx 0,544$; $J_2(x) \approx 0,210$; $J_3(x) \approx 0,052$; $J_4(x) \approx 0,009$; $J_5(x) \approx 0,001$. Із зростанням n величини $J_n(x)$ зменшуються все більше. Зупинимось на врахуванні перших п'ятих бічних ліній спектра: урахуємо афілійовані з першою бічною пелюсткою гармоніки з $n = 0, \dots, 5$. Виходячи з цього перша бічна пелюстка лежить у межах $[f_c - 5f_{sp}; f_c + 5f_{sp}]$ або $[19640; 20360]$ Гц. Відстань між першою та другою пелюстками складає $f_s = 20$ кГц. На цій відстані афілійовані з пелюстками гармоніки згасають до нехтувано малих величин. Крім того, через наявність множника $\frac{1}{m}$ амплітуди афілійованих з другою пелюсткою гармонік будуть у два рази менші. Бокові

пелюстки з номерами більше 2 здійснюватимуть ще менший вплив. Отже, можна обґрунтовано вважати, що складова $i_{ges}(t, \vec{\lambda}_{ges})$ займає діапазон часто від 19640 до 20360 Гц.

Тепер проаналізуємо наступний доданок формули (1) – струм $i_{tr}(t, \vec{\lambda}_{tr})$, викликаний зубцевими гармоніками. Його частота складає [7]

$$f_{tr} = \frac{f_{sp} \cdot z_2 (1-s)}{p} \pm l f_{sp}, \quad (3.3)$$

де f_{sp} – частота живильної напруги;

z_2 – кількість зубців ротора;

s – ковзання;

p – кількість пар полюсів;

l – ціле непарне число – номер гармоніки зубцевого струму.

Приймемо типові для тягових двигунів числові значення $f_{sp} = [20...60]$ Гц; $z_2=40$; $p=3$; $s=0,05$. При таких даних маємо $f_{sp} = (25,4...762) \pm (2...60) \cdot l$, $l = 1, 3, 5, 7, \dots$. Ураховуючи гармоніки включно по 17-ту, отримаємо, що частоти зубцевих гармонік лежать від 0 (при $l = -12$) до 1992 Гц.

Отже, узагальнення цих компонентів $i_{ges}(t, \vec{\lambda}_{ges})$ і $i_{tr}(t, \vec{\lambda}_{tr})$ призводить до діаграми зайнятості частотної області, поданої на рисунку 3.2.

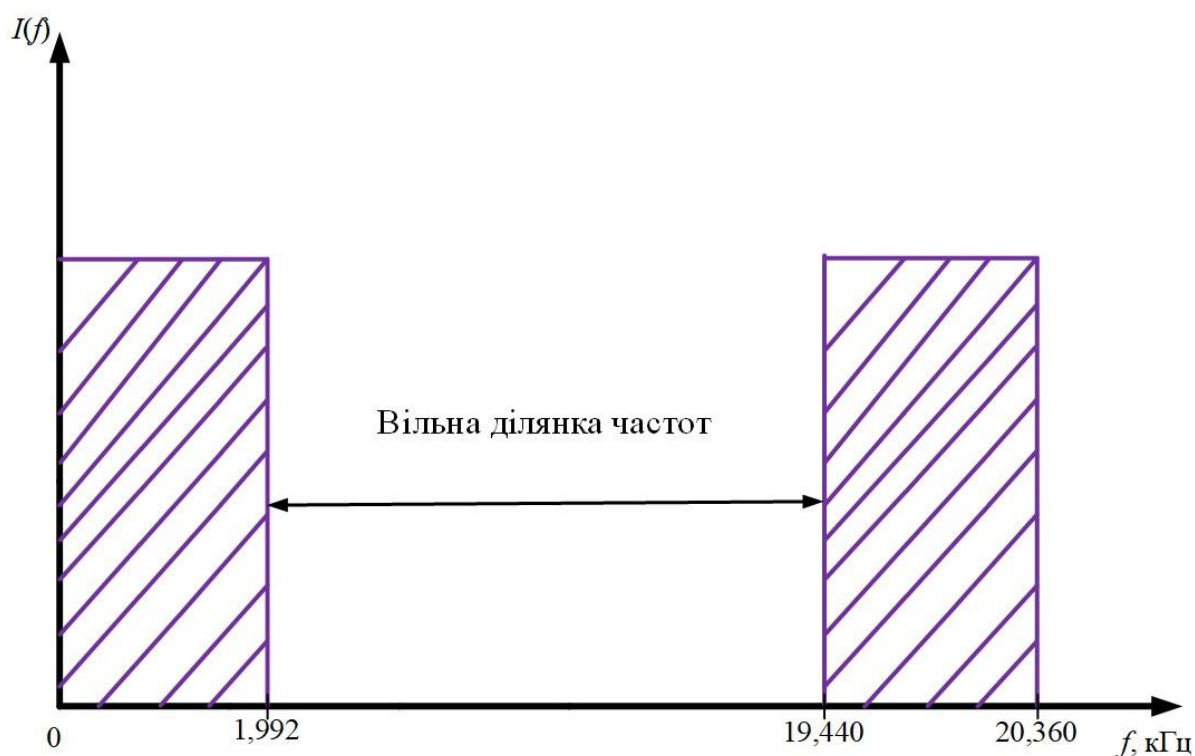


Рисунок 3.2 – Зайнятість частотної області заводовими струмами

Тобто можна вважати вільною від дії цих двох компонентів ділянку частот від 2 до 19 кГц.

Імпульсна завада $i_p(t, \tilde{\lambda}_p)$ утворена процесами, які можуть бути дуже короткочасними. Однак через інерційність індуктивно-резистивного кола фазної обмотки тривалість цієї завади не може бути менше сталої часу цього кола. Наприклад, для тягового двигуна АД-914У параметри цього кола складають [14] $R = 0,0226 \text{ Ом}$, $L = 0,68 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$. Відповідна величина сталої часу $\tau = L/R \approx 0,03 \text{ с}$. Спектр імпульсу, тривалість якого обмежена знизу цією величиною, лежить у межах від 0 до $1/\tau \approx 33 \text{ Гц}$. Однак при виникненні несправностей величина L може багатократно зменшуватися, а R – багатократно збільшуватися. Тому можливу верхню частоту спектра імпульсної завади слід вважати дуже великою – у сотні разів більше ніж 33 Гц.

Підведемо проміжний підсумок аналізу зайнятості частотної області завадовими струмами. Струми I_0 , $i_{sp}(t, \vec{\lambda}_{sp})$, $i_{ges}(t, \vec{\lambda}_{ges})$, $i_p(t, \vec{\lambda}_p)$ займають обмежені діапазони частот $0 \dots 2$ кГц і $19,64 \dots 20,36$ кГц. Великий проміжок між цими діапазонами дає змогу повністю відфільтрувати ці завади при первинній обробці струму $i(t)$, наприклад, шляхом виконання перетворення Фур'є та обнулення частотних відліків у вказаних діапазонах зосередження завад. Діапазон від 2 до 19 кГц вільний від усіх завад, окрім імпульсної. У ньому доцільно розмістити (локалізувати) тестовий сигнал (можна і вище 20,36 кГц, але зі зростанням частоти збільшується й опір індуктивно-ємнісного кола фази, і для отримання прийнятної величини сигналу $s(t, \vec{\lambda}_s)$ знадобиться й більша потужність генератора цього сигналу).

Отже, після частотної локалізації сигналу та видалення всіх компонент струму, що знаходяться поза діапазоном локалізації, вираз (2) для струму, що надходить до вимірювального пристрою, набуває вигляду:

$$i(t) = s(t, \vec{\lambda}_s) + i_p(t, \vec{\lambda}_p). \quad (3.4)$$

Але при вимірюванні доступна лише величина $i(t)$ лівої частини цієї рівності. Щоб визначити величини параметрів правої частини за такою інформацією, необхідно ввести до розгляду модель $\hat{i}(t)$ струму $i(t)$:

$$\hat{i}(t) = s(t, \vec{\hat{\lambda}}_s) + i_p(t, \vec{\hat{\lambda}}_p) = \hat{s}(t) + \hat{i}_p(t), \quad (3.5)$$

де $\vec{\hat{\lambda}}_s$ та $\vec{\hat{\lambda}}_p$ – вектори оцінок параметрів реального струму, підбором яких досягається найкраща за певним критерієм схожість часових залежностей $i(t)$ та $\hat{i}(t)$.

У якості критерію використано найменший середній квадрат відхилення струмів $i(t)$ та $\hat{i}(t)$ один від одного. На цьому критерії базується широковідомий метод оцінювання – метод найменших квадратів [125], за яким у розглянутому випадку оцінки $\vec{\lambda}_s$ та $\vec{\lambda}_p$ є такими, що мінімізують середню потужність струму похибки в резисторі опором 1 Ом:

$$\varepsilon_H = \frac{1}{T_2 - T_1} \cdot \int_{T_1}^{T_2} [i(t) - \hat{i}(t)]^2 dt. \quad (3.6)$$

Вважатимемо, що спостереження здійснюється в дискретні моменти часу $t_k = (k-1) \cdot \Delta t$, де $k=1, \dots, K$. Ці моменти розташовані з однаковим інтервалом Δt . За таких умов вираз (3.6) набуває вигляду

$$\varepsilon_K = \frac{1}{K-1} \cdot \sum_{k=1}^K (i_k - \hat{i}_k)^2, \quad (3.7)$$

де i_k та $\hat{i}_k$ – відліки відповідно струму $i(t)$ та $\hat{i}(t)$.

Помноживши обидві частини на $(K-1)$, виникає необхідність мінімізації величини

$$\varepsilon^2 = \sum_{k=1}^K (i_k - \hat{i}_k)^2. \quad (3.8)$$

Після піднесення до квадрату матимемо наступний вираз:

$$\varepsilon^2 = \sum_{k=1}^K (i_k^2 - 2i_k \hat{i}_k + \hat{i}_k^2) = \sum_{k=1}^K i_k^2 - 2 \sum_{k=1}^K i_k \cdot \hat{i}_k + \sum_{k=1}^K \hat{i}_k^2.$$

Урахувавши вираз (3.5), отримаємо

$$\varepsilon^2 = \sum_{k=1}^K i_k^2 - 2 \sum_{k=1}^K i_k \cdot \hat{s}_k - 2 \sum_{k=1}^K i_k \hat{i}_{pk} + \sum_{k=1}^K \hat{s}_k^2 + \sum_{k=1}^K \hat{i}_{pk}^2 + 2 \sum_{k=1}^K \hat{s}_k \cdot \hat{i}_{pk}. \quad (3.9)$$

Перший доданок цього виразу є постійною величиною для конкретної вибірки спостережень, тому не впливає на процес мінімізації. З урахуванням цього виникає необхідність мінімізації величини

$$\delta = \sum_{k=1}^K \hat{s}_k^2 - 2 \sum_{k=1}^K i_k \cdot \hat{s}_k + \sum_{k=1}^K \hat{i}_{pk}^2 - 2 \sum_{k=1}^K i_k \cdot \hat{i}_{pk} + 2 \sum_{k=1}^K \hat{s}_k \cdot \hat{i}_{pk}. \quad (3.10)$$

Позначення ε^2 замінене на δ , оскільки видалення першого доданка виразу (3.9) може призвести до від'ємних значень його правої частини, яка вже не буде квадратом похибки. Але δ має мінімум у тій самій точці простору параметрів. Вираз (3.10) надає дві можливості для подальшої величини δ (цільової функції). Вони залежать від підходу до подання імпульсної завади. Перший підхід полягає в представленні цієї завади як широкосмугового випадкового процесу з нульовою середньою величиною. Цей процес не містить параметрів, які підлягають оцінюванню, і не є корельованим із сигналом. За цих умов останні три доданки виразу (3.10) не впливають на положення мінімуму цільової функції в просторі параметрів і можуть бути видалені з виразу для цільової функції, яка в цьому випадку набуває вигляду:

$$\delta = \sum_{k=1}^K \hat{s}_k^2 - 2 \sum_{k=1}^K i_k \cdot \hat{s}_k. \quad (3.11)$$

Другий підхід полягає в представленні завади як структурно-детермінованої функції часу, яка залежить від деякої сукупності параметрів, згрупованих у вектор параметрів $\vec{\lambda}_p$. Величини цих параметрів визначають часову залежність миттєвої величини завади в конкретній спостережній реалізації. За такого підходу задача оцінювання параметрів сигналу перетворюється на задачу сумісного оцінювання параметрів сигналу та завад. Точність отриманих оцінок суттєво залежатиме від того, наскільки детально прийнята структурно-детермінована модель завади здатна описувати будь-яку її реалізацію. При цьому підлягає мінімізації цільова функція в повній формі (3.10).

Розглянемо застосування першого з описаних підходів на прикладі тестового сигналу у вигляді синусоїди з відомою частотою ω і невідомими амплітудою I_{ms} та початковою фазою φ_s [5]:

$$s(t, \vec{\lambda}_s) = I_{ms} \cdot \sin(\omega t + \varphi_s), \quad (3.12)$$

де вектором невідомих параметрів є $\vec{\lambda}_s = \begin{pmatrix} I_{ms} \\ \varphi_s \end{pmatrix}$.

Після дискретизації такого сигналу за часом маємо

$$s_k(\vec{\lambda}_s) = I_{ms} \cdot \sin[\omega \cdot (k-1)\Delta t + \varphi_s].$$

Після підстановки останнього виразу до формули (3.11) отримаємо

$$\begin{aligned} \delta(I_{ms}, \varphi_s) = & I_{ms}^2 \cdot \sum_{k=1}^K \sin^2[\omega \cdot (k-1)\Delta t + \varphi_s] - \\ & - 2I_{ms} \cdot \sum_{k=1}^K i_k \sin[\omega \cdot (k-1)\Delta t + \varphi_s]. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Це квадратична функція параметра I_{ms} , а оскільки коефіцієнт при I_{ms}^2 додатний, то точка рівності нулю першої похідної за I_{ms} – це точка мінімуму цільової функції за параметром I_{ms} :

$$I_{ms \min}(\varphi_s) = \frac{\sum_{k=1}^K i_k \cdot \sin[\omega(k-1)\Delta t + \varphi_s]}{\sum_{k=1}^K \sin^2[\omega(k-1)\Delta t + \varphi_s]}. \quad (3.14)$$

Підстановка цього виразу до цільової функції (3.13) зводить задачу мінімізації функції $\delta(I_{ms}, \varphi_s)$ двох змінних до задачі мінімізації функції однієї змінної:

$$\begin{aligned} \delta(\varphi_s) &= I_{ms \min}^2(\varphi_s) \cdot \sum_{k=1}^K \sin^2[\omega(k-1)\Delta t + \varphi_s] - \\ &- 2I_{ms \min}(\varphi_s) \cdot \sum_{k=1}^K i_k \cdot \sin[\omega(k-1)\Delta t + \varphi_s] = \\ &= - \frac{\left\{ \sum_{k=1}^K i_k \cdot \sin[\omega(k-1)\Delta t + \varphi_s] \right\}^2}{\sum_{k=1}^K \sin^2[\omega(k-1)\Delta t + \varphi_s]}. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Оскільки $\sin^2 \alpha = 0,5(1 - \cos 2\alpha)$, то знаменник виразу (3.15) можна записати у вигляді $\sum_{k=1}^K 0,5 - \sum_{k=1}^K 0,5 \cdot \cos[2\omega(k-1)\Delta t + 2\varphi_s]$. Часовий інтервал спостереження $(T_2 - T_1)$ містить багато періодів косинусного коливання, тому друга сума набагато менша за першу, і з високою точністю вираз (3.15) можна записати як

$$\delta(\varphi_s) = -\frac{2}{K} \cdot \left\{ \sum_{k=1}^K i_k \cdot \sin[\omega(k-1)\Delta t + \varphi_s] \right\}^2.$$

Оцінкою початкової фази є:

$$\hat{\varphi}_s = \arg \max \left\{ \sqrt{\frac{2}{K}} \cdot \sum_{k=1}^K i_k \cdot \sin[\omega(k-1)\Delta t + \varphi_s] \right\}. \quad (3.16)$$

Щоб отримати кінцевий вираз для обчислення величини $\hat{\varphi}_s$, візьмемо похідну від змісту фігурних дужок формули (3.16) і прирівняємо її до нуля. Отримаємо таке співвідношення:

$$-\sin \hat{\varphi}_s \sum_{k=1}^K i_k \cdot \sin[\omega(k-1)\Delta t] + \cos \hat{\varphi}_s \sum_{k=1}^K i_k \cdot \cos[\omega(k-1)\Delta t] = 0,$$

звідки

$$\hat{\varphi}_s = \operatorname{arctg} \frac{\sum_{k=1}^K i_k \cdot \cos[\omega(k-1)\Delta t]}{\sum_{k=1}^K i_k \cdot \sin[\omega(k-1)\Delta t]}. \quad (3.17)$$

Для визначення точнісних характеристик оцінювання параметрів тестового сигналу за співвідношеннями (3.14), (3.17) і робочих меж співвідношення амплітуд тестового сигналу та імпульсу було виконане комп'ютерне моделювання сигналу, імпульсу та обробки їхньої адитивної суміші за вказаними співвідношеннями. Параметри сигналу: $I_{ms} = 0,1$ А, $f_s = 2500$ Гц, $\varphi_s = 75^\circ$, інтервал спостереження $(T_2 - T_1) = 0,01$ с, інтервал дискретизації за часом $\Delta t = 5 \cdot 10^{-5}$ с. Імпульсну заваду зімітовано як послідовність статистично незалежних відліків гаусівської випадкової

величини з середнім квадратом відхилення 0,005 А і нульовим середнім значенням, промодульовану за амплітудою обвідною кривою $A \cdot t \cdot e^{-\gamma t}$, підтвердженою експериментальними дослідженнями [8]. Параметри A та γ цієї кривої при кожному моделюванні були підібрані так, щоб забезпечити задану амплітуду I_p і тривалість τ_p імпульсу завади. Змодельовані три варіанти тривалості цього імпульсу $\tau_p = T_2 - T_1$, $\tau_p = 0,5(T_2 - T_1)$ і $\tau_p = 0,125(T_2 - T_1)$. Обчислено середньоквадратичні похибки σ_I оцінки амплітуди сигналу та σ_φ оцінки початкової фази сигналу. Результати моделювання зведено до таблиць 3.1-3.3.

Таблиця 3.1 – Похибки оцінок при $\tau_p = T_2 - T_1$

I_p, A	0,01	0,10	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	2,00	10
σ_I, A	$4,01 \cdot 10^{-4}$	$4,01 \cdot 10^{-3}$	$7,9 \cdot 10^{-3}$	0,016	0,023	0,031	0,038	0,067	0,459
σ_φ°	0,21	2,1	4,01	8,1	11,7	15,8	19,1	31	72,9

Таблиця 3.2 – Похибки оцінок при $\tau_p = 0,5(T_2 - T_1)$

I_p, A	0,01	0,10	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	2,00	10
σ_I, A	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$4,39 \cdot 10^{-3}$	$8,82 \cdot 10^{-3}$	0,013	0,018	0,022	0,046	0,245
σ_φ°	0,078	0,776	1,603	3,14	4,53	6,10	7,49	14,68	56,04

Таблиця 3.3 - Похибки оцінок при $\tau_p = 0,125(T_2 - T_1)$

I_p, A	0,01	0,10	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	2,00	10
σ_I, A	$5,6 \cdot 10^{-5}$	$5,84 \cdot 10^{-4}$	$1,15 \cdot 10^{-3}$	$2,29 \cdot 10^{-3}$	$3,51 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$6,18 \cdot 10^{-3}$	0,013	0,078
σ_φ°	0,067	0,689	1,351	2,64	3,99	5,36	6,75	12,93	60,2

На рисунках 3.3 і 3.4 зображено графіки залежностей $\sigma_I(I_p)$ і $\sigma_\varphi(I_p)$, які відповідають результатам розрахунку, наведених у таблицях 3.1-3.3.

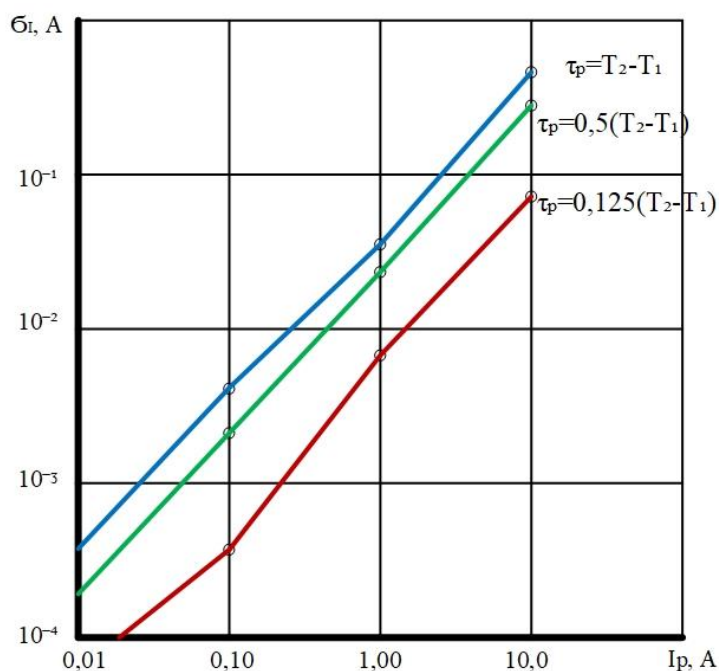


Рисунок 3.3 – Середньоквадратична похибка оцінки амплітуди сигналу

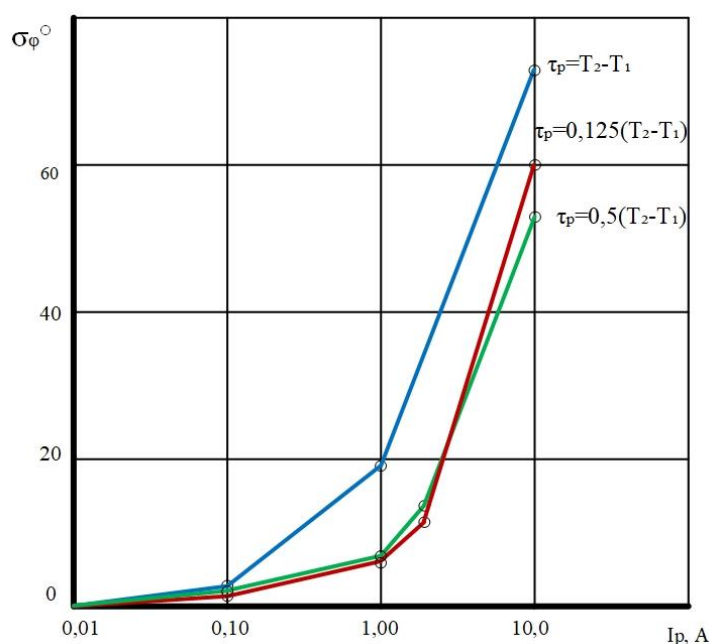


Рисунок 3.4 – Середньоквадратична похибка оцінки початкової фази сигналу

Як показали результати моделювання, розроблена математична процедура оцінювання параметрів тестового сигналу забезпечує високу

точність цього оцінювання в широких діапазонах інтенсивності імпульсної завади та перекриття сигналу і завади в часі.

Розглянуті питання стосуються відомої методології контролю електричних параметрів обмоток асинхронних електродвигунів шляхом введення в контрольоване коло спеціальних тестових сигналів. Однак результати цього дослідження надають обґрунтування вибору виду та параметрів тестових сигналів, чого не було розглянуто в попередніх роботах. Крім того, визначено процедуру обробки тестового сигналу, яка мінімізує вплив електромагнітних завад на оцінку параметрів цього сигналу. Це питання також не було розглянуте в попередніх роботах. Отже, результати цієї роботи визначають комплекс заходів з підвищення точності вимірювання електричних параметрів обмотки, а через це – підвищення точності діагностування технічного стану ТЕД. Розглянуто режим роботи двигуна з постійною частотою обертання ротора. Хоча такі умови і відповідають реальному режиму роботи двигуна на коротких інтервалах часу, але вони все ж таки не є всеосяжними. Це є чинником, який обмежує застосування отриманих результатів у різко нестаціонарних режимах роботи двигуна. Поширення проведеного обґрунтування на такі режими – напрям подальших досліджень.

3.2 Оцінювання параметрів синусоїдного тестового сигналу асинхронних ТЕД

Дотримання встановлених конструктивно параметрів обмотки статора трифазного асинхронного двигуна є критично важливим для його подальшої експлуатації. Такий контроль можна забезпечити введенням в цю обмотку спеціального тестового струму і вимірюванням його параметрів. Однак низка

факторів призводить до спотворення вимірюваних електричних коливань, а відтак – до помилок у визначенні технічного стану ТЕД. Зростання насиченості транспортними засобами та новими електричними пристроями навколишнього середовища, робота яких призводить до проникнення завад у вимірювані електричні коливання, викликає зростання і потенційно можливого відсотку неправильних рішень системи контролю технічного стану. Тому набуває все більшої актуальності розв’язання задачі отримання якомога можливо менш залежних від завад величин параметрів тестових електричних коливань.

Безвідносно до фізичної природи коливань, що спостерігаються, визначимо їх як [5]

$$u(t) = s(t, \vec{\lambda}) + n(t), \quad (3.18)$$

де $s(t, \vec{\lambda})$ – структурно-детермінований сигнал;

t – час;

$\vec{\lambda}$ – вектор параметрів сигналу;

$n(t)$ – імпульс, що є фрагментом гаусівського стаціонарного випадкового процесу, при цьому спектральна густина потужності імпульсу є рівномірною в смузі частот сигналу:

$$N_p(f) = \begin{cases} 0,5N_p & \text{при } f \in [-F_p; F_p]; \\ 0 & \text{при інших величинах } f. \end{cases} \quad (3.19)$$

Тут F_p – гранична частота завади, причому $F_p > F_s$, де F_s найвища частота спектра сигналу.

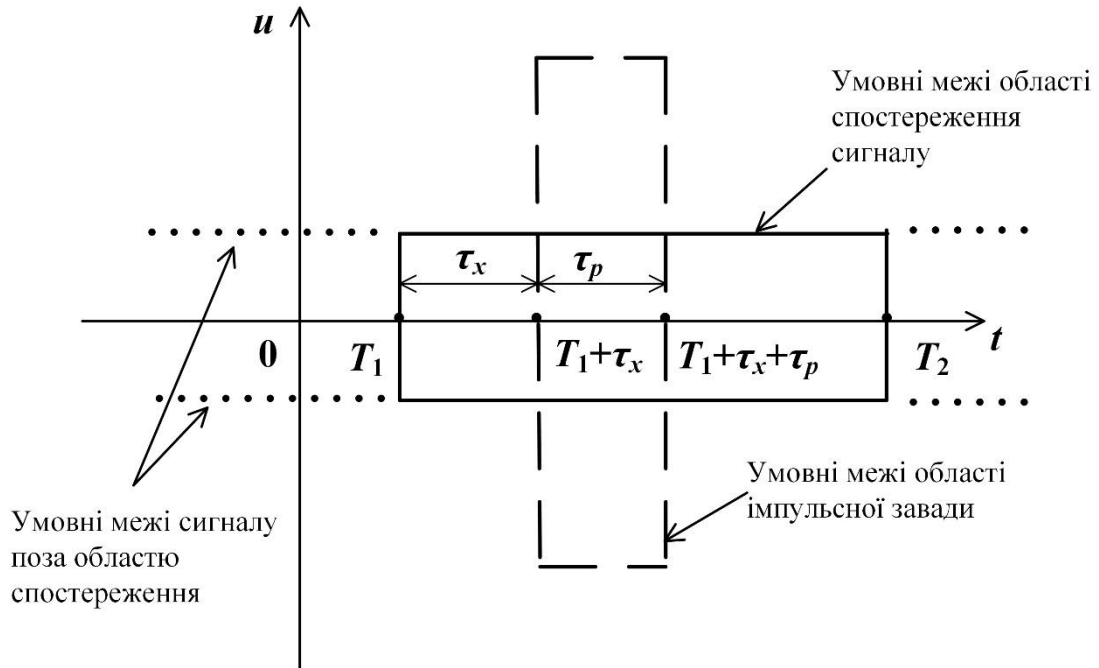


Рисунок 3.5 – Часові співвідношення між сигналом та імпульсною завадою

На рисунку 3.5 T_1 і T_2 – відповідно початок та кінець інтервалу спостереження, а τ_x – зсув моменту виникнення завади відносно початку інтервалу спостереження; τ_p – тривалість імпульсу завади.

Згідно з теоремою відліків усі функції часу, що входять до формули (3.18), можна однозначно відтворити за часовими вибірками, взятими з інтервалом:

$$\Delta t = 1/(2F_p), \quad (3.20)$$

тобто за величинами $u_k = u(k\Delta t)$, $s_k(\vec{\lambda}) = s(k\Delta t, \vec{\lambda})$, $n_k = n(k\Delta t)$,

де k – номер відліку.

При цьому $k_1 = \text{Int}[2F_p T_1] + 1$, $k_2 = \text{Int}[2F_p T_2]$.

Для відтворення коливань служить інтерполяційна формула

$$\begin{aligned} u(t) &= \sum_{k=k_1}^{k_2} u_k \operatorname{sinc} [2\pi F_p (t - k\Delta t)] = \\ &= \sum_{k=k_1}^{k_2} [s_k(\vec{\lambda}) + n_k] \cdot \operatorname{sinc} [2\pi F_p (t - k\Delta t)], \end{aligned} \quad (3.21)$$

де $\operatorname{sinc}(x) = \sin x / x$.

Рівність (3.21) є наближеною, оскільки функція $\operatorname{sinc}(x)$ має нескінченну тривалість. Але за тривалості інтервалу спостереження $T_2 - T_1$, набагато більшої ніж Δt , з достатнім ступенем точності достатньо прийняти до уваги тільки ті відліки цієї функції, які потрапили до інтервалу спостереження.

Припустимо, що на інтервалі спостереження існує ще один стаціонарний гаусівський випадковий процес $n_0(t)$, статистично незалежний від процесу $n(t)$. Спектральна густина потужності процесу $n_0(t)$ визначається співвідношенням

$$N_0(f) = \begin{cases} 0,5N_0 & \text{при } f \in [-F_p; F_p]; \\ 0 & \text{при інших величинах } f. \end{cases} \quad (3.22)$$

З урахуванням цього вираз перетворюється на

$$u(t) = s(t, \vec{\lambda}) + n(t) + n_0(t), \quad (3.23)$$

а вираз (3.21) – на

$$u(t) = \sum_{k=k_1}^{k_2} \left[s_k(\vec{\lambda}) + n_k + n_{0k} \right] \cdot \text{sinc} \left[2\pi F_p (t - k\Delta t) \right], \quad (3.24)$$

де $n_{0k} = n_0(k\Delta t)$.

Відомо, що відліки гаусівського випадкового процесу, взяті з інтервалом часу, визначеним виразом (3.20), є незалежними. Ймовірність реалізації неперервного коливання $u(t)$ дорівнює спільній густині ймовірності сукупності відліків $\{u_{k1}, \dots, u_{k2}\}$. Процес $u(t)$ є гаусівським з математичним очікуванням $s(t, \vec{\lambda})$ тобто

$$E\{u_k\} = s_k(\vec{\lambda}). \quad (3.25)$$

Кореляційна матриця сукупності відліків коливання, яке спостерігається, дорівнює

$$\begin{aligned} E \left\{ \left[u_k - s_k(\vec{\lambda}) \right] \cdot \left[u_m - s_m(\vec{\lambda}) \right] \right\} &= E \{ (n_k + n_{0k}) \cdot (n_m + n_{0m}) \} = \\ &= E \{ n_k \cdot n_m \} + E \{ n_{0k} \cdot n_{0m} \} = N_p F_p \delta_{km} + N_0 F_p \delta_{km}, \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$\text{де } \delta_{km} = \begin{cases} 1 & \text{при } k = m; \\ 0 & \text{при } k \neq m. \end{cases}$$

Тому дисперсії величин відліків u_k дорівнюють $N_0 F_p$ на ділянках, де присутній тільки неперервний шум, та $(N_0 + N_p) F_p$ на ділянці, де присутні неперервний шум та імпульсна завада разом. Відліки гаусівського випадкового процесу, узяті з інтервалом (3), є некорельованими, а тому і незалежними. Тому спільна густина ймовірності сукупності $\{u_{k1}, \dots, u_{k2}\}$ дорівнює добутку гаусівських густин ймовірностей відліків:

$$p(u|\vec{\lambda}) = \prod_{k=k_1}^{k_2} p(u_k|\vec{\lambda}) = \prod_{k=k_1}^{k_{x1}} p(u_k|\vec{\lambda}) \cdot \prod_{k=k_{x1}+1}^{k_{x2}} p(u_k|\vec{\lambda}) \cdot \prod_{k=k_{x2}+1}^{k_2} p(u_k|\vec{\lambda}), \quad (3.27)$$

де $k_{x1} = \text{Int}\left[2F_p(T_1 + \tau_x)\right] + 1$;

$k_{x2} = \text{Int}\left[2F_p(T_1 + \tau_x + \tau_p)\right]$, пояснення на рисунку 3.5

Обчислимо окремі добутки з виразу (3.27). По-перше:

$$\prod_{k=k_1}^{k_{x1}} p(u_k|\vec{\lambda}) = \prod_{k=k_1}^{k_{x1}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{N_0 F_p} \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{[u_k - s_k(\vec{\lambda})]^2}{2N_0 F_p}\right] \right\}.$$

Зауважимо, що

$$k_{x1} - k_1 = \text{Int}\left[2F_p(T_1 + \tau_x)\right] + 1 - \text{Int}\left[2F_p T_1\right] + 1 \approx \text{Int}\left[2F_p \tau_x\right] \approx 2F_p \tau_x, \quad (3.28)$$

оскільки $\text{Int}\left[2F_p T_1\right]$ є великим числом порівняно з одиницею. Тоді

$$\prod_{k=k_1}^{k_{x1}} p(u_k|\vec{\lambda}) = \frac{1}{(N_0 F_p 2\pi)^{F_p \tau_x}} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{N_0 2F_p} \sum_{k=k_1}^{k_{x1}} [u_k - s_k(\vec{\lambda})]^2\right\}. \quad (3.29)$$

В аналогічний спосіб можна записати другий добуток виразу (3.27) як

$$\prod_{k=k_{x1}+1}^{k_{x2}} p(u_k|\vec{\lambda}) = \frac{1}{\left[(N_0 + N_p) F_p 2\pi\right]^{F_p \tau_p}} \times$$

$$\times \exp \left\{ -\frac{1}{(N_0 + N_p)2F_p} \cdot \sum_{k=k_{x1}+1}^{k_{x2}} [u_k - s_k(\vec{\lambda})]^2 \right\}, \quad (3.30)$$

оскільки

$$k_{x2} - (k_{x1} + 1) \approx 2F_p \cdot \tau_p. \quad (3.31)$$

Третій добуток виразу (3.27) можна записати як

$$\begin{aligned} \prod_{k=k_{x2}+1}^{k_2} p(u_k | \vec{\lambda}) &= \frac{1}{\left[(N_p F_p 2\pi) \right]^{F_p (T_2 - T_1 - \tau_x - \tau_p)}} \times \\ &\times \exp \left\{ -\frac{1}{N_0 2F_p} \cdot \sum_{k=k_{x2}+1}^{k_2} [u_k - s_k(\vec{\lambda})]^2 \right\}, \end{aligned} \quad (3.32)$$

оскільки кількість співмножників дорівнює

$$k_2 - (k_{x2} + 1) + 1 \approx 2F_p \cdot (T_2 - T_1 - \tau_x - \tau_p). \quad (3.33)$$

Після підстановки добутоків (3.29)-(3.32) до виразу (3.27) отримаємо, що

$$\begin{aligned} p(u | \vec{\lambda}) &= C(T_2 - T_1, \tau_x, \tau_p, N_0, N_p) \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{N_0 2F_p} \cdot \sum_{k'} [u_k - s_k(\vec{\lambda})]^2 - \right. \\ &\quad \left. -\frac{1}{(N_0 + N_p)2F_p} \cdot \sum_{k=k_{x1}+1}^{k_{x2}} [u_k - s_k(\vec{\lambda})]^2 \right\}, \end{aligned} \quad (3.34)$$

$$C(T_2 - T_1, \tau_x, \tau_p, N_0, N_p) = \frac{1}{\left[(2\pi N_0 F_p) \right]^{F_p(T_2 - T_1)}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{N_p}{N_0} \right)^{F_p \tau_p}}. \quad (3.35)$$

Введемо функцію:

$$\Phi(k) = \begin{cases} 1, & \text{коли } k \text{ не належить до області імпульсу завади;} \\ 1 + \frac{N_p}{N_0}, & \text{в протилежному випадку.} \end{cases} \quad (3.36)$$

Позначимо також, що $\Phi_k = \Phi(k)$. З урахуванням введених позначень вираз (3.34) для спільної густини ймовірності можна записати як:

$$p(u|\vec{\lambda}) = C(T_2 - T_1, \tau_x, \tau_p, N_0, N_p) \times \\ \times \exp \left\{ -\frac{1}{N_0 2F_p} \cdot \sum_{k=k_1}^{k_2} \frac{[u_k - s_k(\vec{\lambda})]^2}{\Phi_k} \right\}. \quad (3.37)$$

Перейдемо до неперервного часу. Для цього спочатку розглянемо допоміжну функцію:

$$V(t) = \frac{u(t) - s(t, \vec{\lambda})}{\sqrt{\Phi(t)}} = \sum_{k=k_1}^{k_2} \left\{ \frac{[u_k - s_k(\vec{\lambda})]}{\sqrt{\Phi_k}} \cdot \text{sinc}[2\pi F_p(t - k\Delta t)] \right\}, \quad (3.38)$$

де Φ_k є часовими відліками неперервної функції часу $\Phi(t)$.

Візьмемо від $V^2(t)$ інтеграл в нескінченних межах, врахувавши ортогональність функцій відліків. Отримаємо:

$$\int_{-\infty}^{\infty} V^2(t) dt = \Delta t \cdot \sum_{k=k_1}^{k_2} \frac{[u_k - s_k(\vec{\lambda})]^2}{\Phi_k}. \quad (3.39)$$

При $T_2 - T_1 \ll \Delta t$ межі інтегрування можна замінити на T_1 (нижня) та T_2 (верхня). Тоді матимемо, що

$$\int_{T_1}^{T_2} V^2(t) dt = \int_{T_1}^{T_2} \frac{[u(t) - s(t, \vec{\lambda})]^2}{\Phi(t)} dt = \frac{1}{2F_p} \cdot \sum_{k=k_1}^{k_2} \frac{[u_k - s_k(\vec{\lambda})]^2}{\Phi_k}, \quad (3.40)$$

де $\Delta t = 1/(2F_p)$ згідно з формулою (3.20).

Співвідношення (3.40) дає змогу переписати вираз для спільної щільності ймовірності у вигляді

$$p(u|\vec{\lambda}) = C(T_2 - T_1, \tau_x, \tau_p, N_0, N_p) \times \\ \times \exp \left\{ -\frac{1}{N_0} \cdot \int_{T_1}^{T_2} \frac{[u(t) - s(t, \vec{\lambda})]^2}{\Phi(t)} dt \right\}. \quad (3.41)$$

Тривалість інтервалу спостереження дорівнює $T = T_2 - T_1$.

Функцію $\Phi(t)$ для урахування спектральних щільностей обох завад перепозначимо як $\Phi\left(t, \frac{N_p}{N_0}\right)$. Тоді

$$p(u|\vec{\lambda}) = \frac{1}{(2\pi N_0 F_p)^{F_p T} \cdot \left(1 + \frac{N_p}{N_0}\right)^{F_p \tau_p}} \times$$

$$\times \exp \left\{ -\frac{1}{N_0} \cdot \int_{T_1}^{T_2} \frac{[u(t) - s(t, \vec{\lambda})]^2}{\Phi\left(t, \frac{N_p}{N_0}\right)} dt \right\}. \quad (3.42)$$

Перетворимо показник експоненти:

$$\frac{1}{N_0} \cdot \int_{T_1}^{T_2} \frac{[u(t) - s(t, \vec{\lambda})]^2}{\Phi(t, N_p/N_0)} dt = \frac{1}{N_0} \cdot \int_{T_1}^{T_2} \frac{u^2(t)}{\Phi(t, N_p/N_0)} dt -$$

$$- \frac{2}{N_0} \cdot \int_{T_1}^{T_2} \frac{u(t) \cdot s(t, \vec{\lambda})}{\Phi(t, N_p/N_0)} dt + \frac{1}{N_0} \cdot \int_{T_1}^{T_2} \frac{s^2(t, \vec{\lambda})}{\Phi(t, N_p/N_0)} dt. \quad (3.43)$$

Введемо позначення вектора параметрів завод

$$\vec{\psi} = (N_p/N_0; \tau_x; \tau_p)^T; \quad (3.44)$$

а також

$$C_w(\vec{\psi}) = \exp \left[-\frac{1}{N_0} \cdot \int_{T_1}^{T_2} \frac{u^2(t)}{\Phi(t, N_p/N_0)} dt \right], \quad (3.45)$$

$$q_w(\vec{\lambda}, \vec{\psi}) = \frac{2}{N_0} \cdot \int_{T_1}^{T_2} \frac{u(t) \cdot s(t, \vec{\lambda})}{\Phi(t, N_p/N_0)} dt, \quad (3.46)$$

$$\mu_w(\vec{\lambda}, \vec{\psi}) = \frac{1}{N_0} \cdot \int_{T_1}^{T_2} \frac{s^2(t, \vec{\lambda})}{\Phi(t, N_p/N_0)} dt \quad (3.47)$$

та ідентифікуємо $q_w(\cdot)$ як зважену кореляцією, а $\mu_w(\cdot)$ зважене енергетичне відношенням «сигнал/завада».

У підсумку отримаємо, що

$$p(u|\vec{\lambda}) = \frac{C_w(\vec{\psi})}{(2\pi N_0 F_p)^{F_p T} \cdot \left(1 + \frac{N_p}{N_0}\right)^{F_p \tau_p}} \times \\ \times \exp\{q_w(\vec{\lambda}, \vec{\psi}) - \mu_w(\vec{\lambda}, \vec{\psi})\}. \quad (3.48)$$

Величина $\hat{\vec{\lambda}}$ оцінки вектора параметрів сигналу доставить максимум функції $p(u|\vec{\lambda})$ густини ймовірності. Множник перед експонентою не залежить від параметрів сигналу, а відтак не впливає на $\hat{\vec{\lambda}}$. Експонента ж є монотонною функцією свого показника, тому максимізації підлягає саме він.

Розглянемо ситуацію, в якій необхідно обчислити оцінки амплітуди та початкової фази синусоїдного тестового струму відомої частоти, введенного до обмотки статора асинхронного електродвигуна [7]. Опишемо його як корисний сигнал:

$$s(t, \vec{\lambda}) = I_{ms} \cdot \sin(\omega t + \varphi_s), \quad (3.49)$$

де ω – відома частота;

I_{ms} та φ_s – відповідно оцінювані амплітуда та початкова фаза;

$\vec{\lambda} = (I_{ms} \varphi_s)^T$ – вектор інформаційних параметрів.

З урахуванням (3.49) маємо

$$q_w(\vec{\lambda}, \vec{\psi}) = \frac{2I_{ms}}{N_0} \int_{T_1}^{T_2} \frac{i(t) \sin(\omega t + \varphi_s)}{\Phi(t, N_p/N_0)} dt =$$

$$= \frac{2I_{ms}}{N_0} \left[\cos \varphi_s \int_{T_1}^{T_2} \frac{i(t) \sin \omega t}{\Phi(t, N_p/N_0)} dt + \sin \varphi_s \int_{T_1}^{T_2} \frac{i(t) \cos \omega t}{\Phi(t, N_p/N_0)} dt \right], \quad (3.50)$$

де $i(t)$ – коливання, зняте з датчика струму.

Також

$$\mu(\vec{\lambda}, \vec{\psi}) = \frac{I_s^2}{N_0} \cdot \int_{T_1}^{T_2} \frac{\sin^2(\omega t + \varphi_s)}{\Phi(t, N_p/N_0)} dt.$$

Оскільки в інтервал спостереження вкладається велика кількість періодів сигналу, то з великою точністю

$$\mu_w(\vec{\lambda}, \vec{\psi}) = \frac{I_{ms}^2}{2N_0} \cdot \left(T - \tau_p + \frac{\tau_p}{1 + N_p/N_0} \right). \quad (3.51)$$

Шукатимемо глобальний максимум отриманої з формули (3.48) цільової функції

$$\delta(\vec{\lambda}, \vec{\psi}) = q_w(\vec{\lambda}, \vec{\psi}) - \mu(\vec{\lambda}, \vec{\psi}). \quad (3.52)$$

Оцінку $\hat{\phi}_s$ початкової фази отримуємо, прирівнявши $\partial\delta(\vec{\lambda},\vec{\psi})/d\phi_s$ до нуля. Маємо

$$\begin{aligned} \frac{2I_{ms}}{N_0} \left[-\sin \hat{\phi}_s \int_{T_1}^{T_2} \frac{i(t) \sin \omega t}{\Phi(t, N_p/N_0)} dt + \right. \\ \left. + \cos \hat{\phi}_s \int_{T_1}^{T_2} \frac{i(t) \cos \omega t}{\Phi(t, N_p/N_0)} dt \right] = 0. \end{aligned}$$

Звідси

$$\hat{\phi}_s = \operatorname{arctg} \frac{\int_{T_1}^{T_2} \frac{i(t) \cos \omega t}{\Phi(t, N_p/N_0)} dt}{\int_{T_1}^{T_2} \frac{i(t) \sin \omega t}{\Phi(t, N_p/N_0)} dt}. \quad (3.53)$$

Оцінку $\hat{I}_{ms}$ амплітуди отримаємо, прирівнявши $\partial\delta(\vec{\lambda},\vec{\psi})/dI_{ms}$ до нуля і підставивши туди $\hat{\phi}_s$:

$$\hat{I}_{ms} = \frac{2(1 + N_p/N_0)}{\left[T(1 + N_p/N_0) - \tau_p \cdot N_p/N_0 \right]} \int_{T_1}^{T_2} \frac{i(t) \sin(\omega t + \hat{\phi}_s)}{\Phi(t, N_p/N_0)} dt. \quad (3.54)$$

Математичний сенс виразів (3.53) та (3.54) полягає в тому, що відома операція обчислення кореляційного інтеграла модифікується так, що на ділянці існування імпульсу завади спостережене колювання $i(t)$ підлягає зменшенню в $\Phi(t, N_p/N_0)$ разів. Це є аналогом автоматичного регулювання підсилення, однак тут воно здійснюється як реакція тільки на заваду, а не як традиційне регулювання за величиною $i(t)$ суми «сигнал плюс завада». Неможливість спостереження завади в чистому вигляді не є перешкодою для такого нового виду регулювання, оскільки підстановка оцінки фази (3.53) та оцінка амплітуди (3.54) до цільової функції $\delta(\vec{\lambda}, \vec{\psi})$ зводить останню до функції трьох параметрів $\delta(\vec{\psi}) = \delta(N_p/N_0, \tau_x, \tau_p)$, яка підлягає максимізації числовими методами. На практиці задача максимізації суттєво спрощується, оскільки у виміряному струмі $i(t)$ статора обмотки ТЕД спектральна щільність N_0 неперервної завади дуже мала і за будь-якої імпульсної завади величина N_p/N_0 є настільки великим числом, що на ділянці існування імпульсної завади ваговий множник $1/\Phi(t, N_p/N_0)$ практично дорівнює нулю. За цих же умов передінтегральний множник у виразі (3.54) набуває вигляду $2/(T - \tau_p)$. Отже, задача максимізації цільової функції $\delta(\vec{\psi})$ зводиться до задачі максимізації функції $\delta(\tau_x, \tau_p)$, яка при цифровій обробці сигналу не є аж надто затратною в плані її обчислення.

Позначимо як

$$\Theta = [T_1, \tau_x] \cup [T_1 + \tau_x + \tau_p, T_2] \quad (3.55)$$

ту частину інтервалу спостереження, в якій $1/\Phi(t, N_p/N_0)=1$, тобто яка не «вирізається» із спостережень (іншими словами, не бланкується). З урахуванням вище описаних спрощень вирази (3.53) і (3.54) для оцінок інформаційних параметрів набудуть вигляду

$$\hat{\phi}_s = \arctg \frac{\int_{\Theta} i(t) \cos \omega t dt}{\int_{\Theta} i(t) \sin \omega t dt}, \quad (3.56)$$

$$\hat{I}_{ms} = \frac{2}{T - \tau_p} \int_{\Theta} i(t) \sin(\omega t + \hat{\phi}_s) dt. \quad (3.57)$$

Вирази (3.56) та (3.57) дають змогу, в принципі, отримати оцінки амплітуди та початкової фази за будь-яких довільно встановлених величин τ_x і τ_p . Але це відповідає довільному вибору початкової точки та ширини забланкованого відрізка спостереженого сигналу, тобто таке бланкування не видалить, принаймні, частину враженої завадою ділянки. Тому дисперсія отриманих оцінок не буде найменш можливою. Для забезпечення найменшої дисперсії слід підставити оцінки (3.56) та (3.57) до виразів (3.50) та (3.51) та після цього мінімізувати цільову функцію (3.52) за параметрами τ_x і τ_p числовими методами.

3.3 Синтез пристрою оцінювання параметрів зондувального синусоїдного сигналу, адитивно змішаного з одиночною імпульсною завадою

Структурно детерміновані сигнали широко використовують при тестуванні технічного стану різноманітного обладнання. Відстежування величин параметрів таких сигналів дає змогу своєчасно фіксувати виникнення несправностей або настання передумов до них і у такий спосіб приймати оперативні рішення щодо технічного обслуговування тестового обладнання. Важливим типом такого обладнання є ТЕД локомотивів. Дотримання їх конструктивно встановлених характеристик критично залежить від технічного стану їх обмоток, який напряду пов'язаний з електричними параметрами цих обмоток. Ці величини можна контролювати шляхом вимірювання параметрів спеціально введених тестових струмів. Точному визначенню параметрів перешкоджають електричні коливання від завад, які потрапляють до складу вимірювальної інформації. Це призводить до помилок у прийнятті рішень щодо технічного стану двигуна. Із зростанням кількості електричного обладнання, яке утворює завади, зростає й імовірність таких помилок. Отже, завдання отримання якомога точніших оцінок параметрів тестових сигналів в умовах дії завад стає все більш актуальним.

Розглянемо ситуацію, коли структурно-детермінований сигнал $s(t, \vec{\lambda})$ спостерігається в сумі з імпульсною завадою $n(t)$, тривалість τ_p якої не перевищує тривалості сигналу [6]:

$$u(t) = s(t, \vec{\lambda}) + n(t), \quad (3.58)$$

де t – час;

$\vec{\lambda}$ – вектор інформаційних параметрів сигналу;

$n(t)$ – імпульсна завада у вигляді відрізка гаусівського стаціонарного випадкового процесу з прямокутною обвідною та спектральною густиною потужності, рівномірною в смузі частот сигналу $[-F_p, F_p]$:

$$N_p(f) = \begin{cases} 0,5N_p & \text{при } f \in [-F_p, F_p]; \\ 0 & \text{при інших величинах } f. \end{cases} \quad (3.59)$$

Часові співвідношення між сигналом і завадою показані на рисунку 3.5.

Приймемо до розгляду допоміжне коливання

$$v(t) = u(t) + n_0(t) = s(t, \vec{\lambda}) + n(t) + n_0(t), \quad (3.60)$$

де $n_0(t)$ – неперервний на інтервалі спостереження $[T_1, T_2]$ незалежний від $n(t)$ гаусівський стаціонарний випадковий процес із спектральною густиною потужності

$$N_p(f) = \begin{cases} 0,5N_p & \text{при } f \in [-F_p, F_p]; \\ 0 & \text{при інших величинах } f. \end{cases} \quad (3.61)$$

Нехай допоміжне коливання $v(t)$ продискретизоване за часом з інтервалом

$$\Delta t = \frac{1}{2F_p}. \quad (3.62)$$

Обробці підлягає реалізація коливання $v(t)$ у вигляді сукупності його відліків

$$v_k = s_k(\vec{\lambda}) + n_k + n_{0k} = u_k + n_{0k}, \quad (3.63)$$

$$\text{де } v_k = v(k\Delta t), \quad s_k(\vec{\lambda}) = s(k\Delta t, \vec{\lambda}), \quad n_k = n(k\Delta t), \quad n_{0k} = n_0(k\Delta t).$$

Тут k – номер відліку, що лежить в інтервалі $[k_1, k_2]$, $k_1 = \text{Int}[2F_p \cdot T_1] + 1$; $k_2 = \text{Int}[2F_p \cdot T_2]$.

Відліки гаусівського випадкового процесу, взяті з інтервалом, визначеним співвідношенням (3.62), незалежні. Математичне очікування допоміжного коливання

$$E\{v_k\} = s_k(\vec{\lambda}). \quad (3.64)$$

Кореляційна матриця відліків допоміжного коливання

$$\begin{aligned} E\left\{\left[v_k - s_k(\vec{\lambda})\right] \cdot \left[v_m - s_m(\vec{\lambda})\right]\right\} &= E\left\{\left[n_k + n_{0k}\right] \cdot \left[n_m + n_{0m}\right]\right\} = \\ &= N_p F_p \delta_{km} + N_0 F_p \delta_{km}, \end{aligned} \quad (3.65)$$

де δ_{km} – символ Кронекера.

Звідси дисперсія допоміжного коливання дорівнює:

$$\sigma_0^2 = N_0 F_p \quad (3.66)$$

на інтервалі номерів відліків, на якому присутні сигнал та імпульсна завада, та

$$\sigma_{p0}^2 = (N_p + N_0) F_p \quad (3.67)$$

на інтервалі, де присутні обидві завади n_{0k} та n_k .

З огляду на зазначені вище незалежності відліків сумарної гаусівської завади можна записати спільну щільність імовірності реалізації $\mathbf{v} = \{v_{k1}, v_{k1+1}, \dots, v_{k2}\}$ як

$$p(\mathbf{v}|\vec{\lambda}) = \prod_{k=k_1}^{k_2} p(v_k|\vec{\lambda}), \quad (3.68)$$

де $p(v_k|\vec{\lambda})$ – умовна по $\vec{\lambda}$ щільність ймовірності k -го дискрету допоміжного коливання.

Введемо позначення

$$\left. \begin{aligned} k_{x1} &= \text{Int}\left[2F_p(T_1 + \tau_x)\right] + 1, \\ k_{x2} &= \text{Int}\left[2F_p(T_1 + \tau_x + \tau_p)\right] \end{aligned} \right\} \quad (3.69)$$

для меж імпульсу та

$$k_{\tau p} = \text{Int}\left[2F_p\tau_p\right] \quad (3.70)$$

для тривалості імпульсу в дискретах часу.

Позначимо як Θ_p діапазон номерів дискретів, в якому знаходиться імпульсна завада. Позначимо як Θ_0 діапазон номерів дискретів, які лежать поза імпульсом:

$$\left. \begin{aligned} \Theta_p &= (T_1 + \tau_x, T_1 + \tau_x + \tau_p), \\ \Theta_0 &= [T_1, T_1 + \tau_x] \cup [T_1 + \tau_x + \tau_p, T_2] \end{aligned} \right\}. \quad (3.71)$$

Відповідно до виразу (3.68) можна записати, що

$$\begin{aligned} p(\mathbf{v}|\vec{\lambda}) &= \prod_{\Theta_0} p(v_k|\vec{\lambda}) \cdot \prod_{\Theta_p} p(v_k|\vec{\lambda}) = \prod_{\Theta_0} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi N_0 F_p}} \cdot e^{-\frac{[v_k - s_k(\vec{\lambda})]^2}{2N_0 F_p}} \right\} \times \\ &\times \prod_{\Theta_p} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi (N_0 + N_p) F_p}} \cdot e^{-\frac{[v_k - s_k(\vec{\lambda})]^2}{2(N_0 + N_p) F_p}} \right\}. \end{aligned} \quad (3.72)$$

При спрямуванні величини N_0 до нуля перший співмножник набуває вигляду $\prod_{\Theta_0} \delta[u_k - s_k(\vec{\lambda})]$, оскільки при цьому $n_0=0$ та $v_k=u_k$; вираз $\delta[x]$

означає одновимірну дельта-функцію аргументу x . Як відомо,

$$\prod_{l=1}^N \delta(x_l) = \delta^N(x_1, x_2, \dots, x_N), \quad \text{причому} \quad \int_{x_1, \dots, x_N} \delta^N(x_1, \dots, x_N) d^N x = 1, \quad \text{де}$$

$\delta^N(x_1, \dots, x_N) \in N$ -вимірною дельта-функцією. Тому

$$\begin{aligned} \prod_{\Theta_0} \delta[u_k - s_k(\vec{\lambda})] &= \\ &= \delta^{k_2 - k_1 + 1 - k_{\tau p}} [u_{k_1} - s_{k_1}(\vec{\lambda}), u_{k_1+1} - s_{k_1+1}(\vec{\lambda}), \dots, u_{k_2} - s_{k_2}(\vec{\lambda})], \end{aligned} \quad (3.73)$$

тобто δ -функція тут має стільки вимірів, скільки відліків знаходиться на ділянці, не перекритій імпульсом завади. Така δ -функція не дорівнює нулю, коли для кожної k -ої координати виконана рівність $u_k - s_k = 0$. При спрямуванні до нуля відстані Δt між дискретам u_k коливання $u(t)$ права частина рівності (3.73) набуває фізичного сенсу у вигляді функції $\delta[u(t) - s(t, \vec{\lambda})]$, котра не дорівнює нулю, якщо в кожен момент часу t діє рівність $u(t) - s(t, \vec{\lambda}) = 0$. Обсяг простору, охопленого цією функцією, дорівнює одиниці.

Другий співмножник виразу (3.72) з використанням теореми відліків, як показано в роботі [209], можна представити в неперервному часі:

$$p_p(\mathbf{v} | \vec{\lambda}, \tau_x, \tau_p) = \frac{1}{[2\pi(N_0 + N_p)F_p]^{F_p \tau_p}} e^{-\frac{1}{N_0 + N_p} \int_{T_1 + \tau_x}^{T_1 + \tau_x + \tau_p} [v(t) - s(t, \vec{\lambda})]^2 dt} . \quad (3.74)$$

При спрямуванні величини N_0 до нуля отримаємо з останнього виразу, що

$$p_p(\mathbf{v} | \vec{\lambda}, \tau_x, \tau_p) = p_p(\mathbf{u} | \vec{\lambda}, \tau_x, \tau_p) = \frac{1}{(2\pi N_p F_p)^{F_p \tau_p}} e^{-\frac{1}{N_p} \int_{T_1 + \tau_x}^{T_1 + \tau_x + \tau_p} [u(t) - s(t, \vec{\lambda})]^2 dt} . \quad (3.75)$$

Отже, спрямування N_0 до нуля переводить умовну щільність імовірності (3.72) реалізації $\mathbf{v}$ допоміжного коливання в умовну щільність імовірності реалізації $\mathbf{u}$ реально спостереженого коливання

$$p(\mathbf{u}|\vec{\lambda}, \tau_x, \tau_p) = \delta[u(t) - s(t, \vec{\lambda})] \Big|_{t \in \Theta_0} \times p_p(\mathbf{u}|\vec{\lambda}), \quad (3.76)$$

де перший співмножник обчислюють по ділянці, вільній від імпульсу завади, а другий співмножник – по ділянці, на якій діє імпульс завади.

Максимум функції (3.76) має місце за умови дотримання умови:

$$u(t) = s(t, \vec{\lambda}), \quad t \in \Theta_0. \quad (3.77)$$

Однак ця умова малоконструктивна з точки зору синтезу пристрою оцінювання, оскільки означає, що треба способом перебору підібрати $\vec{\lambda}$ та величини τ_x і τ_p (які визначають інтервал Θ_0 при відомому T_1) так, щоб рівність (3.77) була виконана. Крім того, неідеальність пристрою зберігання реалізації $\mathbf{u}$ та пристрою формування сигналу $s(t, \vec{\lambda})$ не забезпечать на практиці виконання рівності (3.77). Тому більш конструктивним кроком вбачається отримання неперервного по параметрах наближеного виразу для $p(\mathbf{u}|\vec{\lambda}, \tau_x, \tau_p)$. Безпосередньо пов'язаним з виводом точного виразу (3.76) варіантом дій вбачається апроксимація цього виразу, отримана з виразу (3.72) при досить малій, але все ж ненульовій величині N_0 . Застосувавши до (3.72) теорему відліків аналогічно тому, як це було зроблено при виводі виразу (3.74), отримаємо, для доволіно малих числових значень величини N_0 (при цьому $N_0 \ll N_p$), що

$$p(\mathbf{u}|\vec{\lambda}, \tau_x, \tau_p) \approx p(\mathbf{v}|\vec{\lambda}, \tau_x, \tau_p) = \frac{1}{(2\pi N_0 F_p)^{F_p(T_2 - T_1 - \tau_p)}} e^{-\frac{1}{N_0} \int_{\Theta_0} [u(t) - s(t, \vec{\lambda})]^2 dt} \times$$

$$\times \frac{1}{(2\pi N_p F_p)^{F_p \tau_p}} e^{-\frac{1}{N_p} \int_{\Theta_p} [u(t) - s(t, \vec{\lambda})]^2 dt}. \quad (3.78)$$

Введемо функцію

$$\Phi(t, \tau_x, \tau_p) = \begin{cases} 1, & t \in \Theta_0; \\ \frac{N_p}{N_0}, & t \in \Theta_p. \end{cases} \quad (3.79)$$

Після нескладних перетворень отримаємо, що

$$p(\mathbf{u}|\vec{\lambda}, \tau_x, \tau_p) \approx \frac{1}{(2\pi N_0 F_p)^{F_p(T_2 - T_1)} \cdot \left(\frac{N_p}{N_0}\right)^{F_p \tau_p}} e^{-\frac{1}{N_0} \int_{T_1}^{T_2} \frac{[u(t) - s(t, \vec{\lambda})]^2}{\Phi(t, \tau_x, \tau_p)} dt}. \quad (3.80)$$

При відомих T_1 і T_2 і невідомих початку та тривалості завадового імпульсу оцінкою сукупності інформаційних параметрів $\vec{\lambda}$ сигналу та параметрів τ_x і τ_p завади буде вектор

$$\begin{pmatrix} \vec{\lambda} \\ \tau_x \\ \tau_p \end{pmatrix} = \arg \max_{\vec{\lambda}, \tau_x, \tau_p} p(\mathbf{u}|\vec{\lambda}, \tau_x, \tau_p). \quad (3.81)$$

По відношенню до обмотки двигуна сигналом з оцінюваними параметрами є струм в ній. За синусоїдного струму це

$$s(t, \vec{\lambda}) = I_{ms} \sin(\omega t + \varphi_s), \quad (3.82)$$

де кутова частота ω відома, а I_{ms} та φ_s – призначені для оцінювання величини амплітуди та початкової фази. За цієї обставини

$$p(\mathbf{u} | \vec{\lambda}, \tau_x, \tau_p) = p(\mathbf{i} | \vec{\lambda}, \tau_x, \tau_p) \approx \frac{1}{(2\pi N_0 F_p)^{F_p(T_2 - T_1)} \left(\frac{N_p}{N_0}\right)^{F_p \tau_p}} \times \\ \times \exp \left\{ -\frac{1}{N_0} \int_{T_1}^{T_2} \frac{[i(t) - I_{ms} \sin(\omega t + \varphi_s)]^2}{\Phi(t, \tau_x, \tau_p)} dt \right\}, \quad (3.83)$$

де $i(t)$ – сума сигналу та завад, яка безпосередньо спостерігається.

Звідси оцінки $\hat{\varphi}_s$ та $\hat{I}_{ms}$ задовольняють умови відповідно $\frac{\partial p(\mathbf{i} | \dots)}{\partial \varphi_s} = 0$ та

$$\frac{\partial p(\mathbf{i} | \dots)}{I_{ms}} = 0, \text{ звідки}$$

$$\hat{\varphi}_s = \arctg \frac{\int_{T_1}^{T_2} \frac{i(t) \cdot \cos \omega t}{\Phi(t, \tau_x, \tau_p)} dt}{\int_{T_1}^{T_2} \frac{i(t) \cdot \sin \omega t}{\Phi(t, \tau_x, \tau_p)} dt}, \quad (3.84)$$

$$\hat{I}_{ms} = \frac{2}{T_2 - T_1 - \tau_p} \cdot \int_{T_1}^{T_2} \frac{i(t) \cdot \sin(\omega t + \varphi_s)}{\Phi(t, \tau_x, \tau_p)} dt. \quad (3.85)$$

Підстановка виразів (3.84) і (3.85) в (3.83) перетворює останній (при фіксованій N_0) в функцію величин τ_x , τ_p і N_p . Звернемо увагу на те, що величина дробу $1/\Phi(t, \tau_x, \tau_p)$ при $N_p \gg N_0$ в контексті його обчислення призводить до виключення області Θ_p з діапазону інтегрування (тобто до бланкування вхідного коливання) незалежно від величини N_p , оскільки в цій області $1/\Phi(t, \tau_x, \tau_p) \approx 0$. В знаменнику множника перед експонентою величина $(N_p/N_0)^{F_p \tau_p}$ при вказаному вище довільному виборі $N_0 \ll N_p$ впливає на величину максимуму функції $p(\mathbf{u}|\vec{\lambda}, \tau_x, \tau_p)$, але не на його положення по координатах φ_s та I_{ms} . Тому величина дробу N_p/N_0 може бути довільною, але набагато більшою одиниці. Отже, після підстановки (3.84) та (3.85) в (3.83) залишається тільки знайти точку $(\hat{\tau}_x, \hat{\tau}_p)$ максимуму функції $p(\mathbf{u}|\tau_x, \tau_p)$ по координатах τ_x і τ_p будь-яким з відомих методів пошуку екстремуму. Після цього слід підставити отримані оцінки τ_x і τ_p до виразів (3.84) і (3.85) та обчислити оцінки амплітуди та початкової фази тестового струму обмотки. Структурна схема пристрою, який реалізує отриману процедуру оцінювання, наведена на рисунку 3.6.

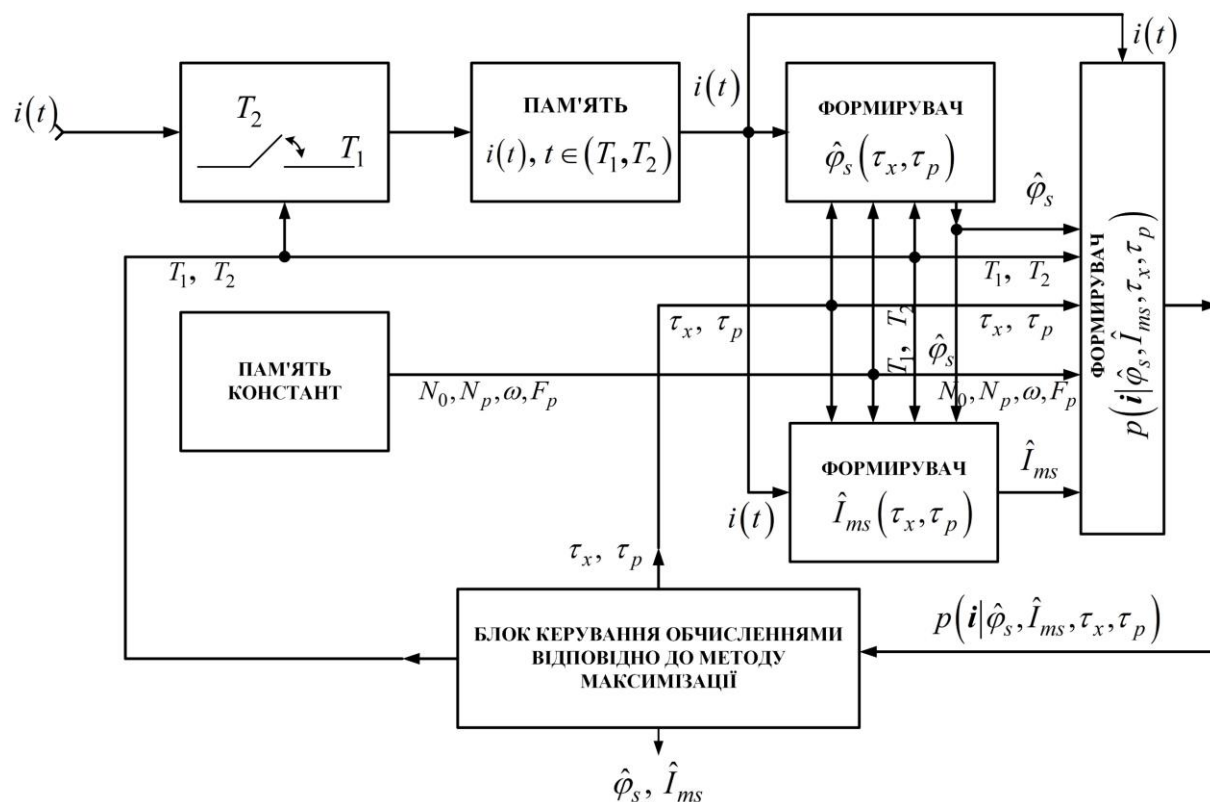


Рисунок 3.6 – Структурна схема пристрою, який реалізує отриману процедуру оцінювання параметрів зондувального синусоїдного сигналу, адитивно змішаного з одиночною імпульсною завадою

Структура синтезованого пристрою та функціональне призначення його блоків допускають як апаратну, так і програмну реалізацію. Отже, розглянуто розв'язування задач, які в широкому сенсі відносяться до загальної проблеми оцінювання параметрів структурно детермінованого сигналу на фоні завад. Досліджено залишений без належної уваги випадок, коли відсутня неперервна завада, яка діє протягом усього часового інтервалу спостереження, але присутня адитивна імпульсна завада з невідомими моментом початку та тривалістю. Така ситуація характерна для практичних вимірювань параметрів тестового струму, адитивно доданого до основного струму обмотки електродвигуна. Математично коректним способом вдалось урахувати відсутність неперервної завади і конструктивним (з точки зору синтезу пристрою) способом інтерпретувати отриману функцію правдоподібності спостереженої реалізації суміші сигналу та імпульсної

завади. Це забезпечить отримання більш наближених до реальності оцінок параметрів тестового сигналу та пов'язаних з ними величин електричних параметрів обмотки, а відтак – підвищить точність діагностування технічного стану ТЕД.

Процедуру оцінювання параметрів тестового сигналу сформовано у вигляді, який дає змогу застосувати широке коло доступних методів розрахунку кінцевих величин оцінок при максимізації функції правдоподібності за часовими параметрами імпульсної завади. Дослідження шляхів розв'язання цієї задачі є основним напрямом подальших робіт.

3.4 Визначення меж Крамера - Рао для амплітуди та фази синусоїди, адитивно змішаної з одиночним шумовим імпульсом завади

Важливість синусоїдних коливань для широкого кола технічних застосувань є причиною підвищеної уваги до визначення якомога більш точних числових величин їх параметрів. За наявності завад, викликаних втручанням спотворюючих факторів у спостережені часові залежності досліджуваних коливань, визначені величини є наближеними оцінками фактичних числових значень. В опублікованих на сьогодні працях всебічно розглянуті теоретичні та прикладні аспекти оцінювання параметрів синусоїдного коливання і визначення точності отриманих оцінок за результатами спостережень, зроблених в умовах дії неперервної завади. Певні доробки наявні й в питанні обчислення таких оцінок з урахуванням дії імпульсних завад. Однак, не вдалося виявити публікацій, в яких було б подане співвідношення для визначення потенційно досяжної точності оцінок параметрів синусоїдного коливання, спотвореного дією короткочасної імпульсної завади. Знаходження таких співвідношень дало б змогу визначити

об'єктивні межі технічних можливостей систем передачі інформації та досяжної точності вимірювальних пристроїв.

Вихідна ситуація, в якій необхідно отримати оцінки амплітуди та початкової фази синусоїди та знайти межі Крамера-Рао для отриманих оцінок, є наступною. На інтервалі часу $[T_1, T_2]$ існує синусоїда з невідомими амплітудою I_{ms} і початковою фазою φ_s та відомою частотою ω . На всьому протязі цього інтервалу адитивно до синусоїди діє неперервний шумовий гаусівський стаціонарний випадковий процес із спектральною густиною потужності величиною $0,5N_0$, рівномірною в інтервалі частот $[-F_p, F_p]$ і величиною 0 поза цим інтервалом. Всередині вказаного інтервалу часу на проміжку $[T_1 + \tau_x, T_1 + \tau_x + \tau_p]$ також адитивно діє імпульс у вигляді фрагменту гаусівського стаціонарного випадкового процесу зі спектральною густиною потужності $0,5N_p$, рівномірною в тому ж інтервалі частот і величиною 0 поза цим інтервалом. Як показано в роботі [6], умовну щільність ймовірності реалізації струму i , спостережену на інтервалі $[T_1, T_2]$, описує вираз

$$p(i|I_{ms}, \varphi_s, \tau_x, \tau_p) = \frac{1}{(2\pi N_0 F_p)^{F_p(T_2-T_1)} \cdot \left(1 + \frac{N_p}{N_0}\right)^{F_p \tau_p}} \times \\ \times \exp \left\{ -\frac{1}{N_0} \int_{T_1}^{T_2} \frac{[i(t) - I_{ms} \cdot \sin(\omega t + \varphi_s)]^2}{\Phi(t, \tau_x, \tau_p)} dt \right\}, \quad (3.86)$$

де $i(t)$ – залежність спостереженого коливання від часу;

$$\Phi(t, \tau_x, \tau_p) = \begin{cases} 1 + \frac{N_p}{N_0}, & t \in [T_1 + \tau_x, T_1 + \tau_x + \tau_p], \\ 1 & \text{при інших } t. \end{cases} \quad (3.87)$$

Вважатимемо, що величини T_1, T_2, τ_x, τ_p відомі. Виходячи з виразу (3.86) шукатимемо дисперсії σ_I^2 та σ_φ^2 оцінок $\hat{I}_{ms}$ та $\hat{\varphi}_s$ відповідно амплітуди та початкової фази струму. Ці дисперсії є діагональними елементами коваріаційної матриці $\vec{K}$. У свою чергу, ця матриця пов'язана з інформаційною матрицею Фішера $\vec{\Phi}$ матричною нерівністю

$$\vec{K} \geq \vec{\Phi}^{-1}. \quad (3.88)$$

Елементи інформаційної матриці Фішера мають вигляд

$$\Phi_{ij} = -E \left\{ \frac{\partial^2}{\partial \lambda_i \cdot \partial \lambda_j} \ln p(u|\vec{\lambda}) \Big| \vec{\lambda} \right\}. \quad (3.89)$$

Тут $E\{\dots\}$ позначає операцію математичного очікування по вектору параметрів $\vec{\lambda} = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M)^T$, « T » позначає матричне транспонування; u позначає спостережену реалізацію випадкового процесу.

Щодо нашої ситуації $\vec{\lambda} = (I_{ms}, \varphi_s)^T$. Множник перед експонентою у формулі (3.86) не залежить від $\vec{\lambda}$; позначимо його C . Введемо також позначення

$$u(t) = \frac{i(t)}{\sqrt{\Phi(t, \tau_x, \tau_p)}}, \quad (3.90)$$

$$s(t, \vec{\lambda}) = \frac{I_{ms} \sin(\omega t + \varphi_s)}{\sqrt{\Phi(t, \tau_x, \tau_p)}}. \quad (3.91)$$

З урахуванням прийнятих позначень вираз (3.86) набуде вигляду

$$p(\mathbf{u}|\vec{\lambda}, \tau_x, \tau_p) = C \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{N_0} \int_{T_1}^{T_2} [u(t) - s(t, \vec{\lambda})]^2 dt \right\}. \quad (3.91)$$

Підставивши цей вираз у (3.89) і врахувавши, що $E\{u(t)\} = s(t, \vec{\lambda})$, отримаємо, що

$$\Phi_{ij} = \frac{2}{N_0} \int_{T_1}^{T_2} \frac{\partial s(t, \vec{\lambda})}{\partial \lambda_i} \cdot \frac{\partial s(t, \vec{\lambda})}{\partial \lambda_j} dt. \quad (3.92)$$

Введемо позначення $\lambda_1 = I_{ms}$, $\lambda_2 = \varphi_s$. Тоді елементи інформаційної матриці Фішера при $\omega \gg 1$ визначатимуться такими виразами:

$$\begin{aligned} \Phi_{11} = \Phi_{II} &= \frac{2}{N_0} \int_{T_1}^{T_2} \left[\frac{\partial s(t, \vec{\lambda})}{\partial I_{ms}} \right]^2 dt = \frac{2}{N_0} \int_{T_1}^{T_2} \left[\frac{\sin^2(\omega t + \varphi_s)}{\Phi(t, \tau_x, \tau_p)} \right] dt \approx \\ &\approx \frac{T_2 - T_1 - \tau_p}{N_0} + \frac{\tau_p}{N_0 + N_p}; \end{aligned} \quad (3.93)$$

$$\Phi_{12} = \Phi_{I\varphi} = \Phi_{21} = \Phi_{\varphi I} \approx 0; \quad (3.94)$$

$$\Phi_{22} = \Phi_{\varphi\varphi} = \frac{2}{N_0} \int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{\Phi(t, \tau_x, \tau_p)} \cdot \left\{ \frac{\partial}{\partial \varphi_s} [I_{ms} \sin(\omega t + \varphi_s)] \right\}^2 dt \approx$$

$$\approx I_{ms}^2 \cdot \left(\frac{T_2 - T_1 - \tau_p}{N_0} + \frac{\tau_p}{N_0 + N_p} \right). \quad (3.95)$$

Отже, інформаційна матриця Фішера є такою:

$$\vec{\Phi} = \begin{pmatrix} \frac{T_2 - T_1 - \tau_p}{N_0} + \frac{\tau_p}{N_0 + N_p} & 0 \\ 0 & I_{ms}^2 \cdot \left(\frac{T_2 - T_1 - \tau_p}{N_0} + \frac{\tau_p}{N_0 + N_p} \right) \end{pmatrix}. \quad (3.96)$$

Отримана матриця (3.96) є діагональною. Зворотна їй матриця також є діагональною, тому з урахуванням нерівності (3.88) отримаємо, що

$$\vec{K} \geq \begin{pmatrix} \left(\frac{T_2 - T_1 - \tau_p}{N_0} + \frac{\tau_p}{N_0 + N_p} \right)^{-1} & 0 \\ 0 & I_{ms}^{-2} \cdot \left(\frac{T_2 - T_1 - \tau_p}{N_0} + \frac{\tau_p}{N_0 + N_p} \right)^{-1} \end{pmatrix}. \quad (3.97)$$

При $N_p \gg N_0$ маємо нерівність

$$\vec{K} \geq \begin{pmatrix} \frac{N_0}{T_2 - T_1 - \tau_p} & 0 \\ 0 & \frac{N_0}{I_{ms}^2 \cdot (T_2 - T_1 - \tau_p)} \end{pmatrix}. \quad (3.98)$$

З цих матричних нерівностей визначимо межі Крамера-Рао як мінімальні величини дисперсій параметрів, тобто діагональні елементи. Відповідні мінімальні середньоквадратичні відхилення оцінок складають

$$\sigma_{I_{ms \min}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{T_2 - T_1 - \tau_p}{N_0} + \frac{\tau_p}{N_0 + N_p}}} \approx_{N_p \gg N_0} \quad (3.99)$$

$$\approx_{N_p \gg N_0} \sqrt{\frac{N_0}{T_2 - T_1 - \tau_p}}, \quad (3.100)$$

$$\sigma_{\varphi_{\min}} = \frac{1}{I_{ms} \cdot \sqrt{\frac{T_2 - T_1 - \tau_p}{N_0} + \frac{\tau_p}{N_0 + N_p}}} \approx_{N_p \gg N_0} \quad (3.101)$$

$$\approx_{N_p \gg N_0} \frac{1}{I_{ms}} \sqrt{\frac{N_0}{T_2 - T_1 - \tau_p}}. \quad (3.102)$$

Перетворимо вирази (3.99) та (3.101) до вигляду, зручного для візуального спостереження процесів. Для цього введемо ширину ΔF смуги пропускання пристрою оцінювання параметрів. У виразі (3.99) помножимо чисельники і знаменники підкорінних дробів на $18\Delta F$. Отримаємо, що

$$\sigma_{I_{ms \min}} = \frac{1}{\sqrt{18\Delta F \left[\frac{T_2 - T_1 - \tau_p}{18N_0\Delta F} + \frac{\tau_p}{18(N_0 + N_p)\Delta F} \right]}}. \quad (3.103)$$

Оскільки $2N_0 \cdot \Delta F = \sigma_0^2$ (дисперсія неперервного шуму), то $18N_0 \cdot \Delta F = (3\sigma_0)^2 = I_{n0,5}^2$, де

$$I_{n0,5} = 3\sigma_0 \quad (3.104)$$

є напівшириною шумової «доріжки» на екрані осцилографа.

Аналогічно $18N_p \cdot \Delta F = (3\sigma_p)^2 = I_p^2$, де

$$I_p = 3\sigma_p \quad (3.105)$$

є умовною амплітудою шумової імпульсної завади.

Отже, можна записати, що

$$\sigma_{I_{ms} \min} = \frac{1}{3 \cdot \sqrt{\frac{2\Delta F(T_2 - T_1 - \tau_p)}{I_{n0,5}^2} + \frac{2\Delta F\tau_p}{I_{n0,5}^2 + I_p^2}}} . \quad (3.106)$$

Аналогічно

$$\sigma_{\varphi \min} = \frac{1}{3I_{ms} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta F(T_2 - T_1 - \tau_p)}{I_{n0,5}^2} + \frac{2\Delta F\tau_p}{I_{n0,5}^2 + I_p^2}}} . \quad (3.107)$$

Для обчислення величини мінімального середньоквадратичного відхилення (МСВ) у ході експериментальних досліджень замість точної величини амплітуди струму в формулу (3.107) можна підставити її оцінку, обчислену у такий спосіб, як у роботах [5, 209].

На рисунках 3.7 і 3.8 наведено результати обчислення залежностей МСВ оцінок відповідно амплітуди та фази від I_p при $I_{ms}=0,1$ А; $I_{n0,5}=0,02$ А; $T_2 - T_1 = 0,01$ с; $\Delta F=16$ кГц і трьох величин тривалості імпульсу. Крива 1 відповідає $\tau_p = 0,1(T_2 - T_1)$, крива 2 – $\tau_p = 0,5(T_2 - T_1)$, крива 3 – $\tau_p = 0,75(T_2 - T_1)$ (Додаток Е).

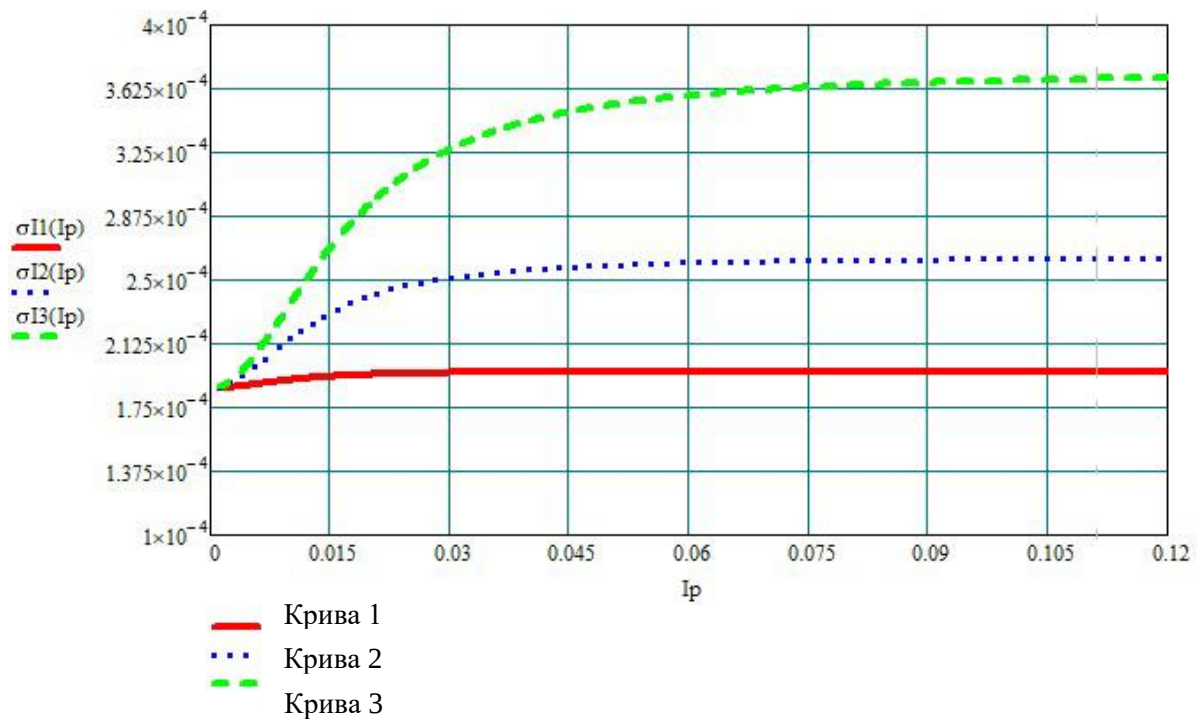


Рисунок 3.7 – Залежність мінімального середньоквадратичного відхилення оцінки амплітуди синусоїди від амплітуди імпульсу завади

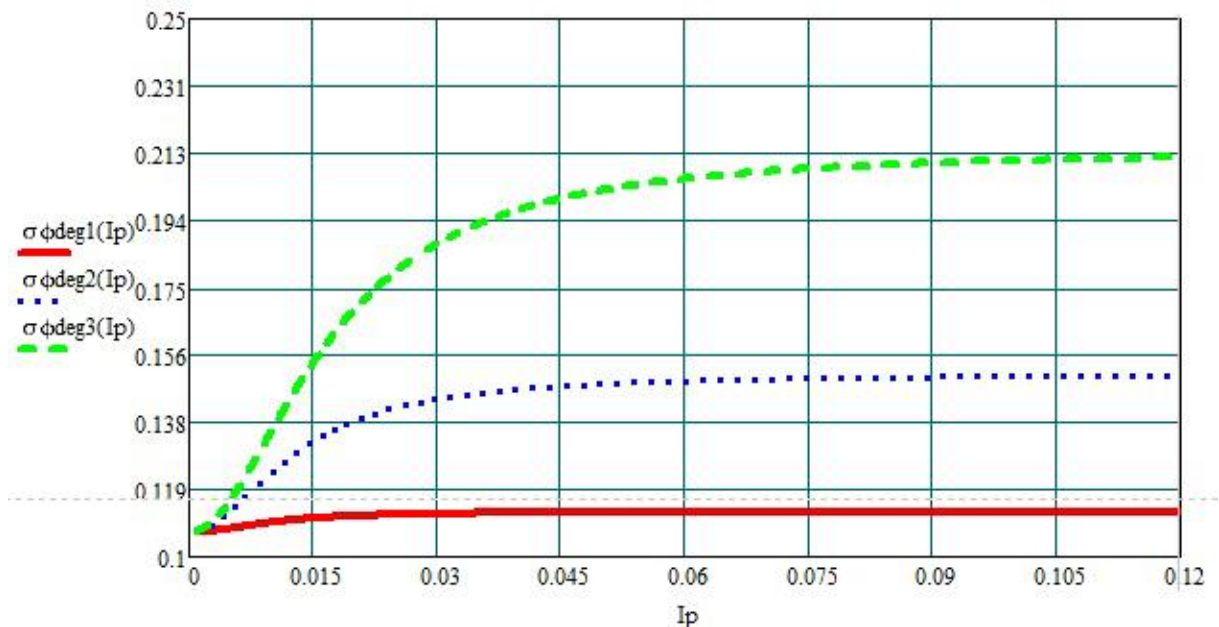


Рисунок 3.8 – Залежність мінімального середньоквадратичного відхилення оцінки початкової фази синусоїди від амплітуди імпульсу завади

Стабілізація величин МСВ при зростанні амплітуд імпульсу обумовлена зростанням за цих умов бланкуючої дії знаменника виразу (3.86), з причини чого уражена імпульсом ділянка сигнально-завадової реалізації

робить все менший внесок у формування оцінок. Згідно з виразами (3.106) та (3.107) при великих величинах амплітуди імпульсу величини МСВ майже цілком визначаються стаціонарним шумом.

На рисунку 3.9 наведено графік залежності МСВ оцінки амплітуди від ΔF при $I_{n0,5}=10^{-3}$ А; $I_p=1$ А; $T_2-T_1=0,01$ с; $\tau_p=0,5(T_2-T_1)$. На рисунку 3.10 наведено графіки залежності МСВ оцінки фази від ΔF за тих самих початкових даних. Крива 1 відповідає $I_{ms}=0,01$ А, крива 2 – $I_{ms}=0,05$ А, крива 3 – $I_{ms}=0,1$ А (Додаток Е).

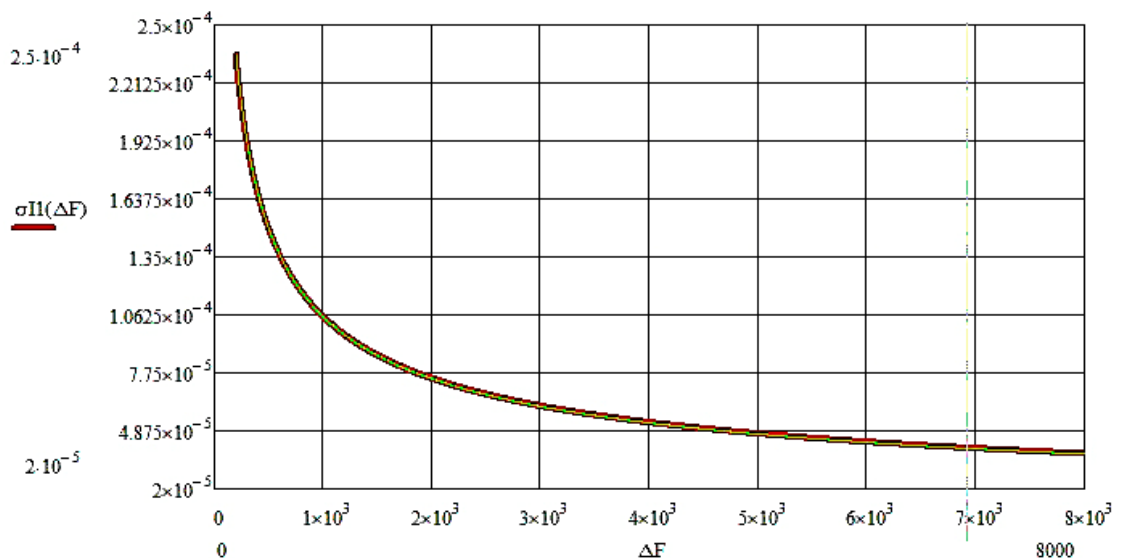


Рисунок 3.9 – Залежність мінімального середньоквадратичного відхилення оцінки амплітуди синусоїди від ширини смуги пропускання оцінювача

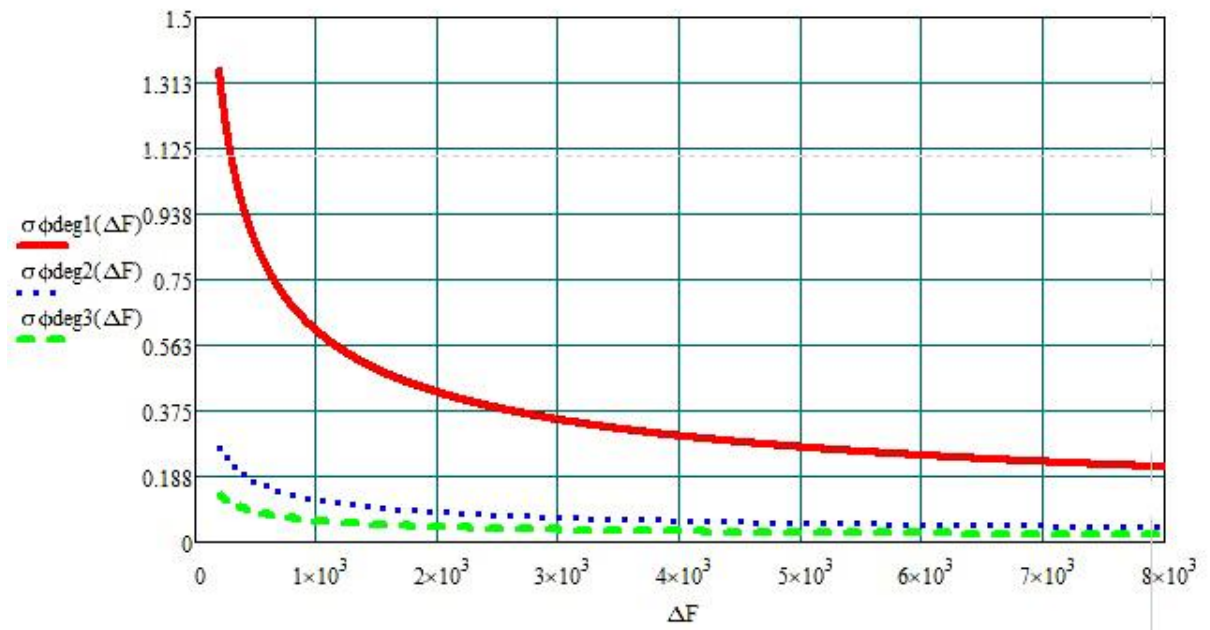


Рисунок 3.10 – Залежність мінімального середньоквадратичного відхилення оцінки початкової фази синусоїди від ширини смуги пропускання оцінювача

Зменшення величин МСВ із зростанням величини ΔF при сталих I_p та $I_{n0,5}$ пояснюється відповідним до формул (3.104) і (3.105) зменшенням спектральних густин потужності обох завад.

3.5 Висновки по розділу 3

1. На базі аналізу електромагнітного оточення визначено склад комплексу завад, які створюють електричний фон для спостереження тестового струму в обмотці ТЕД, що дозволило шляхом аналізу спектрального складу цих завад встановити діапазон частот, у якому їхня спектральна щільність найменша.

2. З урахуванням можливих варіантів часових залежностей залишкових завад розроблено математичну процедуру оцінювання

параметрів тестового сигналу, що дозволило шляхом комп'ютерного моделювання випадку застосування синусоїдного тестового сигналу визначити точнісні характеристики цієї процедури в широкому діапазоні інтенсивності завади і ступеня перекриття сигналу і завади за часом.

3. На базі статистичного подання адитивної суміші дискретних в часі інформаційного сигналу та імпульсної завади, а також з використанням представлення цієї суміші в базисі ортогональних функцій відліків знайдено вираз для функції правдоподібності вимірювального струму тестування обмотки статора ТЕД, що дозволило запропонувати можливий шлях математичної обробки результатів вимірювань, який призводить до зменшення впливу імпульсних завад на отримані величини інформаційних параметрів. Це дасть змогу підвищити точність діагностування технічного стану електродвигуна.

4. Шляхом аналізу отриманої функції правдоподібності знайдено співвідношення для розрахунку амплітуди та початкової фази тестового струму які враховують величини спектральної щільності, часу початку та тривалості імпульсної завади.

5. Для статистичної моделі адитивної суміші сигналу та завад, яка описана функцією щільності розподілу ймовірності миттєвого значення. визначено вирази для меж Крамера - Рао оцінок амплітуди та початкової фази синусоїди при її спостереженні на фоні суміші імпульсної та неперервної шумових завад, що дає змогу додатково об'єктивізувати визначення граничних технічних можливостей як нових, так і сучасних систем і пристроїв, що використовують синусоїдні інформаційні сигнали. Отримані найвищі граничні точності оцінок є абсолютними, оскільки вони розраховані за всіх відомих параметрів (крім інформаційних) функції щільності розподілу ймовірності спостереженої реалізації вхідного коливання.

РОЗДІЛ 4

РЕАЛІЗАЦІЯ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ НА ДІЛЬНИЦЯХ ЗАЛІЗНИЦЬ В
УМОВАХ ДІЇ СКЛАДНИХ ЗАВАД

4.1 Синтез пристрою контролю технічного стану асинхронних ТЕД в умовах дії п'ятикомпонентної адитивної завади

4.1.1 Формування цільової функції

Визначимо базову обчислювальну структуру пристрою, який забезпечує завадостійке приймання зондувальних сигналів моніторингу технічного стану асинхронних ТЕД в умовах дії п'ятикомпонентної завади. При цьому чотири її компоненти являють собою структурно детерміновані коливання, а п'ята є широкосмуговим гаусівським шумом.

Обґрунтованою довжиною інтервалу спостереження сигналу є відрізок часу $\Delta T = T_2 - T_1 = 1$ с, де T_1 – момент початку спостереження, T_2 – момент кінця спостереження. Параметри і склад структурно-детермінованих завад можуть змінюватися кожного інтервалу. Їх також неможливо спостерігати в окремому від сигналу каналі. Тому єдиним виходом є сумісне оцінювання параметрів сигналу та структурно-детермінованих завад на фоні єдиної випадкової завади у вигляді широкосмугового стаціонарного гаусівського шуму. В такій ситуації найкращу точність отримуваних оцінок забезпечує оцінювання за критерієм мінімуму середнього квадрату похибки [5].

Отже, за прийнятим в попередньому підрозділі критерієм, найкращими оцінками параметрів сигналу і завад беруть такі їх числові значення, які забезпечують мінімум величини

$$\varepsilon_H^2 = \frac{1}{T_2 - T_1} \cdot \int_{T_1}^{T_2} \left\{ u(t) - [s(t) + v_P(t) + v_T(t) + v_Q(t) + v_C(t)] \right\}^2 dt. \quad (4.1)$$

Вважатимемо, що $T_1 = 0$ (тобто сумістимо з нулем початок інтервалу спостереження). Також вважатимемо, що напруга на вході кінцевого пристрою ТРК рівномірно продискретизована в часі з інтервалом Δt . При кількості відліків напруги K матимемо $T_2 = (K - 1) \cdot \Delta t$, а вираз (4.1) перетвориться на

$$\varepsilon_H^2 = (K - 1)^{-1} \cdot \sum_{k=1}^K \left\{ u_k - (s_k + v_{Pk} + v_{Tk} + v_{Qk} + v_{Ck}) \right\}^2, \quad (4.2)$$

де $u_k = u(t_k) = u((k - 1)\Delta t)$; аналогічний сенс мають й інші доданки суми (4.2).

Оскільки $K = \text{const}$, то з мінімумом величини ε_H^2 збігатиметься й мінімум величини

$$\varepsilon_u^2 = (K - 1) \varepsilon_H^2 = \sum_{k=1}^K \left\{ u_k - (s_k + v_{Pk} + v_{Tk} + v_{Qk} + v_{Ck}) \right\}^2 \quad (4.3)$$

Після піднесення до другого ступеню та групування доданків отримаємо таку цільову функцію:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_u^2 = & \sum_{k=1}^K u_k^2 - 2 \sum_{k=1}^K u_k v_{Pk} - 2 \sum_{k=1}^K u_k v_{Tk} - 2 \sum_{k=1}^K u_k v_{Qk} - 2 \sum_{k=1}^K u_k v_{Ck} - 2 \sum_{k=1}^K u_k s_k + \\
 & + \sum_{k=1}^K v_{Pk}^2 + \sum_{k=1}^K v_{Tk}^2 + \sum_{k=1}^K v_{Qk}^2 + \sum_{k=1}^K v_{Ck}^2 + \sum_{k=1}^K s_k^2 + 2 \sum_{k=1}^K v_{Pk} v_{Tk} + 2 \sum_{k=1}^K v_{Pk} v_{Qk} + \\
 & + 2 \sum_{k=1}^K v_{Pk} v_{Ck} + 2 \sum_{k=1}^K v_{Tk} v_{Qk} + 2 \sum_{k=1}^K v_{Pk} s_k + 2 \sum_{k=1}^K v_{Tk} v_{Ck} + \\
 & + 2 \sum_{k=1}^K v_{Qk} v_{Ck} + 2 \sum_{k=1}^K v_{Tk} s_k + 2 \sum_{k=1}^K v_{Qk} s_k + 2 \sum_{k=1}^K v_{Ck} s_k .
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

Перший доданок цього виразу є постійною величиною для вибірки числових значень $\{u_1, u_2, \dots, u_k\}$, отриманою на кожному конкретному інтервалі спостереження. Отже, ця величина не впливає на положення мінімуму числової величини ε_u^2 в просторі параметрів сигналу та завад і тому її можна виключити з кінцевого виразу для цільової функції. Доданки у вигляді сум квадратів сигналу та завад мають фізичний сенс енергій цих коливань на інтервалі спостереження; вони суттєво впливають на ε_u^2 . Також суттєво впливають на цю величину і взаємні кореляційні функції сигналу і вибірки $\sum_{k=1}^K u_k s_k$ та кожної із завад та вибірки $\sum_{k=1}^K u_k v_k$. Всі інші доданки суми (4.4) є взаємними кореляційними функціями завад та кожної із завад з

сигналом. Як буде показано нижче, деякі з них дають нехтувано малий внесок в цільову функцію.

Оцінимо взаємні кореляційні зв'язки сигналу з кожною із завад. Зв'язок сигналу з імпульсною завадою описується у виразі (4.4) взаємно кореляційною сумою $2 \sum_{k=1}^K v_{Pk} s_k$. Для оцінки її величини перейдемо до неперервного часу. Для комплексних процесів $x(t)$ та $y^*(t)$ (зірочка означає комплексне спряження) справедлива рівність

$$\int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot y^*(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \cdot Y^*(f) df, \quad (4.5)$$

де $X(f)$ та $Y(f)$ – спектральні щільності вказаних процесів.

Спектр імпульсної завади монотонно спадає із зростанням частоти. Тому наведений вище інтеграл від добутку спектральних щільностей дуже малий порівняно з енергією кожного з співмножників, а відтак малим є й інтеграл за часом від добутку сигналу та імпульсної завади і, відповідно, малою є й відповідна йому взаємнокореляційна сума $2 \sum_{k=1}^K v_{Pk} s_k$. Тож цим доданком виразу (4.4) можна знехтувати.

Зв'язок сигналу із завадою від тягового перетворювача локомотива описується у виразі (4.4) взаємнокореляційною сумою $2 \sum_{k=1}^K v_{Tk} s_k$. Оскільки частота імпульсів може сягати 120 Гц (а частоти їх найпотужніших гармонічних складових приблизно в 10 разів більші), то в певних випадках

слід очікувати сильної кореляції сигналу із цим видом завади. Тож доданок

$$2 \sum_{k=1}^K v_{Tk} s_k \text{ необхідно залишати.}$$

Зв'язок сигналу із завадою від тягового струму в рейках та від лінії електропередач описано у виразі (4.4) взаємнокореляційною сумою $2 \sum_{k=1}^K v_{Qk} s_k$.

Гармоніки цієї завади мають частоти, кратні 50 Гц. Порівнюючи їх частоти із частотами гармонік інформаційних сигналів, неважко визначити, що мінімальна відстань між цими частотами складає не менш ніж 20 Гц. Взаємна кореляційна сума двох настільки рознесених по частоті синусоїдних коливань на інтервалі спостереження тривалістю 1с практично дорівнює нулю. Тому доданком $2 \sum_{k=1}^K v_{Qk} s_k$ виразу (4.4) можна знехтувати.

Зв'язок сигналу із завадою від тонального рейкового кола (ТРК) описано у виразі (4.4) взаємнокореляційною сумою $2 \sum_{k=1}^K v_{Ck} s_k$. Цією компонентою теж можна знехтувати.

Взаємнокореляційний зв'язок між імпульсною завадою та завадою від тягового перетворювача локомотива описано у виразі (4.4) сумою $2 \sum_{k=1}^K v_{Pk} v_{Tk}$. Частоти слідування імпульсів тягового перетворювача лежать в діапазоні 2...120 Гц. Цей діапазон повністю перекривається спектром імпульсної завади, тому згідно із співвідношенням (4.5) розглянутою взаємнокореляційною сумою знехтувати не можна.

З тієї ж самої причини не можна знехтувати й взаємнокореляційною сумою $2 \sum_{k=1}^K v_{Pk} v_{Qk}$. А ось сумою $2 \sum_{k=1}^K v_{Pk} v_{Ck}$ знехтувати можна з тієї ж самої причини, з якої ми знехтували взаємнокореляційною сумою імпульсної завади та інформаційного сигналу.

Взаємнокореляційна сума $2 \sum_{k=1}^K v_{Tk} v_{Qk}$ описує зв'язок між завадою від тягового перетворювача локомотива та завадою від тягового струму в рейках та від лінії електропередач. Частоти гармонік останньої завади кратні 50 Гц, а частоти гармонік завади від тягового перетворювача локомотива кратні змінній величині, яка лежить в діапазоні 2...120 Гц. В певних режимах роботи перетворювача в обидвох послідовностях гармонік можуть бути такі гармоніки, частоти яких співпадають або дуже близькі і тому їх взаємною кореляцією знехтувати не можна.

Далі, доданком $2 \sum_{k=1}^K v_{Tk} v_{Ck}$ знехтувати не можна з тієї самої причини, з якої був залишений доданок $2 \sum_{k=1}^K v_{Tk} s_k$, а доданок $2 \sum_{k=1}^K v_{Qk} v_{Ck}$ можна відкинути з тієї самої причини, з якої було відкинуто доданок $2 \sum_{k=1}^K v_{Qk} s_k$.

Отже, було оцінено значущість та внески всіх доданків цільової функції (4.4). Виходячи з наведених міркувань, можна досягти певної економії в обмеженнях без суттєвого впливу на результати оцінювання, якщо шукати таку сукупність параметрів сигналу та завад, що мінімізує величину

$$\begin{aligned} \xi = \varepsilon_u^2 - \sum_{k=1}^K u_k^2 \approx & \sum_{k=1}^K v_{Pk}^2 + \sum_{k=1}^K v_{Tk}^2 + \sum_{k=1}^K v_{Qk}^2 + \sum_{k=1}^K v_{Ck}^2 + \sum_{k=1}^K s_k^2 - \\ & - 2 \sum_{k=1}^K u_k v_{Pk} - 2 \sum_{k=1}^K u_k v_{Tk} - 2 \sum_{k=1}^K u_k v_{Qk} - 2 \sum_{k=1}^K u_k v_{Ck} - 2 \sum_{k=1}^K u_k s_k + \end{aligned}$$

$$+2\sum_{k=1}^K v_{Tk} s_k + 2\sum_{k=1}^K v_{Pk} v_{Tk} + 2\sum_{k=1}^K v_{Pk} v_{Qk} + 2\sum_{k=1}^K v_{Tk} v_{Qk} + 2\sum_{k=1}^K v_{Tk} v_{Ck}. \quad (4.6)$$

Отриманий вираз являє собою шукану базову обчислювальну структуру.

4.1.2 Формалізація завдання розрізнення двох сигналів

Відправним пунктом синтезу пристрою оптимального приймання зондувального сигналу контролю технічного стану асинхронних ТЕД є конкретизація раніше сформованої цільової функції стосовно ситуацій наявності та відсутності сигналу [6]. Якщо висунути гіпотезу про наявність корисного сигналу, то цільова функція набуде вигляду [193]

$$\begin{aligned} \xi_S \approx & \sum_{k=1}^K v_{Pk}^2 - 2\sum_{k=1}^K u_k v_{Pk} + \sum_{k=1}^K v_{Qk}^2 - 2\sum_{k=1}^K u_k v_{Qk} + \\ & + \sum_{k=1}^K v_{Ck}^2 - 2\sum_{k=1}^K u_k v_{Ck} + \sum_{k=1}^K s_k^2 - 2\sum_{k=1}^K u_k s_k + \\ & + \sum_{k=1}^K v_{Tk}^2 - 2\sum_{k=1}^K u_k v_{Tk} + 2\sum_{k=1}^K v_{Pk} v_{Tk} + 2\sum_{k=1}^K v_{Pk} v_{Qk} + \\ & + 2\sum_{k=1}^K v_{Tk} v_{Qk} + 2\sum_{k=1}^K v_{Tk} v_{Ck} + 2\sum_{k=1}^K s_k v_{Tk}. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Якщо ж висунути гіпотезу про відсутність корисного сигналу, то цільова функція набуде вигляду

$$\begin{aligned}
\xi_F \approx & \sum_{k=1}^K v_{Pk}^2 - 2 \sum_{k=1}^K u_k v_{Pk} + \sum_{k=1}^K v_{Qk}^2 - 2 \sum_{k=1}^K u_k v_{Qk} + \\
& + \sum_{k=1}^K v_{Ck}^2 - 2 \sum_{k=1}^K u_k v_{Ck} + \sum_{k=1}^K v_{Tk}^2 - 2 \sum_{k=1}^K u_k v_{Tk} + \\
& + 2 \sum_{k=1}^K v_{Pk} v_{Tk} + 2 \sum_{k=1}^K v_{Pk} v_{Qk} + 2 \sum_{k=1}^K v_{Tk} v_{Qk} + 2 \sum_{k=1}^K v_{Tk} v_{Ck}.
\end{aligned} \tag{4.8}$$

Виявлення корисного сигналу полягає в порівнянні величин ξ_F та ξ_S - яка з цих величин менша, та гіпотеза і правильна. Тобто завдання виявлення корисного сигналу зводиться до завдання розрізнення псевдосигналів

$$Z_{Fk} = v_{Pk} + v_{Qk} + v_{Ck} + v_{Tk} \tag{4.9}$$

та

$$Z_{Sk} = s_k + v_{Pk} + v_{Qk} + v_{Ck} + v_{Tk}, \tag{4.10}$$

де $k=1, 2, \dots, K$.

Використовуємо введені в роботі [4] поняття «ізолюваний логарифм відношення правдоподібності, узятий з від'ємним знаком» (ІЛВПМ). Тоді у формулі (4.7) перша пара доданків є ІЛВПМ $w_p(\vec{\lambda}_p)$ імпульсної завади ($\vec{\lambda}_p$ – вектор невідомих параметрів цієї завади); друга пара доданків є ІЛВПМ $w_q(\vec{\lambda}_q)$ завади від тягового струму в рейках і від наводки від лінії електропередач ($\vec{\lambda}_q$ – вектор невідомих параметрів цієї завади); третя пара доданків є ІЛОПМ $w_c(\vec{\lambda}_c)$ завади від ТРК ($\vec{\lambda}_c$ – вектор невідомих параметрів

цієї завади); четверта пара доданків є ІЛВПМ $w_s(\vec{\lambda}_s)$ сигналу ($\vec{\lambda}_s$ – вектор невідомих параметрів сигналу); п'ята пара є ІЛВПМ $w_T(\vec{\lambda}_T)$ завади від тягового перетворювача локомотива ($\vec{\lambda}_T$ – вектор невідомих параметрів цієї завади). Решта доданків вносять поправки у величини цільових функцій. Під час мінімізації цільової функції можна задовольнятися оцінками параметрів, отриманими шляхом мінімізації кожного з ІЛВПМ окремо [233].

4.1.3 Процедура й технічна реалізація оброблення сигналу

Відомо, що усі структурно детерміновані компоненти вхідної суміші сигналу та завад є періодичними або безпосередньо мультигармонійними функціями часу, за винятком одиночної імпульсної завади [61]. Це визначило різні підходи до мінімізації відповідних їм ІЛВПМ. Розглянемо ІЛВПМ одиночної імпульсної завади:

$$\begin{aligned}
 W_P(U_{OP}, U_{mP}, f_P, \varphi_P) = \\
 = \sum_{k=k_1}^{k_1+\Delta k-1} U_{OP}^2 - 2U_{OP} \sum_{k=k_1}^{k_1+\Delta k-1} u_k + U_{mP}^2 \sum_{k=k_1}^{k_1+\Delta k-1} \sin^2(2\pi f_P k \Delta t + \varphi_P) - \\
 - 2U_{mP} \sum_{k=k_1}^{k_1+\Delta k-1} u_k \cdot \sin(2\pi f_P k \Delta t + \varphi_P), \quad (4.11)
 \end{aligned}$$

де k_1 - номер відліку часу, що відповідає початку імпульсу; Δk - тривалість імпульсу; Δt - крок дискретизації за часом.

Перші два доданки є ЛВПМ постійного доданка імпульсної завади:

$$W_{P1}(U_{OP}, k_1, \Delta k) = U_{OP}^2 \cdot \Delta k - 2U_{OP} \cdot \sum_{k=k_1}^{k_1+\Delta k-1} u_k. \quad (4.12)$$

Легко бачити, що мінімум цієї функції за параметром U_{OP} досягається при

$$\hat{U}_{OP} = \frac{\sum_{k=k_1}^{k_1+\Delta k-1} u_k}{\Delta k}. \quad (4.13)$$

Підстановка цього співвідношення у формулу (6) дає

$$W_{P1}(U_{OP}, k_1, \Delta k) = -\frac{\left(\sum_{k=k_1}^{k_1+\Delta k-1} u_k\right)^2}{\Delta k}. \quad (4.14)$$

Це найпростіший випадок сепарабельної функції двох змінних k_1 і Δk . Її мінімізація потребує відносно малих обчислювальних витрат. У результаті знаходимо оцінку $\hat{k}_1$ номера початкового відліку імпульсної завади та оцінку $\Delta \hat{k}$ тривалості імпульсної завади. Підставивши їх у співвідношення (4.13), знаходимо оцінку величини $\hat{U}_{OP}$.

Оцінімо параметри другої пари доданків виразу (4.11). Вони являють собою ЛВПМ синусоїдального доданка імпульсної завади:

$$\begin{aligned}
W_{P2}(U_{mP}, f_P, \varphi_P) = & U_{mP}^2 \sum_{k=k_1}^{k_1+\Delta k-1} \sin^2(2\pi f_P k \Delta t + \varphi_P) - \\
& - 2U_{mP} \cdot \sum_{k=k_1}^{k_1+\Delta k-1} u_k \cdot \sin(2\pi f_P k \Delta t + \varphi_P)
\end{aligned} \quad (4.15)$$

Ця функція квадратична за параметром U_{mP} , тому оцінкою цього параметра є величина

$$\hat{U}_{mP} = \frac{\sum_{k=k_1}^{k_1+\Delta k-1} u_k \cdot \sin(2\pi f_P k \Delta t + \varphi_P)}{\sum_{k=k_1}^{k_1+\Delta k-1} \sin^2(2\pi f_P k \Delta t + \varphi_P)}, \quad (4.16)$$

де величини k_1 і Δk беруться рівними їхнім оцінкам відповідно $\hat{k}_1$ й $\Delta \hat{k}$, отриманим під час мінімізації $W_{P1}(U_{OP}, k_1, \Delta k)$.

У підсумку оцінка амплітуди виявилася вираженою через відомі величини відліків вхідної напруги й через невідомі величини f_P і φ_P за отриманих раніше оцінок $\hat{k}_1$ і $\Delta \hat{k}$, оскільки $\hat{U}_{mP} = f_U(f_P, \varphi_P | \hat{k}_1, \Delta \hat{k})$. Підстановка оцінки (4.16) у формулу (4.15) призводить до того, що виявляється $W_{P2}(U_{mP}, f_P, \varphi_P)$ функцією не трьох параметрів, а тільки двох:

$$W_{P2}(f_P, \varphi_P | \hat{k}_1, \Delta \hat{k}) = f_W(f_P, \varphi_P). \quad (4.17)$$

Це теж найпростіший випадок сепарабельної функції двох змінних, мінімізація якої супроводжується відносно малими обчислювальними витратами. Отже, оцінки сукупності шести параметрів одиночної імпульсної

завади можуть бути отримані в результаті процедур простої двовимірної (а не шестимірної) мінімізації.

Що стосується корисного сигналу $s(t)$, завади від ТРК $v_C(t)$, завади від тягового струму та лінії електропередач $v_Q(t)$ і завади від тягового перетворювача локомотива $v_T(t)$ (де буква t позначає безперервний час), то їх об'єднує таке.

Усі вони є на інтервалі спостереження періодичними функціями часу. Тому їх зручно (а функцію $v_T(t)$ єдино можливо за апіорною інформацією) подати у вигляді рядів Фур'є. Частоти гармонік компонентів $s(t)$ і $v_C(t)$ відомі з технічних характеристик ТРК, а частоти компоненти $v_Q(t)$ теж відомі і кратні 50 Гц. Ці обставини дають змогу застосувати спектральний аналіз під час мінімізації ІЛВПМ. Дійсно, максимізація логарифма відношення правдоподібності структурно-детермінованого коливання, що приймається на тлі гаусівського шуму, еквівалентна завданню апроксимації спостережного процесу $u(t)$ функцією $x(t)$ за методом найменших квадратів. У цій роботі виконується мінімізація величини ІЛВПМ.

Відомо, що подання процесу $u(t)$ у вигляді ряду Фур'є якраз і є результатом його апроксимації за методом найменших квадратів за допомогою суми синусоїд з кратними частотами [4]. Тому оцінки амплітуд, частот і початкових фаз гармонік коливань $s(t)$, $v_C(t)$, $v_Q(t)$ и $v_T(t)$ можна отримати, якщо відняти від $u(t)$ раніше виміряний поодинокий імпульс $v_P(t)$ і після цього розкласти залишок у ряд Фур'є. Для виконання цієї операції існують швидкі та економні (в сенсі обчислювальних витрат) методи [2]. З огляду на те, що частоти гармонік коливань $s(t)$, $v_C(t)$ і $v_Q(t)$ відомі, а частоти гармонік коливання $v_T(t)$ невідомі, наведений вище порядок дій доцільно модифікувати наступним чином. Після розкладання залишку в ряд Фур'є слід знайти тільки оцінки амплітуд і початкових фаз гармонік коливань $s(t)$, $v_C(t)$ і $v_Q(t)$ на їхніх заздалегідь відомих частотах, причому за нахилами спектрів фаз сигналу $s(t)$ та завади $v_C(t)$ від ТРК знаходимо відповідно їхні зсуви t_S та

t_C відносно початку спостереження. Потім відновлюємо функцію часу $s(t) + v_C(t) + v_Q(t)$ і віднімаємо її від залишку $[u(t) - v_P(t)]$.

Отже, новий залишок містить тільки заваду $v_T(t)$ і гаусівський шум. Теоретично система гармонік, що міститься в цьому новому залишку - це гармоніки, які утворюють заваду $v_T(t)$. У такій ситуації дієвими є методи автоматичного виявлення гармонік, описані в [141]. У результаті застосування одного з цих методів можна відновити залежність $v_T(t)$ у безперервному або дискретному часі. Зрештою, після цього можна обчислити величини цільових функцій ξ_S і ξ_F , порівняти їх між собою та ухвалити рішення про наявність чи відсутність зондувального сигналу контролю технічного стану асинхронних ТЕД. Структурну схему відповідного пристрою наведено на рисунку 4.1. Допоміжні пристрої аналого-цифрового перетворення та синхронізації тут не наведено.

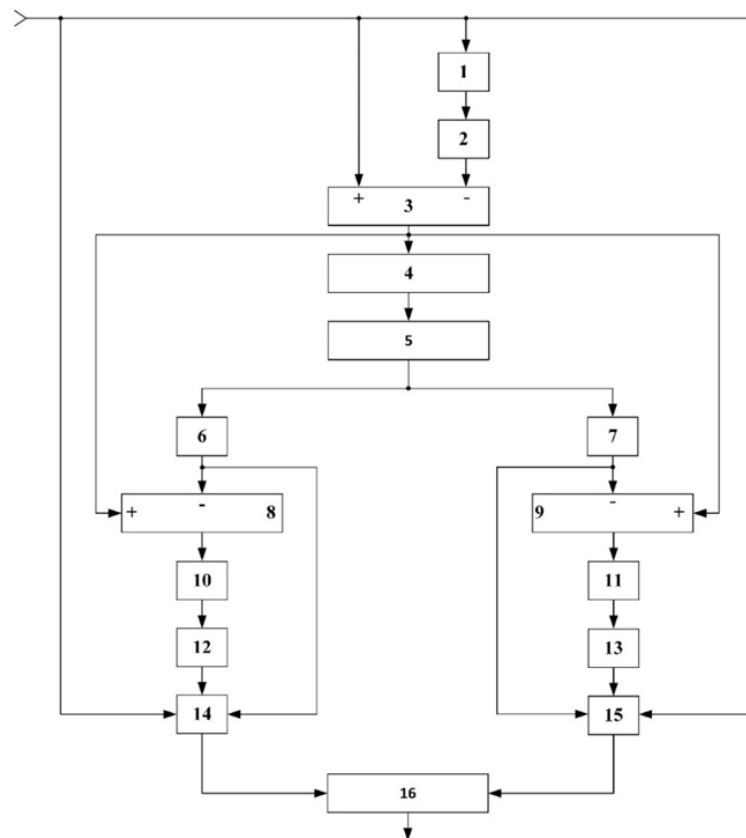


Рисунок 4.1 – Структурна схема пристрою оптимального приймання зондувального сигналу контролю технічного стану асинхронних ТЕД

Для реалізації пристрою з наведеною на рисунку 4.1 структурою раціонально використовувати мікропроцесори загального призначення з двопотоковим опрацюванням даних або спеціалізовані процесори опрацювання сигналів, які широко доступні на сьогодні.

Дана схема включає: 1 - формувач оцінок величин U_{OP} , U_{mP} , f_P , φ_P ; 2 - блок відновлення імпульсу $v_P(t)$; 3 - суматор («+» - вхід підсумовування, «-» - вхід віднімання); 4 - блок перетворення Фур'є; 5 - формувач оцінок параметрів коливань $s(t)$, $v_C(t)$, $v_Q(t)$ і величин τ_s і τ_c ; 6 - блок відновлення коливання $v_C(t) + v_Q(t)$; 7 - блок відновлення коливання $s(t) + v_C(t) + v_Q(t)$; 8, 9 - суматори («+» - входи підсумовування, «-» - входи віднімання); 10, 11 - блоки автоматичного виявлення гармонік; 12, 13 - блоки відновлення коливання $v_T(t)$; 14 - блок обчислення ξ_F ; 15 - блок обчислення ξ_S ; 16 - пристрій вибору меншої з величин.

4.1.4 Чисельна оцінка завадостійкості розробленого пристрою

Для чисельного оцінювання завадостійкості розробленого пристрою було проведено комп'ютерне моделювання сигналу та завад і подальший розрахунок їх енергетичних характеристик (Додаток Д). На рисунку 4.2 представлено графік залежності вхідного сигналу пристрою від часу на інтервалі тривалістю 1с. Корисний сигнал має несучу частоту 420 Гц і частоту модуляції 8 Гц, завада від ТРК має несучу частоту 480 Гц і частоту модуляції 12 Гц. Амплітуда U_{mS} корисного сигналу дорівнює 0,042 В. Амплітуда завади від ТРК дорівнює 0,01 В. Необхідні для подальшого енергетичного розрахунку параметри інших завад такі: амплітуда несинусоїдальної завади v_T від тягового перетворювача локомотива 0,8 В; амплітуда несинусоїдальної завади v_Q від тягового струму та наведень від лінії електропередачі 0,09 В; амплітуда імпульсної завади 1,5 В за тривалості

імпульсу $\tau_p = 0,05\text{с}$; середньоквадратичне відхилення σ_{Π} стаціонарного гаусівського шуму 0,19 В за рівномірного спектра завширшки ΔF 2500 Гц.

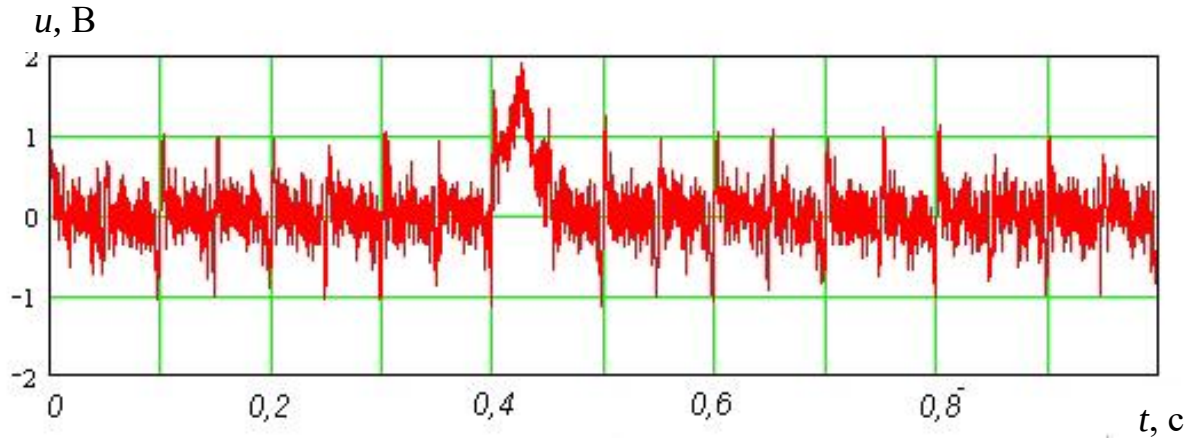


Рисунок 4.2 – Сигнал контролю технічного стану асинхронних ТЕД, спотворений імпульсною завадою, завадою від тягового струму і лінії електропередач, завадою від тягового перетворювача локомотива і безперервним гаусівським шумом $f_s = 420$ Гц

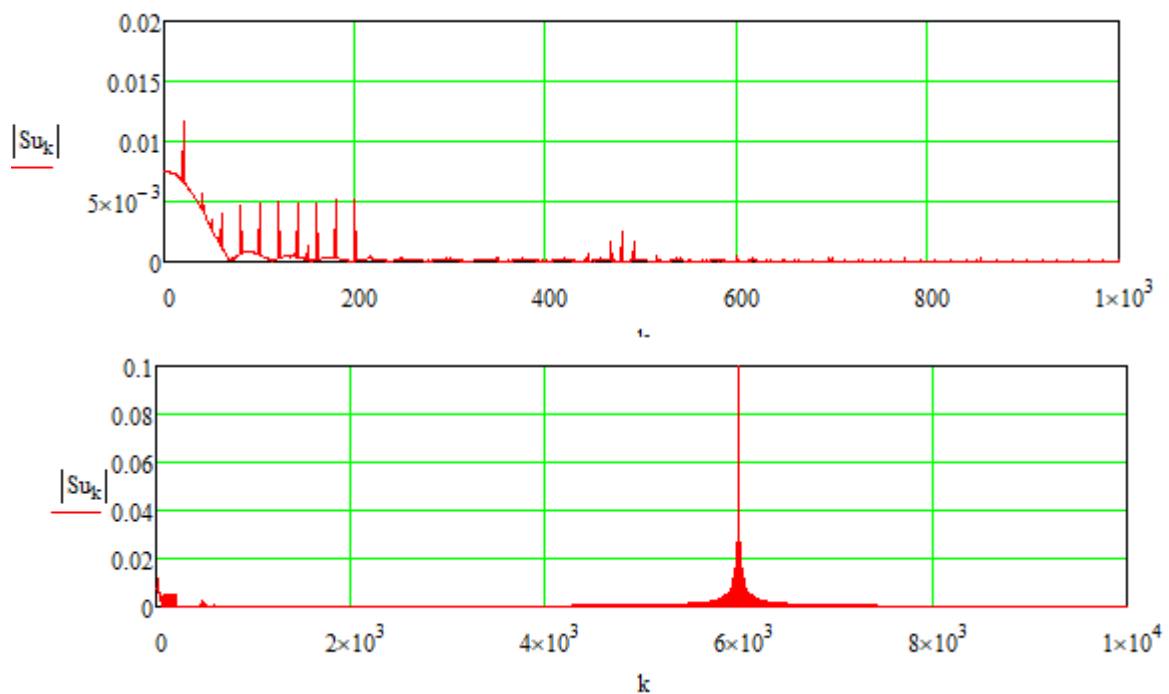


Рисунок 4.3 – Залежність спектру вхідного сигналу від частоти

$$f_s = 6000 \text{ Гц}$$

Для безпосереднього розрахунку завадостійкості розробленого пристрою використано відомий вираз (4.18) для розрахунку середньої ймовірності помилки розрізнення двох рівноймовірних структурно-детермінованих сигналів P_{EM} за методом максимуму правдоподібності [6]. Цей вираз дає величину потенційної завадостійкості розробленого пристрою, що використовує ізольований логарифм відношення правдоподібності ІЛВІПМ:

$$P_{EM} = 1 - \Phi \left\{ \sqrt{q_s \cdot (1 + \delta - 2\rho_{s1}) \cdot 0,25} \right\}, \quad (4.18)$$

де $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{y^2}{2}} dy$ - функція нормального розподілу;

$q_s = \frac{2E_1}{N_0}$ - відношення енергії E_1 коливання Z_{Sk} до спектральної

густини потужності гаусівського шуму N_0 ; ;

$$N_0 = \sigma_{II}^2 / \Delta F;$$

δ - відношення енергії E_2 коливання Z_{Fk} до енергії коливання Z_{Sk} ;

$$E_1 = \sum_{k=1}^K z_{Sk}^2 \cdot \Delta t;$$

$\Delta t = 1/(2\Delta F)$ - інтервал дискретизації вхідного коливання u_k за часом;

$\rho_{s1} = B_s / E_1$ - нормована взаємна кореляційна функція коливань Z_{Sk} і Z_{Fk} ;

$$B_S = \sum_{k=1}^K Z_{Sk} \cdot Z_{Fk} \cdot \Delta t \text{ - взаємна кореляційна функція зазначених вище}$$

коливань.

У таблиці 1 наведено результати розрахунку величини P_{EM} як функції амплітуди корисного сигналу U_{mS} за трьох різних величин середньоквадратичної напруги гаусівського шуму: $\sigma_{II} = 0,1 \text{ В}$; $\sigma_{II} = 0,19 \text{ В}$ і $\sigma_{II} = 0,5 \text{ В}$. Символ «0» означає числову величину, малість якої лежить за межами точності обчислень.

Таблиця 4.1 – Величини середньої ймовірності помилки розрізнення P_{EM} за різних числових значень середньоквадратичної напруги шуму σ_{II} як функція амплітуди корисного сигналу U_{mS}

$U_{mS}, \text{ В}$	0,001	0,005	0,010	0,020	0,030	0,040	0,060	0,080	0,100
P_{EM}									
При $\sigma_{II} = 0,1 \text{ В}$	0,430	0,188	$3,86 \cdot 10^{-2}$	$2,04 \cdot 10^{-4}$	$5,69 \cdot 10^{-8}$	$7,69 \cdot 10^{-13}$	0	0	0
При $\sigma_{II} = 0,19 \text{ В}$	0,463	0,321	0,176	$3,14 \cdot 10^{-2}$	$2,63 \cdot 10^{-3}$	$9,90 \cdot 10^{-5}$	$1,19 \cdot 10^{-8}$	$4,91 \cdot 10^{-14}$	0
При $\sigma_{II} = 0,5 \text{ В}$	0,486	0,430	0,362	0,240	0,144	$7,87 \cdot 10^{-2}$	$1,70 \cdot 10^{-2}$	$2,34 \cdot 10^{-3}$	$2,04 \cdot 10^{-4}$

На основі результатів розрахунків побудовано криві залежностей величини P_{EM} від амплітуди U_{mS} для кожного з трьох числових значень величини (рисунки 4.4).

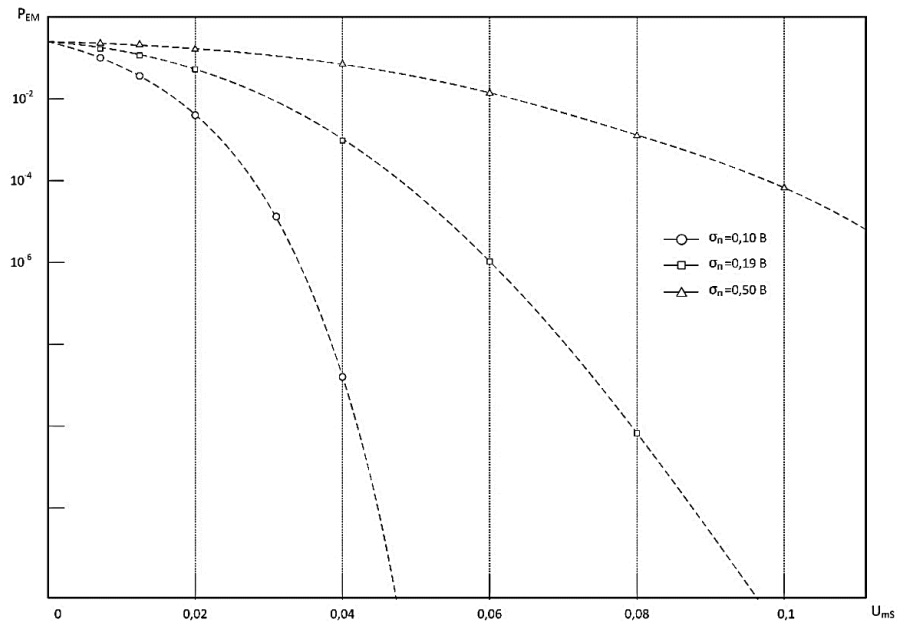


Рисунок 4.4 - Залежність середньої ймовірності помилки розрізнення P_{EM} від амплітуди U_{ms} зондувального сигналу контролю технічного стану асинхронних ТЕД за різних величин середньо-квадратичної напруги шуму σ_{II}

Результати розрахунку величини P_{EM} дають змогу зробити висновок, що розроблений пристрій надійно розпізнає ситуацію наявності тестового зонduючого сигналу у вхідній суміші цього сигналу і типових завад. Варіювання амплітуд структурно-детермінованих завад під час розрахунків показало, що наведені в таблиці 4.1 залежності мало чутливі до цих змін (не більше, ніж у другому знаку після коми). Це означає стійкість пристрою до впливу структурно-детермінованих завад врахованих типів.

4.2 Розробка математичної моделі контролю технічного стану ТЕД в умовах дії складних завад

ТЕД у процесі експлуатації постійно зазнають впливу динамічних, механічних та електромагнітних навантажень. На надійність роботи ТЕД

також впливають особливості кліматичних умов довкілля та людський фактор. У середньому на ТЕД припадає 20-25 % загальної кількості відмов усього обладнання локомотивів. Основними причинами відмов ТЕД є: пробої ізоляції обмоток, міжвиткові замикання в якорях, полюсах, компенсаційних обмотках, неприпустиме зниження опору ізоляції, пошкодження з'єднання між полюсами і обмотками, вихід з ладу головних полюсів, руйнування бандажу та ін. Статистика відмов окремих вузлів ТЕД виглядає так [239]:

- якір – (42,5...84...84,5) %;
- міжкатушкові з'єднання і виводи – (2,1...14,1) %;
- полюсні компенсаційні котушки – (2,1...15...15,6) %;
- якірні і моторно-осьові підшипники – (5,3...43...43,1) %;
- обриви катушок головних і додаткових полюсів і перемичок між ними – близько 80 %.

Затримки поїздів при пошкодженнях ТЕД призводять до значних економічних збитків. У зв'язку з цим виникає необхідність розроблення нових методів діагностики ТЕД на основі контролю фактичного стану, що істотно підвищить надійність їх роботи.

Для спостереження за технічним станом двигуна можна безконтактно ввести в коло його живлення зондуєчий гармонічний сигнал і спостерігати викликаний ним струм. Це потребує встановлення математичного зв'язку між величинами параметрів його кіл і величинами параметрів спостереженого струму.

Розглянемо колекторний двигун постійного струму з послідовним збудженням, в коло живлення якого у такий чи інший спосіб введено змінну напругу з постійними параметрами, зокрема, з кутовою частотою ω_T . Піддамо більш детальному огляду електричні та магнітні явища, пов'язані з будь-якою однією секцією цього двигуна (рисунок 4.5).

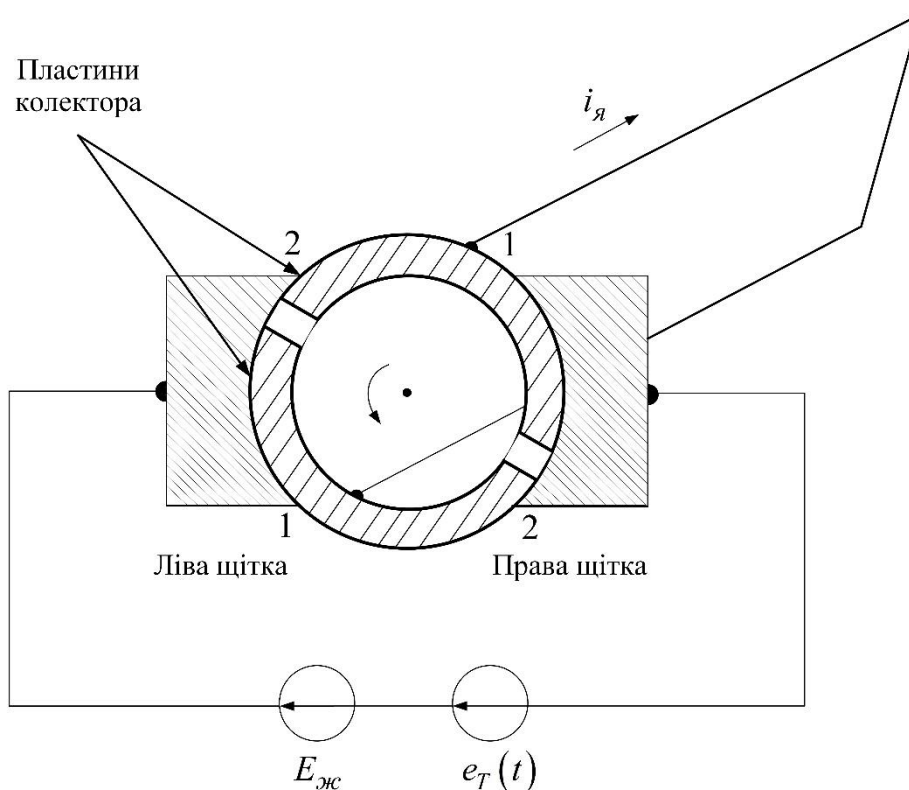


Рисунок 4.5 – Ескіз підключення секції двигуна

Стрілкою показано напрям обертання якоря. Умовні позначення: $E_{\text{жс}}$ – джерело живлення постійною напругою; $e_T(t)$ – джерело синусоїдної напруги; 1 – збігаючий край щітки; 2 – набігаючий край щітки; $i_{\text{я}}$ – струм секції якоря.

Вважатимемо, що як опори елементів конструкції, так і перехідні опори між ними є лінійними. За цієї умови до розгляду роботи секції можна застосувати принцип накладання та окремо розглядати ефекти, викликані дією джерела постійної напруги та джерела змінної напруги. В цій роботі нас цікавлять саме ефекти другого типу. Зобразимо схему заміщення показаного на рисунку 4.5 фрагмента двигуна для джерела напруги зондуєчого сигналу (рисунок 4.6).

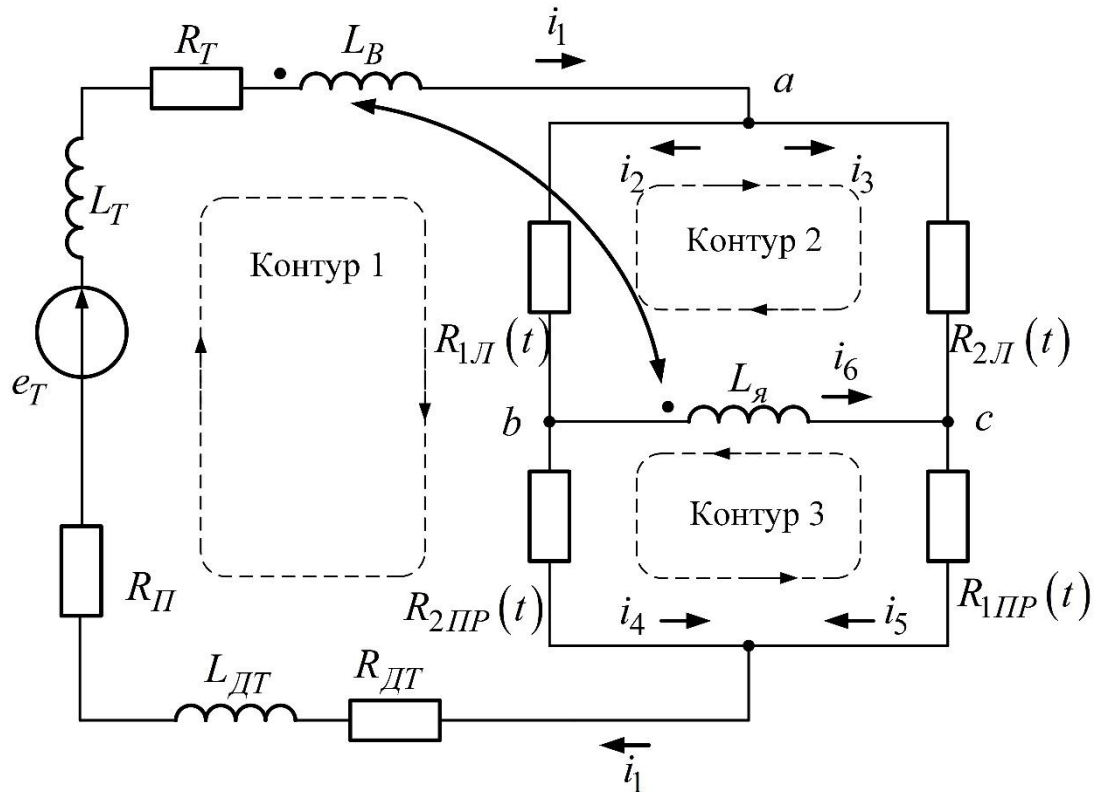


Рисунок 4.6 – Схема заміщення секції та колекторно-щіткового вузла

Джерело постійної напруги тут враховано його внутрішнім активним опором R_{Π} , а джерело синусоїдної напруги – його активним опором R_T та внутрішньою індуктивністю L_T . Індуктивність обмотки збудження позначена L_B , індуктивність обмотки якоря $L_{\text{я}}$, взаємна індуктивність між ними – $M(t)$. Зазначимо, що взаємна індуктивність є функцією часу з огляду на обертання якоря. Викликаний джерелом e_T струм i_1 розтікається через збігаючий край лівої щітки (опір $R_{1Л}(t)$) та її набігаючий край з опором $R_{2Л}(t)$ відповідно на струми i_2 та i_3 . Через збігаючий край правої щітки (його опір $R_{1ПР}(t)$) протікає струм i_5 , а через набігаючий край правої щітки (його опір $R_{2ПР}(t)$) протікає струм i_4 . Струм секції якоря позначено на рисунку 4.6 як i_6 . Поставимо задачу визначення зв'язку струму i_1 з параметрами колекторно-щіткового апарату та якоря за результатами спостереження миттєвого значення цього струму (внесені в коло параметри датчика позначимо $R_{ДТ}$ та $L_{ДТ}$).

Розрахуємо струм i_1 методом рівнянь Кірхгофа. Коло, схему якого зображено на рисунку 4.6, описується шістьма рівняннями Кірхгофа – трьома за першим законом та трьома за другим законом.

Для вузлів a , b та c маємо відповідно, що

$$i_1 = i_2 + i_3; \quad (4.19)$$

$$i_2 = i_4 + i_6; \quad (4.20)$$

$$i_5 = i_3 + i_6. \quad (4.21)$$

Для позначених на рисунку 4.6 контурів 1, 2 та 3 маємо відповідно, що

$$\begin{aligned} e_T = i_1(R_T + R_{II}) + L_B \frac{di_1}{dt} + M(t) \frac{di_6}{dt} + i_6 \frac{dM(t)}{dt} + \\ + i_1 R_T + L_T \frac{di_1}{dt} + R_{1L}(t) i_2 + R_{2IP}(t) i_4; \end{aligned} \quad (4.22)$$

$$i_3 R_{2L}(t) - L_{Я} \frac{di_6}{dt} - M(t) \frac{di_1}{dt} - i_1 \frac{dM(t)}{dt} - i_2 R_{1L}(t) = 0; \quad (4.23)$$

$$i_4 R_{2IP}(t) - i_5 R_{1IP}(t) - L_{Я} \frac{di_6}{dt} - M(t) \frac{di_1}{dt} - i_1 \frac{dM(t)}{dt} = 0. \quad (4.24)$$

З рівнянь (4.19) – (4.21) випливає, що

$$i_3 = i_1 - i_4 - i_6; \quad (4.25)$$

$$i_5 = i_1 - i_4. \quad (4.26)$$

Підставимо i_2 з формули (4.20) до (4.22). Після приведення подібних отримаємо нове рівняння

$$\begin{aligned} e_T = i_1 (R_T + R_{II} + R_{DT}) + (L_B + L_{DT}) \frac{di_1}{dt} + M(t) \frac{di_6}{dt} + \\ + i_6 \frac{dM(t)}{dt} + [R_{1L}(t) + R_{2IP}(t)] i_4 + R_{1L}(t) i_6. \end{aligned} \quad (4.27)$$

Підставимо i_3 з формули (4.25) до (4.23). Після приведення подібних отримаємо нове рівняння

$$\begin{aligned} i_1 \left[R_{2L}(t) - \frac{dM(t)}{dt} \right] - i_4 [R_{2L}(t) + R_{1L}(t)] - \\ - i_6 [R_{2L}(t) + R_{1L}(t)] - M(t) \frac{di_1}{dt} - L_{Я} \frac{di_6}{dt} = 0. \end{aligned} \quad (4.28)$$

Підставимо i_5 з формули (4.26) до (4.24). Після приведення подібних отримаємо нове рівняння

$$i_4 \left[R_{2\Pi P}(t) + R_{1\Pi P}(t) \right] - i_1 \left[R_{1\Pi P}(t) + \frac{dM(t)}{dt} \right] -$$

$$-M(t) \frac{di_1}{dt} - L_{\text{Я}} \frac{di_6}{dt} = 0. \quad (4.29)$$

З рівняння (4.24) можна виразити i_4 через i_1 та i_6

$$i_4 = i_1 \frac{R_{1\Pi P}(t) + \frac{dM(t)}{dt}}{R_{2\Pi P}(t) + R_{1\Pi P}(t)} + \frac{di_1}{dt} \cdot \frac{M(t)}{R_{2\Pi P}(t) + R_{1\Pi P}(t)} +$$

$$+ \frac{L_{\text{Я}}}{R_{2\Pi P}(t) + R_{1\Pi P}(t)} \cdot \frac{di_6}{dt}. \quad (4.30)$$

Позбавимося від струму i_4 в рівнянні (4.27), підставивши туди вираз (4.30):

$$e_T = i_1 \left\{ \left(R_T + R_{II} + R_{IT} \right) + \frac{\left[R_{1II}(t) + R_{2\Pi P}(t) \right] \cdot \left[R_{1\Pi P}(t) + \frac{dM(t)}{dt} \right]}{R_{2\Pi P}(t) + R_{1\Pi P}(t)} \right\} +$$

$$\begin{aligned}
& + \left[L_B + L_{DT} + \frac{R_{1L}(t) + R_{2PP}(t)}{R_{2PP}(t) + R_{1PP}(t)} \cdot M(t) \right] \cdot \frac{di_1}{dt} + \\
& + \left[R_{1L}(t) + \frac{dM(t)}{dt} \right] \cdot i_6 + \left[\frac{R_{1L}(t) + R_{2PP}(t)}{R_{2PP}(t) + R_{1PP}(t)} \cdot L_Y + M(t) \right] \cdot \frac{di_6}{dt}. \quad (4.31)
\end{aligned}$$

Позбавимося від струму i_4 в рівнянні (4.28), підставивши туди вираз (4.30):

$$\begin{aligned}
& M(t) \left[\frac{R_{2L}(t) + R_{1L}(t)}{R_{2PP}(t) + R_{1PP}(t)} + 1 \right] \cdot \frac{di_1}{dt} + \\
& + \left\{ \frac{R_{2L}(t) + R_{1L}(t)}{R_{2PP}(t) + R_{1PP}(t)} \cdot \left[R_{1PP}(t) + \frac{dM(t)}{dt} \right] - \left[R_{1L}(t) - \frac{dM(t)}{dt} \right] \right\} \cdot i_1 + \\
& + \left[\frac{R_{2L}(t) + R_{1L}(t)}{R_{2PP}(t) + R_{1PP}(t)} + 1 \right] \cdot L_Y \cdot \frac{di_6}{dt} + [R_{2L}(t) + R_{1L}(t)] \cdot i_6 = 0. \quad (4.32)
\end{aligned}$$

Отже, маємо пару рівнянь (4.31) та (4.32) відносно i_1 та i_6 . Зведемо її до рівняння відносно потрібного нам струму i_1 .

Для надання рівнянням (4.31) та (4.32) компактного вигляду введемо такі позначення. Для рівняння (4.31):

$$A_{11}(t) = R_T + R_{II} + R_{\mathcal{IT}} + \frac{[R_{1I}(t) + R_{2IP}(t)] \cdot \left[R_{1IP}(t) + \frac{dM(t)}{dt} \right]}{R_{2IP}(t) + R_{1IP}(t)};$$

$$A_{12}(t) = L_B + L_{\mathcal{IT}} + \frac{R_{1I}(t) + R_{2IP}(t)}{R_{2IP}(t) + R_{1IP}(t)} \cdot M(t);$$

$$B_{11}(t) = R_{1I}(t) + \frac{dM(t)}{dt};$$

$$B_{12}(t) = \frac{R_{1I}(t) + R_{2IP}(t)}{R_{2IP}(t) + R_{1IP}(t)} \cdot L_{\mathcal{I}} + M(t).$$

Для рівняння (4.32):

$$A_{21}(t) = \frac{R_{2I}(t) + R_{1I}(t)}{R_{2IP}(t) + R_{1IP}(t)} \cdot \left[R_{1IP}(t) + \frac{dM(t)}{dt} \right] - \left[R_{1I}(t) - \frac{dM(t)}{dt} \right];$$

$$A_{22}(t) = M(t) \left[\frac{R_{2I}(t) + R_{1I}(t)}{R_{2IP}(t) + R_{1IP}(t)} + 1 \right];$$

$$B_{21}(t) = R_{2I}(t) + R_{1I}(t);$$

$$B_{22} = \left[\frac{R_{2Л}(t) + R_{1Л}(t)}{R_{2ПП}(t) + R_{1ПП}(t)} + 1 \right] \cdot L_{Я}.$$

З урахуванням цих позначень рівняння (4.31) та (4.32) набудуть вигляду:

$$e_T = A_{11}(t)i_1 + A_{12}(t)\frac{di_1}{dt} + B_{11}(t)i_6 + B_{12}(t)\frac{di_6}{dt}; \quad (4.33)$$

$$0 = A_{21}(t)i_1 + A_{22}(t)\frac{di_1}{dt} + B_{21}(t)i_6 + B_{22}(t)\frac{di_6}{dt}. \quad (4.34)$$

Позбавимося похідної від i_6 . Для цього спочатку помножимо вираз (4.34) на B_{12}/B_{22} . Отримаємо, що

$$0 = A_{21}(t)\frac{B_{12}(t)}{B_{21}(t)} \cdot i_1 + A_{22}(t)\frac{B_{12}(t)}{B_{21}(t)} \cdot \frac{di_1}{dt} + B_{21}(t)\frac{B_{12}(t)}{B_{21}(t)} \cdot i_6 + B_{12}\frac{di_6}{dt}. \quad (4.35)$$

Віднімемо вираз (4.35) від (4.33), отримаємо, що

$$e_T = \left[A_{11}(t) - A_{21}(t)\frac{B_{12}(t)}{B_{21}(t)} \right] i_1 + \left[A_{12}(t) - A_{22}(t)\frac{B_{12}(t)}{B_{21}(t)} \right] \frac{di_1}{dt} + \\ + \left[B_{11}(t) - B_{21}(t)\frac{B_{12}(t)}{B_{22}(t)} \right] i_6. \quad (4.36)$$

Позначимо коефіцієнт при i_6 як $Y(t)$. З урахуванням цього, отримаємо з рівняння (4.36), що

$$i_6 = C_0(t) + C_1(t)i_1 + C_2(t)\frac{di_1}{dt}. \quad (4.37)$$

Тут

$$C_0(t) = \frac{e_T}{Y(t)};$$

$$C_1(t) = \frac{A_{11}(t) - A_{21}(t)\frac{B_{12}(t)}{B_{21}(t)}}{Y(t)};$$

$$C_2(t) = \frac{A_{12}(t) - A_{22}(t)\frac{B_{12}(t)}{B_{21}(t)}}{Y(t)}.$$

Після підстановки формули (4.37) до (4.34) та приведення подібних, отримаємо таке рівняння:

$$B_{22}(t)C_2(t)\frac{d^2i_1}{dt^2} + \left[A_{22}(t) + B_{21}(t)C_2(t) + B_{22}(t)C_1(t) + B_{22}(t)\frac{dC_2(t)}{dt} \right] \cdot \frac{di_1}{dt} +$$

$$\begin{aligned}
& + \left[A_{21}(t) + B_{21}(t)C_1(t) + B_{22}(t)\frac{dC_1(t)}{dt} \right] \cdot i_1 + \\
& + B_{21}(t)C_0(t) + B_{22}(t)\frac{dC_0(t)}{dt} = 0.
\end{aligned} \tag{4.38}$$

Введемо позначення

$$\left. \begin{aligned}
q_0(t) &= B_{21}(t)C_0(t) + B_{22}(t)\frac{dC_0(t)}{dt}; \\
q_1(t) &= A_{21}(t) + B_{21}(t)C_1(t) + B_{22}(t)\frac{dC_1(t)}{dt}; \\
q_2(t) &= A_{22}(t) + B_{21}(t)C_2(t) + B_{22}(t)C_1(t) + B_{22}(t)\frac{dC_2(t)}{dt}; \\
q_3(t) &= B_{22}(t)C_2(t).
\end{aligned} \right\} \tag{4.39}$$

З урахуванням цих позначень рівняння (4.38) набуває вигляду:

$$q_3(t)\frac{d^2 i_1}{dt^2} + q_2(t)\frac{d i_1}{dt} + q_1(t) \cdot i_1 + q_0(t) = 0. \tag{4.40}$$

Звідси маємо

$$\frac{d^2 i_1}{dt^2} + \frac{q_2(t)}{q_3(t)} \cdot \frac{d i_1}{dt} + \frac{q_1(t)}{q_3(t)} \cdot i_1 = -\frac{q_0(t)}{q_3(t)}. \tag{4.41}$$

Введемо такі позначення:

$$\left. \begin{aligned} a(t) &= \frac{q_2(t)}{q_3(t)}; \\ b(t) &= \frac{q_1(t)}{q_3(t)}; \\ f(t) &= -\frac{q_0(t)}{q_3(t)}. \end{aligned} \right\} \quad (4.42)$$

Урахувавши їх, записуємо рівняння для струму кола живлення, який викликаний дією джерела e_T у кінцевому вигляді

$$\frac{d^2 \dot{i}_1}{dt^2} + a(t) \cdot \frac{di_1}{dt} + b(t) \cdot i_1 = f(t). \quad (4.43)$$

4.3 Формування узагальненого критерію оцінки ефективності процесу експлуатації тягового рухомого складу

4.3.1. Оцінка ефективності процесу контролю та управління, здійснюваного системою автоматичного управління

Системи автоматичного управління і контролю (САУ) все ширше застосовуються при керуванні тяговим рухомим складом залізниць, але при цьому практично відсутні критерії оцінки ефективності їхньої роботи. Узагальнений критерій оцінювання ефективності має характеризувати інформаційну спроможність процесу автоматичного управління і контролю ТРС.

За допомогою двійкової послідовності можна передати повідомлення про подію, обрану з $N=2^m$ можливих подій, де довжина послідовності (число розрядів у двійковому числі). Отже, довжина послідовності, необхідної для передачі деякого повідомлення, пропорційна логарифму числа можливих повідомлень [33]. Очевидно, що максимальна кількість інформації, що міститься в повідомленні, пропорційна його довжині, тобто

$$H_{\max} = \log_2 N. \quad (4.44)$$

Величина $H_{\max}$ вказує верхню межу кількості інформації, яка може міститися в повідомленні.

Дійсна кількість інформації залежить не тільки від числа можливих повідомлень, а й від їхніх імовірностей, оскільки вибір повідомлень здійснюється з безлічі можливих нерівноймовірних повідомлень. З цих міркувань вводиться уявлення про кількісну міру інформації.

$$H(X) = -\sum_{i=1}^N P(X_i) \log_2 P(X_i), \quad (4.45)$$

де $P(X_i)$ - ймовірність i -го повідомлення з множини N .

У разі, коли ймовірності всіх повідомлень, окрім одного, обертаються в нулі, тобто за $P(X_i)=0$ і за $P(X_k)=1 (k \neq i)$, кількість інформації дорівнює нулю. Якщо ж заздалегідь відомо, що всі можливі повідомлення в множині N рівноймовірні, то кількість інформації є максимальною.

Таким чином, у всіх випадках, крім граничних ($N_{\min}=0$ і $H_{\max}=\log_2 N$), справедлива нерівність

$$0 < H < \log_2 N. \quad (4.46)$$

Величина H називається ентропією випадкової величини X . Вона є мірою первісної невизначеності результату вибору повідомлень X із множини можливих повідомлень. Вибір повідомлення повністю ліквідує цю невизначеність і доставляє кількість інформації, що дорівнює H .

Кількість інформації, отримана такою системою в процесі контролю та управління об'єкта за інтервал часу (t, τ) , дорівнює зміні кількості ентропії:

$$I(X, t, \tau) = H_0(X, t, \tau) - H_k(X, t, \tau), \quad (4.47)$$

де $H_0(X, t, \tau)$ - ентропія, що характеризує невизначеність керованого об'єкта і САУ до початку процесу контролю та управління;

$H_k(X, t, \tau)$ - умовна ентропія керованого об'єкта і САУ під час здійснення процесу контролю та управління;

τ - момент часу, що відповідає закінченню роботи системи управління.

Кожен зі станів керованого об'єкта в будь-який момент часу характеризується ймовірністю виконання поставленого завдання в інтервалі часу (t, τ) :

$$P(t, \tau) = P_{BO}(t, \tau) \cdot P_{ПО}(t, \tau), \quad (4.48)$$

де $P_{BO}(t, \tau)$, $P_{ПО}(t, \tau)$ - відповідно ймовірності відсутності раптових і поступових відмов керованого об'єкта і системи управління та контролю.

За незалежності раптових і поступових відмов ентропія процесу контролю й керування являє собою суму ентропій, зумовлених цими відмовами:

$$H_0(X, t, \tau) = H_{BO}(X, t, \tau) + H_{ПО}(X, t, \tau), \quad (4.49)$$

$$\text{де } H_{BO}(X, t, \tau) = -\{P_{BO}(X, t, \tau) \log_2 P_{BO}(X, t, \tau) + (1 - P_{BO}(X, t, \tau)) \log_2 (1 - P_{BO}(X, t, \tau))\}$$

відповідно до виразу (4.45);

$H_{ПО}(X, t, \tau) = - \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int f_{ПО}(X, t, \tau) \log_2 f_{ПО}(X, t, \tau) dX$ - ентропія, зумовлена впливом поступових відмов на вихідні параметри процесу управління та контролю (тут - $f_{ПО}(X, t, \tau)$ щільність розподілу вихідного параметра, схильного до впливу поступових відмов).

Оптимальний рівень невизначеності керованого об'єкта вибирають з умови забезпечення заданої ймовірності виконання об'єктом поставленого завдання:

$$H_{OIT}(X, t, \tau) = -\{P(X, t_{kk}, \tau_{kPO}) \log_2 P(X, t_{kk}, \tau_{kPO}) + [1 - P(X, t_{kk}, \tau_{kPO})] \log_2 [1 - P(X, t_{kk}, \tau_{kPO})]\} , \quad (4.50)$$

Імовірність виконання об'єктом і системою управління та контролю поставленого перед ними завдання в інтервалі часу (t_{kk}, τ_{kPO}) , початком якого є момент часу закінчення контролю t_{kk} (кінець контролю), а кінцем - момент часу закінчення роботи керованого об'єкта (кінець роботи об'єкта).

Час проведення контролю τ_k має бути зведено до мінімуму, щоб за одиницю часу можна було одержати максимальну кількість інформації, що має найбільшу достовірність. Водночас цей мінімум не повинен перевищувати допустимий час виведення об'єкта зі стану готовності, оскільки це призведе до невиправданого ускладнення системи управління і контролю.

Узагальнений критерій ефективності має характеризувати інформаційну спроможність процесу і системи автоматичного управління та контролю.

Кількість інформації, одержуваної САУ в процесі контролю та управління об'єктом за інтервал часу (t, τ) , визначається відповідно до залежності:

$$I(t, \tau) = H_0(t, \tau) - H(t, \tau) , \quad (4.51)$$

де $H_0(t, \tau)$ - ентропія, що характеризує невизначеність керованого об'єкта САУ до початку процесу контролю та управління і визначається за формулою (4.49);

$H(t, \tau)$ - ентропія керованого об'єкта і САУ, що залишилася, після здійснення процесу контролю та управління об'єктом, яка визначається за формулою (4.50).

Рівність (4.51) характеризує реальну інформаційну можливість САУ. Потенційна можливість цієї системи становить величину

$$I_{\Pi}(t, \tau) = H(t, \tau). \quad (4.52)$$

Ефективність САУ з інформаційної точки зору можна оцінити критерієм

$$\mathcal{E}_I(t, \tau) = \frac{I_p(t, \tau)}{I_{\Pi}(t, \tau)}, \quad (4.53)$$

де $I_p(t, \tau) = I(t, \tau)$ - реальна кількість інформації, що визначається за (8).

З урахуванням (4.51) і (4.52) для оцінки ефективності САУ матимемо вираз

$$\mathcal{E}(t, \tau) = \frac{H_0(t, \tau) - H(t, \tau)}{H_0(t, \tau)} \quad (4.54)$$

За виразом (4.54) неважко визначити, що ідеальна САУ матиме значення ефективності $\mathcal{E}_I(t, \tau) = 1$, а реальна - значення $\mathcal{E}_I(t, \tau) < 1$. Однак критерій (4.54) не враховує динаміку процесу контролю та управління, складність і вартість САУ. Ці недоліки можна усунути ввівши інше співвідношення для ефективності САУ:

$$\mathcal{E}(t, \tau) = \frac{K_I(t, \tau)}{K_{IO}(t, \tau)}, \quad (4.55)$$

де $K_I(t, \tau) = \frac{I_{\max}(t, \tau)}{C_{\Sigma}(t, \tau)}$ - максимальна кількість інформації, одержувана

САУ в розрахунках на одиницю її загальної вартості;

$I_{\max}(t, \tau) = \sum_{i=1}^m I_{i \max}(t, \tau)$ - максимальна кількість інформації, яку отримують

під час контролю за m параметрами процесу;

$K_{IO}(t, \tau) = \frac{I_{\max \max}(t, \tau)}{C_{\min}(t, \tau)}$ - максимальна середня кількість інформації,

одержувана САУ під час контролю за m параметрами процесу в розрахунку на одиницю мінімальної загальної вартості ідеалізованої САУ;

$I_{\max \max}(t, \tau) = \sum_{i=1}^m I_{i \max \max}(t, \tau)$ - максимальна середня кількість інформації,

одержувана під час контролю об'єкта за m параметрами.

З урахуванням розглянутих вище співвідношень (4.51), (4.52), (4.55) і рівності $I_{\max \max}(t, \tau) = m$ отримуємо остаточну формулу для оцінки ефективності САУ:

$$\mathcal{E}(t, \tau) = \frac{\sum_{i=1}^m [H_{0i}(t, \tau) - H_i(t, \tau)] C_{\min}(t, \tau)}{m \sum_{i=1}^m C_i(t, \tau)}. \quad (4.56)$$

4.3.2 Розробка рекомендацій щодо застосування узагальненого функціонально-статистичного критерію оцінки ефективності процесу та САУ

Розробка рекомендацій щодо застосування узагальненого функціонально-статистичного критерію оцінки ефективності процесу і САУ виконано на конкретному прикладі.

Оцінити ефективність САУ за рівноточного контролю п'яти параметрів об'єкта, що має однакові середньоквадратичні відхилення $\sigma_i = 0,1$ і однакові допуски $\Delta_i = 0,25$ за однакової надійності контрольованих вузлів $P_{oi} = 0,9$. Відомо, що середньоквадратичне відхилення системи з контролю кожного з параметрів $\sigma_{cki} = 0,025$. Економічні показники системи (її вартість і коефіцієнт, що враховує вартість обслуговування за одиницю часу контролю) становлять відповідно величини $C_{ск}=1000$ грн. і $a_3 = 10$ грн/хв. Час повного контролю об'єкта $T_k = 0,2$ хв.

Визначимо значення ентропії об'єкта контролю і системи з контролю одного параметра, користуючись заданим значенням $P_{oi} = 0,9$ і таблицею 4.2. Маємо $H_{oi} = 0,4691$.

Таблиця 4.2 - Значення ймовірностей виконання завдань контрольованим об'єктом за і-м параметром і відповідні їм значення ентропії

Pi	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.15	0.2
Hi	0.0808	0.1415	0.1949	0.2422	0.2864	0.3274	0.3659	0.4021	0.4366	0.4691	0.6099	0.7219
Pi	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8
Hi	0.8113	0.8814	0.9341	0.9709	0.9827	1.0000	0.9927	0.9709	0.9341	0.8814	0.8113	0.7219

Продовження таблиці 4.2

Pi	0.85	0.9	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00
Hi	0.6089	0.4691	0.4366	0.4021	0.3659	0.3274	0.2864	0.2422	0.1949	0.1415	0.0808	0.0000

Визначимо значення ентропії об'єкта і системи з контролю п'яти параметрів

$$H_o = \sum_{i=1}^5 H_{oi} = 5 \cdot 0,4691 = 2,3455$$

визначаємо:

граничну похибку системи під час контролю *i*-го параметра

$$\delta_i = 3\sigma_{cki} = 3 \cdot 0,025 = 0,075$$

відносне значення граничної похибки

$$Z_i = \frac{\delta_i}{\Delta_i} = \frac{0,075}{0,25} = 0,3$$

відносне значення допуску на *i*-й параметр

$$r_i = \frac{\Delta_i}{\sigma_i} = \frac{0,25}{0,1} = 2,5$$

відношення граничної похибки САУ під час контролю i -го параметра до середньоквадратичного відхилення i -го параметра

$$\frac{\delta_i}{\sigma_i} = \frac{0,075}{0,1} = 0,75$$

Визначаємо ймовірності невиявлених і помилкових відмов, користуючись номограмами (рисунки 4.7 та 4.8). Маємо:

$$P_{noi} = 2 \cdot f_{noi} = 0,006$$

$$P_{loi} = 2 \cdot f_{loi} = 0,003$$

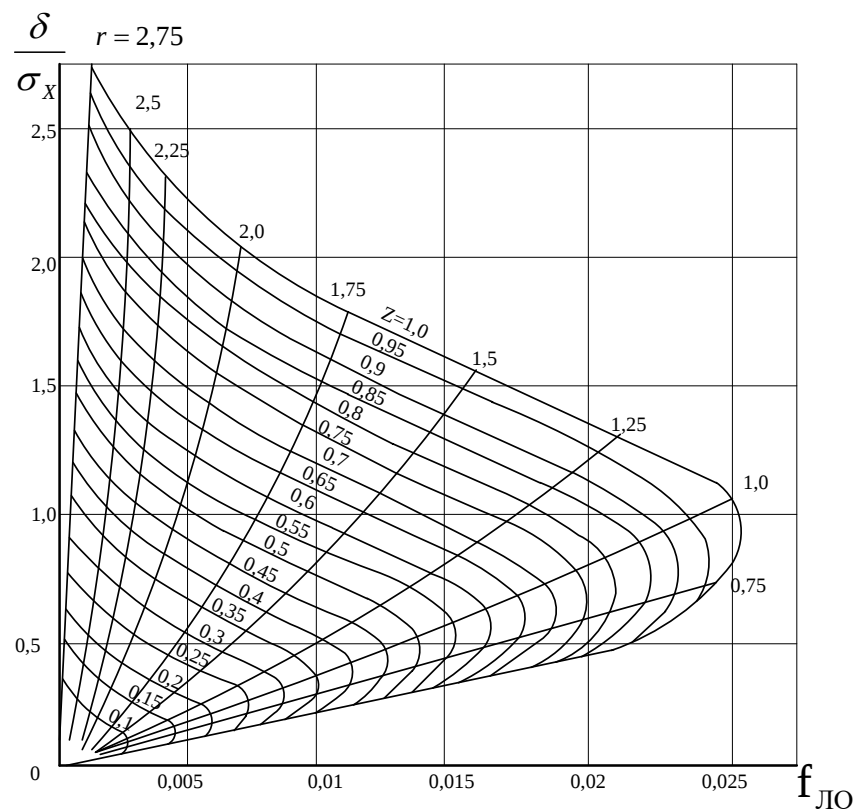


Рисунок 4.7 – Номограма залежності $f_{ЛО}\left(\frac{\delta}{\sigma_X}, r, Z\right)$

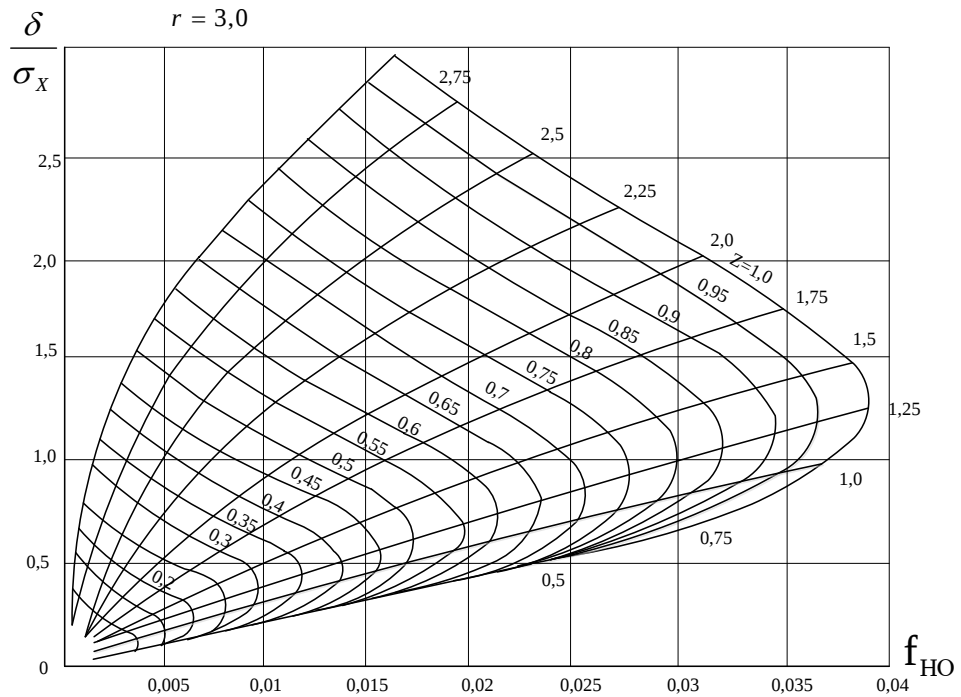


Рисунок 4.8 – Номограма залежності $f_{HO}\left(\frac{\delta}{\sigma_X}, r, Z\right)$

Визначасмо апостеріорну ймовірність виконання завдання об'єктом за i -м параметром, користуючись значеннями P_{noi} , P_{loi} і формулою

$$P_i = \frac{P_{oi}(1 - P_{loi})}{P_{oi}(1 - P_{loi}) + P_{noi}(1 - P_{oi})}$$

Отримуємо $P_i = 0,9993$

Визначаємо ентропію об'єкта за i -м параметром до моменту закінчення контролю, користуючись значенням P_i та інтерполяцією даних у таблиці 4.2.

Маємо $H_i = 0,025$.

Визначаємо ентропію об'єкта за п'ятьма параметрами до моменту закінчення контролю:

$$H = \sum_{i=1}^5 H_i = 5 \cdot 0,025 = 0,125$$

Визначаємо ефективність САУ, користуючись формулою (4.56) [55]:

$$\mathcal{E}_I = \frac{H_0 - H}{H_0} = \frac{2,3455 - 0,125}{2,3455} = 0,9467$$

Визначаємо коефіцієнт, що враховує вартість експлуатації системи контролю

$$K_{\mathcal{E}} = \frac{C_{ck}}{C_{ck} + a_{\mathcal{E}} \cdot T_K} = \frac{1000}{1000 + 10 \cdot 0,2} = 0,998$$

Визначаємо ефективність САУ з урахуванням економічних витрат

$$\mathcal{E}_{I\mathcal{E}} = \mathcal{E}_I K_{\mathcal{E}} = 0,9467 \cdot 0,998 = 0,945$$

4.4 Синтез нейрорегулятора NARMA-L2 для системи ПЧ-АД

З точки зору теорії автоматичного керування асинхронний електродвигун (АД) представляє собою складну нелінійну систему, яка описується рівняннями взаємодії статора та ротора двигуна. Існує певна кількість математичних моделей для опису цієї взаємодії в залежності від поставленої задачі дослідження АД. Для дослідження векторної системи керування використовується математична модель АД в обертовій системі

координат, орієнтованій по вектору потокозчеплення ротора d, q , яку можна описати системою рівнянь [28] :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{sd} = R_e i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} - \frac{k_r}{T_r} \Psi_{rd} - \omega_k \sigma L_s i_{sq} - p \omega k_r \Psi_{rq}; \\ U_{sq} = R_e i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} - \frac{k_r}{T_r} \Psi_{rd} + \omega_k \sigma L_s i_{sd} + p \omega k_r \Psi_{rd}; \\ \frac{d\Psi_{rd}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{sd} - \frac{1}{T_r} \Psi_{rd} + (\omega_k - p\omega) \Psi_{rq}; \\ \frac{d\Psi_{rq}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{sq} - \frac{1}{T_r} \Psi_{rq} - (\omega_k - p\omega) \Psi_{rd}; \\ M = \frac{3}{2} p k_r (\Psi_{rd} i_{sq} - \Psi_{rq} i_{sd}); \\ M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} \end{array} \right. \quad (4.57)$$

де $R_e = R_s + k_r^2 R'_r$ – еквівалентний опір;

$T_r = \frac{L_r}{R'_r}$ – електромагнітна постійна часу ротора;

$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2}$ – коефіцієнт розсіювання;

U_{sd}, U_{sq} – напруга статора по осях d та q відповідно;

i_{sd}, i_{sq} – струм статора;

Ψ_{rd}, Ψ_{rq} – потокозчеплення ротора;

L_s – індуктивність статора;

L_m – індуктивність розсіювання;

k_r – коефіцієнт зв'язку ротора;

ω_k – частота обертання системи координат;

ω – електрична частота обертання ротора;

p – кількість пар полюсів;

M – електромагнітний момент;

M_c – момент опору;

J – момент інерції.

Для моделювання був обраний асинхронний ТЕД АД914-У, основні технічні характеристики якого наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Основні технічні характеристики АД914-У

Найменування параметра	Значення
Номинальна лінійна напруга, В	1870
Частота струму статора, Гц	55,9
Потужність на валу, кВт	1200
Номинальний струм, А	450
Номинальний момент, Н·м	10400
Частота обертання ротора, об/хв	1140
ККД	0,955
Коефіцієнт потужності	0,870
Активний опір фази статора, Ом	0,0026
Активний приведений опір обмотки ротора, Ом	0,0181
Індуктивний опір фази статора, Ом	0,213
Індуктивний приведений опір обмотки ротора, Ом	0,161
Індуктивний опір намагнічуючого контура, Ом	6,48

В бібліотеці Deep Learning Toolbox середовища Matlab представлені три типи нейрорегуляторів: регулятор на основі еталонної моделі Model Reference Controller, регулятор на основі авторегресії з ковзаючим середнім

NARMA-L2 Controller та регулятор з передбаченням NN Predictive Controller. NARMA-L2 є одним з найбільш доречних методів управління нелінійними системами, що змінюються в залежності від часу. Проектування NARMA-L2 складається з двох основних кроків. Першим кроком є визначення системи, якою потрібно керувати. Другим кроком є синтез системи керування. Модель NARMA [92] може бути представлена у вигляді рівняння (4.58):

$$y(k+d) = N[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k), u(k-1), \dots, u(k-n+1)] \quad (4.58)$$

$$u(k), u(k-1), \dots, u(k-m+1)$$

де $u(k)$ - вхід системи;

$y(k)$ - вихід системи;

m - ціле число, що показує затримку вхідного сигналу;

n - ціле число, що показує затримку вихідного сигналу;

d - відносний ступінь.

На вході в систему діє контрольний набір i , коли система слідує цьому посиланню, структура контролера може бути виражена рівнянням (4.59). Нейронна мережа використовується для мінімізації середньої квадратичної помилки, яка визначається функцією G [26]. З іншого боку, для навчання нейронної мережі використовувався алгоритм зворотного поширення.

$$u(k) = G[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), y_r(k+d), u(k-1), \dots, u(k-m+1)] \quad (4.59)$$

Після визначення функції G NARMA-L2 можна записати, як показано в рівнянні (4.60).

$$y(k+d) = f[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-m+1)] + g[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-m+1)] \cdot u(k) \quad (4.60)$$

Перевага рівняння (4.60) полягає в тому, що його можна розв'язати для керуючого сигналу, що змушує системний вихід слідувати еталонному. Отриманий вираз регулятора можна виразити рівнянням (4.61).

$$u(k) = \frac{y_r(k+d) - f[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-n+1)]}{g[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-n+1)]} \quad (4.61)$$

У реальній системі входи, підключені до виходу, не визначаються одночасно. Тому використовується рівняння (4.62) при значенні d більше двох.

$$y(k+d) = f[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k), u(k-1), \dots, u(k-n+1)] + g[y(k), \dots, y(k-n+1), u(k), \dots, u(k-n+1)] \cdot u(k+1) \quad (4.62)$$

У цьому випадку, структура NARMA-L2 буде виглядати як показано в рівнянні (4.63)

$$u(k+1) = \frac{y_r(k+d) - f[y(k), \dots, y(k-n+1), u(k), \dots, u(k-n+1)]}{g[y(k), \dots, y(k-n+1), u(k), \dots, u(k-n+1)]} \quad (4.63)$$

На рисунку 4.9 зображена узагальнена форма структури NARMA-L2 та спосіб підключення регулятора після завершення навчання нейромережі.

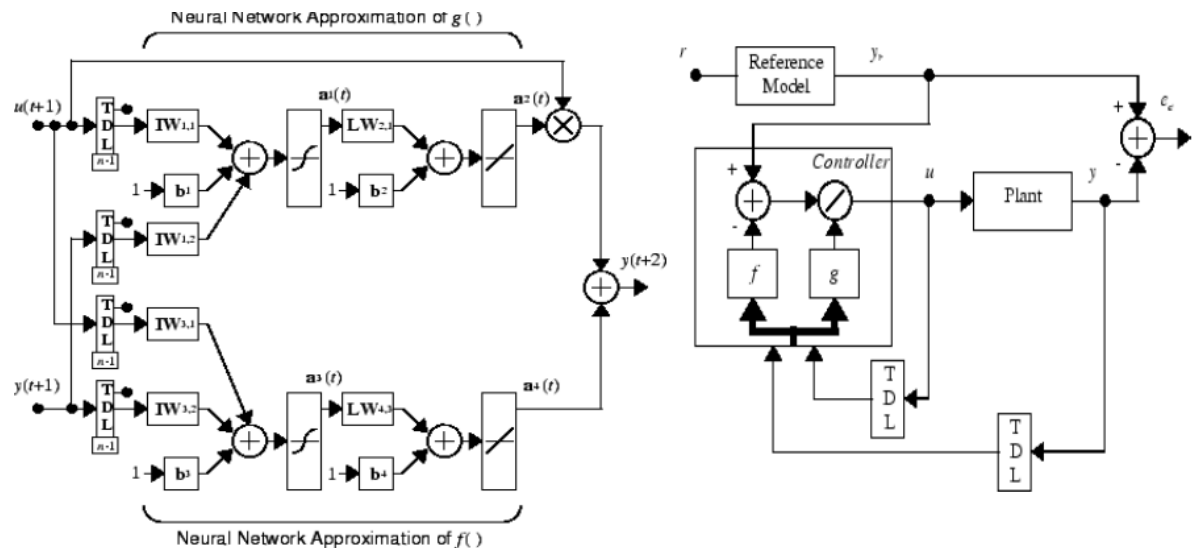


Рисунок 4.9 – Узагальнена форма структури NARMA-L2 та спосіб підключення регулятора

На основі системи рівнянь (4.57) була розроблена імітаційна модель системи векторного керування тяговим електродвигуном АД914-У з нейрорегулятором NARMA-L2 (рисунок 4.10):

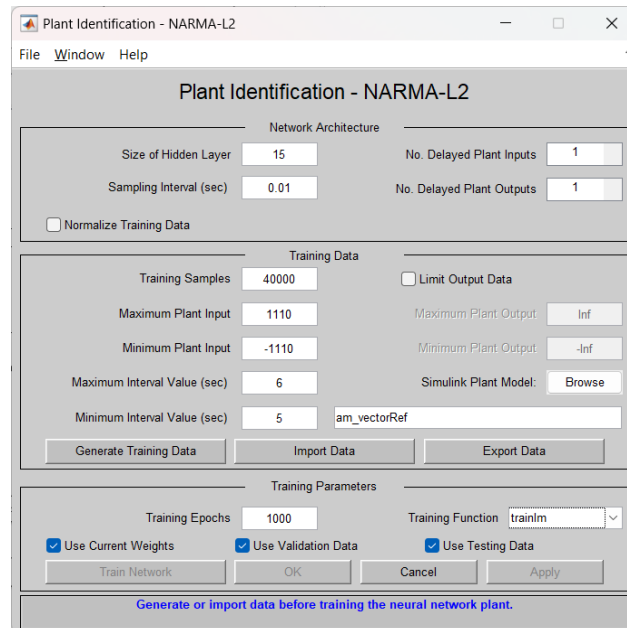


Рисунок 4.11 – Вікно ідентифікації об'єкта керування

Для демонстрації можливостей нейрорегулятора NARMA-L2 проведемо порівняльне імітаційне моделювання системи векторного керування з нейрорегулятором швидкості та ПІ-регулятором [27, 37]. Результати моделювання представлені на рисунку 4.12. Червоним кольором позначені характеристики електродвигуна з нейрорегулятором швидкості, а синім – з ПІ-регулятором.

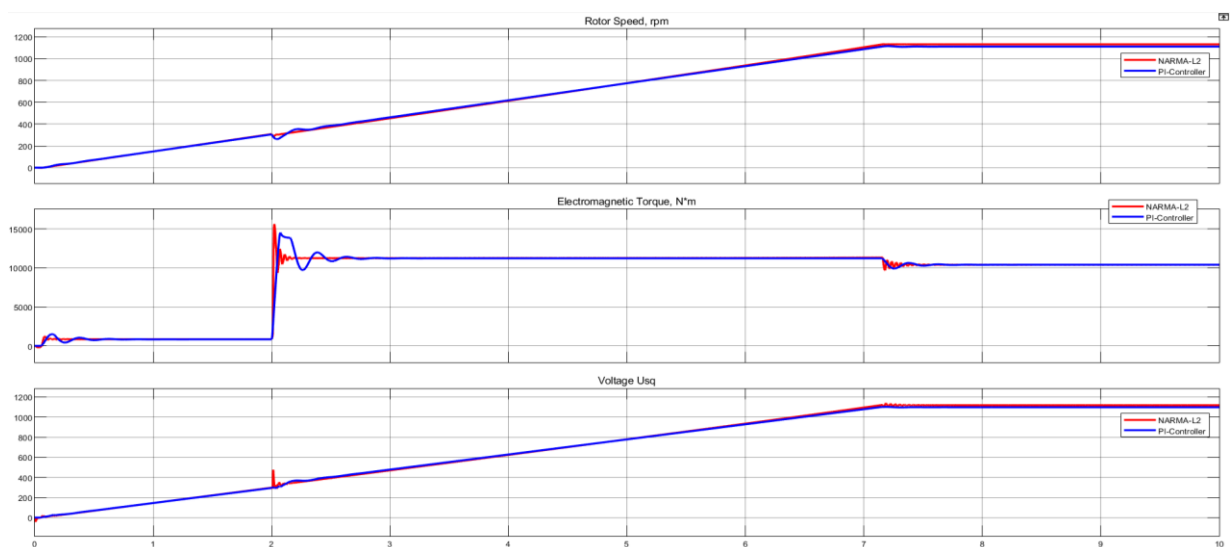


Рисунок 4.12 – Результати імітаційного моделювання з нейрорегулятором та ПІ-регулятором

У результаті імітаційного моделювання встановлено, що система з нейрорегулятором показує кращі показники регулювання частоти обертання та електромагнітного моменту в перехідних процесах, однак при стрибкоподібному накиданні навантаження має місце значна пульсація напруги U_{sq} .

4.5 Висновки по розділу 4

1. В ході вирішення проблеми синтезу базової обчислювальної структури пристрою завадостійкого приймання зондувального сигналу моніторингу технічного стану асинхронних ТЕД в умовах дії складної адитивної завади, чотири компоненти якої є структурно-детермінованими, а п'ята являє собою широкосмуговий гаусівський шум, визначено критерій оптимальності приймання, а також сформовано відповідну цьому критерію цільову функцію та оптимізовано її вигляд з урахуванням взаємних кореляційних зв'язків компонентів адитивної суміші сигналу та завад.

2. На основі заданого загального вигляду цільової функції побудовано її модифікації, які відповідають наявності або відсутності корисного сигналу у вхідній сигнально-завадовій суміші. Як наслідок, задачу виявлення корисного сигналу зведено до задачі розрізнення двох псевдосигналів, утворених як суми структурно-детермінованих компонентів завади та корисного сигналу або як сума тільки зазначених компонентів завади.

3. Встановлено, що статистично обґрунтованими оцінками параметрів сигналу є оцінки, отримані шляхом мінімізації ізольованих логарифмів відношень правдоподібності сигналу та кожної зі структурно-детермінованих завад (ІЛВПМ). Ці ІЛВПМ є складовими обох модифікацій цільової функції. Складові, що не увійшли в ІЛВПМ, обчислюють на основі вищевказаних

оцінок, і вони вносять поправки у величини обох модифікацій цільових функцій.

4. Проведено синтез пристрою оптимального приймання зондувального сигналу контролю технічного стану асинхронних ТЕД,

Результати розрахунку величини середньої ймовірності помилки розрізнення P_{EM} зондувального сигналу дають змогу зробити висновок, що синтезований пристрій надійно розпізнає ситуацію наявності тестового сигналу у вхідній суміші цього сигналу і типових завад, а величина P_{EM} з великим запасом задовольняє нормативні вимоги і вкрай слабо чутлива до амплітудних параметрів структурно-детермінованих завад.

5. У ході вирішення проблеми моніторингу якості роботи тягових двигунів локомотивів сформовано систему диференціальних рівнянь відносно шуканих струмів і напруги, що враховує поточний стан їхніх електричних параметрів;

6. Розроблено математичну модель, яка дає змогу провести аналітичний або числовий опис струму в будь-якій вітці схеми заміщення двигуна. Отримані в ході розрахунків рівняння залишаються справедливими для будь-якої форми тестової напруги. Це дає змогу знайти аналітичний опис напруги на будь-якому елементі як самого двигуна, так і кола його живлення.

7. Проведено формування узагальненого критерію оцінки ефективності процесу експлуатації тягового рухомого складу, що дозволило розробити і показати на конкретному прикладі покрокові рекомендації щодо застосування узагальненого функціонально - статистичного критерію оцінювання ефективності процесу контролю та управління, здійснюваного САУ.

8. Виконано синтез нейрорегулятора швидкості тягового електродвигуна на основі авторегресії з середнім NARMA-L2, реалізованого в бібліотеці Deep Learning Toolbox середовища Matlab. В Simulink була розроблена імітаційна модель векторного керування тяговим асинхронним

електродвигуном АД914-У. У результаті імітаційного моделювання встановлено, що система з нейрорегулятором показує кращі показники регулювання частоти обертання та електромагнітного моменту в перехідних процесах, однак при стрибкоподібному накиданні навантаження має місце значна пульсація напруги U_{sq} .

РОЗДІЛ 5

ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ЕКСПЛУАТАЦІЙНОМУ ПАРКУ ЛОКОМОТИВІВ

5.1 Сучасна проблема української залізниці щодо визначення актуального завдання з модернізації локомотивів експлуатаційного парку та обґрунтування необхідності невідкладного її вирішення

Основною складовою стратегії розвитку суб'єктів господарського права усіх видів у сфері реальної економіки країни є формування технічної політики, яка окреслює основні напрями інноваційно-інвестиційної діяльності на довгостроковий період, уточнюється комплексом середньострокових завдань тактичного характеру та конкретизується детально спланованими оперативними задачами поточного і найближчого часів. Ефективна реалізація таких ієрархічно побудованих рішень можлива лише за умови їхньої відповідності загальним законам розвитку (законам діалектики) і закономірностям, що впливають з них як форми прояву загальних законів в окремому середовищі чи окремій системі господарської діяльності. Повною мірою це стосується як транспортної системи в цілому, так і залізничної галузі зокрема. Такий дедуктивний підхід дає змогу зробити логічний висновок щодо пріоритетності інноваційних заходів, спрямованих на поліпшення функціональних можливостей залізниці, і обґрунтувати їх [23].

На сьогодні є важливим оприлюднення результатів поглибленого дослідження дії загальних законів розвитку на еволюцію транспортної системи і на цій основі визначення актуальних задач з модернізації

локомотивів експлуатаційного парку і обґрунтування необхідності невідкладного їх вирішення. Це дасть змогу вирішити завдання з подовження «життєвого циклу» локомотивів і збільшення обсягів перевезень вантажів у сучасних умовах. Дослідження здійснювалось із застосуванням методів наукової дедукції, кореляційно-регресійного та економічного аналізів.

Відомо, що становлення будь-якого окремого виду трудової діяльності, в тому числі і транспортного обслуговування, як інфраструктурної складової економічної системи в цілому, зумовлено суспільним розподілом праці і, перш за все, виділенням в окремі галузі промисловості та сільського господарства. Причинно-наслідковий зв'язок цього процесу проявився у виникненні ринку товарів і послуг, що надало поштовх розвитку товарно-грошових відносин. На цьому етапі процес перевезення товарів і людей здійснювався виключно гужовим транспортом на невеликі відстані і в незначних обсягах. Подальший розвиток цих галузей потребував кількісного збільшення обсягів вантажних перевезень, що обумовило виникнення якісно нової транспортної системи, основою якої став залізничний транспорт. Принциповими техніко-технологічними відмінностями залізниці від гужового транспорту були: застосування єдиного силового тягового засобу (локомотива) для швидкого одночасного переміщення великої сукупності окремих завантажених транспортних одиниць (вагонів); незалежність транспортного процесу від погодних умов. Це дозволило здійснювати перевезення великих мас вантажів в значно коротші терміни. Тобто, збільшення кількісних явищ і, передусім, потреб базових галузей економіки в транспортних послугах призвело до якісних змін в діючій на той час транспортній системі.

Проте потреби виробництва обмежувались можливостями залізниці здійснювати перевезення лише між окремими станціями і унеможливлювали доставку вантажів безпосередньо від виробника до споживача без використання гужового транспорту. Це, в свою чергу, обумовило швидкий

розвиток автомобільного транспорту та постійне його вдосконалення перш за все в напрямі створення спеціалізованих та великовантажних транспортних засобів, а також якісної дорожньої інфраструктури.

Стрімке будівництво мережі автомобільних доріг в економічно розвинутих країнах, насамперед швидкісних автомагістралей, дало змогу суттєво розширити функціональні можливості автомобільного транспорту. У другий половині XX сторіччя він перетворився з допоміжного транспортного засобу місцевого значення, що переважно забезпечував перевезення вантажів між залізничною станцією і підприємством, в потужного самостійного гравця на транспортному ринку. Вантажопідйомність сучасного автомобільного тривісного напівпричепа досягає 70 т, а обсяг кузова наближається до 100 м³, що перевищує технічні характеристики вантажного вагона. Про тенденцію зростання конкурентоспроможності автомобільного транспорту свідчать порівняльні показники його роботи з залізницею, наведені в таблиці 5.1 [244].

Як бачимо, середньорічний обсяг перевезення вантажів автомобілями за цей період в 3,21 рази більший за обсяг залізничних перевезень, проте залізниця поки що випереджає в 3,26 раза за обсягом вантажообігу (середня відстань залізничних перевезень більша за автомобільні понад 10,7 рази).

При цьому слід зазначити, що географічне положення України і площа її території, щільність розташування населених пунктів і структура економіки країни, а також активне відновлення та розбудова автомобільних доріг в Україні відповідно з Державною програмою «Велике будівництво» в подальшому створить сприятливі умови для постійного зростання дальніх автомобільних перевезень.

Таблиця 5.1 – Показники роботи залізничного та автомобільного транспорту

Рік	Залізничний транспорт			Автомобільний транспорт		
	Перевезення вантажів, млн т	Вантажообіг, млрд т*км	Середня відстань, км	Перевезення вантажів, млн т	Вантажообіг, млрд т*км	Середня відстань, км
1	386	211,2	547	1131	56,0	50
2	350	195,1	557	1021	53,3	49
3	343	187,6	545	1086	58,0	53
4	339	191,9	566	1022	62,3	56
5	322	186,3	561	1206	71,7	59
6	313	181,8	581	1147	64,2	56
7	306	175,5	573	956	42,2	44

Середні відстані таких перевезень наближатимуться до залізничних і неминучість цього процесу закономірна. Такий тренд розвитку ринку перевезень звужує можливості транспортного обслуговування залізницею, які обмежаться здебільшого перевезенням масових вантажів. Останніми роками середньорічний темп зменшення обсягів перевезення вантажів залізницею складав 0,96, а вантажообіг щорічно скорочувався на 3 %. У той же час середньорічний темп автоперевезення вантажів складав 1,003, а вантажообіг щорічно збільшувався на 2,8 %. В майбутньому цей процес набиратиме більш швидких темпів, про що переконливо свідчить закордонний досвід [17].

Отже, кількісні зміни в системі суспільного розподілу праці призвели до кількісних змін у транспортній галузі, яка обслуговує виробничу сферу, що, у свою чергу, стало причиною якісних змін на ринку транспортних послуг. Ця закономірність має об'єктивний характер і є проявом першого закону діалектики – переходу кількісних змін у якісні в транспортній системі.

Основою існування будь-якої системи є постійне знаходження компромісних рішень між суперечливими (протилежними) елементами, які її

утворюють. Наявність протилежностей, що проявляється у вигляді суперечностей в різних формах, є запорукою існування цілісності будь-якої системи і її розвитку, в тому числі і транспортної галузі.

Суперечності між попитом виробництва та можливостями гужового транспорту щодо перевезень дали поштовх розвитку залізниці, яка стала протилежністю гужовому транспорту та надала йому суто допоміжні функції. Їхнє існування в межах однієї транспортної системи в подальшому не забезпечувало потреби виробничої сфери, тобто обумовило протиріччя між цими двома системами, які входять до складу системи вищого порядку – економіки країни. Це дало поштовх розвитку автомобільного транспорту, який спочатку виконував допоміжні функції відносно залізничного. Проте з моменту свого виникнення автомобільний транспорт стає протилежністю залізничному, і їхнє співіснування в умовах компромісів, які постійно змінюються, забезпечує існування та розвиток транспортної системи в цілому. В подальшому розвиток автомобільного транспорту, що знаходиться в постійному протиріччі з залізничним, обумовлює розвиток саме залізниці як свого конкурента (контрейлерні перевезення, маршрутні поїзди тощо) і таке співіснування протиріч між елементами транспортної системи є запорукою їхнього сумісного функціонування.

Компромісне розв'язання протиріч між елементами транспортної системи призводить до виникнення її нового якісного стану, оптимізує систему. Постійна боротьба внутрішніх протиріч в транспортній системі та їхнє рішення є рушійною силою подальшого розвитку всієї транспортної системи у повній відповідності з дією другого закону діалектики – єдності і боротьби протилежностей.

Як було показано, під дією двох вищезначених законів діалектики транспортна система піднімається на більш високий ступінь розвитку і набуває нового якісного стану.

Виникнення залізничного транспорту зупинило монополію гужових перевезень, проте транспортна система успадкувала кращі можливості цього транспорту, який в співіснуванні зі своєю протилежністю – залізницею, оперативно забезпечував локальні перевезення невеликих обсягів вантажу. В свою чергу, виникнення і подальший розвиток автомобільного транспорту заперечили використання гужового, перейнявши на себе його функції. У наш час автомобільний транспорт виступає як відносне заперечення залізниці, конкуруючи з нею в транспортному обслуговуванні не тільки малих і середніх, а, в окремих випадках, і великих матеріальних потоків (перевезення зерна, контейнерів тощо). Проте залізниця зберегла і перенесла в сучасну транспортну систему свої найкращі позитивні якості: можливість перевезення масових вантажів, мінімальний вплив погодних умов на процес транспортування тощо. Таким чином, заперечення є умовою розвитку будь-якої системи, зокрема транспортної системи, і залізниці як одного з її елементів.

Запереченням старої системи не закінчується процес розвитку, оскільки в якісно новій системі виникають свої внутрішні протиріччя (заперечення) між її елементами, а постійне знаходження консенсусних умов їхнього вирішення є рушійною силою майбутнього оновлення системи. Проте консенсус повністю не виключає боротьбу між елементами системи, оскільки зберігається конфлікт інтересів, який створює умови для виникнення нових протиріч. Необхідно зазначити, що протиріччя між елементами системи мають причинно-наслідковий зв'язок і виникають разом з виникненням причини, але вони можуть відчуватись в тій, чи іншій формі значно пізніше, тобто може існувати проміжок часу між виникненням причини і відчуттям її наслідків у вигляді протиріч (взаємних заперечень). Так, протиріччя (взаємне заперечення) між залізницею і автомобільним транспортом виникло з появою першого автомобіля, а відчуття цих протиріч з'явилося тільки при значному збільшенні кількості автотранспорту і зростанні його функціональних

можливостей. Цей процес відбувається відповідно з третім об'єктивним законом діалектики, тобто законом «заперечення заперечення» і є віддзеркаленням його дії в ході розвитку транспортної галузі.

Закордонний та вітчизняний досвід транспортної діяльності свідчить про звуження сегменту залізничних перевезень, залишаючи залізниці транспортування масових вантажів (вугілля, руда, зерно тощо), а автомобільний транспорт в умовах європейських країн набуває домінуючого значення [45].

Слід зазначити, що світові тенденції зменшення видобування вугілля та перехід на відновлювальні джерела енергії (зелена енергетика) безпосередньо торкнуться і національної економіки. Це призведе до зменшення обсягів залізничних вантажних перевезень (в наш час частка вугілля та коксу складає понад 17 % в загальному обсязі перевезення вантажів залізницею) [15].

При цьому можна очікувати, що саме перевезення масових вантажів стане запорукою подальшої життєдіяльності залізничної галузі. Проте теперішній стан залізниці та подальше утримання її конкурентоспроможності навіть в існуючому обсязі транспортних послуг вимагає негайного вирішення техніко-технологічних та організаційних задач щодо модернізації рухомого складу, удосконалення інфраструктури залізниці та системи управління нею.

Відповідно до законів діалектики якісне оновлення транспортної системи в цілому і залізничної галузі зокрема передбачає успадкування позитивних якісних властивостей старої системи новою. Виходячи з цього, умовою конкурентоспроможності залізниці є набуття нею властивостей, що притаманні автомобільному транспорту (а стрімкий розвиток великовантажних автоперевезень свідчить про набуття ним властивостей залізничного транспорту). Стратегічною метою такого оновлення є можливість доставляти середні і невеликі обсяги вантажів в стислі терміни за принципом «від дверей до дверей». Не викликають сумніву пропозиції [36], що для цього АО «Укрзалізниця» має розширювати коло своєї діяльності в

напрямі комплексного задоволення потреб клієнтів, перетворюючись з вузькоспеціалізованого рейкового суб'єкта перевезень в багатфункціональну транспортно-логістичну компанію, що здатна використовувати різні види транспорту, а саме: мати власний парк великовантажних автомобілів, впроваджувати гібридний транспорт на базі вантажних тролейбусів, вантажних електропоїздів, здатних перевозити невеликі вантажі з пасажирською швидкістю і можливістю виходу на під'їзні колії завдяки акумуляторним джерелам енергії тощо. Такий концептуальний принцип багатфункціональності доцільно використовувати і в сфері пасажирських перевезень.

Зрозуміло, що вирішення таких завдань потребує значних інвестиційних витрат протягом тривалого часу. Проте стабільне функціонування виробничої сфери країни і, насамперед, її базових галузей в умовах існування фінансових складнощів в Україні в теперішній період можливе лише за наявності безперебійного залізничного обслуговування на основі раціонального використання існуючого парку рухомого складу, насамперед локомотивів.

Пріоритетна роль локомотивів в існуючих умовах технічного переозброєння рухомого складу залізниці підтверджується висновками про їхню ключову значущість у процесі перевезення вантажів. Про обґрунтованість таких висновків свідчать отримані результати аналізу побудови множинної кореляційно-регресійної моделі, яка визначає залежність обсягів вантажних залізничних перевезень від кількості магістральних локомотивів та вантажних вагонів експлуатаційного парку [13].

В таблиці 5.2 наведено статистичні дані цих показників за десять попередніх років [11, 15, 23], які покладено в основу побудови означеної математичної моделі.

Таблиця 5.2 – Обсяги перевезення вантажів залізницею України та наявність експлуатаційного парку рухомого складу

Показник	Рік									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Обсяг вантажних перевезень, млн т	469	457	444	386	350	343	339	322	313	306
Кількість магістральних локомотивів експлуатаційного парку, од.	817	776	703	641	619	596	589	659	680	688
Кількість вантажних вагонів експлуатаційного парку, од.	119265	120814	144641	145029	143313	140964	135792	142547	128303	110267

Двофакторна регресійна модель $y_i = a + b_1x_1 + b_2x_2$, що описує залежність обсягів вантажних залізничних перевезень від кількості магістральних локомотивів та вантажних вагонів експлуатаційного парку, має вигляд [11]

$$y_{o.п.} = -618,474 + 0,9031x_{л} + 0,00286x_{в}, \quad (5.1)$$

де $y_{o.п.}$ – обсяг вантажних залізничних перевезень;

$x_{л}$ – кількість магістральних локомотивів;

$x_{в}$ – кількість вантажних вагонів експлуатаційного парку.

Якісні властивості моделі характеризуються ознаками, що наведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Основні показники якості економіко-математичної моделі

Показник	Значення
Коефіцієнт детермінації, (R^2)	0,7263
Середня помилка апроксимації, ($\bar{A}$)	7,05%
Стандартна помилка, (S)	36,861
Критерій Фішера, (F)	9,29

Отримана кореляційно-регресійна модель показує, що збільшення локомотивного парку на 1 од. забезпечує зростання вантажоперевезень на 0,9031 од. за рік і, відповідно, внаслідок збільшення вагонного парку на 1 од., річний обсяг вантажних перевезень може зрости тільки на 0,00286 од., а константа (-618,474) оцінює вплив інших факторів, які в своїй сукупності негативно впливають на обсяги вантажних перевезень залізничним транспортом, зменшуючи їх.

Для оцінки ступенів значущості експлуатаційних парків магістральних локомотивів та вагонів на обсяги перевезення вантажів було визначено розрахунковий обсяг залізничних вантажних перевезень з використанням даних 2024 р. про кількість локомотивів та вагонів експлуатаційного парку, а саме:

$$y_{o.l.} = -618,474 + 0,9031 \cdot 688 + 0,00286 \cdot 110267 = \\ = -618,474 + 621,36 + 315,36 = 318,22 \quad (s = \pm 36,86).$$

Тобто розрахунки свідчать, що за існуючого стану залізничного транспорту, надання послуг з необхідних обсягів вантажних перевезень здійснюються за умов, коли значущість експлуатаційного парку магістральних локомотивів у 1,97 рази $\left(\frac{621,36}{315,36}\right)$ перевищує значущість експлуатаційного парку вантажних вагонів.

Цей висновок підкріплюється логічним аналізом статистичних даних роботи АТ «Укрзалізниця» минулий рік, що наведено в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 - Основні показники роботи рухомого складу залізниці

Показник	Величина показника
Тривалість обігу вантажного вагона ($t_{об.}$), доб	9,68
Простій вагона під однією вантажною операцією ($t_{в.р.}$), год	50,57
Середньодобовий пробіг локомотива ($l_{л.}$), км	436,2
Середня відстань перевезення вантажу [табл.1] ($S_{пер.}$), км	581
Доля пробігу порожнього вагона ($D_{пор}$) до пробігу навантаженого вагона, %	70,8

Виходячи з наведених даних, визначено:

- середню тривалість пробігу завантаженого вагона ($T_{зв}$)

$$T_{зв} = 24 \cdot \frac{S_{пер}}{l_{л}}; \quad (5.2)$$

$$T_{зв} = \frac{24 \cdot 581}{436,2} = 31,97 \text{ год};$$

- середню тривалість пробігу порожнього вагона ($T_{пв}$)

$$T_{пв} = T_{зв} \cdot \frac{D_{пор}}{100}; \quad (5.3)$$

$$T_{пв} = 31,97 \cdot \frac{70,8}{100} = 22,63 \text{ год};$$

- середню сукупну тривалість пробігу завантаженого та порожнього вагона ($T_{\text{сук}}$)

$$T_{\text{сук}} = T_{\text{зв}} + T_{\text{пв}}; \quad (5.4)$$

$$T_{\text{сук}} = 31,97 + 22,63 = 54,60 \text{ год};$$

- середню сукупну тривалість навантаження та розвантаження вагона ($T_{\text{НР}}$)

$$T_{\text{НР}} = 2t_{\text{в.р.}} \quad (5.5)$$

$$T_{\text{НР}} = 2 \cdot 50,57 = 101,14 \text{ год};$$

- середню тривалість простою вагона в очікуванні формування, відправлення та розформування поїзду ($T_{\text{ПР}}$)

$$T_{\text{ПР}} = t_{\text{об}} - T_{\text{НР}} - T_{\text{сук}} \quad (5.6)$$

$$T_{\text{ПР}} = 232,32 - 101,14 - 54,60 = 76,58 \text{ год.}$$

Що становить 3,19 доби.

Таким чином, очікування формування (розформування) та відправлення вантаж-ного поїзду в 2024 р. складало біля 33 % $\left(\frac{3,19}{9,68}\right)$ тривалості обігу вагона насамперед внаслідок нестачі локомотивів.

Впевненість у такому висновку надають аналітичні дані про співвідношення експлуатаційних парків магістральних локомотивів та вантажних вагонів протягом попередніх десяти років (таблиця 5.2), що наведено в таблиці 5.5.

За даними Укрзалізниці 2022–2023 рр. вантажний поїзд складався в середньому з 53 вагонів, тобто вони виконували свою пряму функцію, оскільки знаходились в стані руху, в той же час близько 136 вагонів (188,7 –

53) в 2022 р. та близько 107 вагонів (160,3 – 53) в 2023 р. у розрахунку на один магістральний локомотив простоювали в очікуванні відправлення, що складає відповідно 72 % та 66 % експлуатаційних парків вагонів в ці роки. За таких умов залізниця втрачає будь-які можливості конкурувати з автомобільним транспортом в обсягах повагонних перевезень вантажів.

Таблиця 5.5 - Співвідношення експлуатаційного парку вантажних вагонів і магістральних локомотивів

Показник	Розрахунковий рік									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Кількість вантажних вагонів в розрахунку на один локомотив, од.	145,8	155,7	205,7	226,3	231,5	236,5	230,5	216,3	188,7	160,3

Враховуючи, що фактичний знос локомотивів складає понад 90 % інвентарного парку, найсуттєвішим і найбільш актуальним питанням сьогодення залишається подальше забезпечення функціональних можливостей існуючих транспортних засобів, зокрема локомотивів, шляхом впровадження технічних новацій, які дозволять збільшити їхній «життєвий цикл». Виходячи з того, що Україна не має необхідних потужностей для випуску локомотивів, будь-яке відтермінування виведення їх з експлуатації дасть змогу знизити ризики для всієї економіки країни. З огляду на це, на сьогодні при формуванні технічної політики залізничної галузі на середньостроковий період пріоритетним завданням, а можливо і єдиним вірним рішенням, є впровадження інноваційних заходів, що дають змогу продовжити експлуатаційні можливості діючого локомотивного парку. Це суттєво знизить вірогідність виникнення непередбачених ситуацій в перехідний період оновлення парку локомотивів і зробить цей процес більш прогнозованим і керованим.

5.2 Джерела отримання економічного ефекту від впровадження ресурсозберігаючих методів, технологій та технічних засобів експлуатації локомотивів

Однією з найважливіших проблем, що стоїть перед інфраструктурною складовою економіки України в наш час, є чітке та злагоджене функціонування транспортної системи. Насамперед це стосується залізничного транспорту, який здійснює понад 51 % загальнодержавного вантажообігу та залишається природним монополістом у перевезенні масових вантажів, більшість з яких має експортно-імпортне призначення і стратегічний характер: руда, метал, вугілля, паливно-мастильні матеріали, зерно, військові та контейнерні вантажі тощо.

Основна причина, що стримує сталий розвиток залізничної галузі, обумовлена дефіцитом фінансових ресурсів, який суттєво звужує можливості її технічного розвитку, і перш за все – оновлення рухомого складу. Найсуттєвішою проблемою в сучасних економіко-політичних умовах є забезпечення безперебійного функціонування локомотивного парку, про що переконливо свідчать офіційні дані АТ «Укрзалізниця» [15].

На сьогодні загальний парк локомотивів складає близько 3550 од., проте постійно експлуатується тільки 1680 од., тобто 47,3 %. При цьому за останні сім років експлуатаційний парк локомотивів скоротився на 415 од., що складає 19,8 %. Враховуючи, що фізичний знос локомотивів перевищує 90 %, можна стверджувати, що навіть оновлення локомотивного парку на 150–200 од. за рахунок імпорту не гарантує стабільної роботи залізниці.

У сучасних умовах ключовим завданням є впровадження комплексу технічних заходів з модернізації локомотивів, що дозволить продовжити їхній

«життєвий цикл» і зменшить ризики нестабільної роботи залізничного транспорту. Пріоритетним напрямом таких інноваційних рішень є облаштування локомотивів автоматизованою системою контролю їхнього технічного стану та оперативної діагностики причин виникнення позаштатних ситуацій.

Поглиблення суспільного розподілу праці внаслідок стрімкого розвитку науково-технічного прогресу зумовило тісний взаємозв'язок між виробничою та невиробничою сферами економіки і відповідно між галузями в межах цих сфер. Цей взаємозв'язок проявляється у взаємодії та взаємозалежності функціонування галузей і їхніх структурних утворень – суб'єктів господарювання. Будь-яка зміна в окремій галузі сфери матеріального виробництва неодмінно впливає на стан інших галузей в обох сферах економіки, тобто змінює загальний економічний стан країни.

У світовій практиці прийнято, що найважливішим узагальнюючим показником економічного розвитку країн є валовий внутрішній продукт (ВВП), який характеризує загальну ринкову вартість усіх товарів і послуг кінцевого споживання (його було розроблено в 30-х рр. XX ст. в США лауреатом Нобелівської премії з економіки, випускником Харківського комерційного інституту Семеном Кузнецем і прийнято в Україні в 1990-х рр.).

Спираючись на вищесказане, можна стверджувати, що зміни в роботі транспортної галузі неодмінно впливають і на загальний стан економіки України, який проявляється в зміні показника ВВП. Логіка такого твердження полягає в тому, що показник ВВП, який відображує обсяг кінцевого споживання національного продукту і у свою чергу є результатом діяльності виробничої сфери, а транспортне обслуговування є невід'ємним елементом як системи споживання, так і системи виробництва. Збільшення «життєвого циклу» локомотивів дасть можливість забезпечити більший обсяг вантажних перевезень залізницею, що призведе до ланцюгової реакції в

інших галузях сфери матеріального виробництва та позитивно позначиться на величині ВВП [10, 34].

Дослідження цього процесу проведено на основі побудови кореляційно-регресійної моделі та прогнозування подальшого зростання ВВП. Доцільність застосування методу економіко-математичного моделювання підтверджується адекватністю отриманих результатів при моделюванні та подальшому прогнозуванні обсягів пасажирських перевезень залізничним і автомобільним транспортом [12, 67].

Особливість методичного підходу до прогнозування можливого зростання ВВП країни під впливом збільшення обсягів залізничних вантажних перевезень полягає в тому, що сама модель враховує загальний вплив на величину ВВП сукупного обсягу вантажних перевезень як залізницею так і автомобілями. У розрахунках прийнятий показник ВВП, визначений у доларах США з урахуванням паритету купівельної спроможності (ВВП ПКС), тобто він відображує співвідношення гривні та долара на основі цін на аналогічні товари в Україні та США. У подальшому визначалась можлива зміна ВВП ПКС тільки під впливом фактора збільшенні обсягів перевезення вантажів саме залізницею при збереженні різних інших умов (незмінність обсягів автомобільних перевезень). Інформаційною базою для кореляційно-регресійного моделювання впливу обсягів вантажних перевезень на величину ВВП ПКС України є статистичні дані щодо динаміки цих показників за останні 10 розрахункових років. [23], наведені в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 - Показники ВВП ПКС і перевезення вантажів залізницями України

Показник	Рік									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ВВП ПКС України, млрд дол.	378,5	386,4	392,6	373,4	340,5	353,3	368,8	390,74	380,5	365,8
Перевезення вантажів залізничним та автомобільним транспортом України, млн т	1722	1717	1722	1517	1371	1429	1361	1528	1460	1261

Прогнозна оцінка зростання ВВП ПКС під впливом збільшення обсягів перевезень вантажів завдяки подовженню «життєвого циклу» локомотивів здійснювалась у такій послідовності:

а) з використанням кореляційно-регресійного аналізу визначено тісноту і спрямованість взаємозв'язку між сукупним обсягом вантажних перевезень обома видами наземного транспорту (залізничним та автомобільним) і величиною ВВП ПКСВ;

б) отримано регресійну економіко-математичну модель, що описує залежність величини ВВП ПКС від обсягів вантажного обслуговування вказаними видами транспорту;

в) на основі регресійної моделі визначено прогнозну оцінку зростання ВВП ПКС під впливом збільшення обсягів вантажу, що перевозитиметься залізницею при використанні модернізованих локомотивів з подовженим строком їхньої експлуатації.

У результаті кореляційно-регресійного аналізу отримано однофакторну економіко-математичну модель вигляду $y = a + bx$, яка визначає залежність величини ВВП ПКС від сукупних обсягів вантажних перевезень залізничним та автомобільним транспортом

$$y = 271,2702 + 0,06744x, \quad (5.7)$$

де y – величина річного ВВП ПКС;

x – сукупний річний обсяг вантажних перевезень залізничним і автомобільним транспортом.

Кореляційно-регресійний аналіз показав, що збільшення обсягів перевезень (x) на 1 од. вантажу призводить до зростання ВВП ПКС (y) у середньому на 0,06744 од. в дол. США, тобто при зростанні обсягів перевезень (x) на 100 % їхній вплив на величину ВВП ПКС (y) складає 6,74 %. Зв'язок між показником обсягів вантажних перевезень (x) і показником величини ВВП ПКС (y), за критерієм Чеддока, є помітним і прямим ($0,5 < r_{xy} = 0,673 < 0,7$).

Якість економіко-математичної моделі характеризується такими показниками:

- точність підбору рівняння моделі є середньою (коефіцієнт детермінації $R^2 = 0.6732^2$), тобто тільки 45,29 % випадків зміни обсягів вантажних перевезень (x) призводять до зміни обсягу ВВП ПКС (y). Інші 54,71 % змін ВВП ПКС (y) пояснюються сукупністю факторів, що не розглядаються в моделі, але мають відповідний вплив на економіку країни (ступінь впливу цих факторів може стати метою майбутніх досліджень);
- стандартна помилка (S), що показує можливе максимальне відхилення розрахункового (змодельованого) значення обсягу ВВП ПКС (y) від

середнього значення часового ряду за десять попередніх років, складає 12,99 млрд дол.;

- критерій Фішера (F), що характеризує якість моделі, складає 6,623. Табличне значення критерію Фішера ($F_{\text{табл}}$) складає 5,32.

Оскільки рахункове значення $F > F_{\text{табл}}$ ($6,623 > 5,32$), то це свідчить, що рівняння регресії є статистично значущим;

- ступінь значущості коефіцієнта регресії (b), за критерієм Стюдента, свідчить, що сукупний обсяг вантажних перевезень залізничним і автомобільним транспортом не має суттєвого впливу на величину ВВП ПКС країни, оскільки $t_{\text{розн}} < t_{\text{крит}}$. Величина $t_{\text{крит}} = 2.752$ за таблицею критичних точок розподілу Стюдента, проте розрахункова величина ступеня значущості коефіцієнта кореляції ($t_{\text{розн}}$) досягає лише величини 2,573;

- середня помилка апроксимації ($\bar{A}$), тобто середнє відхилення розрахункових значень кореляційно-регресійної моделі від фактичних даних десятих спостережень складає 2,59 %. Це свідчить про можливість використання моделі для кореляційно-регресійного аналізу.

Основні показники якості економіко-математичної моделі (5.7) наведено в таблиці 5.7

Таблиця 5.7 - Основні показники якості економіко-математичної моделі

Показник	Значення
Коефіцієнт детермінації (R^2)	0,4529
Середня помилка апроксимації ($\bar{A}$)	2,59%
Стандартна помилка (S)	12,99
Критерій Фішера (F)	6,623

Отже, встановлено, що обсяг вантажних перевезень вітчизняним колісним транспортом (залізничним та автомобільним) хоч і не має

вирішального впливу на формування ВВП ПКС України, проте вплив цього фактора має місце і його можна та доцільно враховувати. Особливого значення це набуває в умовах воєнного стану та блокування українських морських портів.

Спираючись на результати проведених досліджень, можна очікувати, що модернізація вантажних локомотивів (оснащення їх системою контролю технічного стану) дозволить продовжити тривалість їхнього «життєвого циклу» як мінімум на п'ять років. Практичні впровадження і випробування цієї системи дають підставу стверджувати про відносно невелику трудомісткість її встановлення на локомотиві. Відповідні розрахунки показали, що в короткий строк можна модернізувати п'ятдесят локомотивів вантажного парку. Це забезпечить збільшення обсягів вантажних перевезень, що у свою чергу створить умови для отримання додаткового ВВП в масштабі країни.

З метою проведення цього дослідження визначено середньорічний обсяг перевезення вантажів одним локомотивом експлуатаційного парку та можливий приріст обсягів вантажних перевезень п'ятдесятьма модернізованими локомотивами за строк збільшення їхнього «життєвого циклу» на п'ять років і на цій підставі оцінено величину ВВП, яку можна додатково отримати.

Середньорічний обсяг перевезення вантажів одним локомотивом експлуатаційного парку визначено на основі даних робіт [15, 23], що наведено в таблиці 5.8 (без урахування відповідних показників роботи залізниці в тимчасово окупованій АР Крим і непідконтрольних районах Донецької та Луганської областей).

Розрахунки показують, що середньорічний обсяг перевезення вантажів одним локомотивом експлуатаційного парку складає 527,5 тис. т $\left(\frac{2359000}{4472}\right)$. Оскільки передбачається обладнати системами контролю технічного стану п'ятдесят вантажних локомотивів, що забезпечить подовження їхнього

«життєвого циклу» на п'ять років, то це дозволить збільшити обсяг перевезення вантажів за цей період на 131875 тис. т ($527,5 * 50 * 5$).

Таблиця 5.8 - Показники обсягів вантажних перевезень і робочого парку вантажних локомотивів

Показник	Рік						
	1	2	3	4	5	6	7
Обсяг вантажів, млн т	386	350	343	339	322	313	306
Кількість вантажних локомотивів експлуатаційного парку, од.	641	619	596	589	659	680	688

На підставі отриманих даних і економіко-математичної моделі, що описує вплив обсягів вантажних перевезень на ВВП ПКС, визначено величину додаткового ВВП ПКС України, яку можливо отримати за рівних інших умов протягом п'яти років у результаті модернізації визначеної кількості локомотивів, у розмірі 8893,7 тис. дол. США ($0,06744 * 131875$), тобто 1778,3 тис. дол. щорічно (35,6 тис. дол. у розрахунку на один локомотив за рік).

За експертною оцінкою, сукупні одноразові витрати на розроблення і впровадження систем контролю технічного стану на п'ятдесяти вантажних локомотивах складають 3500 тис. грн.

Слід зауважити, що експлуатація систем контролю технічного стану локомотивів не потребує поточних витрат на їх обслуговування. Виходячи з поточного валютного курсу за 1 дол. США, що передбачено Бюджетом України, загальна сума одноразових витрат складатиме 122,38 тис. дол. Таким чином, величина приросту ВВП ПКС в розрахунку на 1 дол. одноразових витрат за п'ять років експлуатації п'ятдесяти модернізованих локомотивів складе 72,67 дол. ($8893,65 / 122,38$).

5.3 Методичний підхід до оцінки економічної ефективності функціонування залізничної галузі внаслідок збільшення «життєвого циклу» локомотивів

Впровадження системи контролю технічного стану локомотивів дозволяє підвищити ефективність функціонування залізничної галузі в цілому за рахунок збільшення обсягів вантажних перевезень, зменшення позапланових поточних ремонтів локомотивів, економії валютних ресурсів на придбання закордонних аналогів системи контролю.

З метою оцінювання можливого підвищення ефективності залізничних вантажних перевезень визначено:

- величину приросту економічного ефекту від розроблення та серійного впровадження системи контролю технічного стану п'ятдесяти локомотивів вантажного парку протягом розрахункового періоду (п'ять років);
- строк повернення одноразових витрат на розроблення та впровадження цього інноваційного заходу;
- загальну рентабельність впровадження системи контролю технічного стану на п'ятдесяти вантажних локомотивах;
- ступінь валютної вигідності реалізації інноваційної пропозиції, за критерієм Бруно.

Величину приросту економічного ефекту визначено відповідно до загальноприйнятого у світовій практиці методу перевищення вартісної оцінки результатів (доходів) (P_T) від впровадження інноваційного заходу над вартісною оцінкою сукупних витрат на його реалізацію протягом розрахункового періоду (Z_T) з урахуванням можливої зміни вартості грошей за цей період (α_t) [35], а саме

$$E_T = P_T - Z_T = \sum_{t=1}^n E_t \cdot \alpha_t = \sum_{t=1}^n (P_T - Z_T) \cdot \alpha_t, \quad (5.8)$$

де P_T – вартісна оцінка результатів заходу в році t розрахункового періоду;

Z_t – вартісна оцінка сукупних витрат на реалізацію заходу в році t розрахункового періоду;

n – кількість років розрахункового періоду.

Тривалість розрахункового періоду в п'ять років визначено експертним шляхом виходячи з можливого продовження життєвого циклу локомотивів (фізичний знос яких на сьогодні перевищує 90 %), а також строку використання системи контролю їхнього технічного стану, що відповідає сучасним темпам морального старіння інформаційних технологій. Вихідні дані для оцінювання економічної ефективності розроблення та впровадження системи контролю технічного стану вантажних локомотивів наведено в таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 – Вихідні дані для оцінювання економічної ефективності проекту

Показник	Величина показника
1. Кількість локомотивів, обладнаних системою контролю технічного стану, од.	50
2. Обсяг перевезення вантажів одним локомотивом у середньому за рік, тис. т	527,5
3. Доходи АТ «Укрзалізниця» від перевезення вантажів у розрахунку на 1 т, грн*	212,48

Продовження таблиці 5.9

4. Одноразові витрати на реалізацію проекту, у т. ч.:	
4.1. на науково-дослідні та конструкторські роботи, тис. грн;	500
4.2. обладнання системою контролю одного локомотива, тис. грн	60
5. Витрати АТ «Укрзалізниця» на перевезення 1 т вантажу, грн. *	176,17
6. Середня вартість одного поточного ремонту локомотива, тис. грн.	290
7. Середня кількість поточних ремонтів за рік одного локомотива протягом року, рем.	1,3
8. Можливе скорочення поточних ремонтів локомотивів, %	20
9. Ліквідаційне сальдо (залишкова вартість) системи контролю технічного стану локомотивів, тис. грн, – відсутнє	-
10. Річна дисконтна ставка українських банків за депозитними внесками, %	7
11. Річний рівень інфляційних очікувань, % **	5,5
12. Можливий ступінь ризику – низький, % збільшення інфляції ***	1
13. Кількість років розрахункового періоду, р.	5
14. Розрахунковий рік розрахункового періоду	перший
15. Вартість одиниці системи контролю технічного стану локомотивів закордонного виробництва в іноземній валюті (дол. США), тис. дол.	3,1

* Питомі величини доходів і витрат визначено за даними Консолідованої фінансової звітності АТ «Укрзалізниця» і обсягом вантажних перевезень за 2020 р.

** Річний рівень інфляційних очікувань протягом розрахункового періоду визначено на основі експертної оцінки виходячи з показників інфляції попередніх років і бюджету України.

*** Можливий ступень ризику оцінює вірогідність дострокового виходу з ладу систем контролю технічного стану модернізованих локомотивів.

Коефіцієнти, що визначають зміну вартості грошей у часі протягом розрахункового періоду (α_t), тобто приведення грошових потоків різних років реалізації проєкту до розрахункового (першого) року, визначено за формулою

$$\alpha_t = \frac{1}{[(1+E)(1+I+R)]^{t_p-t_k}}, \quad (5.9)$$

де E – річна ставка комерційних банків за депозитними внесками, %;

I – щорічний рівень інфляції в період здійснення проєкту, %;

R – можливий ступінь ризику, %;

t_p – порядковий номер розрахункового року;

t_k – порядковий номер того року, грошові потоки якого приводяться до розрахункового року.

Для кожного з п'яти років реалізації проєкту (розрахункового періоду) коефіцієнти дисконтування (α_t), тобто приведення грошових потоків майбутніх років до теперішньої вартості грошей (першого року здійснення проєкту), складають

$$\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0,88, \alpha_3 = 0,77, \alpha_4 = 0,68, \alpha_5 = 0,59.$$

Дані випробувань дозволяють дійти висновку, що впровадження системи контролю технічного стану локомотивів дозволяє скоротити кількість поточних ремонтів на 20 %. Виходячи з цього кількість поточних ремонтів п'ятдесяти локомотивів, обладнаних відповідною системою, зменшиться щорічно на 13 од. ($1,3 \cdot 50 \cdot 0,2$) (таблиця 5.9).

5.4 Визначення приросту економічного ефекту АТ «Укрзалізниця» при впровадженні ресурсозберігаючих технологій експлуатації вантажних локомотивів

Розрахунок приросту економічного ефекту АТ «Укрзалізниця» від розроблення та впровадження системи контролю технічного стану вантажних локомотивів наведено в таблиці 5.10.

Приріст економічного ефекту з урахуванням зміни вартості грошей у часі (приведення до першого року розрахункового періоду), який отримує АТ «Укрзалізниця» у разі впровадження системи контролю технічного стану п'ятдесяти локомотивів протягом п'яти років, складе 3765,50 млн грн.

Строк повернення одноразових витрат на розроблення та впровадження визначеної системи (строк окупності одноразових витрат) визначається роком, коли величина сукупних результатів (доходів) за відрахуванням поточних витрат зрівняється або перевищить величину одноразових витрат з урахуванням зміни вартості грошей у часі, тобто виконується умова

$$\sum_{t=1}^n K_t \cdot \alpha_t \leq \sum_{t=1}^n (P_t - Z_{t,nom}) \cdot \alpha_t, \quad (5.10)$$

де K_t – одноразові витрати на реалізацію проєкту, грн;

$Z_{t,nom}$ – поточні витрати на реалізацію проєкту, грн.

З розрахунків видно (таблиця 5.10, ряд. 17), що одноразові витрати на розроблення та впровадження визначеної системи в розмірі 3,5 млн грн повернуться в першому році реалізації проєкту.

Таблиця 5

Розрахунок економічного ефекту від розроблення та впровадження системи контролю технічного стану вантажних локомотивів

Показник	Рік розрахункового періоду					
	1	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6	
<i>Результати</i>						
1. Кількість локомотивів, обладнаних системою контролю технічного стану, од.	50	50	50	50	50	50
2. Обсяг перевезення вантажів одним локомотивом у середньому за рік, тис. т	527,5	527,5	527,5	527,5	527,5	527,5
3. Обсяг перевезення вантажів п'ятдесятьма локомотивами за рік, тис. т	26375	26375	26375	26375	26375	26375
4. Доходи АТ «Укрзалізниця» від перевезення вантажів у розрахунку на 1 т, грн	212,48	212,48	212,48	212,48	212,48	212,48
5. Доходи АТ «Укрзалізниця» від перевезення вантажів п'ятдесятьма локомотивами за рік, млн грн	5604,16	5604,16	5604,16	5604,16	5604,16	5604,16
<i>Витрати</i>						
6. Витрати на обладнання системою контролю одного локомотива, тис. грн	60	–	–	–	–	–
7. Одноразові витрати на реалізацію проекту, тис. грн, у т. ч.:	3500	–	–	–	–	–
7.1. на науково-дослідні та конструкторські роботи, тис. грн;	500	–	–	–	–	–
7.2. обладнання системою контролю п'ятдесяти локомотивів, тис. грн	3000	–	–	–	–	–
8. Витрати АТ «Укрзалізниця» на перевезення 1 т вантажу, тис. грн	176,17	176,17	176,17	176,17	176,17	176,17
9. Витрати АТ «Укрзалізниця» на перевезення вантажів п'ятдесятьма локомотивами за рік, млн грн	4646,48	4646,48	4646,48	4646,48	4646,48	4446,48
10. Середня вартість одного поточного ремонту локомотива, тис. грн	290	290	290	290	290	290
11. Скорочення поточних ремонтів п'ятдесятьма локомотивами в середньому за рік, од.	13	13	13	13	13	13
12. Зменшення витрат АТ «Укрзалізниця» на поточний ремонт п'ятдесяти локомотивів, млн грн	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
13. Разом витрати АТ «Укрзалізниця» (п. 7 + п. 9 - п. 12), млн грн	4646,18	4642,68	4642,68	4642,68	4642,68	4642,68
14. Приріст економічного ефекту (п. 5 - п. 13), млн грн	957,98	961,48	961,48	961,48	961,48	961,48
15. Коефіцієнт приведення до розрахункового року	1	0,88	0,77	0,68	0,59	0,59
16. Приріст економічного ефекту з урахування коефіцієнта приведення до розрахункового року, млн грн	957,98	846,10	740,36	653,81	567,27	567,27
17. Приріст економічного ефекту зростаючим підсумком, млн грн	957,98	1804,08	2544,42	3198,23	3765,50	3765,50

Визначено величину загальної рентабельності впровадження системи контролю технічного стану п'ятдесяти вантажних локомотивів ($P_{\text{рент.заг.}}$) за формулою

$$P_{\text{рент.заг.}} = \sum_{t=1}^n P_t \cdot \alpha_t / \sum_{t=1}^n 3_t \cdot \alpha_t. \quad (5.11)$$

Отже,

$$P_{\text{рент.заг.}} = \frac{5604,16 \cdot (1 + 0,88 + 0,77 + 0,68 + 0,59)}{4646,18 + 4642,68 \cdot (0,88 + 0,77 + 0,68 + 0,59)} = 1,21.$$

Розрахунок загальної рентабельності проєкту показує, що за розрахунковий період на 1 грн витрат в середньому припадає 1,21 грн доходу.

Визначено рівень валютної вигідності впровадження системи технічного стану локомотивів вітчизняного розроблення порівняно з іноземним аналогом, за критерієм Бруно ($K_{\text{бп}}$), за формулою

$$K_{\text{бп}} = \left(\sum_{t=1}^n N \cdot \Pi_B \cdot q_t / \sum_{t=1}^n 3_{t,\text{одп}} \right) \cdot \alpha_t, \quad (5.12)$$

де N – кількість систем контролю технічного стану локомотивів закордонного виробництва в році t розрахункового періоду, од.;

Π_B – вартість одиниці системи контролю технічного стану локомотивів закордонного виробництва в іноземній валюті в році t розрахункового періоду, дол. США;

q_t – співвідношення величин національної та іноземної валют (перевідний коефіцієнт) у році t розрахункового періоду;

$Z_{t,odr}$ – одноразові витрати систем контролю технічного стану локомотивів вітчизняного виробництва в році t розрахункового періоду, грн.

Вважається, що закупівля та впровадження систем контролю технічного стану локомотивів здійснюватиметься в першому році розрахункового періоду $\alpha_1 = 1$.

Виходячи з цього рівень валютної вигідності впровадження системи контролю технічного стану локомотивів вітчизняного розроблення, за критерієм Бруно, складає

$$K_{br} = \frac{3,1 \cdot 50 \cdot 28,6}{3500} \cdot 1 = 1,27.$$

Це дасть можливість отримати економію валюти в розмірі понад 32,6 тис. дол. США.

Оскільки показники загальної рентабельності проєкту (1,21) і його валютної вигідності, за критерієм Бруно (1,27), більше одиниці, то це свідчить про економічну доцільність впровадження системи контролю технічного стану локомотивів.

5.5 Висновки по розділу 5

Досліджено закономірності розвитку транспортної системи, і зокрема залізничного вантажного транспорту, під дією загальних законів діалектики. Визначено, що залізницю очікує неминуче якісне оновлення, але це потребує значних інвестиційних витрат протягом тривалого часу. Проте існуючий стан залізниці та подальше утримання її конкуренто-спроможності навіть у теперішньому обсязі транспортних послуг вимагає негайного вирішення

техніко-технологічних та організаційних задач щодо модернізації рухомого складу, удосконалення інфраструктури залізниці та системи управління нею.

Проведено кореляційно-регресійний аналіз впливу наявності магістральних локомотивів та вантажних вагонів на обсяг перевезення вантажів. Він дав змогу обґрунтувати висновок, що в теперішніх умовах саме локомотиви відіграють вирішальну роль у задоволенні потреб у масових вантажних перевезеннях. Встановлено, що в перерахунку на річний обсяг вантажних перевезень, рівень впливу парку магістральних локомотивів на забезпечення безперебійного перевезення майже в два рази вищий за вплив експлуатаційного парку вагонів на цей процес.

Аналіз показників роботи залізниці свідчить, що очікування формування (розформування) та відправлення вантажного поїзду в 2019 р. складало близько 33 % тривалості обігу вагона і, насамперед, через нестачу локомотивів, а простоювало з різних причин одночасно близько 70 % експлуатаційного парку вагонів. Зроблено висновок, що на сьогодні пріоритетним завданням при формуванні технічної політики залізничної галузі на середньостроковий період є впровадження інноваційних заходів, що дають змогу продовжити експлуатаційні можливості діючого локомотивного парку.

Досліджено та обґрунтовано доцільність використання методів кореляційно-регресійного аналізу для побудови економіко-математичної моделі, що адекватно визначає вплив збільшення обсягів вантажних перевезень на величину ВВП ПКС за рахунок продовження «життєвого циклу» вантажних локомотивів (макроекономічний аспект). Визначено залежність величини ВВП ПКС України від обсягів вантажних перевезень вітчизняним колісним транспортом. Було обрано парну лінійну регресію та оцінено її параметри методом найменших квадратів. Статистична значущість рівняння перевірена за допомогою коефіцієнта детермінації та критерію Фішера. Встановлено, що в досліджуваній ситуації понад 45 % загальної

варіабельності величини ВВП ПКС України пояснюється зміною загальних обсягів вантажних перевезень залізничним і автомобільним транспортом. Економічна інтерпретація параметрів моделі дозволяє визначити, що збільшення обсягів вантажних перевезень на 1 од. вантажу призводить до збільшення величини ВВП ПКС України в середньому на 0,0674 од. в доларах США. Використання моделі дало можливість отримати прогнозну оцінку зростання ВВП ПКС України за рахунок збільшення обсягів вантажних перевезень п'ятдесятьма локомотивами за умови подовження їхнього строку експлуатації на п'ять років в обсязі 8893,7 тис. дол. США, тобто 1778,3 тис. дол. щорічно.

Дослідження економічної привабливості для залізничної галузі розроблення та впровадження вітчизняної системи контролю технічного стану локомотивів (галузево-економічний аспект) дозволило зробити обґрунтований висновок щодо можливості отримання значного підвищення ефективності роботи залізниці. Це підтверджується такими прогнозними показниками: сукупний економічний ефект у результаті збільшення обсягів вантажних перевезень п'ятдесятьма локомотивами, обладнаних вітчизняними системами контролю їх технічного стану, за п'ять років очікується в розмірі 3765,50 млн. грн.; загальна рентабельність цього інноваційного заходу складає 1,21 (доходи в 1,21 раза перевищують суму витрат); розроблення та впровадження вітчизняних систем на п'ятдесяти локомотивах порівняно з закупками аналогів іноземного виробництва дасть економію понад 32,6 тис. дол. США.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну проблему формування ресурсозберігаючих технологій експлуатації локомотивів шляхом впровадження інноваційних методів і технічних засобів моніторингу та контролю у реальному часі технічного стану їх тягового обладнання.

На основі проведених досліджень сформульовано основні висновки:

1. Проведений аналіз існуючих досліджень умов експлуатації ТРС показав, що середній знос локомотивів в Україні сьогодні становить 96,8%, у тому числі електровозів – 93,3%, магістральних тепловозів – 99,6%, а маневрових тепловозів – 99,9%. Середній вік електровозів складає 40,6 років за нормативного віку в 30 років, магістральних тепловозів – 30,7 років за нормативних 20 років, маневрових тепловозів – 35,8 років за нормативних 25 років. Проаналізовано основні фактори, які безпосередньо впливають на тривалість «життєвого циклу» локомотивів. Визначено, що модернізація локомотивів значно знижує експлуатаційні витрати і підвищує ефективність ТРС та дозволяє продовжити «життєвий цикл» ще на 10-15 років. Досліджений міжнародний досвід подовження життєвого циклу локомотивів свідчить про ефективність цього підходу за умови адаптації до конкретних умов експлуатації.

Проте незважаючи на наявність багатьох досліджень проблему продовження життєвого циклу локомотивів досі не вирішено. Тому формування ресурсозберігаючих методів, технологій та технічних засобів експлуатації локомотивів, які значною мірою впливають на їхній життєвий цикл залишається актуальною науково-прикладною проблемою.

2. Розроблено математичну модель електричних перехідних процесів у частотно - керованому АД, яка дозволяє виявляти вплив технічного стану обмоток статора АД на спектральний склад струму ПЧ–АД та визначати сукупність його параметрів, що підлягають числовому оцінюванню, і

автоматично враховувати поточну конфігурацію комутуючих перемикачів. Результати моделювання в MathCAD показали наявність змін у спектральному складі струмів статора в аварійному режимі роботи, що у подальшому дозволить накопичувати бази даних їх технічного стану залежно від виду пошкоджень;

3. Розроблено імітаційну модель АД, що дозволило провести аналіз пускових та несиметричних режимів роботи асинхронного ТЕД АД914У і з використанням пакетів моделювання ANSYS та MATLAB сформувати зразкові бази даних для подальшого моніторингу його технічного стану в процесі експлуатації з урахуванням того, що термін служби повністю навантаженого АД, який працює при несиметрії напруги 4% зменшується в 2 рази, а при несиметрії 5% потужність двигуна зменшується на 5 - 10%. При несиметричному режимі живлення ТЕД було встановлено, що відхилення напруги однієї фази на 2% викликає значні коливання як електромагнітного моменту, так і частоти обертання, а це в свою чергу призводить до втрат активної потужності, нерівномірного споживання електроенергії та додаткового нагріву обмоток двигуна. Відносна похибка моделювання склала: за моментом двигуна 0,67%, за вхідним струмом 3,7%, за коефіцієнтом потужності 7,95%, за ККД – 0,52%;

4. Проведене імітаційне моделювання процесу векторного керування асинхронним ТЕД, що дозволило дослідити номінальні та аварійні режими роботи тягового електродвигуна АД914У в процесі експлуатації. Результати імітаційного моделювання показали, що аварійні режими навіть при короткочасній тривалості (0,2 с при короткому замиканні та 0,4 с при зникненні напруги живлення) здатні призвести до значних пошкоджень і спричинити зупинку електродвигуна. Обидва випадки призводять до кратних струмових перевантажень, збільшення спотворень фазного струму до 65 %, появи субгармонік з високими амплітудами (у випадку короткого замикання навіть вище основної гармоніки) і значних пульсацій електромагнітного

моменту. Крім того, повернення з аварійного режиму до нормального на номінальні характеристики відбувалось при моменті, який складав 20 % номінального, а коефіцієнт спотворення фазного струму склав 26 %. Це дозволяє визначити граничні межі процесу векторного керування ТЕД;

5. Запропоновано метод моніторингу технічного стану асинхронних ТЕД в умовах дії складної адитивної завади, що дозволяє здійснювати контроль ТЕД в реальному часі під час експлуатації;

6. На базі дослідження електромагнітного оточення локомотива в процесі експлуатації визначено склад комплексу завад, які створюють електричний фон для спостереження тестового струму в обмотці трифазного ТЕД, що дозволило шляхом аналізу спектрального складу цих завад встановити діапазон частот, у якому їхня спектральна щільність найменша, саме для тягового двигуна АД-914У вона складає обмежені діапазони частот $0 \dots 2$ кГц і $19,64 \dots 20,36$ кГц, що дає змогу встановити діапазон частот де вплив завад буде найменшим, а саме від 2 до 19 кГц вільний від усіх завад, окрім імпульсної. У ньому доцільно розмістити (локалізувати) тестовий сигнал (можна і вище $20,36$ кГц, але зі зростанням частоти збільшується й опір індуктивно-ємнісного кола фази, і для отримання прийнятної величини сигналу знадобиться й більша потужність генератора цього сигналу);

7. З урахуванням можливих варіантів часових залежностей залишкових завад розроблено математичну процедуру оцінювання параметрів тестового сигналу, що дозволило шляхом комп'ютерного моделювання визначити точнісні характеристики цієї процедури в широкому діапазоні інтенсивності завади і ступеня перекриття сигналу і завади за часом. Обчислено середньоквадратичні похибки σ_I оцінки амплітуди сигналу та σ_φ оцінки початкової фази сигналу, які для струму $I_p = 0,01$ А складають відповідно $5,6 \cdot 10^{-5}$ та $0,067$ при тривалості τ_p імпульсу завади $\tau_p = 0,125(T_2 - T_1)$;

8. Проведено синтез пристрою оцінювання параметрів зондувального синусоїдного сигналу адитивно змішаного з одиночною імпульсною завадою

для виявлення пошкоджень обмоток асинхронного ТЕД у реальному часі, що забезпечує отримання більш наближених до реальності оцінок параметрів тестового сигналу та пов'язаних з ними величин електричних параметрів обмотки, а відтак – підвищує точність діагностування технічного стану двигуна;

9. Для статистичної моделі адитивної суміші сигналу та завад, яка описана функцією щільності розподілу ймовірності миттєвого значення, визначено вирази для границь Крамера - Рао оцінок амплітуди та початкової фази синусоїди при її спостереженні на фоні суміші імпульсної та неперервної шумових завад, що дає змогу обчислити величини мінімального середньоквадратичного відхилення (МСВ) результатів досліджень. Залежності МСВ оцінки амплітуди від ΔF при $I_{n0,5}=10^{-3}$ А; $I_p=1$ А; $T_2-T_1=0,01$ с; $\tau_p=0,5(T_2-T_1)$ знаходиться в межах « $2,5 \times 10^{-4}$ - $4,875 \times 10^{-5}$ ». Отже, отримані найвищі граничні точності оцінок є абсолютними, оскільки вони розраховані за всіх відомих параметрів функції щільності розподілу ймовірності спостереженої реалізації вхідного коливання;

10. Проведено синтез пристрою оптимального приймання зондувального сигналу обмоток тягових двигунів на тлі адитивної п'ятикомпонентної завади для здійснення моніторингу технічного стану ТЕД під час експлуатації. Чотири компоненти завади є структурно-детермінованими, а п'ята являє собою широкосмуговий гаусівський шум, що дозволило розпізнати ситуацію наявності тестового зонduючого сигналу у вхідній суміші цього сигналу і типових завад. Залежність середньої ймовірності похибки розрізнення P_{EM} від амплітуди U_{mS} зондувального сигналу за різних величин середньоквадратичної напруги шуму σ_{Π} знаходиться в межах « $2,04 \cdot 10^{-4}$ - $0,486$ ». Результати розрахунку величини P_{EM} дають змогу зробити висновок, що розроблений пристрій надійно розпізнає ситуацію наявності тестового зонduючого сигналу у вхідній суміші цього сигналу і типових завад;

11. Розроблено математичну модель процесу розповсюдження зондувальних сигналів, яка дає змогу провести аналітичний та числовий опис їх параметрів в будь-якій вітці схеми заміщення тягового двигуна постійного струму. Отримані в ході розрахунків рівняння залишаються справедливими для будь-якої форми тестової напруги. Це дає змогу знайти аналітичний опис напруги на будь-якому елементі як самого двигуна, так і кола його живлення;

12. Розроблено метод моніторингу ТЕД постійного струму, який базується на введенні в кола живлення двигунів зондуючого гармонічного сигналу і спостереження викликаного ним струму, що дозволило вчасно виявляти їх можливі ушкодження в процесі експлуатації та вживати заходів щодо їх усунення;

13. Виконано синтез нейрорегулятора швидкості на основі авторегресії з середнім NARMA-L2, реалізованого в бібліотеці Deep Learning Toolbox середовища Matlab в системі керування асинхронним ТЕД АД914У. Для навчання нейронної мережі було обрано 40000 тренувальних точок, які знімалися через інтервал у 0,01с, 1000 циклів навчання та обрано алгоритм Левенберга-Марквардта. В результаті навчання нейромережі похибка регулювання частоти обертання склала 10 об/хв, для чого було здійснено 70 навчальних циклів. У результаті імітаційного моделювання встановлено, що система з нейрорегулятором показує кращі показники регулювання частоти обертання та електромагнітного моменту в перехідних процесах, однак при стрибкоподібному накиданні навантаження має місце значна пульсація напруги U_{sq} ;

14. Удосконалено систему моніторингу електрообладнання локомотивів, що дозволило підвищити її завадостійкість і точність контролю технічного стану ТЕД в реальному часі та енергоефективність експлуатації в умовах локомотивного депо, а також здійснити перехід до обслуговування та ремонту двигунів за фактичним станом;

15. Проведено розрахунок техніко-економічної ефективності впровадження результатів дисертаційної роботи, а саме:

- інноваційних заходів, що дозволяють подовжити експлуатаційні можливості діючого локомотивного парку, а саме рекомендації з удосконалення систем моніторингу технічного стану тягових двигунів локомотивів;
- методів та засобів контролю технічного стану тягових двигунів локомотивів у реальному часі;
- визначення залежності обсягів вантажних залізничних перевезень від кількості магістральних локомотивів та вантажних вагонів експлуатаційного парку, що дозволяє адекватно оцінити вплив збільшення обсягів вантажних перевезень на величину ВВП ПКС за рахунок подовження «життєвого циклу» вантажних локомотивів.

Обґрунтовано економічну доцільність впровадження ресурсозберігаючих методів, технологій та технічних засобів експлуатації локомотивів, а саме завадостійкої системи моніторингу тягових двигунів локомотивів, виходячи з можливості її використання у локомотивних депо регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця», що має суттєве значення для підвищення ефективності роботи загальнодержавної транспортно-логістичної системи.

На підставі отриманих даних визначено очікувану величину додаткового ВВП ПКС України, яку можливо отримати від впровадження протягом п'яти років запропонованих у роботі завадостійких методів моніторингу тягових двигунів на п'ятдесяти локомотивах АТ «Укрзалізниця» у результаті їхньої модернізації, в розмірі 8893,7 тис. дол. США, тобто 1778,3 тис. дол. щорічно (35,6 тис. дол. в розрахунку на один локомотив за рік).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Акімов О. І., Заїка Л. В., Панченко В. В., Панютін О. М. Розподілення тягових підстанцій по дистанціях електропостачання при впровадженні швидкісного руху. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2018. Вип. 181. С.43–50. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.181.2018.156417>
2. Ананьєва О. М., Бабаєв М. М., Блиндюк В. С., Давиденко М. Г. Математична модель суміші сигналу та багатокомпонентної завади на вході колійних пристроїв тональних рейкових кіл. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2020. № 2. С. 3–7. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v25i2.206825>.
3. Ананьєва О. М., Бабаєв М. М., Давиденко М. Г., Панченко В. В. Моделювання електричних перехідних процесів у частотно-керованому асинхронному двигуні. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2022. № 2. С. 23–33. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v27i2.259696>.
4. Ананьєва О. М., Бабаєв М. М., Давиденко М. Г., Панченко В. В. Оптимальне приймання інформаційних сигналів в умовах дії п'ятикомпонентної завади. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2021. № 1. С. 24–29. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v26i1.229062>.
5. Ананьєва О. М., Бабаєв М. М., Давиденко М. Г., Панченко В. В. Оцінювання параметрів неперервного зондуючого сигналу при тестуванні обмотки статора трифазного асинхронного двигуна. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 2. С. 52–60. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v29i2.307682>.
6. Ананьєва О. М., Бабаєв М. М., Давиденко М. Г., Панченко В. В. Синтез пристрою оцінювання параметрів синусоїдного сигналу, адитивно змішаного з одиночною імпульсною завадою. *Інформаційно-керуючі*

системи на залізничному транспорті. 2024. № 3. С. 25–32.
<https://doi.org/10.18664/ikszt.v29i3.313625>.

7. Ананьєва О. М., Бабаєв М. М., Давиденко М. Г., Панченко В. В. Частотна локалізація та оцінювання параметрів сигналу тестування обмотки статора трифазного асинхронного двигуна. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 4. С. 28–37.
<https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i4.296413>.

8. Бабаєв М. М., Блиндюк В. С., Давиденко М. Г. Оцінювання ступеня іскріння на колекторі тягових двигунів локомотивів. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2005. Вип. 68. С. 266–276.

9. Бабаєв М. М., Панченко В. В., Туренко О. Г. Дослідження роботи тягового електродвигуна 1AL4668DT у програмному комплексі Ansys. *Інформатика, управління та штучний інтелект* : тези дев'ятої міжнародної науково-технічної конференції. Харків : НТУ "ХП", 2022. С.12.

10. Балака Є. І., Панченко В. В., Резуненко М. Є. Подовження «життєвого циклу» локомотивів шляхом їх модернізації як фактор впливу на економічний розвиток. *Міжнародні економічні відносини. Сталий розвиток України в умовах глобалізації та Європейської економічної інтеграції* : проблеми, перспективи, ефективність. *ФЕНІКС-2022* : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, 31 травня 2022 р. Харків : НТУ «ХП», 2022. С. 67–70.

11. Балака Є. І., Панченко В. В., Резуненко М. Є. Пріоритетний напрямок технічної політики Укрзалізниці в теперішній період. *Технологія-2022* : XXV матеріали міжнар. наук.-техн. конф., 27 травня 2022 р., м. Сєвєродонецьк / укл. : Тарасов В. Ю., Зубцов Є. І. Сєвєродонецьк : Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля, 2022. С. 118–119.

12. Балака Є. І., Резуненко М. Є., Резуненко С. О., Попов М. А. Прогнозування обсягів пасажирських перевезень в дальньому залізничному

сполученні на основі багатофакторного аналізу. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2019. Вип. 185. С. 6–14. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.185.2019.180481>

13. Богомазова Г.Є. Формування технології оптимального управління парком вантажних вагонів різної форми власності. *Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті* : зб. матеріалів 79-ї Міжнар. наук.-техн. конф. 25 – 27 квіт. 2017 р. Харків : УкрДУЗТ, 2017. Вип. 169. С. 195–197.

14. Відмовостійкий колійний індуктивний датчик : пат. 127127 Україна : МПК B61L1/08, B61L25/00, G08G7/00; № а201906666 ; заявл. 20.06.2019 ; опубл. 10.05.2023, Бюл. № 23.

15. Довідник основних показників роботи регіональних філій АТ «Українська залізниця» (2004–2019 роки). Київ, 2020. 39 с.

16. Запара В. М., Капустянська Н. Г., Конарьов В. В., Неглядова Н. В. Вплив воєнного стану на основні показники вантажної роботи залізниці України. *Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика* : матеріали 18-ї наук.-практ. міжн. конф., 2–3 черв. 2022 р. Харків : УкрДУЗТ, 2022. С. 58–60.

17. Зоріна О. І., Колеснікова Н. М., Погасій С. О. Тенденції розвитку залізничних перевезень у провідних країнах світу. *Залізничний транспорт України*. 2000. № 1. С. 22–23.

18. Кіндзерський Ю. Повоєнне відновлення промисловості України: виклики та особливості політики. *Економічний аналіз*. 2022. № 32(2). С. 101 – 117. <https://doi.org/10.35774/econa2022.02.101>

19. Кірдіна О. Г., Андрощук М. М., Черняк Ю. М. Управління процесами оновлення основних засобів підприємств залізничного транспорту. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2023. № 84. С. 28 – 37. <https://doi.org/10.18664/btie.84.301256>.

20. Крашенінін О. С. Вибір та оцінка параметрів системи утримання локомотивів. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2014. № 150. С. 121–124.
21. Кудря Є. А., Спінул Л. Ю. Теоретичні основи електротехніки : конспект лекцій / за ред. А. А. Щерби. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 150 с. URL: https://toe.fea.kpi.ua/download/lecture_notes/.
22. Луценко І. М., Рухлова Ю. Н., Кириченко М. С., Панченко В. В., Циган П. С. Підвищення енергоефективності режимів розподільчих мереж із фотоелектричними станціями. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. Дніпро : НТУ «ДП», 2023. №1 (193). С. 99–106. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-1/099>.
23. Панченко С. В., Балака Є. І., Панченко В. В., Резуненко М. Є. Еволюція транспорту та сучасна проблема української залізниці. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2022. Вип. 199. С. 89–98. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.199.2022.258816>
24. Панченко В. В., Туренко О. Г. Дослідження прямого пуску тягового асинхронного електродвигуна за допомогою імітаційної моделі. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2021. № 3. С. 3–6. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v26i3.240446>
25. Панченко В. В., Туренко О. Г. Дослідження роботи тягового асинхронного двигуна при несиметрії живильної напруги та аварійних режимах роботи. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2021. Вип. 198. С. 145–150. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256648>
26. Панченко В. В., Туренко О. Г. Застосування штучних нейронних мереж в системі керування тяговим електроприводом. *Стан та перспективи розвитку електричного транспорту* : матеріали

Всеукраїнської науково-практичної конференції, 23-25 листопада 2022 р. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. С. 158–160.

27. Панченко В. В., Туренко О. Г. Порівняльний аналіз типів регуляторів для керування електродвигунами змінного струму. *Матеріали шістнадцятої міжнародної науково-практичної конференції «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» ІТРК-2023, 23-24 травня*. Київ : НАУ, 2023. С.221–222.

28. Панченко В. В., Туренко О. Г. Синтез нейрорегулятора NARMA-L2 для системи тягового асинхронного електропривода. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2024. Вип. 208. С. 180–187. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.208.2024.308623>

29. Панченко В. В., Харін Р. О Модернізація систем електропостачання залізниць шляхом застосування альтернативних джерел енергії. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2019. № 4 (додаток). С. 36–37.

30. Панченко В. В., Харін Р. О. Дослідження впливу деградації сонячних панелей на ефективність роботи сонячної електростанції. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 3. С. 73–82. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i3.290140>.

31. Панченко В. В., Харін Р. О. Дослідження втрат енергії в сонячній електростанції на тяговій підстанції. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2021. Вип. 196. С. 149–160. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.242262>.

32. Панченко В. В., Харін Р. О. Моделювання та техніко-економічний розрахунок роботи сонячної електростанції на тяговій підстанції. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 2. С. 3–13. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i2.283295>.

33. Панченко С. В., Ананьєва О. М., Бабаєв М. М., Блиндюк В. С., Давиденко М. Г., Карпенко Н. П. Теорія електричних і магнітних кіл : підручник. Харків : УкрДУЗТ, 2020. 246 с.

34. Панченко С. В., Балака Є. І., Панченко В. В., Резуненко М. Є. Вплив подовження «життєвого циклу» локомотивів на ВВП країни та економіку залізничної галузі. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2022. Вип. 200. С. 36–48. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.200.2022.262696>

35. Панченко С. В., Балака Є. І., Панченко В. В., Резуненко М. Є. Ефективність автоматизації оперативного контролю технічного стану локомотивів. *Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика* : матеріали 18-ї науково-практичної міжнародної конференції (2-3 червня 2022 р.). Харків : УкрДУЗТ, 2022. С. 94–96.

36. Панченко С. В., Ватуля Г. Л., Балака Є. І., Лючков Д. С. Концептуальні підходи до диверсифікації діяльності ПАТ «Укрзалізниця». *Українська залізниця*. 2018. № 9 (63). С. 15–19.

37. Панченко С. В., Панченко В. В., Туренко О. Г. Аналіз роботи системи тягового асинхронного електропривода електрорухомого складу з різними типами регуляторів швидкості. *Матеріали П'ятнадцятої міжнародної науково-практичної конференції студентів і молодих вчених імені Георгія Кірти «Сучасні транспортні технології»* : збірник наукових праць / під загальною редакцією І. Кравця, О. Возняка ; НУЛП. Львів. 2023. С.74–76.

38. Панченко С. В., Панченко В. В., Туренко О. Г. Дослідження аварійних режимів роботи тягового асинхронного електропривода. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2023. Вип. 203. С. 56–63. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.203.2023.277955>

39. Пристрій для компенсації пульсацій вихідної напруги перетворювача електричної енергії : пат. 114146 Україна : МПК H02M1/14 № a201512696; заявл. 23.12.2015 ; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12.

40. Рудковський О. В., Калабухін Ю. Є. Обґрунтування вибору варіанта оновлення локомотивів з урахуванням життєвого циклу. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2016. Вип. 166. С.173–180. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.166.2016.92942>.

41. Спосіб ідентифікації поїзда під час руху : пат. 133387 Україна : МПК B61L1/00, B61L25/02. № u201808240 ; заявл. 26.07.2018 ; опубл. 10.04.2019, Бюл. № 7.

42. Супрун О. Д., Семененко О. І., Панченко В. В., Семененко Ю. О. Дослідження електромагнітних перехідних процесів у частотно-керованому електроприводі перемикальних пристроїв трансформаторів тягових підстанцій. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2017. № 6. С. 25–36. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v0i6.119929>

43. Супрун О. Д., Семененко Ю. О. Дослідження аварійних режимів роботи агрегатів безперебійного живлення блочно-модульних тягових підстанцій. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2016. №165. С. 77–83. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.165.2016.87737>

44. Токмакова І. В. Шляхи вдосконалення ремонтів рухомого складу на залізничному транспорті. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2009. № 27. С. 68–69. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vetp_2009_27_92 (дата звернення: 12.09.2023).

45. Україна в цифрах 2014-2019 рр. Державна служба статистики України. URL: https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/Arhiv_u/01/Arch_ukr_zb.htm

46. Устенко О. В., Пасько О.В. Багатокритеріальний аналіз шляхів модернізації локомотивного парку. *Людина, суспільство, комунікативні*

технології : матеріали IX міжнар. наук.-практ. конф., 21–22 жовт. 2021 р. Харків : ДІСА ПЛЮС, 2021. - С. 328 – 330.

47. Яцько С. І. Ващенко Я. В. Система моніторингу стану асинхронного тягового електроприводу рухомого складу. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2015. Вип. 153. С. 79–84. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.153.2015.64135>.

48. Яцько С. І., Карпенко Н. П., Панченко В. В., Ващенко Я. В. Розвиток обладнання розподільних пристроїв тягового електропостачання. Частина I. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2017. Вип. 172. С. 37–48.

49. Acampora G., Landi C., Luiso M., Pasquino N. Optimization of energy consumption in a railway traction system. *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*. SPEEDAM, 2006. P. 1121–1126. <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2006.1649936>.

50. Adamkiewicz A., Fydrych J., Drzewieniecki J. Studies on the Effects of Cold Starts of the Ship Main Engine. *Polish Maritime Research*. 2022. Vol. 29. P. 109–118. <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0031>.

51. Afshar M., Abdi S., Mortazavizadeh S., Fajri P., Ebrahimi M. A New Stator Winding Inter-Turn Short Circuit Fault Detection Method For Brushless Doubly Fed Induction Machine. *IEEE : 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2020. P. 223–228. <https://doi.org/10.1109/ISIE45063.2020.9152557>.

52. Agarwal A., Dhar A., Gautam A., Pandey A. Introduction to the Locomotives and Rail Road Transportation. *Locomotives and Rail Road Transportation*. 2017. P. 3–7. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3788-7_1.

53. Agarwal A., Sharma N., Singh A. Potential of DME and Methanol for Locomotive Traction in India : Opportunities, Technology Options and Challenges. *Locomotives and Rail Road Transportation*. 2017. P. 129–151. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3788-7_7.

54. Ahuja N., Martin J., Yukish M., Stump G., Bennett L., Schlake B., Anstrom J., Rahn C. Route Based Fuel Savings of Freight Train Hybridization. *25th International Conference on Advanced Vehicle Technologies (AVT)*. 2023. Vol. 1. <https://doi.org/10.1115/detc2023-114683>.

55. Akimov A. I., Akimova J. A., Panchenko V. V., Odiehov M. M. The composite functional statistical criterion for evaluating the effectiveness of the automatic control process and system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1021. P. 1–6 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012001>.

56. Al-Hamed K., Dincer I. A novel ammonia solid oxide fuel cell-based powering system with on-board hydrogen production for clean locomotives. *Energy*. 2021. Vol. 220. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.119771>.

57. Al-Hamed K., Dincer I. Comparative evaluation of fuel cell based powering systems for cleaner locomotives. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2021. Vol. 23. <https://doi.org/10.1016/J.TSEP.2021.100912>.

58. Alla G., Soliman H., Badr O., Rabbo M., Richardson J. Effect of injection timing on the performance of a dual fuel engine. *Energy Conversion and Management*. 2002. Vol. 43, Issue 2. P. 269–277. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00168-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00168-0).

59. Allaoua B., Asnoune K., Mebarki B. Energy management of PEM fuel cell/ supercapacitor hybrid power sources for an electric vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42, Issue 33. P. 21158–21166. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2017.06.209>.

60. Ananieva O. M., Babaiev M. M., Panchenko V. V., Davydenko M. H. Justification of the selection of the frequency range for the location of the test signal of the stator windings of a three-phase asynchronous electric motor. *Інформатика, управління та штучний інтелект: тези одинадцятої міжнародної науково-технічної конференції*. Харків : НТУ "ХПІ", 2024. С.4.

61. Ananieva O., Babaiev M., Blyndiuk V., Davidenko M. Development of a device for the optimal reception of signals against the background of an additive three-component interference. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2, No. 9 (98). P. 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.159310>.
62. Anderson R., Elkins J., Brickle B. Rail Vehicle Dynamics for the 21st Century. *Mechanics for a New Mellennium* : Springer, Dordrecht, 2001. P. 113–126 https://doi.org/10.1007/0-306-46956-1_8
63. Andrzejewski M., Daszkiewicz P., Rymaniak Ł., Merkisz J., Kamińska M. Impact of modernization of locomotives operated in Poland on the emission of toxic compounds in exhaust gases. *AUTOBUSY – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*. 2018. Vol. 19, No 12. P. 54–57. <https://doi.org/10.24136/atest.2018.353>.
64. Arendas A., Majumdar P., Schroeder D., Kilaparti S. Experimental Investigation of the Thermal Characteristics of Li-Ion Battery for Use in Hybrid Locomotives. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. 2014. Vol. 6, Issue 4. <https://doi.org/10.1115/1.4026987>.
65. Aulin D., Zinkivskyi A., Anatskyi O., Kovalenko D. Measures for Resource Saving for Diesel Locomotives. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7, No. 4.3. P. 152–154. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19726>
66. Bai Y., Ho T. K., Mao B., Ding Y., Chen S., Energy-Efficient Locomotive Operation for Chinese Mainline Railways by Fuzzy Predictive Control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014. Vol. 15. Issue 3. P. 938–948 <https://doi.org/10.1109/TITS.2013.2292712> .
67. Balaka Ye., Rezunenکو M., Vdovychenko V. Comparative forecast of passenger transportation in long haul railway and long-distance bus service. *Automobile transport*. 2021. № 48. P. 54–63. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2021.48.0.54>.

68. Ban D., Cettolo M., Miletić B. Electrical motor insulation conditions dc testing. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 1998. Vol. 5., Issue 6. P. 917–921. <https://doi.org/10.1109/94.740776>.
69. Baranovskyi D., Bulakh M., Michajłyszyn A., Myamlin S., Muradian L. Determination of the Risk of Failures of Locomotive Diesel Engines in Maintenance. *Energies*. 2023. Vol. 16. <https://doi.org/10.3390/en16134995>.
70. Barksdale H., Smith Q., Khan M. Condition Monitoring of Electrical Machines with Internet of Things. *SoutheastCon*. 2018. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/SECON.2018.8478989>.
71. Barnes A. Increased Locomotive performance using Condition Based Maintenance. *6th IET Conference on Railway Condition Monitoring (RCM 2014)*. 2014. P. 1–7. <https://doi.org/10.1049/CP.2014.1011>.
72. Benedetti M., Cesarotti V., Introna V., Serranti J. Energy consumption control automation using Artificial Neural Networks and adaptive algorithms: Proposal of a new methodology and case study. *Applied Energy*. 2016. Vol. 165. P. 60–71. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.12.066>.
73. Bodnar B., Ochkasov O., Hryshechkina T., Bodnar E. Choosing the system of locomotive maintenance in view of the effect of dependent failures. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2018. № 6. P. 47–58. <https://doi.org/10.15802/stp2018/154823>.
74. Bonissone P., Varma A., Aggour K. A fuzzy instance-based model for predicting expected life: a locomotive application. *CIMSA. 2005 IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications*. 2005. P. 20–25. <https://doi.org/10.1109/CIMSA.2005.1522819>.
75. Botte M., D’Acierno L., Pagano M. Impact of Railway Energy Efficiency on the Primary Distribution Power Grid. *EEE Transactions on*

Vehicular Technology. 2020. Vol. 69, Issue 12. P. 14131–14140. <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2998153>.

76. Brown L., Miller R. Design and Production in Locomotive Lifecycle Management. *International Journal of Transport Technology*. 2020. Vol. 14. P. 115–128.

77. Buriakovskiy S., Maslii A., Pomazan D., Panchenko V., Overianova L., Omelianenko H. Multi-criteria Quality Evaluation of Energy Storage Devices for Rolling Stock Using Harrington's Desirability Function. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. 2020. P. 158–163. <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160105>.

78. Buriakovskiy S. G., Maslii A. S., Panchenko V. V., Pomazan D. P., Denis I. V. The research of the operation modes of the diesel locomotive CHME3 on the imitation model. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2018. No. 2. P. 59–62. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.2.10>.

79. Buriakovskiy S., Liubarskyi B., Maslii A., Pomazan D., Panchenko V., Maslii A. Mathematical Modelling of Prospective Transport Systems Electromechanical Energy Transducers on Basis of the Generalized Model. *2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. Ceske Budejovice, Czech Republic, 2019. P. 76–79. <https://doi.org/10.1109/ACITT.2019.8779998>.

80. Buriakovskiy S., Maslii A., Pomazan D., Kovalchuk O. Analysis of ways of increasing the energy efficiency of traction electric transmission of shunting diesel locomotive. *Computational Problems of Electrical Engineering*. 2019. Vol. 9, No. 1. P. 1–4. <https://doi.org/10.23939/jcpee2019.01.001>.

81. Butor A., Labisz K. Reduction of Life-cycle Costs of Locomotives by Leaning Maintenance Process. *Problemy Kolejnictwa*. 2020. Issue 188. P. 103–113. <https://doi.org/10.36137/1882e>.

82. Cannon C., Marinov M., Robinson M. Data analysis of current and emerging skills development and training schemes in the rail transport sector.

Journal of Educational Research and Reviews. 2019. Vol. 7, Issue 3. P. 57–75.
https://doi.org/10.33495/JERR_V7I3.19.105.

83. Chen L, Li C. Overall objectives and principles of optimizing adjustments in locomotive affair productivity layout. *ICTE*. 2013. P. 1309–1315
<https://doi.org/10.1061/9780784413159.190>

84. Chen Y., Ardila-Gomez A., Frame G. Achieving energy savings by intelligent transportation systems investments in the context of smart cities. *Transportation Research Part D-transport and Environment*. 2016. Vol. 54. P. 381–396. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2017.06.008>.

85. Chiaradonna S., Masetti G., Giandomenico F., Righetti F., Vallati C. Enhancing sustainability of the railway infrastructure: Trading energy saving and unavailability through efficient switch heating policies. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. 2021. Vol. 30. <https://doi.org/10.1016/J.SUSCOM.2021.100519>.

86. Chitima, S. “Engines and Wagons”: The Challenges and Options of Conserving Railway Heritage. *Collections*, 2021 Vol. 18(2), P. 202–219. <https://doi.org/10.1177/15501906211052717>

87. Chupun P., Suechoey B., Siriporananon S. Performance Analysis of Electric Motors Using Vibration Measurement. *International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)*. 2019. P. 68–71. <https://doi.org/10.1109/ICPEI47862.2019.8944946>.

88. Cipek M., Pavković D., Kljaic Z. Optimized Energy Management Control of a Hybrid Electric Locomotive. *Machines*. 2023. Vol. 11, Issue 6. <https://doi.org/10.3390/machines11060589>.

89. Crotti G., Giordano D., Signorino D., Femine A., Gallo D., Landi C., Luiso M., Biancucci A., Donadio L. Monitoring Energy and Power Quality On Board Train. *IEEE 10th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*. 2019. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/AMPS.2019.8897794>.

90. Crowe I., Dathan C. Remanufacture extends loco life by 20 years. *Railway Gazette international*. 1981. P. 137.
91. Dasgupta R. Aluminium Alloy-Based Metal Matrix Composites: A Potential Material for Wear Resistant Applications. *International Scholarly Research Notices*. 2012. P. 1–14. <https://doi.org/10.5402/2012/594573>.
92. Design NARMA-L2 Neural Controller in Simulink. *MATLAB Help Center* : web-site. URL: https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ug/design-narma-l2-neural-controller-in-simulink.html?s_tid=srchtitle_site_search_1_narma (access date: 08.04.2024).
93. Domínguez M., Fernández A., Cucala A., Blanquer J. Efficient design of Automatic Train Operation speed profiles with on board energy storage devices. *WIT Transactions on the Built Environment*. 2010. Vol. 114. P. 509–520. <https://doi.org/10.2495/CR100471>.
94. Dubravin Y., Tkachenko V. Spivak O. Increasing the energy efficiency of the ac electric lokomotive traction drive. *Transport Systems and Technologies*. 2021. №38 P. 36–52. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-38-36-4>.
95. Eadie D., Santoro M., Top-of-rail friction control for curve noise mitigation and corrugation rate reduction. *Journal of Sound and Vibration*, 2006 Vol. 293. Issues 3–5. P. 747 – 757. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.12.007>.
96. Edwards M., Donelson J., Zavis W., Prabhakaran A., Brabb D., Jackson A. Improving freight rail safety with on-board monitoring and control systems. *Proceedings of the 2005 ASME/IEEE Joint Rail Conference*. 2005. P. 117–122. <https://doi.org/10.1115/RTD2005-70047>.
97. Egamberdiev B., Lee K., Lee J., Burnashev S. A Study on Life Cycle Cost on Railway Locomotive Systems. *International Journal of Railway*. 2016. №9 P. 10–14. <https://doi.org/10.7782/IJR.2016.9.1.010>
98. Ehret O., Bonhoff K. Hydrogen as a fuel and energy storage: Success factors for the German Energiewende. *International Journal of Hydrogen Energy*.

2015. Vol. 40, Issue 15. P. 5526–5533. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2015.01.176>.

99. Fakih B., Dienwiebel M. The structure of tribolayers at the commutator and brush interface: A case study of failed and non-failed DC motors *Tribology International*. 2015. Vol. 92. P. 21–28. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2015.05.008>.

100. Falendysh A., Kharlamov P., Kletska O., Volodarets N. Calculation of the Parameters of Hybrid Shunting Locomotive. *Transportation research procedia*. 2016. Vol. 14. P. 665–671. <https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2016.05.325>.

101. Fayad A., Ibrahim H., Ilinca A., Karganroudi S., Issa M. Energy Recovering Using Regenerative Braking in Diesel-Electric Passenger Trains: Economical and Technical Analysis of Fuel Savings and GHG Emission Reductions. *Energies*. 2021. Vol. 15, Issue 1. P. 1–16. <https://doi.org/10.3390/en15010037>.

102. Femine A., Gallo D., Giordano D., Landi C., Luiso M., Signorino D. Synchronized Measurement System for Railway Application. *Journal of Physics: Conference Series* 1065. 2018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1065/5/052040>.

103. Fink O., Zio E., Weidmann U. Extreme learning machines for predicting operation disruption events in railway systems. 2013. P. 1781–1787. <https://doi.org/10.1201/b15938-271>.

104. Fischer J., Roshchin M., Langer G., Pirker M. Semantic Data Integration and Monitoring in the Railway Domain. *IEEE International Conference on Information Reuse and Integration (IRI)*. 2009. <https://doi.org/10.1109/IRI.2009.5211615>.

105. Fujimoto H. Railway Applications for High-Tc Superconductors. *Quarterly Report of RTRI*. 2004. Vol. 45, Issue 4. P. 197–202. <https://doi.org/10.2219/RTRIQR.45.197>.

106. Furuta R., Kawasaki J., Kondo K. Hybrid Traction Technologies with Energy Storage Devices for Nonelectrified Railway Lines. *IEEEJ Trans Elec Electron Eng.* 2010. №5. P. 291–297. <https://doi.org/10.1002/tee.20532>

107. Gangwar R. Railways in India: challenges and opportunities. *Handbook on Railway Regulation* / eds. M. Finger, J. Montero. Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing, 2020. P. 146 – 164. <https://doi.org/10.4337/9781789901788.00015>

108. Gao Z., Fang J., Zhang Y., Sun D. Control strategy for wayside supercapacitor energy storage system in railway transit network. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy.* 2014. Vol. 2. P. 181–190. <https://doi.org/10.1007/S40565-014-0060-4>.

109. Garcia-Gonzalez H., Rodríguez R., Bascompta M. Nitrogen Dioxide Gas Levels in TBM Tunnel Construction with Diesel Locomotives Based on Directive 2017/164/EU. *Applied Sciences.* 2023. Vol. 13, Issue 18. <https://doi.org/10.3390/app131810551>.

110. Gautam A., Chandra P., Kumar K., Sharma M., Kumar S., Agarwal A. Development of an Electronic Fuel Injection System for a 4-Stroke Locomotive Diesel Engine. *ASME 2012 Internal Combustion Engine Division Spring Technical Conference, Torino, Piemonte, Italy, May 6-9. 2012.* P. 93–99. <https://doi.org/10.1115/ICES2012-81163>.

111. GE Transportation's Modernization Program Hits New Milestones. *Wabtec Corporation* : web-site. URL: <https://www.wabteccorp.com/newsroom/press-releases/ge-transportations-modernization-program-hits-new-milestones> (access date: 12.05.2022).

112. Genovese A., Russo M., Strano S. Mechanical characterization and modeling of an innovative composite material for railway applications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L.* 2016. Vol. 231 Issue 1-2. P. 122–130. <https://doi.org/10.1177/1464420716665648>

113. Giunta M. Trends and Challenges in Railway Sustainability: The State of the Art regarding Measures, Strategies, and Assessment Tools. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, Issue 24. <https://doi.org/10.3390/su152416632>.

114. Gołębiowski P., Jacyna M., Stańczak A. The Assessment of Energy Efficiency versus Planning of Rail Freight Traffic: A Case Study on the Example of Poland. *Energies*. 2021. Vol. 14, Issue 18. <https://doi.org/10.3390/en14185629>.

115. Gordon D., West D. Modernization as a Key to Extending Locomotive Lifespan. *Transport Economics and Sustainability*. 2021. Vol. 11. P. 73–89.

116. Goswami B., Rath A., Sayeed S., Das P., Sharma R., Sharma S. Optimization Design for Aerodynamic Elements of Indian Locomotive of Passenger Train. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2019. P. 663–673. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6469-3_61.

117. Gu Q., Tang T., Song Y. A Survey on Energy-Saving Operation of Railway Transportation Systems. *Measurement and Control*. 2010. Vol. 43. P. 209–211. <https://doi.org/10.1177/002029401004300704>.

118. Gubarevych O., Duer S., Melkonova I., Woźniak M., Paś J., Stawowy M., Rokosz K., Zajkowski K., Bernatowicz D. Research on and Assessment of the Reliability of Railway Transport Systems with Induction Motors. *Energies*. 2023, № 16(19) 6888. <https://doi.org/10.3390/en16196888>

119. Gunsellmann W. Technologies for increased energy efficiency in railway systems. *2005 European Conference on Power Electronics and Applications*. 2005. P. 10. <https://doi.org/10.1109/EPE.2005.219712>.

120. Haidong S., Hongkai J., Ke Z., Dongdong W., Xingqiu L. A novel tracking deep wavelet auto-encoder method for intelligent fault diagnosis of electric locomotive bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018. Vol. 110. P. 193–209. <https://doi.org/10.1016/J.YMSSP.2018.03.011>.

121. Hao-Jie S. Discussion on Bearing Service Life of Passenger Electric Locomotives. *Railway Locomotive & Car*, 2010. https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-TDJC201006023.htm

122. Hausberger L., Cordes T., Gschösser F. Life Cycle Assessment of High-Performance Railway Infrastructure, Analysis of Superstructures in Tunnels and on Open Tracks. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. P. 7064. <https://doi.org/10.3390/su15097064>.

123. Hayashiya H., Watanabe Y., Fukasawa Y., Miyagawa T., Egami A., Iwagami T., Kikuchi S., Yoshizumi H. Cost impacts of high efficiency power supply technologies in railway power supply - Traction and Station -. *2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)*. 2012. P. LS3e.4-1–LS3e.4-6. <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2012.6397441>.

124. Heijden V., Alvarez E., Schutten J. Inventory reduction in spare part networks by selective throughput time reduction. *International Journal of Production Economics*. 2013. Vol. 143. P. 509–517. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2012.03.020>.

125. Heller B., Hamata V. Harmonic field effects in induction machines. Prague : Academia, 1977. 330 p.

126. Herwartz S., Pagenkopf J., Streuling C. Sector coupling potential of wind-based hydrogen production and fuel cell train operation in regional rail transport in Berlin and Brandenburg. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46, Issue 57. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2020.11.242>.

127. Hillmansen S., Ellis R. Electric railway traction systems and techniques for energy saving. *IET 13th Professional Development Course on Electric Traction Systems*. 2014. P. 1–6. <https://doi.org/10.1049/CP.2014.1432>.

128. Huang J., Deng Y., Yang Q., Sun J. An Energy-Efficient Train Control Framework for Smart Railway Transportation. *IEEE Transactions on Computers*. 2016. Vol. 65, Issue 5. P. 1407–1417. <https://doi.org/10.1109/TC.2015.2500565>.

129. Iden M. Battery Storage of Propulsion-Energy for Locomotives. 2014 *Joint Rail Conference: proceedings of the 2014 Joint Rail Conference*, April 2–4, 2014. Colorado Springs, Colorado. <https://doi.org/10.1115/JRC2014-3805>
130. Ikshwaku S., Srinivasan A., Varghese A., Gubbi J. Railway Corridor Monitoring Using Deep Drone Vision. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1135-2_28.
131. Iwnicki S. Future trends in railway engineering. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C*. 2009, Vol. 223(12), P. 2743–2750. <https://doi.org/10.1243/09544062JMES1545>.
132. Jiang L, Bai-gen C, Jian W. Early warning system for potential train collisions: Enhancing safety levels of high-speed trains. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F*. 2014, Vol. 230(1), P. 295–312. <https://doi.org/10.1177/0954409714541437>
133. Jiang Z., Chen W., Dai C., Cheng Z. Optimal energy management for a fuel cell hybrid locomotive. *Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*. 2010. № 3. P. 1320–1323. <https://doi.org/10.1109/FSKD.2010.5569103>.
134. Joost W. Reducing Vehicle Weight and Improving U. S. Energy Efficiency Using Integrated Computational Materials Engineering. *JOM*. 2012. № 64. P. 1032–1038. <https://doi.org/10.1007/S11837-012-0424-Z>.
135. Juan W., Ming-Hai L. Research and Simulation of Natural Gas as Locomotive Engines' Fuel. *2010 WASE International Conference on Information Engineering*. 2010. № 4. P. 276–278. <https://doi.org/10.1109/ICIE.2010.356>.
136. Kaleybar H., Brenna M., Li H., Zaninelli D. Fuel Cell Hybrid Locomotive with Modified Fuzzy Logic Based Energy Management System. *Sustainability*. 2022. P. 36–57. <https://doi.org/10.3390/su14148336>.
137. Kamakshi T., Pritika K. Smart Railway Infrastructure: Fusion of IoT, RFID and VANET for Enhanced Safety and Operational Efficiency. *2023 Second International Conference on Advances in Computational Intelligence and*

Communication (ICACIC). 2020. P. 2114-2117.
<https://doi.org/10.1109/ICACIC59454.2023.10435249>.

138. Kans M., Galar D., Thaduri A. Maintenance 4.0 in Railway Transportation Industry. *WCEAM 2015: proceedings of the 10th World Congress on Engineering Asset Management*. Springer, Cham, 2016. P. 317–331.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-27064-7_30.

139. Karakolev R., Dimitrov L. Analysis of electrical motor mechanical failures due to bearings. *IOP Conference Series: materials Science and Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/393/1/012064>.

140. Kauschke S., Fürnkranz J., Janssen F. Predicting Cargo Train Failures: A Machine Learning Approach for a Lightweight Prototype. 2016. P. 151–166. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46307-0_10.

141. Kay S. M., Marple Jr. S. L. Spectrum analysis – a modern perspective. *Proceedings of the IEEE*. 1981. Vol. 69, Issue 11. P. 1380–1419.

142. Key figures 2023 for more sustainability. *Deutsche Bahn* : web-site. URL: <https://nachhaltigkeit.deutschebahn.com/en/key-figures> (access date: 14.02.2024)

143. Khodaparastan M., Mohamed A. Supercapacitors for electric rail transit systems. *2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. 2017. P. 896–901.
<https://doi.org/10.1109/ICRERA.2017.8191189>.

144. Kim J., Baek S., Lee C., Yoon S. Deterioration and Thermographic Analyses of Electrical Units in Diesel Locomotive. *Key Engineering Materials*. 2009. P. 417–418. P. 729–732. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.417-418.729>.

145. Kim M., Park D., Kim M., Heo J., Park S., Chong H. A Study on Characteristic Emission Factors of Exhaust Gas from Diesel Locomotives. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. № 17(11). <https://doi.org/10.3390/ijerph17113788>.

146. Kim S., Choi K. A Study on the Efficiency of Energy Storage System Applied to the Power Traction System of DC Electric Railway. *Journal of International Council on Electrical Engineering*. 2012. № 2. P. 225–230. <https://doi.org/10.5370/JICEE.2012.2.2.225>.

147. Kljaic Z., Pavković D., Cipek M., Trstenjak M., Mlinarić T., Nikšić M. An Overview of Current Challenges and Emerging Technologies to Facilitate Increased Energy Efficiency, Safety, and Sustainability of Railway Transport. *Future Internet*. 2023. № 15. P. 347. <https://doi.org/10.3390/fi15110347>.

148. Konarzewski M., Niezgoda T., Stankiewicz M., Szurgott P.. Hybrid locomotives overview of construction solutions. *Journal of KONES. Powertrain and Transport*. 2013. № 20. P. 127– 134. <https://doi.org/10.5604/12314005.1135325>.

149. Kondo K. Recent Energy Saving Technologies on Railway Traction Systems. *IEEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*. 2010. № 5. P. 298–303. <https://doi.org/10.1002/TEE.20533>.

150. Kostenko I., Nezlina O., Maliuk S., Lysenko Y., Popovich, D.. Development of the traction system structure of a shunting diesel locomotive with a hybrid power supply scheme. *Transport Systems and Technologies*, 2024. Vol. 43, P. 100–110. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-8>

151. Kostrzewski M., Melnik R. Condition Monitoring of Rail Transport Systems: A Bibliometric Performance Analysis and Systematic Literature Review. *Sensors*. 2021. № 21(14), 4710. <https://doi.org/10.3390/s21144710>

152. Krashenin O., Klymenko O., Ponomarenko O., Yakovlev S. Justification of Statutory Service Life Extension of Locomotives on the Basis of Theory of Aging. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. № 7. P. 174–178. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19731>.

153. Kumari J., Karim R., Thaduri A., & Castaño A, M. Augmented asset management in railways – Issues and challenges in rolling stock. *Proceedings of*

the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2021. Vol. 236(7). P. 095440972110457. <https://doi.org/10.1177/09544097211045782>.

154. Kunthong J., Sapaklom T., Konghirun M., Prapanavarat C., Ayudhya P., Mujjalinvimut E., Boonjeed S. IoT-based traction motor drive condition monitoring in electric vehicles: Part 1. *2017 IEEE 12th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)* 2017. № 1. P. 184–188. <https://doi.org/10.1109/PEDS.2017.8289143>.

155. Kutovoj Y., Kyrylenko Y., Obruch I., Kunchenko T. Application of Intelligent Control Systems in Electric Drives of Rail Vehicles. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021. P. 709–713. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570026>.

156. Kyrylenko V., Kyrylenko K., Budko M., Denysiuk P. Reasoning of additional diagnostic parameters for electric insulation diagnostics by absorption methods. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2021. P. 39–45. <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2021.6.06>.

157. Lebedevas S. Economy of fuel-energy resources on rail-freight traffic improving the exploitations characteristics of fuel consumption of diesels. *Transport*. 2002. № 17. P. 30–37. <https://doi.org/10.3846/16483480.2002.10414007>.

158. Li G. Design of Remote Monitoring and Fault Diagnosis System for Railway Locomotive. *Computer Engineering*. 2012. Vol. 38. Issue (04). P. 227–229. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3428.2012.04.074>

159. Li M., Cui H., Wang J., Guan Y. Improvement of fuel injection system of locomotive diesel engine. *Journal of Environmental Sciences*. 2009. Vol. 21, [https://10.1016/S1001-0742\(09\)60058-9](https://10.1016/S1001-0742(09)60058-9).

160. Li X., Shi T., Ma X. Research on the Big Data Platform and Its Key Technologies for the Railway Locomotive System. *Proceedings of the 5th*

International Conference on Big Data and Computing. 2020. P. 6–12. <https://doi.org/10.1145/3404687.3404693>.

161. Liang H., Zhang Y., Yang P., Wang L., Gao C. Comparison and Analysis of Prediction Models for Locomotive Traction Energy Consumption Based on the Machine Learning. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 38502–38513. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3268531>.

162. Lin X., Zhang J. Dust corrosion. *Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts Electrical Contacts*. 2004. P. 255–262. <https://doi.org/10.1109/holm.2004.1353127>.

163. Lingaitis LP, Lebedevas S, Liudvinavičius L. Evaluation of the operational reliability and forecasting of the operating life of the power train of the freight diesel locomotive fleet. *Eksplotacija i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability*. 2014. Vol. 16 (1). P. 73–79.

164. Liu J. Qin D., Dejie Y. Intelligent condition monitoring system based on wireless sensor networks. *Jisuanji Jicheng Zhizao Xitong/Computer Integrated Manufacturing Systems*. 2008 Vol. 14, P. 2047–2051.

165. Liu J., Guo H., Yu Y. Research on the Cooperative Train Control Strategy to Reduce Energy Consumption. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2017. Vol. 18. P. 1134–1142. <https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2598425>.

166. Liu Q., Li N., Tang H., Jia X. An Analysis of Intelligent Operation and Maintenance for Rail Transit Electric Locomotives. *Engineering Advances*. 2023. № 3. P. 164–168. <https://doi.org/10.26855/ea.2023.06.002>.

167. Liu Y., Chen Z., Li W., Wang K. Dynamic analysis of traction motor in a locomotive considering surface waviness on races of a motor bearing. *Rail. Eng. Science*. 2021. Vol. 29. P. 379–393. <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00246-x>

168. Lonsdale C., Stone D. Some possible alternatives for longer-life locomotive wheels. *Proceedings of the 2005 ASME/IEEE Joint Rail Conference*. 2005. P. 239–244. <https://doi.org/10.1109/RRCON.2005.186086>.

169. Madonna V., Giangrande P., Lusuardi L., Cavallini A., Galea M. Impact of thermal overload on the insulation aging in short duty cycle motors for aerospace. *2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*. 2018. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607539>.

170. Martinis V., Corman F. Data-driven perspectives for energy efficient operations in railway systems: Current practices and future opportunities. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2018. Vol. 95. P. 679–697. <https://doi.org/10.1016/J.TRC.2018.08.008>.

171. Mayet C., Pouget J., Bouscayrol A., Lhomme W. Influence of an Energy Storage System on the Energy Consumption of a Diesel-Electric Locomotive. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2014. Vol. 63, № 3. P. 1032–1040. <https://doi.org/10.1109/TVT.2013.2284634>.

172. Mayrink S., Oliveira J., Dias B., Oliveira L., Ochoa J., Rosseti G. Regenerative Braking for Energy Recovering in Diesel-Electric Freight Trains: A Technical and Economic Evaluation. *Energies*. 2020. Vol. 13(4). P. 963. <https://doi.org/10.3390/en13040963>.

173. Merkisz-Guranowska A., Merkisz J., Jacyna M., Pyza D., Stawecka H. Rail Vehicles Recycling. *WIT Transactions on the Built Environment*. 2014. Vol. 135. P. 425–436. <https://doi.org/10.2495/CR140351>.

174. Mezitis M., Panchenko V., Yatsko S., Vashchenko A., Sidorenko A., Sansyzbajeva Z. Selection of mathematical model of on-board capacity energy storage as element of hybrid traction unit of motor car rolling stock. *Journal of Measurements in Engineering*. 2021. Vol. 9, № 2. P. 71–86. <https://doi.org/10.21595/jme.2021.21818>.

175. Michalak P., Merkisz J., Stawecki W., Andrzejewski M., Daszkiewicz P. The selection of the engine unit – main engine generator during the modernization of the 19D/TEM2 locomotive. *Combustion Engines*. 2020. № 3. P. 38–46. <https://doi.org/10.19206/CE-2020-307>.

176. Milewski D., Milewska B. Efficiency of the Consumption of Energy in the Road Transport of Goods in the Context of the Energy Crisis. *Energies*. 2023. Vol. 16 (3). P. 1257. <https://doi.org/10.3390/en16031257>.

177. Miller A., Hess K., Barnes D., Erickson T. System design of a large fuel cell hybrid locomotive. *Journal of Power Sources*. 2007. Vol. 173. P. 935–942. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2007.08.045>.

178. Miller A., Peters J., Smith B., Velez O. Analysis of fuel cell hybrid locomotives. *Journal of Power Sources*. 2006. Vol. 157. P. 855–861. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2005.12.051>.

179. Mistry P., Johnson M. Lightweighting of railway axles for the reduction of unsprung mass and track access charges. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2019. Vol. 234. P. 958–968. <https://doi.org/10.1177/0954409719877774>.

180. Moraes C., Brockveld S., Heldwein M., Franca A., Vaccari A., Waltrich G. Power Conversion Technologies for a Hybrid Energy Storage System in Diesel-Electric Locomotives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2021. Vol. 68. № 10. P. 9081–9091. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3021643>.

181. Morey E., Galvin K., Riley T., Wilson R. Application of soft systems methodology to frame the challenges of integrating autonomous trains within a legacy rail operating environment. *Systems Engineering*. 2024. Vol. 27 P. 326–337. <https://doi.org/10.1002/sys.21723>

182. Müller J., Schenk T. Sustainable Solutions in Railways: Extending the Life Cycle of Locomotives. *Environmental Engineering*. 2019. Vol. 13. P. 243–259.

183. Muttaqin P., Damayanti D., Kamil A. Integrated model development of spare part inventory and maintenance. *Proceedings of the 2018 International Conference on Industrial Enterprise and System Engineering (IcoIESE 2018)*. 2019. Vol. 2. P. 364–368. <https://doi.org/10.2991/ICOIESE-18.2019.64>.

184. Nakamura N. Diversification and Convergence: The Development of Locomotive Technology in Meiji Japan. *The Development of Railway Technology in East Asia in Comparative Perspective . Studies in Economic History* / ed. M. Sawai. Springer, Singapore, 2017. P. 41–65. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4904-0_3.

185. Nejikovsky B., Keller E. Wireless communications based system to monitor performance of rail vehicles. *Proceedings of the 2000 ASME/IEEE Joint Railroad Conference (Cat. No.00CH37110)*. 2000. P. 111–124. <https://doi.org/10.1109/RRCON.2000.869993>.

186. Niu G., Yang B. Intelligent condition monitoring and prognostics system based on data-fusion strategy. *Expert Systems with Applications*. 2010. Vol. 37. P. 8831–8840. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.06.014>.

187. Novak H., Lešić V., Vašak M. Energy-Efficient Model Predictive Train Traction Control With Incorporated Traction System Efficiency. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2022. Vol. 23. P. 5044–5055. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3046416>.

188. Novak H., Lešić V., Vašak M. Hierarchical Model Predictive Control for Coordinated Electric Railway Traction System Energy Management. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2019. Vol. 20, № 7. P. 2715–2727. doi: 10.1109/TITS.2018.2882087.

189. Nurchis M., Valta M., Vaccarini M., Carbonari A. A Wireless System for Real-time Environmental and Energy Monitoring of a Metro Station: Lessons Learnt from a Three-year Research Project. *Proceedings of the 32nd ISARC*. 2015. P. 416–423. <https://doi.org/10.22260/ISARC2015/0054>.

190. Orellano A., Sperling S. Aerodynamic Improvements and Associated Energy Demand Reduction of Trains. *The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses, and Trains. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics* / eds. F. Browand, R. McCallen, J. Ross. Springer, Berlin, Heidelberg 2009. Vol. 41. P. 219–231. https://doi.org/10.1007/978-3-540-85070-0_19.

191. Padma V., Raghavan V. Analysis of insulation degradation in Insulators using Partial Discharge analysis. *2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology*. 2011. Vol. 4. P. 110–114. <https://doi.org/10.1109/ICECTECH.2011.5941868>.

192. Painter T., Barkan C. Prospects for dynamic brake energy recovery on North American freight locomotives. *Proceedings of the 2006 IEEE/ASME Joint Rail Conference*. 2006. P. 181–188. <https://doi.org/10.1109/RRCON.2006.215308>.

193. Panchenko S., Ananieva O., Babaiev M., Davidenko M., Panchenko V. Synthesis of a device for anti-jamming reception of signals of tonal rail circuits on the background of additive five-component interference. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3, Issue 9 (111). P. 94–102. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235835>.

194. Panchenko S., Balaka Y., Panchenko V., Rezunenko M. Impact of extending the «life cycle» of locomotives on the country's GDP and the economy of the railway industry. *Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport*. 2022. Vol. 200. P. 36–48. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.200.2022.262696>.

195. Panchenko V. V., Masliy A. S., Kharin R. O. Prospects of introducing alternative sources of energy on Ukrainian railways : International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. P. 1–10. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012008>.

196. Panou K., Tzieropoulos P., Emery D. Railway driver advice systems: Evaluation of methods, tools and systems. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2013. Vol. 3. P. 150–162. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2013.10.005>.
197. Patgar T., Shankaraiah Trajectory Tracking of locomotive Using IMM-Based Robust Hybrid Control Algorithm. *International Journal of Sensors and Sensor Networks*. 2017. Vol. 5. Issue 3. P. 34–42. <https://doi.org/10.11648/J.IJSSN.20170503.11>.
198. Pavlenko O., Pavlenko I. The role of railway transport in the evacuation of the population during hostilities in Ukraine. *Transport systems and transportation technologies*. 2022. Vol. 23. P. 74–78. <https://doi.org/10.15802/tstt2022/261658>.
199. Peterson R. Maintenance and Repair Cycles for Long-Term Locomotive Use. *Journal of Railway Engineering*. 2019. Vol. 7. P. 207–222.
200. Peterson R., Miller T. Lifecycle Cost Management in Railway Transport. *Journal of Transportation Economics*. 2019. Vol. 27. P. 103–116.
201. Pielecha I., Dimitrov R., Mihaylov V. Energy flow analysis based on a simulated drive of a hybrid locomotive powered by fuel cells. *Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe*. 2022. Vol. 1-2. P. 68–76. <https://doi.org/10.53502/rail-152703>.
202. Pineda-Jaramillo J., Insa R., Martínez P. Modeling the energy consumption of trains by applying neural networks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2018. Vol. 232, Issue 3. P. 816–823. <https://doi.org/10.1177/0954409717694522>.
203. Plakhtii O., Trubchaninova K., Panchenko V., Anannieva O. Improving the Energy Efficiency of Railway Electrical Traction by Creating Smart Grid System. *ICTE in Transportation and Logistics 2019 (Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure)*. 2019. P. 337–343. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_42.

204. Popescu M., Bitoleanu A. A Review of the Energy Efficiency Improvement in DC Railway Systems. *Energies*. 2019. Vol. 12(6). <https://doi.org/10.3390/EN12061092>.

205. Powell J., Batty P., González-Gil A., Palacin R. Determining system-wide energy use in an established metro network. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2017. Vol. 231. P. 570–577. <https://doi.org/10.1177/0954409716674748>.

206. Puzyr V., Datsun Y. The use of modern strategies for improvement of system of technical service and repair of locomotives. *Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*. 2014. Vol. 149. P. 75–80. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.149.2014.81814>.

207. Qingquan Q. Energy Consumption Management and Optimization Software System for Electric Locomotive Based on Intelligent Ammeter. *China Railway Science*.

208. Railway Emission Standards and Compliance. *European Environmental Agency* : web-site. URL: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/sustainability-of-europes-mobility-systems/climate> (access date: 12.10.2024)

209. Ren J Dai X., Wang N., Li H. Parameters estimation of noise amplitude modulation signal. *IET Radar, Sonar & Navigation*. 2017. Vol. 11, Issue 1. P. 161–170. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0114>.

210. Ren W., Guo J. Long-Range Tracking of Intelligent Locomotive Dispatching System Based on 3S Technology. *International Conference on Transportation Engineering*. 2009. P. 1855–1860. [https://doi.org/10.1061/41039\(345\)307](https://doi.org/10.1061/41039(345)307).

211. Ren Z., Wan J., Deng P. Machine-Learning-Driven Digital Twin for Lifecycle Management of Complex Equipment. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*. 2022. Vol. 10, № 1. P. 9–22. <https://doi.org/10.1109/tetc.2022.3143346>.

212. Resolving the Skills Shortage. *Transportation Research Board* : website. URL: <https://trid.trb.org/View/870616> (access date: 11.01.2023)

213. Roi S., Kachan A., Tykhonov A., Iakunin D., Riabov Y. Application of electric traction drive for the modernization of locomotives with hydraulic power transmission. *Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*. 2023. № 46. P. 93–102. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288177>.

214. Rufer A. Energy storage for railway systems, energy recovery and vehicle autonomy in Europe. *The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA*. 2010. P. 3124–3127. <https://doi.org/10.1109/IPEC.2010.5542334>.

215. Saadat M., Esfahanian M., Saket M. Longitudinal dynamics and energy flow modelling for diesel-electric locomotives. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*. 2016. Vol. 23. P. 155. <https://doi.org/10.1504/IJHVS.2016.075504>.

216. Saadat M., Esfahanian M., Saket M. Reducing fuel consumption of diesel-electric locomotives using hybrid powertrain and fuzzy look-ahead control. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F. Journal of Rail and Rapid Transit*. 2017. Vol. 231, Issue 4. P. 406–418. <https://doi.org/10.1177/0954409716631010>.

217. Salasoo L. 21st Century Locomotive Technology: 2003 Annual Technical Status Report DOE/AL68284-TSR03. 2004. <https://doi.org/10.2172/820639>

218. Samanta A., Naha A., Basu D., Routray A., Deb A. Online Condition Monitoring of Traction Motor. *Handbook of Research on Emerging Innovations in Rail Transportation Engineering*. 2016. P. 489–523. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-0084-1.CH020>.

219. Semko Z. Safety of goods indicies of environmental exhaust gases of locomotives, whith extended service life after overhaul reconditioning. *Railbound*

Rolling Stock. 2020. № 21. P. 64–77. <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2020-21-64-77>.

220. Shafighy M., Khoo S., Kouzani A. Energy Efficiency Methods in Electrified Railways Based on Recovery of Regenerated Power. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2011. P. 69–77. https://doi.org/10.1007/978-3-642-21765-4_9.

221. Shaikh M., Kim H., Byun N., Lee S., Kim K., Kong T., Ko B., Kim K., Park H. A Simple Offline Test for Detecting Rotor Faults in Wound Field Synchronous Machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2023. Vol. 38. № 4. P. 2980–2983. <https://doi.org/10.1109/TEC.2023.3304130>.

222. Shamardina V., Anishchenko M., Lemeshko S., Kanunnikov R. Functional efficiency enhancement of diesel-electric locomotive traction system. *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2017. P. 20–23. <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248888>.

223. Shang W., Yu S., Zhang G., Li Q., Chen W. Fuel cell hybrid locomotive system based on equivalent consumption minimization strategy. *2017 Chinese Automation Congress (CAC)*. 2017. P. 2457–2461. <https://doi.org/10.1109/CAC.2017.8243188>.

224. Sharma S., Cui Y., He Q., Mohammadi R., Li Z. Data-driven optimization of railway maintenance for track geometry. *Transportation Research Part C-emerging Technologies* 2018. Vol. 90. P. 34–58. <https://doi.org/10.1016/J.TRC.2018.02.019>.

225. Sharma S., Kandpal V., Choudhury T., Gonzalez E., Agarwal N. Assessment of the implications of energy-efficient technologies on the environmental sustainability of rail operation. *AIMS Environmental Science*. 2023. Vol. 10, Issue 5. P. 709–731. <https://doi.org/10.3934/environsci.2023039>.

226. Shireesha Y., Suresh V., Sateesh B. Vibration Analysis and Control of Locomotive System. *Mechanics and Mechanical Engineering*. 2008. Vol. 22. P. 195–206. <https://doi.org/10.2478/mme-2018-0018>.

227. Singh A., Swarup A., Agarwal A., Singh D. Vision based rail track extraction and monitoring through drone imagery. *ICT Express*. 2017. Vol. 5. P. 250–255. <https://doi.org/10.1016/J.ICTE.2017.11.010>.

228. Smith J., Andrews D. Environmental Impact Consideration in the Lifecycle of Transportation Assets. *Green Transport Journal*. 2021. Vol. 5. P. 45–63.

229. Song Y., Song W. A. Novel Dual Speed-Curve Optimization Based Approach for Energy-Saving Operation of High-Speed Trains. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2016. Vol. 17. P. 1564–1575. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2507365>.

230. Soofastaei A. Energy-Efficiency Improvement in Mine-Railway Operation Using AI. *Journal of Energy and Power Engineering*. 2019. Vol. 13. P. 333–348. <https://doi.org/10.17265/1934-8975/2019.09.002>.

231. Su S., Tang T., Wang Y. Evaluation of Strategies to Reducing Traction Energy Consumption of Metro Systems Using an Optimal Train Control Simulation Model. *Energies*. 2016. Vol. 9. P. 105. <https://doi.org/10.3390/EN9020105>.

232. Sun Y., Cole C., Spiryagin M., Godber T., Hames S., Rasul M. Conceptual designs of hybrid locomotives for application as heavy haul trains on typical track lines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2013. Vol. 22. P. 439–452. <https://doi.org/10.1177/0954409713501655>.

233. Sutjipto A., Triwiyanto A., Aminanda Y., Faris W., Adesta E. Visual Inspection on Premature Failure of Electric Motor Bearings. *Applied Mechanics and Materials*. 2011. Vol. 84–85. P. 557–561. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.84-85.557>.

234. Takahashi A., Sugimoto S., Ito M., Tamiya S., Fujii K., Endo M. High-Efficiency Technology for Railway-Vehicle Traction Motors. *2020 23rd*

International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). 2020. P. 2114–2117. <https://doi.org/10.23919/ICEMS50442.2020.9291012>.

235. Tanwar M., Raghavan N., Khanam S. Condition Based Maintenance Policy for Crankcase Lubricating Oil in Diesel Locomotives. *2021 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. 2021. P. 1593–1598. <https://doi.org/10.1109/IEEM50564.2021.9672919>.

236. Tartakovskyi E., Ustenko O., Puzyr V., Datsun Y. Systems Approach to the Organization of Locomotive Maintenance on Ukraine Railways. *Rail Transport – Systems Approach. Studies in Systems, Decision and Control* / eds. A. Ślaskowski. Springer, Cham, 2017. vol 87. P. 217–236. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51502-1_5.

237. Thounthong P., Rael S., Davat B. Analysis of Supercapacitor as Second Source Based on Fuel Cell Power Generation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2009. Vol. 24. P. 247–255. <https://doi.org/10.1109/TEC.2008.2003216>.

238. Tuan D., Truyen N., Vu N., Volvenko S., Hung N. Experimental UWB Wireless Sensor System for Locomotive Engine Parameters Monitoring. *2019 6th NAFOSTED Conference on Information and Computer Science (NICS)*. 2019. P. 154–159. <https://doi.org/10.1109/NICS48868.2019.9023841>.

239. Van K., Thu A. Optimal supercapacitor placement in an urban railway line. *Transport and Communications Science Journal*. 2022. Vol. 73, Issue 1. P. 75–89. <https://doi.org/10.47869/tcsj.73.1.7>.

240. Verberg N. Life Cycle Analysis replacing existing data servers. 2018. 17 p. https://www.alstom.com/sites/alstom.com/files/2021/12/03/Life_Cycle_Analysis_Replacing_old_servers.pdf

241. Vitins J. Reducing Energy Costs With Electric. *Diesel and Dual-Powered Locomotives*. 2009. P. 63–68. <https://doi.org/10.1115/JRC2009-63019>.

242. Wang J., Du Y., Wang J. LSTM based long-term energy consumption prediction with periodicity. *Energy*. 2020. Vol. 197. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117197>.

243. Wang Y., Miao J., Wei Y. The Research of Traction Motor Energy-Saving Regenerative Braking Control Technology. *2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*. 2010. Vol. 3. P. 930–933. <https://doi.org/10.1109/ICICTA.2010.47>.

244. Watson I., Ali A., Bayyati A. Energy Efficiency of High-Speed Railways. *Advances in Environmental and Engineering Research*. 2022. Vol. 3, Issue 4. <https://doi.org/10.21926/aeer.2204055>.

245. White T. Environmental Standards for the Decommissioning and Recycling of Locomotives. *Green Transport Review*. 2022. Vol. 9. P. 44–59.

246. Wilson A., Cleary T., Ballew B. Power Management Control Optimization of a Hybrid Electric-Diesel Locomotive. *JRC*. 2016. <https://doi.org/10.1115/JRC2016-5777>.

247. Xu P., Yao W., Zhao Y., Yi C., Li L., Lin J., Tsui K. Condition monitoring of wheel wear for high-speed trains: A data-driven approach. *2018 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM)*. 2018. P. 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICPHM.2018.8448864>.

248. Yan G., Chen J., Bai Y., Yu C. A Survey on Fault Diagnosis Approaches for Rolling Bearings of Railway Vehicles. *Processes*. 2022. Vol. 10. P. 724. <https://doi.org/10.3390/pr10040724>

249. Yang J., Yip H., Jen A. Rational Design of Advanced Thermoelectric Materials. *Advanced Energy Materials*. 2013. Vol. 3, Issue 5. P. 549–565. <https://doi.org/10.1002/aenm.201200514>.

250. Yang Y., Ling L., Zhan T., Wang K., Zhai W. An Advanced Anti-Slip Control Algorithm for Locomotives Under Complex Friction Conditions. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*. 2021. Vol. 16, Issue 10. <https://doi.org/10.1115/1.4051822>.

251. Yatsko S., Vashchenko Y., Sydorenko A. Development of strategies for reducing traction energy consumption by electric rolling stock. *Computational Problems of Electrical Engineering*. 2019. Vol. 9, No. 1. P. 44–52. <https://doi.org/10.23939/jcpee2019.01.044>.

252. Yong-Che N. Research on Railway Freight Transportation Management System Based on GPS Technology. *Journal of North China Institute of Science and Technology*. 2014. Issue 10. P. 64–69.

253. Yu H., Zhou Z., Chen C., Gu J. Design of Locomotive Energy Consumption Monitoring System. *Advanced Materials Research*. 2014. P. 960–961; P. 1325–1330. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.960-961.1325>.

254. Zhalkin D., Taran A. Improving methods of monitoring the thermal state electric locomotives traction electric motors. *Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport*. 2015. Vol. 2, No. 158. P. 74–82. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.158.2015.63392>.

255. Zhang J. Effect of Dust Contamination on Electrical Contact Failure. *Electrical Contacts, Proceedings of the Annual Holm Conference on Electrical Contacts*. 2007. P. xxi - xxx. <https://doi.org/10.1109/HOLM.2007.4318186>.

256. Zhong-Xi Z. Life cycle cost analysis and its software development for electric locomotive. *Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles*. 2007.

257. Zhu J., Li H., Wang Q., Long S.. Optimization analysis on the energy saving control for trains. *China Railway Science*. 2008. Vol. 29. P. 104–108

Додаток А

Акти впровадження результатів дисертації

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Перший заступник директора виконавчого
регіональної філії «Південна залізниця»
АТ «Укрзалізниця»

Михайло КУЗЬМЕНКО



Вересень 2024 року

АКТ

**про впровадження результатів докторської дисертаційної роботи
на тему: «Розвиток наукових основ формування ресурсозберігаючих методів,
технологій та технічних засобів експлуатації локомотивів»
Панченка Владислава Вадимовича**

Складено комісією у складі:

Голова: Начальник структурного підрозділу «Служба локомотивного господарства» регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця» - Дмитро КРИКУН.

Члени комісії: Заступник начальника структурного підрозділу «Служба локомотивного господарства» регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця» - Богдан ЗАЄЦЬ;

начальник паливно-енергетичного відділу структурного підрозділу «Служба локомотивного господарства» регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця» - Олексій ТРИХЛІБ.

Комісія визначила впровадження таких результатів дисертаційної роботи Панченка В. В. в регіональній філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця»:

- інноваційні заходи, що дозволяють подовжити експлуатаційні можливості діючого локомотивного парку, а саме рекомендації з удосконалення систем моніторингу технічного стану тягових двигунів локомотивів;
- методи та засоби контролю технічного стану тягових двигунів локомотивів у реальному часі;
- визначення залежності обсягів вантажних залізничних перевезень від кількості магістральних локомотивів та вантажних вагонів експлуатаційного парку, що дозволяє адекватно оцінити вплив збільшення обсягів вантажних перевезень на величину ВВП ПКС за рахунок подовження «життєвого циклу» вантажних

транспорту та регіональною філією «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця».

Обґрунтовано економічну доцільність впровадження ресурсозберігаючих методів, технологій та технічних засобів експлуатації локомотивів, а саме заводостійкої системи моніторингу тягових двигунів локомотивів, виходячи з можливості її використання у локомотивних депо регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця», що має суттєве значення для підвищення ефективності роботи загальнодержавної транспортно-логістичної системи.

Враховуючи, що фактичний знос локомотивів складає понад 90 % інвентарного парку, найсуттєвішим і найбільш актуальним питанням сьогодення залишається подальше забезпечення функціональних можливостей існуючих транспортних засобів, зокрема локомотивів. З огляду на це, в наш час при формуванні технічної політики залізничної галузі на середньостроковий період пріоритетним завданням є впровадження інноваційних заходів, що дозволяють подовжити експлуатаційні можливості діючого локомотивного парку.

На підставі отриманих даних визначено очікувану величину додаткового ВВП ПКС України, яку можливо отримати від впровадження протягом п'яти років запропонованих у роботі заводостійких методів моніторингу тягових двигунів на п'ятдесяти локомотивах АТ «Укрзалізниця» у результаті їхньої модернізації, в розмірі 8893,7 тис. дол. США, тобто 1778,3 тис. дол. щорічно (35,6 тис. дол. в розрахунку на один локомотив за рік).

Висновки і рекомендації про подальше використання розробок – рекомендувати для подальшого використання конструкторськими, експлуатаційними та проєктними організаціями на магістральному, промисловому транспорті та метрополітенах на умовах співробітництва з регіональною філією «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця» та Українським державним університетом залізничного транспорту.

Голова комісії:

Голова: Начальник структурного підрозділу «Служба локомотивного господарства» регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця»

Дмитро КРИКУН.

Члени комісії: Заступник начальника структурного підрозділу «Служба локомотивного господарства» регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця»

Богдан ЗАЄЦЬ;

начальник паливно-енергетичного відділу структурного підрозділу «Служба локомотивного господарства» регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця»

Олексій ТРИХЛІБ.

ЗАТВЕРДЖЕНО

Проректор з науково-педагогічної роботи
Українського державного університету
залізничного транспорту



Артур КАГРАМАНЯН

2024 р.

АКТ

**про впровадження результатів дисертаційної роботи
Панченка Владислава Вадимовича щодо формування ресурсозберігаючих
методів, технологій та технічних засобів експлуатації локомотивів, у
навчальний процес Українського державного університету залізничного
транспорту (УкрДУЗТ)**

Основні результати дисертаційної роботи Владислава Панченка впроваджено у навчальний процес кафедри «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» механіко-енергетичного факультету УкрДУЗТ, а саме:

1. У дисципліну «Ресурсозберігаючі технології» бакалаврського рівня при вивченні ефективності ресурсозберігаючих методів на залізничному транспорті впроваджено:

- методи оптимізації процесів енергоспоживання тягового рухомого складу, що дозволяють не лише знизити експлуатаційні витрати, але й суттєво знизити екологічний вплив, зокрема, скоротити обсяг викидів парникових газів, що в умовах світових тенденцій до зменшення залежності від викопних джерел енергії та поширення використання відновлювальних джерел енергії стає пріоритетним завданням;

- результати оцінки методів з енергоефективності на тяговому рухомому складі за критеріями зниження споживаної енергії, швидкості виявлення оптимальних параметрів, зниження експлуатаційних витрат, вартості впровадження та стійкості до змін в умовах експлуатації;

- імітаційні моделі пускових та несиметричних режимів роботи асинхронних тягових електродвигунів на основі еквівалентної двофазної моделі в нерухомій системі координат α , β для дослідження характеристик швидкості обертання, електромагнітного моменту та трифазного струму.

2. У дисципліну «Системи управління розподілом та обліком електроенергії» магістерського рівня при аналізі систем контролю електричних параметрів електродвигунів впроваджено:

- прогнозу математичну модель контролю технічного стану тягових двигунів постійного струму в умовах дії складних завад, яка дає змогу провести аналітичний або числовий опис струму в будь-якій вітці схеми заміщення двигуна, що дозволяє врахувати поточний стан їхніх електричних параметрів відносно шуканих струмів і напруги;

- узагальнений критерій оцінки ефективності процесу експлуатації тягового рухомого складу, що дозволило розробити і показати на конкретному прикладі

покрокові рекомендації щодо його впровадження в системах автоматичного управління і контролю тягових електричних двигунів;

Результати дисертаційної роботи використовуються при підготовці до дипломування бакалаврів і магістрів на механіко-енергетичному факультеті за освітніми програмами “Електропостачання та ресурсозберігаючі технології”, “Електричний транспорт” спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка та «Електровози та електропоїзди» спеціальності 273 Залізничний транспорт.

Заступник декана механіко-енергетичного
факультету



Павло РУКАВІШНИКОВ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор із науково-педагогічної

роботи УкрДУЗТ

к.т.н., доцент

Артур КАТРАМАНЯН



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Результатів дисертаційного дослідження

Панченка Владислава Вадимовича

На тему «РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ФОРМУВАННЯ
РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ МЕТОДІВ, ТЕХНОЛОГІЙ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ
ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЛОКОМОТИВІВ» в освітній процес

Навчально-наукового центру освіти дорослих Українського державного університету
залізничного транспорту

Актуальність дисертаційного дослідження Панченка Владислава Вадимовича визначається потребою у впровадженні сучасних ресурсозберігаючих методів, технологій та технічних засобів експлуатації рухомого складу залізниць та на необхідність подовження життєвого циклу локомотивів.

Основні результати, дисертаційної роботи Панченка В.В., які використовуються в освітньому процесі Навчально-наукового центру освіти дорослих Українського державного університету залізничного транспорту:

- аналіз проблем ресурсозбереження в процесі експлуатації рухомого складу залізниць;
- результати аналізу впливу різних чинників на тривалість життєвого циклу локомотивів;

- аналіз методів та засобів моніторингу енергоефективності тягового рухомого складу;
- математичні моделі перехідних процесів в частотно-керованому асинхронному електродвигуні, яка дозволяє отримати форми струмів та напруг в нормальних, несиметричних та аварійних режимах експлуатації;
- імітаційні Matlab моделі для аналізу пускових та несиметричних режимів роботи асинхронних тягових електродвигунів.

Дані розробки з 2023 року і по теперішній час використовуються:

1) при наданні освітніх послуг з підвищення кваліфікації за категорією: Начальник, головний інженер, заступники начальників , інженер технічного відділу локомотивних служб , тепловозоремонтних заводів ,служб приміських перевезень та підприємств локомотивного господарства АТ «Укрзалізниця»;

2) при підготовці спеціалістів за освітніми програмами «Електропостачання та ресурсозберігаючі технології», «Електричний транспорт» та «Електровози та електропоїзди»;

3) при підготовці та виконанні випускних кваліфікаційних робіт.

В.о. директора ННЦОД

к.т.н., доцент

Вячеслав ЗАХАРЧЕНКО

Додаток Б

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Супрун О. Д., Семененко О. І., Панченко В. В., Семененко Ю. О. Дослідження електромагнітних перехідних процесів у частотно-керованому електроприводі перемикальних пристроїв трансформаторів тягових підстанцій. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2017. № 6. С. 25–36. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v0i6.119929>
2. Акімов О. І., Заїка Л. В., Панченко В. В., Панютін О. М. Розподілення тягових підстанцій по дистанціях електропостачання при впровадженні швидкісного руху. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2018. Вип. 181. С.43–50. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.181.2018.156417>
3. Ананьєва О. М., Бабаєв М. М., Давиденко М. Г., Панченко В. В. Оптимальне приймання інформаційних сигналів в умовах дії п'ятикомпонентної завади. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2021. № 1. С. 24–29. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v26i1.229062>.
4. Панченко В. В., Туренко О. Г. Дослідження прямого пуску тягового асинхронного електродвигуна за допомогою імітаційної моделі. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2021. № 3. С. 3–6. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v26i3.240446>
5. Панченко В. В., Харін Р. О. Дослідження втрат енергії в сонячній електростанції на тяговій підстанції. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2021. Вип. 196. С. 149–160. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.242262>

6. Панченко В. В., Туренко О. Г. Дослідження роботи тягового асинхронного двигуна при несиметрії живильної напруги та аварійних режимах роботи. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2021. Вип. 198. С. 145–150. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256648>

7. Панченко С. В., Балака Є. І., Панченко В. В., Резуненко М. Є. Еволюція транспорту та сучасна проблема української залізниці. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2022. Вип. 199. С. 89–98. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.199.2022.258816>

8. Панченко С. В., Балака Є. І., Панченко В. В., Резуненко М. Є. Вплив подовження «життєвого циклу» локомотивів на ВВП країни та економіку залізничної галузі. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2022. Вип. 200. С. 36–48. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.200.2022.262696>

9. Ананьєва О. М., Бабаєв М. М., Давиденко М. Г., Панченко В. В. Моделювання електричних перехідних процесів у частотно-керованому асинхронному двигуні *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2022. № 2. С. 23–33. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v27i2.259696>

10. Луценко І. М., Рухлова Ю. Н., Кириченко М. С., Панченко В. В., Циган П. С. Підвищення енергоефективності режимів розподільчих мереж із фотоелектричними станціями. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. Дніпро : НТУ «ДП», 2023. №1 (193). С. 99–106. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-1/099> (видання індексується в базі Scopus, Q3)

11. Панченко С. В., Панченко В. В., Туренко О. Г. Дослідження аварійних режимів роботи тягового асинхронного електропривода. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного*

транспорті. 2023. Вип. 203. С. 56–63. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.203.2023.277955>

12. Панченко В. В., Харін Р. О. Моделювання та техніко-економічний розрахунок роботи сонячної електростанції на тяговій підстанції. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 2. С. 3–13. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i2.283295>

13. Панченко В. В., Харін Р. О. Дослідження впливу деградації сонячних панелей на ефективність роботи сонячної електростанції. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 3. С. 73–82. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i3.290140>

14. Ананьєва О. М., Бабаєв М. М., Давиденко М. Г., Панченко В. В. Частотна локалізація та оцінювання параметрів сигналу тестування обмотки статора трифазного асинхронного двигуна. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 4. С. 28–37. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i4.296413>.

15. Ананьєва О. М., Бабаєв М. М., Давиденко М. Г., Панченко В. В. Оцінювання параметрів неперервного зондуєчого сигналу при тестуванні обмотки статора трифазного асинхронного двигуна. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 2. С. 52–60. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v29i2.307682>

16. Ананьєва О. М., Бабаєв М. М., Давиденко М. Г., Панченко В. В. Синтез пристрою оцінювання параметрів синусоїдного сигналу, адитивно змішаного з одиночною імпульсною завадою. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 3. С. 25–32. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v29i3.313625>

17. Панченко В. В., Туренко О. Г. Синтез нейрорегулятора NARMA-L2 для системи тягового асинхронного електропривода. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2024. Вип. 208. С. 180–187 <https://doi.org/10.18664/1994-7852.208.2024.308623>

18. Buriakovskiy S. G., Maslii A. S., Panchenko V. V., Pomazan D. P., Denis I. V. The research of the operation modes of the diesel locomotive CHME3 on the imitation model. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2018. No. 2. P. 59–62. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.2.10> . (видання індексується в базі *Web of Science*)

19. Panchenko S., Ananieva O., Babaiev M., Davidenko M., Panchenko V. Synthesis of a device for anti-jamming reception of signals of tonal rail circuits on the background of additive five-component interference. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3, Issue 9 (111). P. 94–102. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235835> (видання індексується в базі *Scopus*, Q3)

20. Відмовостійкий колійний індуктивний датчик : пат. 127127 Україна : МПК B61L1/08, B61L25/00, G08G7/00; № а201906666 ; заявл. 20.06.2019 ; опубл. 10.05.2023, Бюл. № 23.

Публікації у виданнях інших держав

21. Mezitis M., Panchenko V., Yatsko S., Vashchenko A., Sidorenko A., Sansyzbajeva Z. Selection of mathematical model of on-board capacity energy storage as element of hybrid traction unit of motor car rolling stock. *Journal of Measurements in Engineering*. 2021. Vol. 9, № 2. P. 71–86. <https://doi.org/10.21595/jme.2021.21818> (видання індексується в базі *Scopus* Q3, закордонне видання)

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

22. Buriakovskiy S., Maslii A., Pomazan D., Panchenko V., Overianova L., Omelianenko H. Multi-criteria Quality Evaluation of Energy Storage Devices for Rolling Stock Using Harrington's Desirability Function. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. 2020. P. 158–163. <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160105>. (включено до наукометричної бази *Scopus*)

23. Panchenko V. V., Masliy A. S., Kharin R. O. Prospects of introducing alternative sources of energy on Ukrainian railways : International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. P. 1–10. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012008> (включено до наукометричної бази Scopus)

24. Akimov A. I., Akimova J. A., Panchenko V. V., Odiehov M. M. The composite functional statistical criterion for evaluating the effectiveness of the automatic control process and system. Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series : Materials Science and Engineering, International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport (EET 2020) 18th-20th November, Kharkiv, Ukraine. [Citation A. I. Akimov] et al 2021. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1021. P. 1–6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012001> (включено до наукометричної бази Scopus)

25. Яцько С. І., Карпенко Н. П., Панченко В. В., Ващенко Я. В. Розвиток обладнання розподільних пристроїв тягового електропостачання. Частина I. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2017. Вип. 172. С. 37–48

26. Plakhtii O., Trubchaninova K., Panchenko V., Anannieva O. Improving the Energy Efficiency of Railway Electrical Traction by Creating Smart Grid System. *ICTE in Transportation and Logistics 2019 (Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure)*. 2019. P. 337–343. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_42

27. Панченко В. В., Харін Р. О Модернізація систем електропостачання залізниць шляхом застосування альтернативних джерел енергії. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті* : тези стендових доповідей та виступів учасників 32-ї міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційно-керуючі системи на залізничному

транспорті" (Харків, 24–25 жовтня, 2019 р.). Харків : УкрДУЗТ, 2019. № 4 (додаток). С. 36–37.

28. Бабаєв М. М., Панченко В. В., Туренко О. Г. Дослідження роботи тягового електродвигуна 1AL4668DT у програмному комплексі Ansys. *Інформатика, управління та штучний інтелект* : тези дев'ятої міжнародної науково-технічної конференції. Харків : НТУ "ХПІ", 2022. С.12

29. Балака Є. І., Панченко В. В., Резуненко М. Є. Подовження «життєвого циклу» локомотивів шляхом їх модернізації як фактор впливу на економічний розвиток. *Міжнародні економічні відносини. Сталий розвиток України в умовах глобалізації та Європейської економічної інтеграції : проблеми, перспективи, ефективність. ФЕНІКС-2022* : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, 31 травня 2022 р. Харків : НТУ «ХПІ», 2022. С. 67–70

30. Балака Є. І., Панченко В. В., Резуненко М. Є. Пріоритетний напрямок технічної політики Укрзалізниці в теперішній період. *Технологія-2022* : XXV матеріали міжнар. наук.-техн. конф., 27 травня 2022 р., м. Сєверодонецьк / укл. : Тарасов В. Ю., Зубцов Є. І. Сєверодонецьк : Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля, 2022. С. 118–119.

31. Панченко С. В., Балака Є. І., Панченко В. В., Резуненко М. Є. Ефективність автоматизації оперативного контролю технічного стану локомотивів. *Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика* : матеріали 18-ї науково-практичної міжнародної конференції (2-3 червня 2022 р.). Харків : УкрДУЗТ, 2022. С. 94–96

32. Панченко В. В., Туренко О. Г. Застосування штучних нейронних мереж в системі керування тяговим електроприводом. *Стан та перспективи розвитку електричного транспорту* : матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції, 23-25 листопада 2022 р. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. С. 158–160

33. Панченко В. В., Туренко О. Г. Порівняльний аналіз типів регуляторів для керування електродвигунами змінного струму. *Матеріали шістнадцятої міжнародної науково-практичної конференції «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» ІТРК-2023, 23-24 травня*. Київ : НАУ, 2023. С.221–222.

34. Панченко С. В., Панченко В. В., Туренко О. Г. Аналіз роботи системи тягового асинхронного електропривода електрорухомого складу з різними типами регуляторів швидкості. *Матеріали П'ятнадцятої міжнародної науково-практичної конференції студентів і молодих вчених імені Георгія Кірти «Сучасні транспортні технології»* : збірник наукових праць / під загальною редакцією І. Кравця, О. Возняка ; НУЛП. Львів. 2023. С.74–76

35. Ananieva O. M., Babaiev M. M., Panchenko V. V., Davydenko M. H. Justification of the selection of the frequency range for the location of the test signal of the stator windings of a three-phase asynchronous electric motor. *Інформатика, управління та штучний інтелект* : тези одинадцятої міжнародної науково-технічної конференції. Харків : НТУ "ХПІ", 2024. С.4

36. Спосіб ідентифікації поїзда під час руху : пат. 133387 Україна : МПК B61L1/00, B61L25/02. № u201808240 ; заявл. 26.07.2018 ; опубл. 10.04.2019, Бюл. № 7.

Відомості про апробацію результатів дисертації:

1. 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (Ceske Budejovice, June 5 – 7, 2019) (заочна участь);

2. IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS 2020) (Kyiv, May 12 – 14, 2020) (заочна участь);

3. International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport (EET 2020) (Kharkiv, November 18-20, 2020) (очна участь);

4. 32 Міжнародній науково-практичній конференції "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті" (Харків, 24 – 25 жовтня 2019 р.) (очна участь);

5. 9 Міжнародній науково-технічній конференції «Інформатика, управління та штучний інтелект» (Харків-Краматорськ, 11-13 травня 2022 р.) (очна участь);

6. Міжнародній науково-практичній конференції ФЕНІКС-2022 «Міжнародні економічні відносини. Сталий розвиток України в умовах глобалізації та Європейської економічної інтеграції: проблеми, перспективи, ефективність» (Харків, 31 травня 2022 р.) (очна участь);

7. XXV Міжнародній науково-технічній конференції «Технологія-2022» (Сєверодонецьк, 27 травня 2022) (заочна участь);

8. 18 Науково-практичній міжнародній конференції «Міжнародна транспортна інфраструктура, індустриальні центри та корпоративна логістика» (Харків, 2 – 3 червня 2022 р.) (очна участь);

9. Всеукраїнській науково-практичній конференції «Стан та перспективи розвитку електричного транспорту» (Харків, 23-25 листопада 2022 р.) (очна участь);

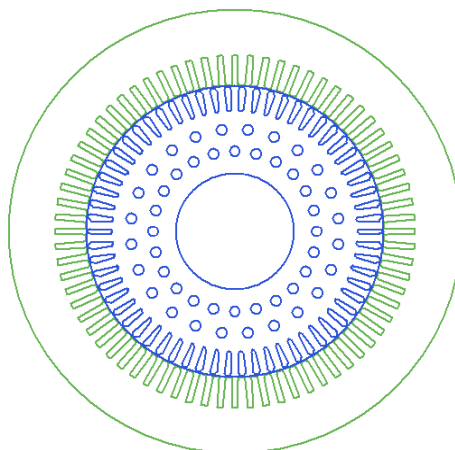
10. 16 Міжнародній науково-практичній конференції «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» ІТРК (Київ, 23 – 24 травня 2023 р.) (заочна участь);

11. 15 Міжнародній науково-практичній конференції студентів і молодих вчених імені Георгія Кірпи «Сучасні транспортні технології», (Львів, 14 грудня 2023 р.) (заочна участь);

12. 11 Міжнародній науково-технічній конференції «Інформатика, управління та штучний інтелект» (Харків, 9 – 12 травня 2024 р.) (очна участь).

Додаток В

Моделювання асинхронного ТЕД АД914У у програмі ANSYS

**Параметри машини**

"Machine Type" "Three Phase
Induction Motor"
"Number of Poles" 6
"Stray Loss Factor" 0.01
"Frictional Loss" 1200 W
"Windage Loss" 1200 W
"Reference Speed" 1110 rpm

Обмотка статора

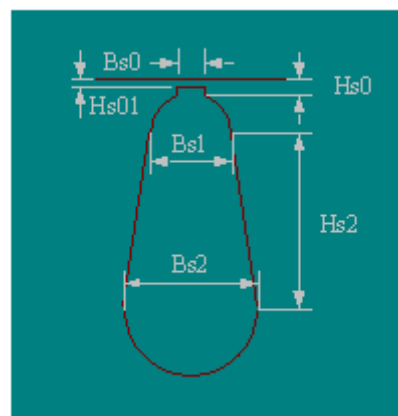
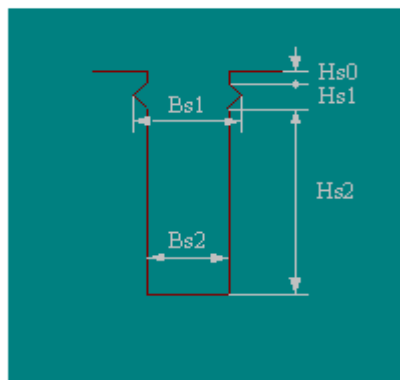
"Winding Layers" 1
"Winding Type" Half-Coiled
"Parallel Branches" 1
"Conductors per Slot" 4
"Number of Strands" 0
"Wire Wrap" 0 mm
"Wire Size" "Width: 7.79mm
Thickness: 2.05mm"

Параметри статора

"Outer Diameter" 770 mm
"Inner Diameter" 510 mm
Length 460 mm
"Stacking Factor" 0.95
"Steel Type" D24_50
"Number of Slots" 72
"Slot Type" 6
"Lamination Sectors" 7
"Press Board Thickness" 3 mm
"Skew Width" 0

Параметры паза статора

Hs0 0.02 mm
Hs1 3.5 mm
Hs2 48 mm
Bs1 13 mm
Bs2 10.4 mm



Параметри ротора

"Stacking Factor" 0.95

"Number of Slots" 62

"Slot Type" 1

"Outer Diameter" 506 mm

"Inner Diameter" 205 mm

Length 465 mm

"Steel Type" D24_50

"Skew Width" 0

"Cast Rotor" true

"Half Slot" false

"Double Cage" false

Паз ротора

Hs0 1 mm

Hs01 0 mm

Hs2 35.5 mm

Bs0 2 mm

Bs1 12 mm

Bs2 6.5 mm

Вентиляція ротора

"Vent Ducts" 0

"Duct Width" 0 mm

"Magnetic Spacer Width" 0 mm

"Duct Pitch" 0 mm

"Holes per Row" 24

"Inner Hole Diameter" 20 mm

"Outer Hole Diameter" 20 mm

"Inner Hole Location" 280 mm

"Outer Hole Location" 355 mm

Стрижні ротора

"Bar Conductor Type"

aluminum_75C

"End Length" 0 mm

"End Ring Width" 45 mm

"End Ring Height" 47 mm

"End Ring Conductor Type"

aluminum_75C

"Winding Connection" Wye
Frequency 55.8 Hz

Setup

"Operation Type" Motor
"Load Type" "Const Power"
"Rated Output Power" 1200 kW
"Rated Voltage" 1870 V
"Rated Speed" 1110 rpm
"Operating Temperature" 75 cel

Результати моделювання асинхронного ТЕД АД914У

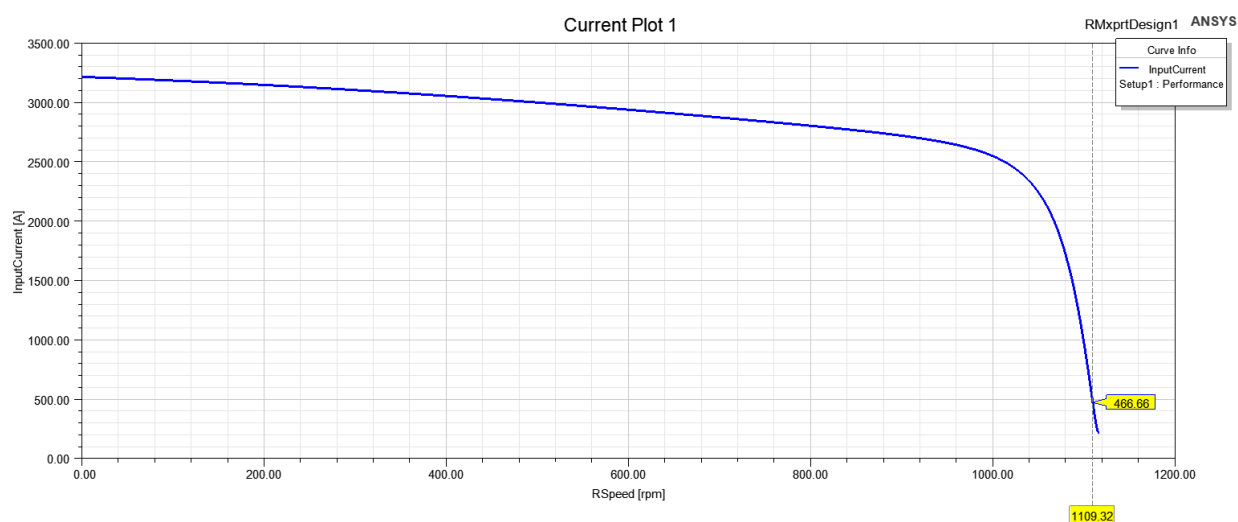


Рисунок В.1 – Вхідний струм (паспортний 450А)

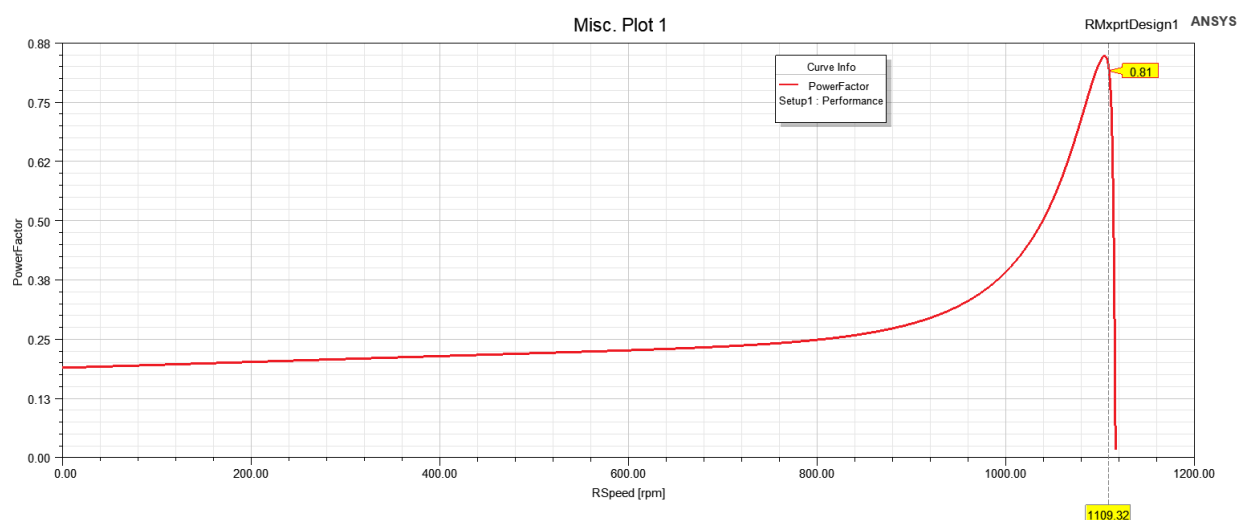


Рисунок В.2 – Коефіцієнт потужності (паспортний 0,88)

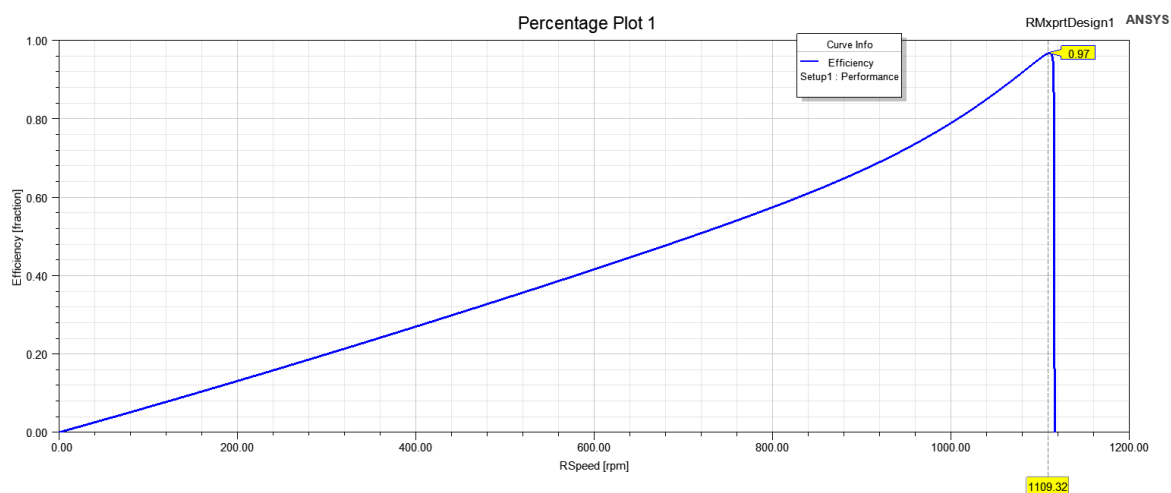


Рисунок В.3 – ККД (паспортний 96,5%)

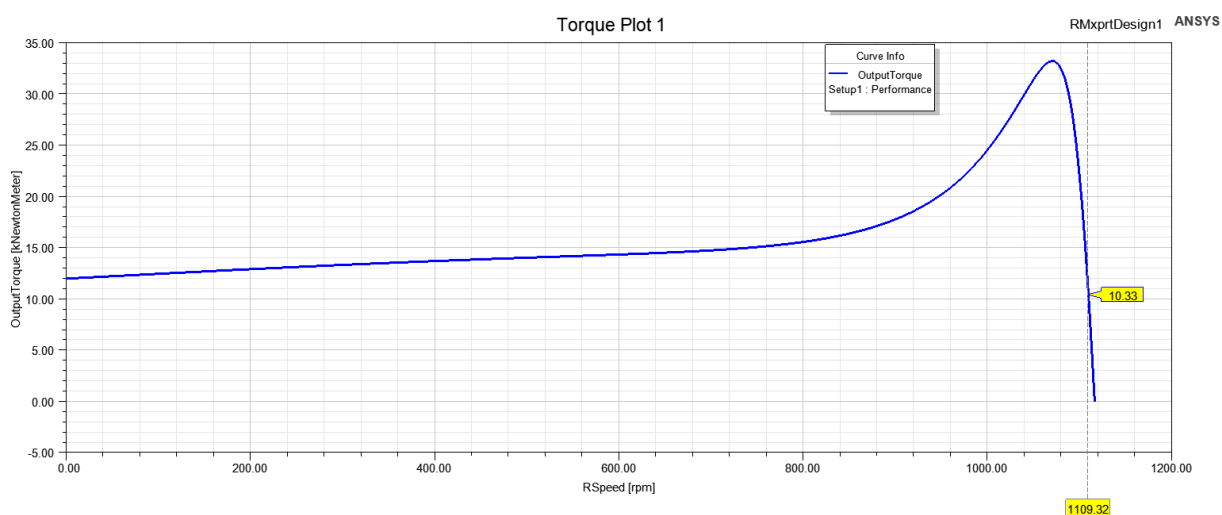


Рисунок В.4 – Момент (паспортний 10400Н·м)

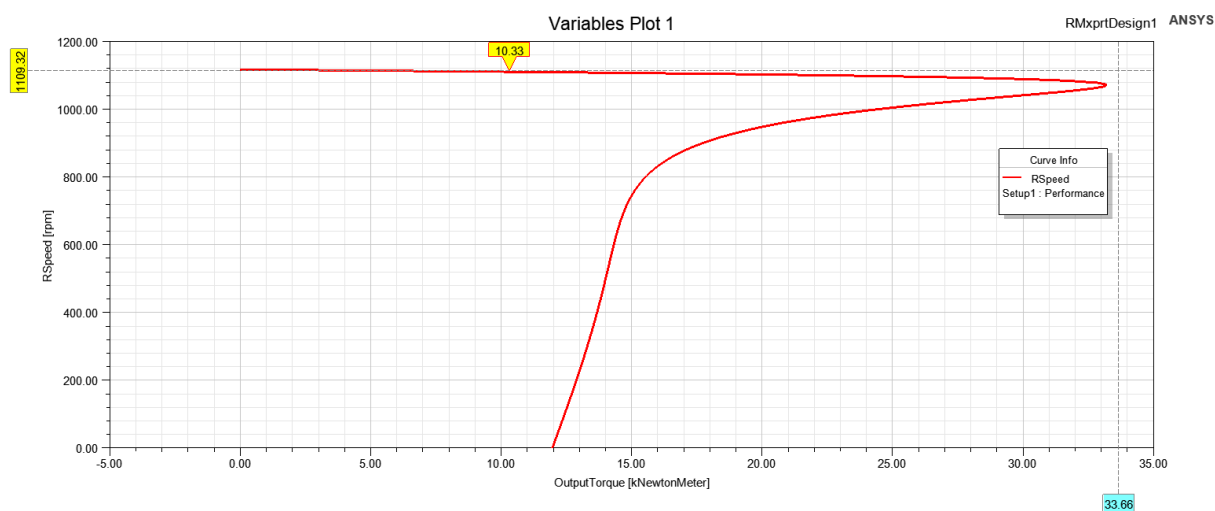


Рисунок В.5 – Механічна характеристика

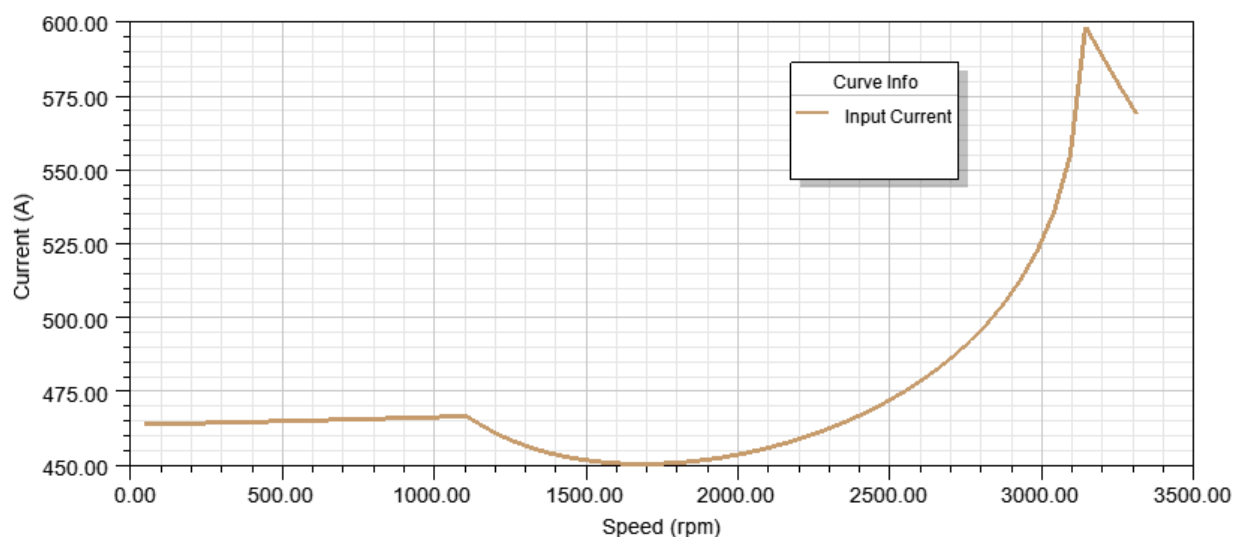


Рисунок В.6 – Струм при підвищенні частоти (перевищення значення після 100 Гц)

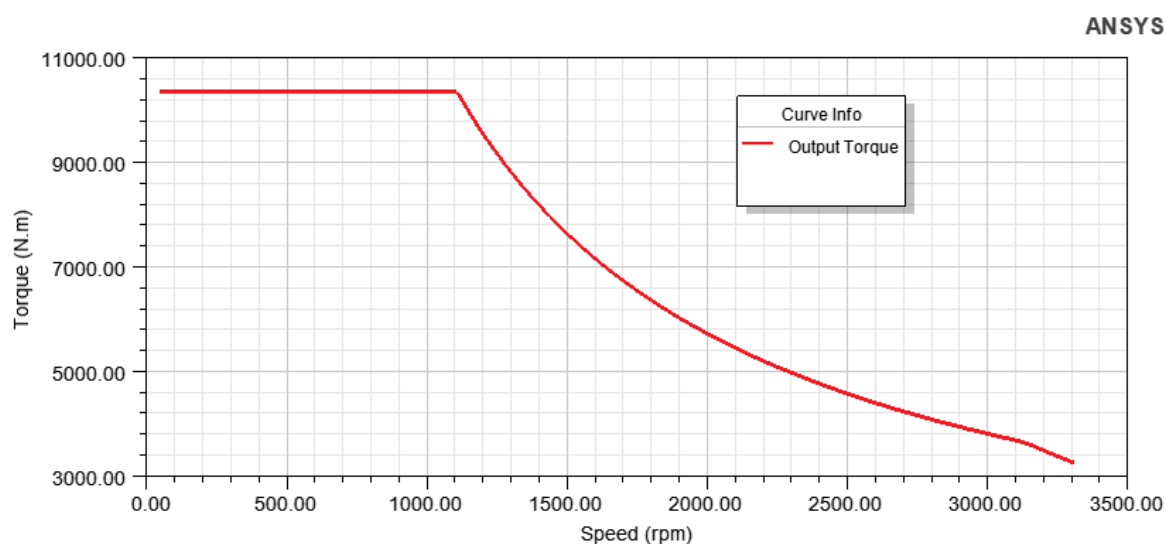


Рисунок В.7 - Момент у разі підвищення частоти (у межах похибки)

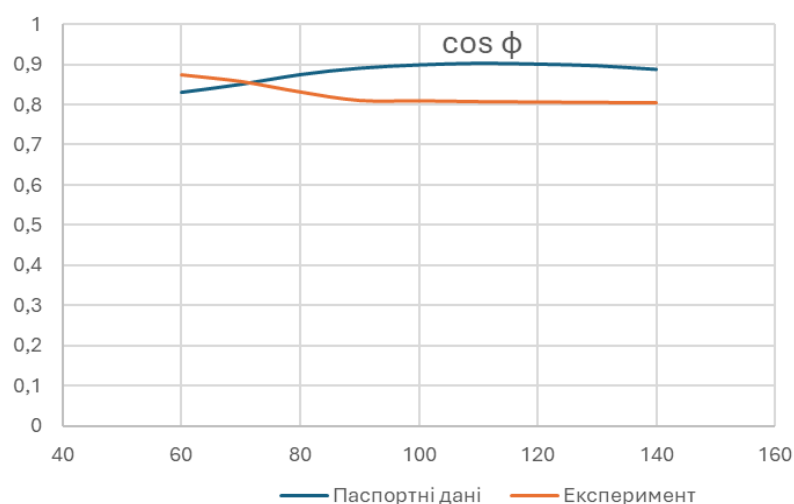


Рисунок В.8 – Коефіцієнт потужності у разі підвищення частоти

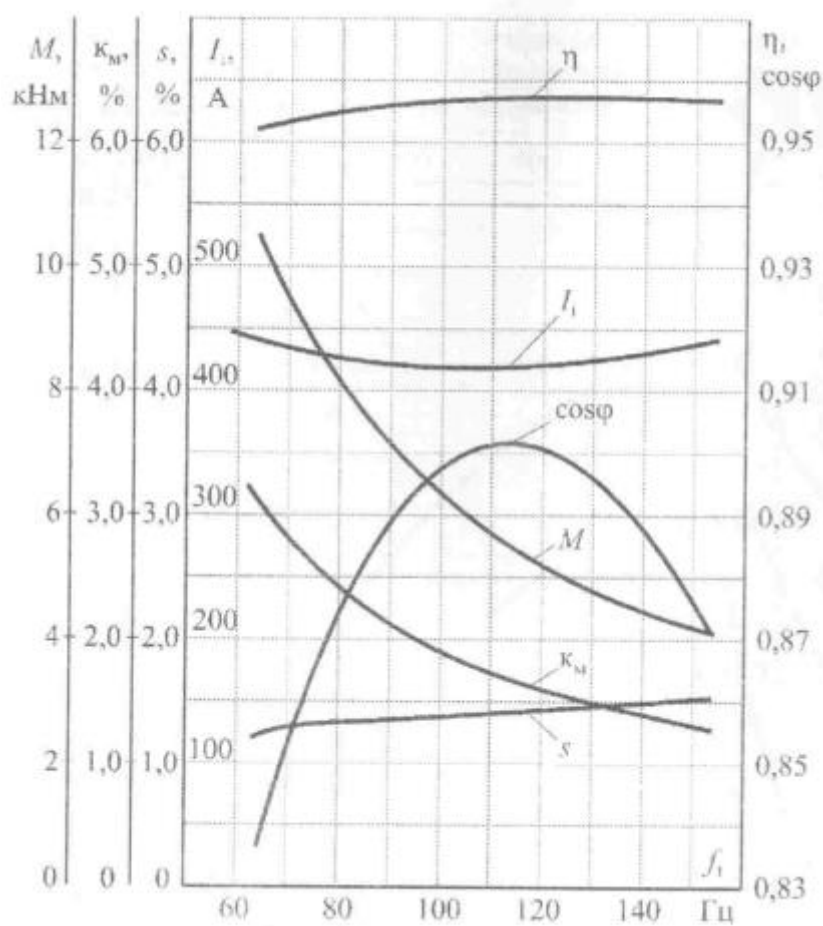


Рисунок В.9 – Довідкові характеристики

Додаток Г

Динамічна модель асинхронного ТЕД АД914У в середовищі Ansys

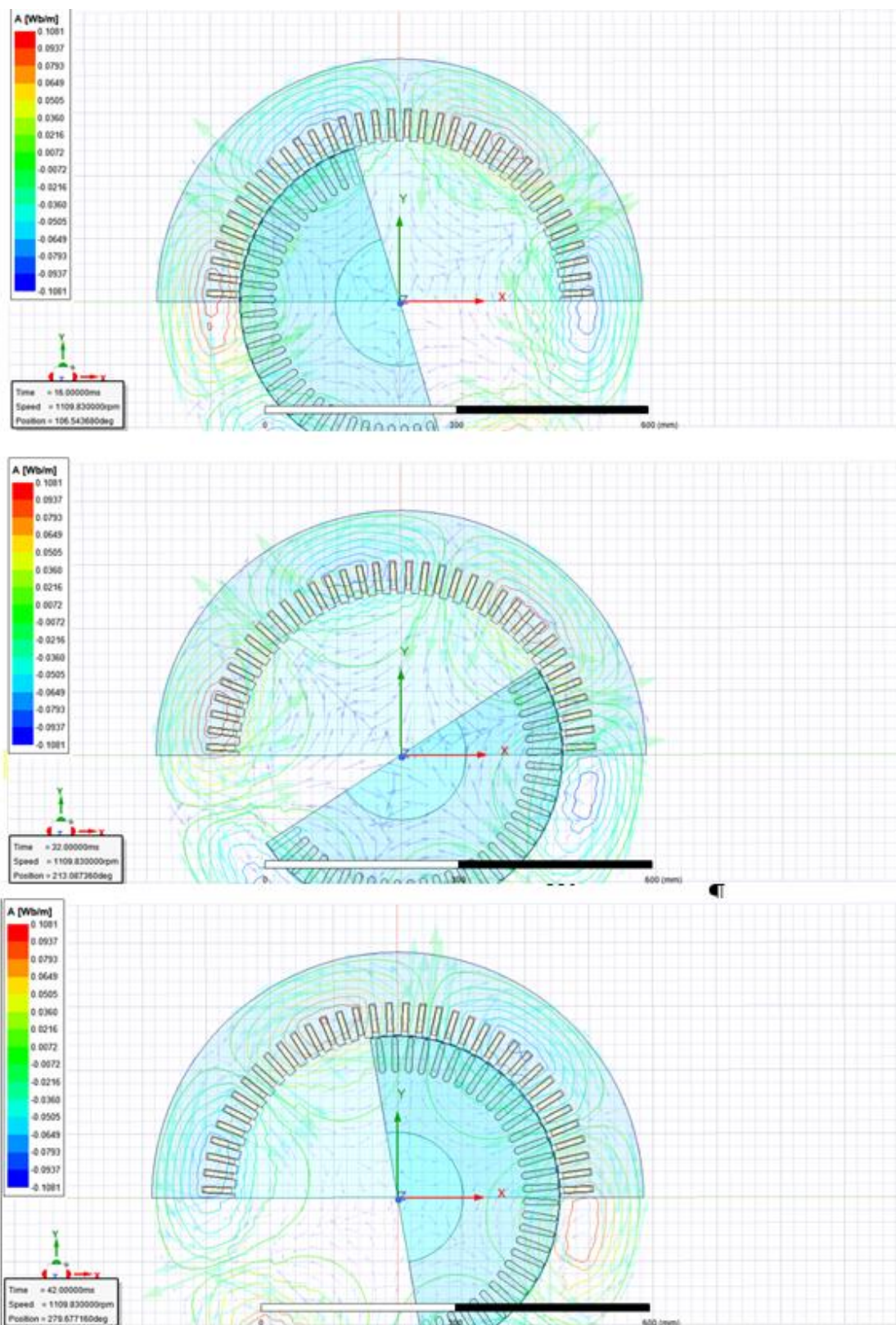


Рисунок Г.1 - Характеристики ліній розподілу магнітного потоку асинхронного ТЕД АД914У

Додаток Д

Чисельна оцінка завадостійкості пристрою оптимального приймання
зондувального сигналу контролю технічного стану асинхронних ТЕД

$$F_{\max} := 2500 \text{ Гц} \quad F_{\max} := 2000 \text{ Гц}$$

$$\Delta t := \frac{1}{2F_{\max}} \quad \Delta t = 2.5 \times 10^{-5}$$

$$N := \frac{T_2 - T_1}{\Delta t} \quad N = 4 \times 10^4$$

$$U_{ms} := 0.042 \text{ В} \quad U_{ms} := 0.5 \text{ В}$$

$$f_s := 420 \text{ Гц} \quad f_s := 2000 \text{ Гц} \quad \phi_{sdeg} := 0$$

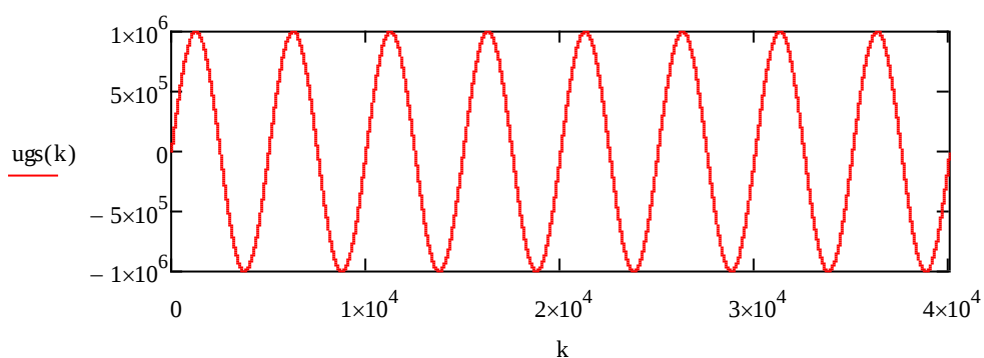
$$\omega_s := 2\pi f_s \quad \phi_s := \pi \cdot \frac{\phi_{sdeg}}{180}$$

$$f_{gs} := \xi \quad \tau_{gs0} := 0.0$$

$$k\tau_{gs0} := \text{floor}\left(\frac{\tau_{gs0}}{\Delta t}\right) \quad k\tau_{gs0} = 0 \times 10^0$$

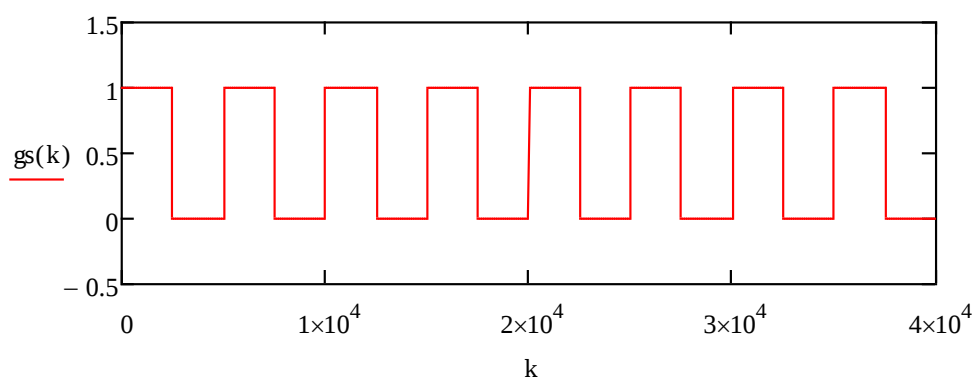
$$u_{gs}(k) := 10^6 \cdot \sin[2\pi f_{gs}(k - k\tau_{gs0})\Delta t]$$

$$k := 0, 1, \dots, N - 1$$

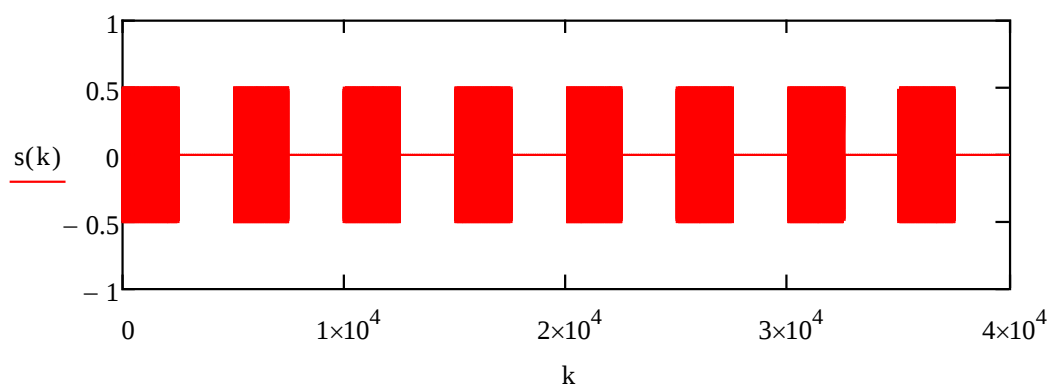


$$v_1(k) := 1 \quad v_2(k) := 0$$

$$g_s(k) := \text{if}(u_{gs}(k) \geq 0, v_1(k), v_2(k))$$



$$s(k) := gs(k) \cdot U_{ms} \cdot \sin(\omega_s \cdot k \cdot \Delta t + \phi_s)$$



$$U_{mc} := 0.01_B \quad f_c := 480 \Gamma_H \quad \phi_{cdeg} := 0$$

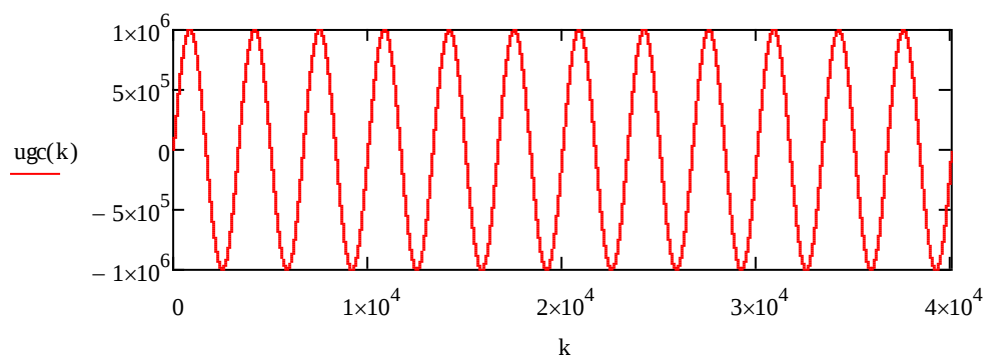
$$\omega_c := 2\pi f_c \quad \phi_c := \pi \cdot \frac{\phi_{cdeg}}{180}$$

$$f_{gc} := 1 \Gamma_H \quad \tau_{gc0} := 0$$

$$k\tau_{gc0} := \text{floor}\left(\frac{\tau_{gc0}}{\Delta t}\right)$$

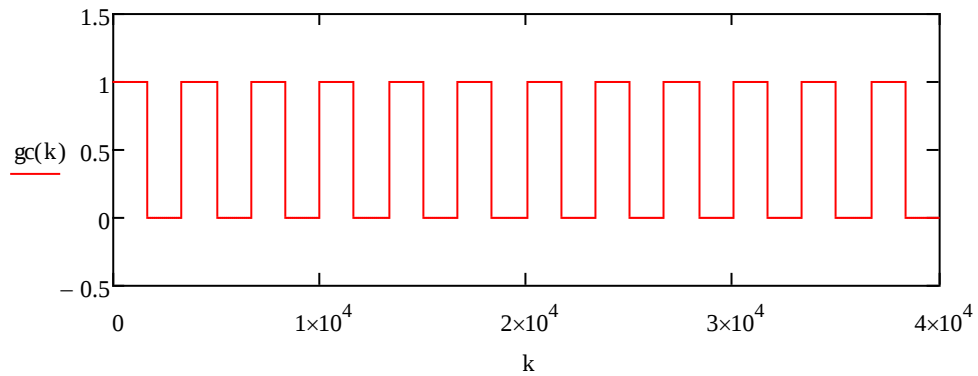
$$k\tau_{gc0} = 0 \times 10^0$$

$$u_{gc}(k) := 10^6 \cdot \sin[2\pi f_{gc}(k - k\tau_{gc0})\Delta t] \quad k := 0, 1..N - 1$$

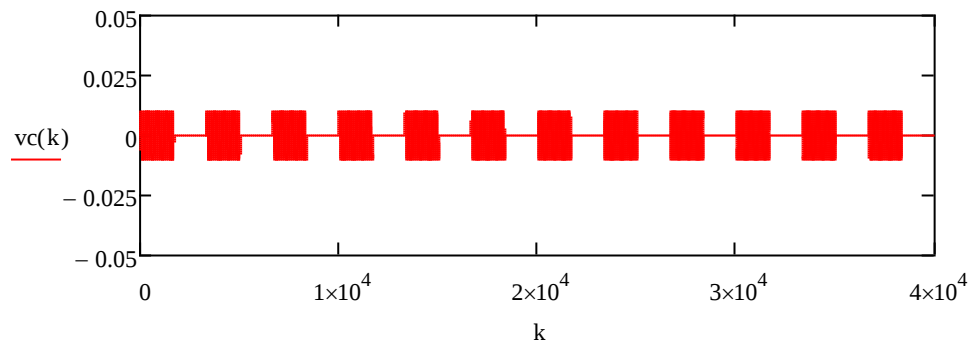


$$\underset{\text{XXXX}}{v1(k)} := 1 \quad \underset{\text{XXXX}}{v2(k)} := 0$$

$$gc(k) := \text{if}(ugc(k) \geq 0, v1(k), v2(k))$$



$$vc(k) := gc(k) \cdot U_{mc} \cdot \sin(\omega_c \cdot k \cdot \Delta t + \phi_c)$$



$$fT := 2\zeta_{\Gamma_{II}} \quad \omega T := 2\pi fT$$

$$vT1(k) := 10 \cdot \sin\left(\omega T \cdot k \cdot \Delta t + 10 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad vT2(k) := 10 \cdot \sin\left(2\omega T \cdot k \cdot \Delta t + 20 \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

$$vT3(k) := 10 \cdot \sin\left(3\omega T \cdot k \cdot \Delta t + 30 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad vT4(k) := 10 \cdot \sin\left(4\omega T \cdot k \cdot \Delta t + 40 \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

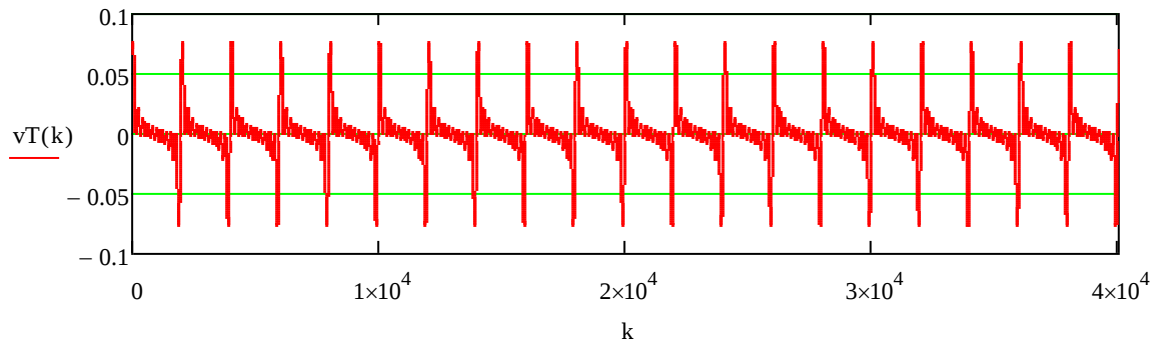
$$vT5(k) := 10 \cdot \sin\left(5\omega T \cdot k \cdot \Delta t + 50 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad vT6(k) := 10 \cdot \sin\left(6\omega T \cdot k \cdot \Delta t + 60 \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

$$vT7(k) := 10 \cdot \sin\left(7\omega T \cdot k \cdot \Delta t + 70 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad vT8(k) := 10 \cdot \sin\left(8\omega T \cdot k \cdot \Delta t + 80 \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

$$vT9(k) := 10 \cdot \sin\left(9\omega T \cdot k \cdot \Delta t + 90 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad vT10(k) := 10 \cdot \sin\left(10\omega T \cdot k \cdot \Delta t + 100 \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

$$KuT := 0.01 \quad KuT := 0.001$$

$$vT(k) := KuT \cdot (vT1(k) + vT2(k) + vT3(k) + vT4(k) + vT5(k) + vT6(k) + vT7(k) + vT8(k) + vT9(k) + vT10(k))$$



$$fQ := 50 \Gamma_{II}$$

$$\omega Q := 2\pi fQ$$

$$UmQ1 := 1_B$$

$$vQ1(k) := UmQ1 \cdot \sin\left(\omega Q \cdot k \cdot \Delta t + 10 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad vQ2(k) := 0.05UmQ1 \cdot \sin\left(2\omega Q \cdot k \cdot \Delta t + 20 \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

$$vQ3(k) := 0.262UmQ1 \cdot \sin\left(3\omega Q \cdot k \cdot \Delta t + 30 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad vQ4(k) := 0.05UmQ1 \cdot \sin\left(4\omega Q \cdot k \cdot \Delta t + 40 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \dots$$

$$vQ5(k) := 0.12UmQ1 \cdot \sin\left(5\omega Q \cdot k \cdot \Delta t + 50 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad vQ6(k) := 0.05UmQ1 \cdot \sin\left(6\omega Q \cdot k \cdot \Delta t + 60 \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

$$vQ7(k) := 0.06UmQ1 \cdot \sin\left(7\omega Q \cdot k \cdot \Delta t + 70 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad vQ8(k) := 0.05UmQ1 \cdot \sin\left(8\omega Q \cdot k \cdot \Delta t + 80 \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

$$vQ9(k) := 0.0285UmQ1 \cdot \sin\left(9\omega Q \cdot k \cdot \Delta t + 90 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad vQ10(k) := 0.05UmQ1 \cdot \sin\left(10\omega Q \cdot k \cdot \Delta t + 10 \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

$$vQ11(k) := 0.0173UmQ1 \cdot \sin\left(11\omega Q \cdot k \cdot \Delta t + 110 \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

$$vQ12(k) := 0.05UmQ1 \cdot \sin\left(12\omega Q \cdot k \cdot \Delta t + 120 \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

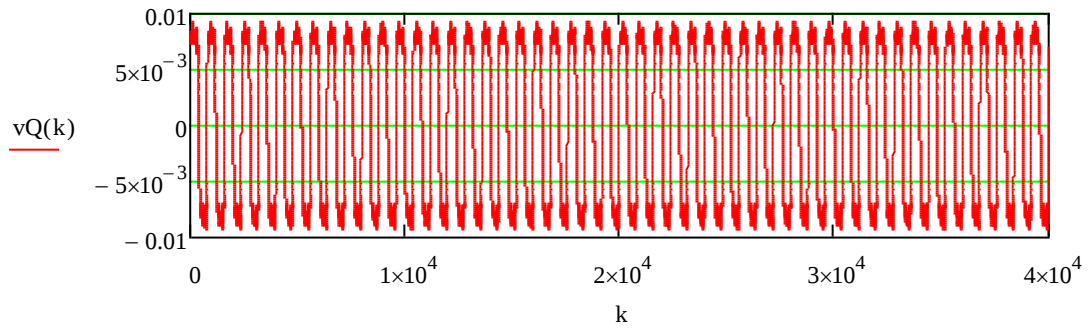
$$vQ13(k) := 0.0145UmQ1 \cdot \sin\left(13\omega Q \cdot k \cdot \Delta t + 130 \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

$$vQ14(k) := 0.05UmQ1 \cdot \sin\left(14\omega Q \cdot k \cdot \Delta t + 140 \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

$$vQ15(k) := 0.01UmQ1 \cdot \sin\left(15\omega Q \cdot k \cdot \Delta t + 150 \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

$$KuQ := 0.1$$

$$KuQ := 0.01$$



$$U0P := 1 \quad U0P := 0.1$$

$$UmP := 0.5 \cdot B$$

$$fP := 25 \cdot \Gamma_H \quad fP := 27 \cdot \Gamma_H$$

$$\omega P := 2\pi \cdot fP \quad \phi P_{deg} := 45$$

$$TP1 := 0.4_c$$

$$k1 := \text{floor}\left(\frac{TP1}{\Delta t}\right) \quad k1 = 1.6 \times 10^4$$

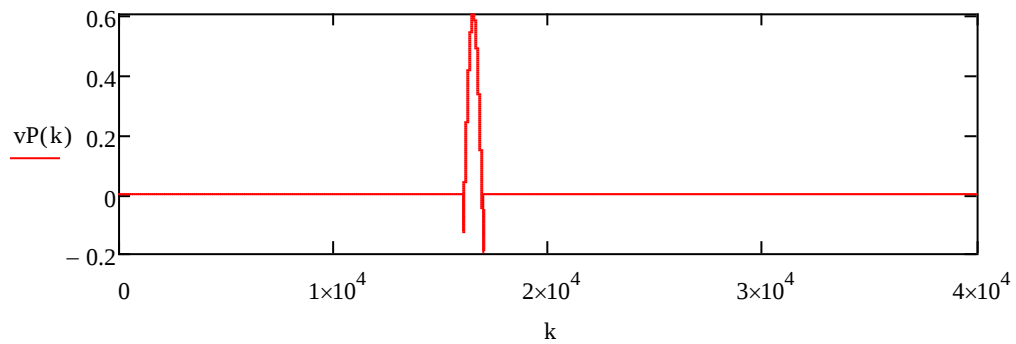
$$\tau P := 0.05 \cdot \Gamma_H \quad \tau P := 0.025 \cdot \Gamma_H$$

$$\Delta k := \text{floor}\left(\frac{\tau P}{\Delta t}\right) \quad \Delta k = 1 \times 10^3$$

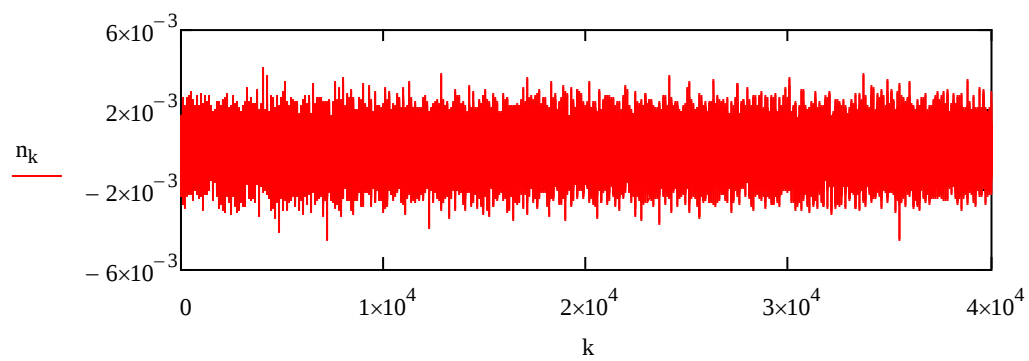
$$vv(k) := U0P + UmP \cdot \sin\left(\omega P \cdot k \cdot \Delta t + \frac{\phi P_{deg} \cdot \pi}{180}\right)$$

$$kuP := 1$$

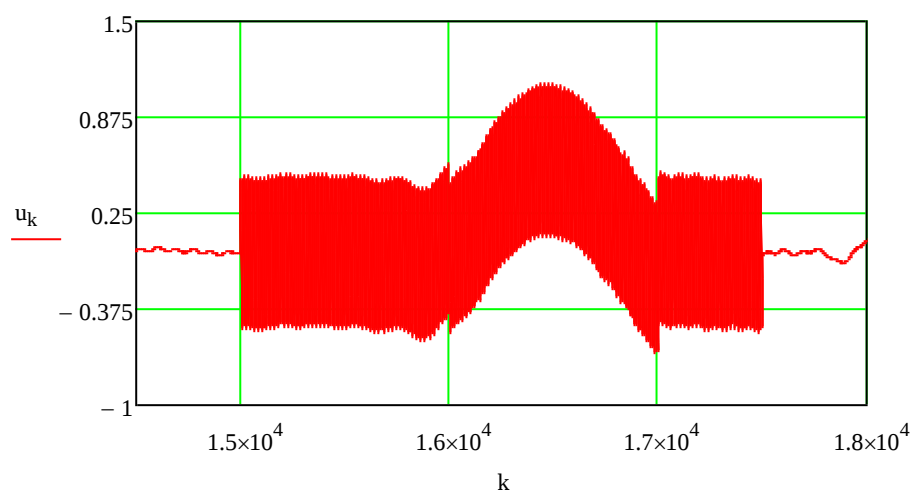
$$vP(k) := kuP \cdot [0 \cdot (k < k1) + vv(k) \cdot [k1 \leq k < (k1 + \Delta k)] + 0 \cdot [k \geq (k1 + \Delta k)]]$$



$$\sigma := 0.19 \quad \sigma := 0.001$$

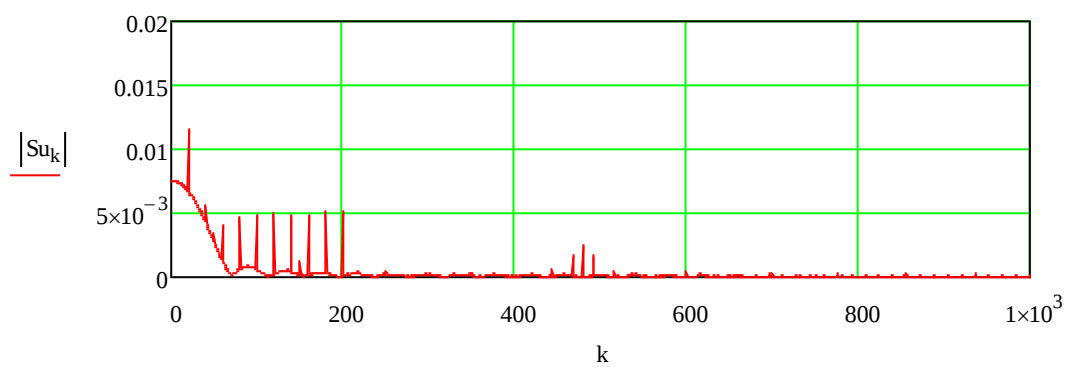


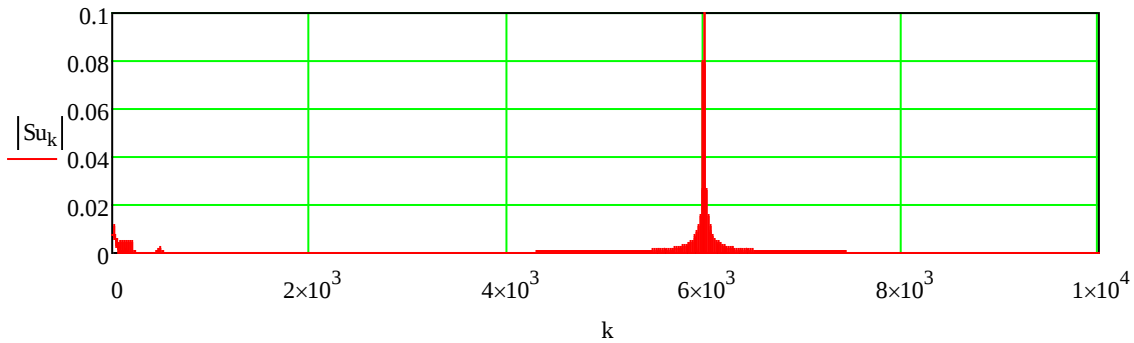
$$u_k := s(k) + vc(k) + vT(k) + vQ(k) + vP(k) + n_k$$



$$k := 0..N - 1$$

$$Su := \text{CFFT}(u)$$





$$z1_k := s(k) + vc(k) + vT(k) + vQ(k) + vP(k)$$

$$z0_k := vc(k) + vT(k) + vQ(k) + vP(k)$$

$$E1 = 6.685802 \times 10^{-2}$$

$$E1 := \sum_{k = 0}^{N-1} \left[\left(z1_k \right)^2 \cdot \Delta t \right]$$

$$E2 := \sum_{k = 0}^{N-1} \left[\left(z0_k \right)^2 \cdot \Delta t \right]$$

$$E2 = 4.347467 \times 10^{-3}$$

$$Bs := \sum_{k = 0}^{N-1} \left(z1_k \cdot z0_k \cdot \Delta t \right)$$

$$Bs = 4.352743 \times 10^{-3}$$

$$N0 := \frac{\sigma^2}{Fmax}$$

$$lms := 0.1$$

$$xx = 2.5 \times 10^4$$

$$xx := \sqrt{\left[\frac{2E1}{N0} \frac{\left(1 + \frac{E2}{E1} - 2 \cdot \frac{Bs}{E1} \right)}{4} \right]}$$

$$\Phi(\underline{xx}) := 0.5 \cdot \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{xx}{\sqrt{2}}\right) \right)$$

$$Pem(\underline{xx}) := 1 - \Phi(\underline{xx})$$

$$Pem(\underline{xx}) = 0 \times 10^0$$

Додаток Е

Визначення меж Крамера - Рао оцінок амплітуди та початкової фази
тестового сигналу

$$T1 := 0 \quad T2 := 0.01 \quad \Delta F := 16000$$

$$\tau_p := 0.1 \cdot (T2 - T1) \quad \ln05 := 10^{-2} \text{ A} \quad I_p := 0.001, 0.0011..1 \text{ A}$$

$$\sigma_{I1}(I_p) := \frac{1}{3 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta F \cdot (T2 - T1 - \tau_p)}{\ln05^2} + \frac{2 \cdot \Delta F \cdot \tau_p}{\ln05^2 + I_p^2}}}$$

$$\sigma_{\phi1}(I_p) := \frac{1}{3 \cdot \ln s \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta F \cdot (T2 - T1 - \tau_p)}{\ln05^2} + \frac{2 \cdot \Delta F \cdot \tau_p}{\ln05^2 + I_p^2}}}$$

$$\tau_{p_{\text{AAAA}}} := 0.5 \cdot (T2 - T1) \quad \sigma_{\phi \text{deg}1}(I_p) := \frac{\sigma_{\phi1}(I_p)}{\pi} \cdot 180$$

$$\sigma_{I2}(I_p) := \frac{1}{3 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta F \cdot (T2 - T1 - \tau_p)}{\ln05^2} + \frac{2 \cdot \Delta F \cdot \tau_p}{\ln05^2 + I_p^2}}}$$

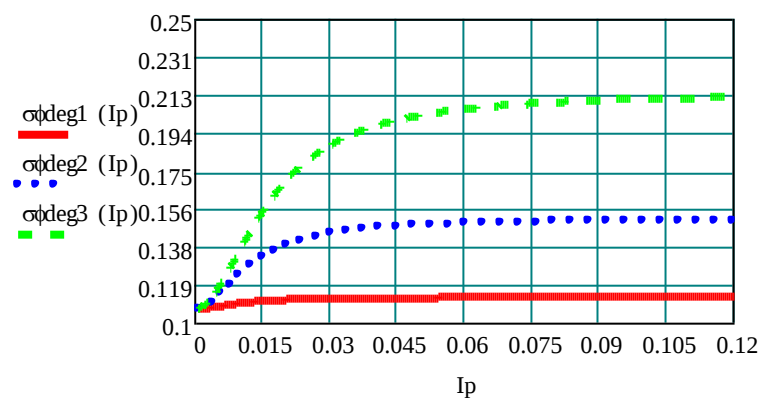
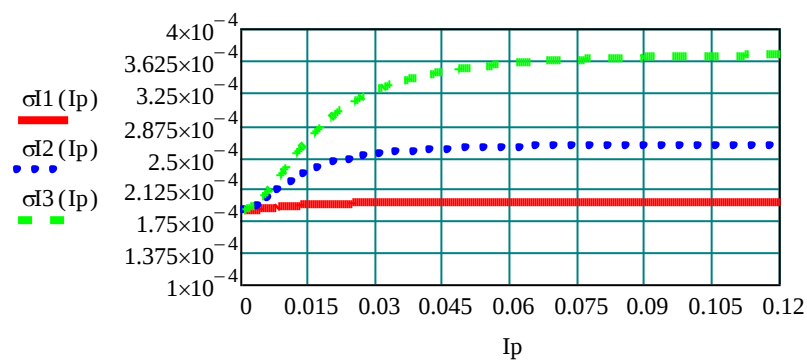
$$\sigma_{\phi2}(I_p) := \frac{1}{3 \cdot \ln s \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta F \cdot (T2 - T1 - \tau_p)}{\ln05^2} + \frac{2 \cdot \Delta F \cdot \tau_p}{\ln05^2 + I_p^2}}}$$

$$\tau_{p_{\text{AAAA}}} := 0.75 \cdot (T2 - T1) \quad \sigma_{\phi \text{deg}2}(I_p) := \frac{\sigma_{\phi2}(I_p)}{\pi} \cdot 180$$

$$\sigma_{I3}(I_p) := \frac{1}{3 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta F \cdot (T2 - T1 - \tau_p)}{\ln05^2} + \frac{2 \cdot \Delta F \cdot \tau_p}{\ln05^2 + I_p^2}}}$$

$$\sigma\phi_3(I_p) := \frac{1}{3 \cdot I_{ms} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta F \cdot (T_2 - T_1 - \tau_p)}{\ln 05^2} + \frac{2 \cdot \Delta F \cdot \tau_p}{\ln 05^2 + I_p^2}}}$$

$$\sigma\phi_{deg3}(I_p) := \frac{\sigma\phi_3(I_p)}{\pi} \cdot 180$$



$$I_{ms} := 0.01 \text{ A}$$

$$T_1 := C_C$$

$$T_2 := 0.01 \text{ C}$$

$$\Delta F := 200, 201 \dots 16000 \text{ } \Gamma_H$$

$$\tau_p := 0.5 \cdot (T_2 - T_1)$$

$$\ln 05 := 10^{-3} \text{ A}$$

$$I_p := 1 \text{ A}$$

$$\sigma I_1(\Delta F) := \frac{1}{3 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta F \cdot (T_2 - T_1 - \tau_p)}{\ln 05^2} + \frac{2 \cdot \Delta F \cdot \tau_p}{\ln 05^2 + I_p^2}}}$$

$$\sigma\phi1(\Delta F) := \frac{1}{3 \cdot \text{Ims} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta F \cdot (T2 - T1 - \tau p)}{\text{In05}^2} + \frac{2 \cdot \Delta F \cdot \tau p}{\text{In05}^2 + \text{Ip}^2}}}$$

$$\sigma\phi\text{deg1}(\Delta F) := \frac{\sigma\phi1(\Delta F)}{\pi} \cdot 180$$

$$\text{Ims} := 0.05 \text{ A}$$

$$\tau p := 0.5 \cdot (T2 - T1)$$

$$\text{In05} := 10^{-3} \text{ A}$$

$$\sigma\text{I2}(\Delta F) := \frac{1}{3 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta F \cdot (T2 - T1 - \tau p)}{\text{In05}^2} + \frac{2 \cdot \Delta F \cdot \tau p}{\text{In05}^2 + \text{Ip}^2}}}$$

$$\sigma\phi2(\Delta F) := \frac{1}{3 \cdot \text{Ims} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta F \cdot (T2 - T1 - \tau p)}{\text{In05}^2} + \frac{2 \cdot \Delta F \cdot \tau p}{\text{In05}^2 + \text{Ip}^2}}}$$

$$\text{Ims} := 0.1 \text{ A}$$

$$\sigma\phi\text{deg2}(\Delta F) := \frac{\sigma\phi2(\Delta F)}{\pi} \cdot 180$$

$$\tau p := 0.5 \cdot (T2 - T1)$$

$$\text{In05} := 10^{-3} \text{ A}$$

$$\sigma\text{I3}(\Delta F) := \frac{1}{3 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta F \cdot (T2 - T1 - \tau p)}{\text{In05}^2} + \frac{2 \cdot \Delta F \cdot \tau p}{\text{In05}^2 + \text{Ip}^2}}}$$

$$\sigma\phi3(\Delta F) := \frac{1}{3 \cdot \text{Ims} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta F \cdot (T2 - T1 - \tau p)}{\text{In05}^2} + \frac{2 \cdot \Delta F \cdot \tau p}{\text{In05}^2 + \text{Ip}^2}}}$$

$\sigma_{deg3}(\Delta F) := \frac{\sigma_3(\Delta F)}{\pi} \cdot 180$

