

ДНІПРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА  
МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДНІПРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА  
МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

МУРАДЯН ЛЕОНТІЙ АБРАМОВИЧ

УДК 629.46-027.45(043.5)

ДИСЕРТАЦІЯ

РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ  
ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ НА ЕТАПАХ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ

Спеціальність 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Галузь знань 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

  
\_\_\_\_\_  
(підпис)

Л. А. Мурадян  
\_\_\_\_\_  
(ініціали та прізвище здобувача)

Науковий консультант: Мямлін Сергій Віталійович, доктор технічних наук,  
професор

ДНІПРО – 2020

## АНОТАЦІЯ

*Мурадян Л. А.* Розвиток наукових основ забезпечення надійності вантажних вагонів на етапах життєвого циклу. – 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» (27 – Транспорт). – Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2020.

Дисертація присвячена проблемі поліпшення надійності вантажних вагонів та безпеки руху на залізничному транспорті. У рамках досліджень у теоретичному аспекті розроблено наукові основи формування показників надійності вантажних вагонів на етапах життєвого циклу, що на практиці дозволяє значно зменшити експлуатаційні витрати за можливості подовження терміну експлуатації з урахуванням корегування системи технічного обслуговування та ремонту.

У першому розділі виконано аналіз технічного стану парку вантажних вагонів України та їх відмов, розглянуто методи поліпшення надійності вантажних вагонів на етапах життєвого циклу, зроблено викладки щодо теоретичних положень дослідження показників надійності вантажних вагонів. При цьому аналіз стану безпеки руху у вагонному господарстві залізниць України та відмов вантажних вагонів показав, що в результаті відчеплень вагонів у поточний ремонт через несправності вузлів вагонне господарство зазнало збитків на рівні 4 503 грн/ т·км, що припадають на один вагон. Рівень збитків є досить значним, і чим більше відбувається відчеплень через незабезпечення гарантованого пробігу вантажних вагонів, тим більше коштів вкладає вагонне господарство в їх життєвий цикл. Особливо актуальним на сьогодні є забезпечення надійності вантажних вагонів на основних етапах життєвого циклу (проектування, виготовлення та експлуатація), оскільки використовуваний парк рухомого складу є морально та фізично застарілим, що вимагає інших підходів до повноти проведення і

якості технічного обслуговування та ремонтів. Також це стосується й нових вантажних вагонів, які нещодавно виготовлені й для яких встановлено гарантований пробіг до ремонту. Однак ці терміни практично не дотримуються на експлуатованому парку вантажних вагонів. Тому й для нових вантажних вагонів, які тільки виготовляються, необхідно розробити заходи із забезпечення надійності на всіх етапах їх життєвого циклу.

У другому розділі виконано теоретичні дослідження показників надійності вантажних вагонів на етапах життєвого циклу. При цьому удосконалено алгоритм дослідження надійності вантажних вагонів на етапах життєвого циклу, виконано оцінку показників надійності елементів вантажних вагонів із застосуванням класичної теорії ймовірностей, здійснено прогнозування показників надійності вантажних вагонів з урахуванням терміну їх експлуатації. На основі існуючої теорії надійності запропоновано методологію визначення показників надійності вантажних вагонів, що містить методи визначення показників, які базуються на аналізі та синтезі теоретико-експериментальних даних про технічний стан та показники надійності вагона як механічної багатоелементної системи. Для прогнозу величини зношування деталей вантажних вагонів запропоновано математичну модель, що спирається на закони розподілу випадкових величин і дозволяє враховувати показники надійності всіх основних комплектуючих елементів протягом життєвого циклу. Для прогнозування напрацювання окремих деталей та вузлів або вагона в цілому протягом життєвого циклу розроблено математичну модель технічного стану вантажного вагона, на основі якої розроблено послідовність визначення показників надійності вагонів для прогнозування кількісних показників надійності деталей та вузлів або вагона в цілому.

У третьому розділі виконано математичне моделювання процесу формування показників надійності вантажних вагонів на етапах життєвого циклу. При цьому здійснено формування показників надійності вагонів на етапі проєктування, визначено показники надійності вагонів на етапі

виготовлення та проведено оцінку показників надійності вантажних вагонів на етапі експлуатації. У результаті виконання теоретичних досліджень взаємодії елементів гальмівної системи вантажного вагона удосконалено математичну модель теплового балансу, використовуючи яку на етапі життєвого циклу – проектування, можна підбирати колодки з необхідними фізико-хімічними, механічними та триботехнічними властивостями для забезпечення ефективної роботи гальмівної системи та необхідного рівня надійності в процесі експлуатації вантажних вагонів. Під час виконання технічних дій (технічного обслуговування та ремонтів) та впровадження інноваційних конструктивних та технологічних рішень у процесі технічного утримання та ремонту вагонів протягом життєвого циклу отримано залежність граничного ресурсу структурних елементів вагона, що дозволяє максимально наблизити прогнозовані дані до результатів експлуатації та визначити показники надійності вантажних вагонів та підвищення рівня безпеки руху із зменшенням експлуатаційних витрат. Для визначення періоду безпечної експлуатації вагонів та прогнозування відповідних економічних показників, що характеризують експлуатаційні та ремонтні витрати, сформовано поняття та отримано вираз для коефіцієнта функціональної надійності вантажних вагонів на етапі експлуатації їх життєвого циклу. Для визначення надійності вантажних вагонів на етапі життєвого циклу – виготовлення комплектуючих та вузлів, удосконалено метод визначення відмов і оцінки надійності вагона, що передбачає можливість прогнозування відмов у експлуатації з урахуванням особливостей технологічного процесу виготовлення складових елементів вагона із запобіганням виникненню дефектів. У результаті досліджень надійності вантажних вагонів на етапі життєвого циклу – експлуатація, запропоновано визначення термінів проведення регламентних видів технічного обслуговування, поточного, деповського та капітального ремонтів вантажних вагонів з визначенням таких параметрів експлуатаційної надійності вантажних вагонів, як

коефіцієнт готовності, ймовірності безвідмовної роботи та виконання завдань.

У четвертому розділі виконано формування системи дослідження надійності вантажних вагонів різних конструкцій. У першому підрозділі розроблено індивідуальні моделі прогнозу показників надійності вантажних вагонів протягом життєвого циклу з урахуванням ймовірнісного характеру відмов. У другому підрозділі розроблено систему дослідження показників надійності вантажних вагонів з урахуванням поточного технічного стану на етапах життєвого циклу. Для формування системи дослідження надійності вантажних вагонів протягом життєвого циклу запропоновано математичну модель зміни технічного стану ресурсовизначальних елементів вагона з послідовністю визначення показників надійності вагонів для прогнозування кількісних показників надійності окремих деталей та вузлів або вагона в цілому з урахуванням як відмов вантажних вагонів, так і зміни фізико-механічних характеристик ресурсовизначальних елементів. Для встановлення експлуатаційних характеристик нових і модернізованих вантажних вагонів було удосконалено метод їх оцінки, що включає контрольовані параметри для системи дослідження надійності вантажних вагонів як свідчення (симптоми), які визначаються протягом випробувань та під час експлуатації і дають можливість більш точно визначити показники надійності вантажних вагонів за комплексними ознаками.

У п'ятому розділі наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень показників надійності вантажних вагонів. При цьому виконано оцінку експлуатаційних характеристик нових і модернізованих вантажних вагонів, планування експерименту з визначення показників надійності вантажних вагонів, наведено результати експлуатаційних випробувань вантажних вагонів, варіанти поліпшення показників їх надійності та подано техніко-економічну оцінку життєвого циклу вантажного вагона з урахуванням запропонованих технічних і технологічних рішень. У результаті виконаних експериментальних

досліджень розроблено методи визначення надійності нових і модернізованих вантажних вагонів з використанням апарату нечіткої логіки. Це дозволяє в системі досліджень надійності вантажних вагонів отримати підсумковий коефіцієнт впевненості гіпотез при заданих відношеннях апіорних ймовірностей справедливості гіпотез з певними ознаками несправностей вантажних вагонів. У результаті техніко-економічного обґрунтування запропонованих технічних та технологічних рішень забезпечення надійності можна досягти зменшення вартості життєвого циклу піввагона на 14,2 тис. грн. Оскільки робочий парк піввагонів на залізницях України становить 83 302 одиниці, то загальний економічний ефект від застосування запропонованих рішень становить 1 183 млн грн.

**Ключові слова:** показники надійності, технічне обслуговування, ремонт, вантажний вагон, життєвий цикл, проектування, технологія виготовлення, експлуатація

## ABSTRACT

Muradian L.A. Development of scientific bases for ensuring the reliability of freight cars in the stages of the life cycle. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Thesis for a Doctor of Technical Sciences degree by specialty 05.22.07 – rolling stock of railways and traction of trains (Branch of knowledge 27 – Transport ). – Dniprovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Dnipro, 2020.

The dissertation is devoted to the problem of increasing the reliability of freight cars in order to increase the lifespan of the life cycle and improve the state of safety of the movement. In the theoretical aspect, the scientific basis for the formation of freight cars reliability indicators has been developed at the stages of the life cycle, which in practical terms can significantly reduce operating costs with the possibility of lengthening the useful life, taking into account the correction of the maintenance and repair system.

In the first section, the analysis of the technical condition of the park and the failures of freight cars of Ukraine was carried out, the methods of increasing the reliability of carriages of cars at the stages of the life cycle were considered, the calculations concerning the theoretical positions of the study of reliability indicators of freight cars were made. At the same time, the analysis of the traffic safety situation in the railway carriage of railways of Ukraine and the failures of freight cars showed that as a result of detachment of cars in the current repair due to malfunction of the units, the wagon economy suffered losses at the level of 4,503 UAH / tone-km, falling on one car. The level of damage is quite significant and, the more there is a connection between the lacks of guaranteed run of freight cars, the more car economy invests in their life cycle. Today, the safety of freight cars at all stages of the life cycle is of particular importance, since the fleet of rolling stock is morally and physically aged, which requires other approaches to the completeness and quality of technical maintenance and repairs. This also applies to new freight wagons that are newly manufactured and for which the guaranteed mileage is before repair. However, these terms are practically non-compliant with the exploited fleet of freight cars. Therefore, for new freight cars that are only being manufactured, it is necessary to develop measures to ensure reliability at all stages of their life cycle.

In the second section theoretical studies of reliability of freight cars at the stages of the life cycle have been conducted. In this case, improvement of the algorithm for the study of the reliability of freight cars at the stages of the life cycle, an estimation of the indicators of wear of the elements of the carriage of cars with the use of the classical probability theory was carried out, the pro-harrowing of reliability indicators of freight cars, taking into account the term of their operation. On the basis of the existing reliability theory, a methodology for determining the reliability of freight cars, which includes methods for determining indicators at all stages of the car life cycle, is based on the analysis and synthesis of theoretical and experimental data on the technical condition and basic parameters of the reliability of the car as a mechanical multi-element system. To predict the value of the wear

of freight cars parts, a mathematical model that takes into account the laws of the distribution of random variables is proposed and allows us to take into account the reliability indices of all the basic components during the life cycle. In order to forecast the progress of individual parts and units or the car as a whole during the life cycle a mathematical model of the technical condition of the freight cars was developed, on the basis of which a sequence of determination of reliability indexes of cars was developed for forecasting of quantitative indicators of reliability of parts and units or a car as a whole.

In the third section, mathematical modeling of the process of formation of reliability indicators of freight cars at the stages of the life cycle of design was performed. In this case, the formation of reliability indicators of cars at the design stage was completed, reliability indicators of wagons were determined at the manufacturing stage and an assessment of reliability indicators of freight cars at the stage of operation was carried out. As a result of theoretical research on the interaction of the elements of the brake system of the freight cars, the mathematical model of the thermal balance has been improved, using which at the stage of the life cycle - designing, it is possible to select the pads with the necessary physical, chemical, mechanical and tribotechnical properties to ensure the effective operation of the braking system and to provide the required level of reliability in the process of operation of freight wagons. During the implementation of technical actions (maintenance and repair) and the introduction of innovative structural and technological solutions in the process of technical maintenance and repair of cars during the life cycle, the dependence of the marginal resource of the structural elements of the car has been obtained, which allows maximum approximation of forecast data to the results of operation and to form the most technically grounded the system of technical maintenance of wagons with reduction of operational expenses. To determine the period of safe operation of wagons and forecasting of relevant economic indicators that characterize maintenance and repair costs, the concept is formulated and an expression for the complex index of operational reliability of van-cars at the appropriate stage of the life cycle is obtained. To



determine the suitability of freight cars at the stage of the life cycle - the manufacture components, the method of determining the off-languages and assessing the reliability of the car, which envisages the possibility of forecasting the DM in operation, taking into account the peculiarities of the technological process of preparing the components of the car, is improved with the prevention of defects. As a result of studies on the reliability of freight cars in the life cycle - operation, it is proposed to determine the timing of regulatory maintenance, current, depot and capital repairs of freight cars, with the definition of parameters of operational reliability of freight cars: readiness coefficient, probability of failure-free operation and performance tasks.

In the fourth section, the formation of a system for investigating the reliability of freight cars of various structures has been completed. In the first subdivision, individual models of forecasting the reliability of freight wagons during the life cycle are developed, taking into account the probabilistic nature of the off-languages. In the second subdivision the system of research of indicators of reliability of freight cars with the account of the current technical condition at all stages of a life cycle is developed. For the formation of the system of research of the reliability of the freight cars throughout the life cycle, a mathematical model for changing the technical condition of the resource-determining elements of the car, with a sequence of determining the reliability indices of wagons for predicting the quantitative reliability indices of individual parts and units or wagon in this unit, is proposed, taking into account both freight car bills, and changes in the physical and mechanical characteristics of resource-determining elements. To establish the operational characteristics of new and upgraded freight cars, a method of their evaluation was improved, which includes controlled parameters for the system of studying the reliability of freight cars as evidence (symptoms), which are determined during the tests and during operation, and provide an opportunity to more accurately determine the reliability of freight cars on complex signs.

The fifth section presents the results of theoretical and experimental studies of freight cars reliability indices. In this case, the evaluation of the operational

characteristics of new and upgraded van cars, the planning of the experiment for determining the reliability of freight cars, the results of operational tests of freight cars, options for increasing the reliability of freight cars and given technically - economic estimation of the life cycle of freight car taking into account the proposed technical and technological decisions. As a result of the experimental research on determining the reliability of new and modernized freight cars, their methodology was developed using fuzzy logic apparatus. This allows in the system of studies of the reliability of freight cars on the basis of knowledge about the connection between the signs of malfunctions and the most trouble of the corresponding freight car, formed on the basis of repair and operational car depot, to obtain the final coefficient of confidence of the hypotheses with given ratios a priori probabilities of the validity of hypotheses with certain signs of malfunctions of freight cars. As a result of the feasibility study of the proposed technical and technological solutions for ensuring reliability, a reduction in the cost of the lifecycle of a gondola can be achieved by 14.2 thousand UAH. Since the work park of gondola cars on the Ukrainian railways is 83 302 units, the overall economic effect of the proposed solutions is UAH 1,183 million.

**Key words:** reliability indicators, maintenance, repair, freight car, life cycle, design, production technology, operation

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Основні праці:

1. Мурадян Л. А., Анофриев В. Г. Исследование действующих условий эксплуатации и анализ причин сокращения ресурса работы железнодорожных колес. *Вісник Дніпропетровського нац. ун-ту залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*. 2010. Вип. 34. С. 206–210.
2. Решетняк Ю. В., Решетняк Д. Ю., Гордійчук О. В., Мурадян Л. А., Бруякін В. К., Бабаев А. М., Міщенко А. А. Модернизация пятникового узла. *Вагонный парк*. 2011. № 5. С. 7–10.
3. Бабаев А. В., Книшук О. С., Исопенко И. В., Мурадян Л. А. Дисковые тормоза грузовых вагонов. *Вагонный парк*. № 12. 2011. С. 8–13.

4. Порівняльний аналіз причин утворення дефектів на поверхні кочення вуглецевих та підвищеної твердості мікролегованих суцільнокатаних коліс / [Узлов І. Г., Узлов К. І., Книш А. В., Хулін А. М., Дементьєва Ж. А., Мямлін С. В., Бруякін В. К., Мурадян Л. А.]. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии* : сб. научн. тр. Дніпропетровськ : ІЧМ НАН України, 2011. С. 3–12.
5. Савчук О. М., Бруякін В. К., Мурадян Л. А., Мищенко А. А., Лутанин С. В., Можейко Е. Р. Надежность полувагонов нового поколения. *Вагонный парк*. 2011. № 9. С. 11–16.
6. Неисправности авторежимов грузовых вагонов / [Кутишенко А. В., Бабаев А. М., Кривошея А. Н., Глешенкова В. С., Мурадян Л. А.]. *Вагонный парк*. 2012. № 2. С. 34–36.
7. On the concept of selection of steels for high-strength railroad wheels / О. Р. Ostash, V. H. Anofriev, I. M. Andreiko, L. A. Muradyan, V. V. Kulyk. *Materials Science*. 2013. Vol. 46. Iss. 6. P. 697–703.
8. Мямлін С. В., Скалозуб В. В., Мурадян Л. А. Адаптивні Байєсівські моделі оцінювання показників надійності вантажних вагонів на етапах життєвого циклу. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2018. Вип. 182. С. 80–91.
9. Мурадян Л. А. Определение количества объектов для проведения эксплуатационных испытаний вагонной техники. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2013. Вип. 139. С. 83–86.
10. Мурадян Л. А., Бабаєв А. М., Сорокалет А. В. Исследование эксплуатационных свойств накладок для дисковых тормозов пассажирских вагонов производства ПАО "Трибо". *Залізничний транспорт України*. 2013. № 3/4. С. 66–68.
11. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Винокурова С. В. Пути развития, тенденции и перспективы дальнейшего совершенствования тормозной колодки рельсового подвижного состава. *Вагонный парк*. 2015. № 5-6. С. 32–34.
12. Испытания перспективных тормозных колодок на железных дорогах Украины / [Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Винстрот Бернд Уве, Муковоз С. П.]. *Локомотив-Информ*. 2015. № 7-8. С. 20–22.
13. Мямлін С. В., Мурадян Л. А., Барановський Д. М. Проблема визначення терміну «надійність». Методологія побудови та вивчення надійності вантажних вагонів. *Наука та прогрес транспорту*. 2015. № 6 (60). С. 110–117. doi: 10.15802/stp2015/57034.
14. Мямлін С. В., Мурадян Л. А. Застосування основних законів розподілу випадкових величин для визначення показників надійності вагонів. *Збірник наукових праць ДЕТУТ*. Сер.: «Транспортні системи і технології». 2015. Вип. 26–27. С. 172–180.
15. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Мищенко А. А. Методологические основы определения эксплуатационных характеристик несамоходного подвижного состава. *Наука та прогрес транспорту*. 2015. № 1 (61). С. 169–179.

16. Мурадян Л. А. Розробка основних елементів для побудови системи дослідження надійності вантажних вагонів. *Збірник наукових праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи і технології»*. 2015. Вип. 29. С. 29–36.
17. Бубнов В. М., Мурадян Л. А., Манкевич М. П., Шапошник В. Ю. Особливості технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів з підвищеними показниками надійності. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2016. Вип. 160 С. 11–17.
18. Мурадян Л. А. Ймовірно-фізичний підхід для описання та визначення надійності вагонів. *Наука та прогрес транспорту*. 2016. № 5 (64). С. 168–177.
19. Мурадян Л. А. Описання відмов вагона при технологічному процесі виготовлення структурних елементів. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2016. Вип. 164. С. 62–68.
20. Мурадян Л. А. Граничний ресурс вагона в процесі експлуатації. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2016. Вип. 166. С. 17–23.
21. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Подосенов Д. О. Повышение надежности грузовых вагонов с применением новых технологий изготовления и восстановления рабочих поверхностей. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2016. № 11. С. 49–54.
22. Мурадян Л. А., Подосенов Д. О. Підвищення міжремонтного ресурсу візків вантажних вагонів. Модель геометрії зносу підп'ятника. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. № 1 (65). С. 61–69.
23. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Подосенов Д. О. Теоретическая зависимость величины износа пары трения "пятник - подпятник" от пробега грузового вагона. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. № 6. С. 79–87.
24. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю. Автоматичний ідентифікатор окремих частин транспортного засобу при впровадженні нових концепцій системи технічного обслуговування та ремонту. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2017. № 4(125). С. 44–50.

#### **Додаткові праці:**

25. Эксплуатационные испытания полувагонов нового поколения / [Савчук О. М., Бруякин В. К., Мурадян Л. А., Мищенко А. А., Коробка Б. А., Можейко Е. Р.]. *Вагонный парк*. 2009. № 5-6. С. 30–32.
26. Эксплуатационные испытания полувагонов нового поколения / [Савчук О. М., Бруякин В. К., Мищенко А. А., Мурадян Л. А., Коробка Б. А., Можейко Е. Р.]. *Вагонный парк*. 2009. № 7-8. С. 8–11.
27. Бабаев А. М., Мурадян Л. А., Винокурова С.В. О тормозных колодках дорог Украины. *Вагоны и вагонное хозяйство*. 2010. № 4. С. 43–44.
28. Бабаев А. М., Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю. Удосконалення вузла передачі стоянкового гальма вантажного вагона. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2013. Вип. 139. С. 94–97.
29. Мурадян Л. А. Відмови та безвідмовність вагонів як складові експлуатаційної надійності. *Вісник НТУ «ХП»*. Сер.: *Механіко-технологічні системи та комплекси*. Харків : НТУ «ХП», 2015. № 52(1161). С.127–130.

30. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю. К вопросу о планах испытаний надежности механических систем. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2015. Вип. 157. С.119–127.
31. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю. Исследование литых железнодорожных колес в эксплуатации производства компании “Griffin Wheel Company” (США). *Бюллетень научных работ Брянского филиала МИИТ*. Брянск, 2015. Вып. 7. С. 65–70.
32. Мурадян Л. А. О ресурсе литых железнодорожных колес компании "Griffin Wheel Company" (США). *Инновации и исследования в транспортном комплексе: Материалы III Международной научно-практической конференции*. Курган, 2015. Часть I (в двух частях). С. 219–222.
33. Мурадян Л. А. Побудова системи дослідження надійності вантажних вагонів. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2015. № 10. С. 90–95.
34. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Мищенко А. А. Опытные маршруты ДИИТ-УЗ: «Опытная эксплуатация – научные обоснования – массовое внедрение». *Вагонный парк*. 2016. № 5–6. С. 57–59.
35. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Пулария А. Л. Устройства пассивной защиты современного подвижного состава железных дорог. *Вагонный парк*. 2016. № 5-6. С. 8–11.
36. Muradian L. Building models of freight cars refusals involving Bayesian approach. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2016. С. 54–60.
37. Мурадян Л. А., Мямлин С. В., Шапошник В. Ю. Определение стратегии технического обслуживания и ремонта вагонной техники. *Транспортная инфраструктура Сибирского района*. Материалы седьмой Всероссийской научно-технической конференции. Иркутск, 2016. С. 369–373.
38. Мурадян Л. А., Барановский Д. Н. Визначення параметрів експлуатаційної надійності вантажних вагонів у системі технічного обслуговування та ремонту. *Залізничний транспорт України*. 2016. № 1-2- С. 35–40.
39. Мурадян Л. А. Побудова системи технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів. *Залізничний транспорт України*. 2017. № 1. С. 36–40.
40. Мурадян Л. А., Подосьонов Д. О. Збільшення міжремонтного ресурсу вантажних вагонів з використанням дискретного розподілення твердості матеріалу. *Вагонный парк*. 2017. № 3-4. С. 62–64.
41. Мямлин С. В., Мурадян Л. А., Подосьонов Д. О. Підвищення надійності п'ятникового вузла вантажного вагону. *Залізничний транспорт України*. 2018. № 1. С. 34–41.
42. Шаблон для виміру дефектів залізничних коліс: Пат UA 123075 U Україна : МПК В61F 5/12, В61F 5/14 № 123075; заяв. 24.07.2017; публ. 12.03.2018. Бюл. № 5.
- Наукові праці апробаційного характеру:**
43. Бруякин В. К., Мурадян Л. А., Мищенко А. А., Дедаева Т. И. К вопросу об износе гребней вагонных колес. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 66-ї Міжнародної науково-практ. конф. Днепропетровск, 2006. С. 78.

44. Бруякин В. К., Мурадян Л. А., Мищенко А. А. К вопросу опытных эксплуатационных испытаний безасбестовых тормозных колодок. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 67-ї Міжнародної науково-практ. конф. Днепропетровск, 2007. С. 54–55.
45. Савчук О. М., Бруякін В. К., Мурадян Л. А., Міщенко А. А. Дослідження зразків нової техніки. *Тези доповідей 68-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»*. Дніпропетровськ, 2008. С. 75–76.
46. Мурадян Л. А., Мищенко А. А. Испытания новых образцов вагонной техники в опытных маршрутах. *Проблеми механіки залізничного транспорту: Безпека руху, динаміка, міцність рухомого складу, енергозбереження*. Матеріали XII Міжнародної конф. Днепропетровск, 2008. С. 107.
47. Савчук О. М., Бруякин В. К., Мурадян Л. А., Мищенко А. А. Эксплуатационные испытания полувагонов нового поколения. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 69-ї Міжнародної науково-практ. конф. Днепропетровск, 2009. С. 56–57.
48. Мурадян Л. А., Бабаев А. М., Винокурова С. В. Совершенствование тормозных колодок железных дорог Украины. *Безопасность движения поездов*. Материалы X научно-практ. конф. Москва, 2009. С. VII-16.
49. Мурадян Л. А., Анофрієв В. Г., Міщенко А. А. Аналіз пошкоджень на поверхні кочення коліс техніки. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 70-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2010. С. 61–62.
50. Бруякін В. К., Бабаєв А. М., Мурадян Л. А., Міщенко А. А. Дослідження зносу гальмових колодок різних виробників в експлуатації. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 70-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2010. С. 70–71.
51. Решетняк Ю. В., Гордійчук О. В., Мурадян Л. А., Бабаєв А. М., Міщенко А. А. Совершенствования пятникового узла грузового вагона. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 71-ї Міжнародної науково-практ. конф. Днепропетровск, 2011. С. 82.
52. Анофрієв В. Г., Мурадян Л. А. Дослідження зносостійкості коліс різних марок сталей. *Проблеми механіки залізничного транспорту: Безпека руху, динаміка, міцність рухомого складу, енергозбереження*. Матеріали XIII Міжнародної конф. Дніпропетровськ, 2012. С. 91–92.
53. Бруякин В. К., Мурадян Л. А., Мищенко А. А. Исследование показателей надежности в эксплуатации новой вагонной техники. *Проблеми механіки залізничного транспорту: Безпека руху, динаміка, міцність рухомого складу, енергозбереження*. Матеріали XIII Міжнародної конф. Дніпропетровськ, 2012. С. 93.
54. Бабаев А. М., Мурадян Л. А., Сороколет А. В., Винокурова С. В. Эксплуатационные испытания тормозных накладок дискового тормоза. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 72-ї Міжнародної науково-практ. конф. Днепропетровск, 2012. С. 60–61.

55. Мурадян Л. А., Шатунов А. В. К вопросу о повреждениях цельнокатанных колес в эксплуатации. *Транспортная инфраструктура сибирского района*. Материалы четвертой всероссийской научно-техн. конф. с международным участием. Иркутск, 2013. С. 368–369.
56. Мурадян Л. А., Міщенко А. А., Бруякин В. К. Исследование эксплуатационных свойств надежности опытных вагонов в замкнутых маршрутах УЗ. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту*: матеріали 73-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2013. С. 52.
57. Бабаев А. М., Мурадян Л. А., Муковоз С. П. Эксплуатационные испытания всесезонных тормозных колодок пассажирских вагонов. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 74-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2014. С. 60–61.
58. Мямлин С. В., Мурадян Л. А., Дузик В. Н. Анализ показателей надежности полувагонов модели 12-7023-01 на тележках 18-7020 в эксплуатации. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 75-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2015. С. 25–26.
59. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю. Випробування гальмової колодки 2тр-155 з двома рознесеними чавунними вставками. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 75-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ. 2015. С. 29–30.
60. Бабаченко А. И., Мямлин С. В., Мурадян Л. А., Кныш А. В., Кононенко А. А. Эксплуатационные свойства железнодорожных колес, изготовленных различными способами производства. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 75-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2015. С. 79–81.
61. Мямлин С. В., Мурадян Л. А., Бабаев А. М., Пуларія А. Л., Шапошник В. Ю. Проблеми існуючої системи технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів в Україні. *Проблеми механіки залізничного транспорту: Безпека руху, динаміка, міцність рухомого складу, енергозбереження*. Матеріали XIV Міжнародної конф. Дніпропетровськ. 2016. С. 89–91.
62. Мурадян Л. А., Міщенко А. А., Шапошник В. Ю. Проблеми визначення надійності піввагонів моделі 12-7023-01 на візках 18-7020 за результатами дослідної експлуатації в маршрутах ДПТ-УЗ. *Проблеми механіки залізничного транспорту: Безпека руху, динаміка, міцність рухомого складу, енергозбереження*. Матеріали XIV Міжнародної конф. Дніпропетровськ. 2016. С. 86–87.
63. Мурадян Л. А. Застосування байєсівського підходу до побудови моделей відмов вантажних вагонів. *Проблеми механіки залізничного транспорту: Безпека руху, динаміка, міцність рухомого складу, енергозбереження*. Матеріали XIV Міжнародної конф. Дніпропетровськ, 2016. С. 84–86.
64. Мурадян Л. А., Мищенко А. А., Шапошник В. Ю. Опытные маршруты ДИИТ: «Опытная эксплуатация – научные обоснования – массовое внед-

- рение». *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 76-ї Міжнародної науково-практ. конф.. Дніпропетровськ, 2016. С. 34–35.
65. Мурадян Л. А., Подосьонов Д. О. Аналіз пошкоджень вантажних вагонів на ПАТ «Українська залізниця». *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 76-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2016. С. 22–24.
66. Мурадян Л. А., Міщенко А. А., Шапошник В. Ю., Бубнов В. М., Тусіков Є. К., Ревякін В. В. Дослідження показників надійності піввагонів моделі 12-1905 на візках 18-1711 в експлуатації. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 77-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпро, 2017. С. 41–43.
67. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю. Перспективи експлуатації литих колес на залізничних дорогах України. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 77-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпро, 2017. С. 280–282.
68. Мурадян Л. А. Індивідуальна модель прогнозу показників надійності вантажних вагонів. *Тези доповідей 78-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»*. Дніпро, 2018. С. 37–38.
69. Мурадян Л. А., Бабаєв А. М., Мищенко А. А. Применения профиля ДИИТ-УЗ в модернизированных тележках грузовых вагонов. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 78-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпро, 2018. С. 39–40.
70. Мурадян Л. А., Подосьонов Д. О. Підвищення міжремонтного ресурсу п'ятникового вузла вантажних. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 78-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпро, 2018. С. 40–41.
71. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 58830. Літературний твір наукового характеру «Програма та методика експлуатаційних випробувань вантажних напіввагонів моделі 12-7023 на візках моделі 18-7020» / С. В. Мямлін, Л. А. Мурадян, В. Ю. Шапошник, А. А. Міщенко. зареєстр. 26.02.2015. 1 с.
72. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 60176. Літературний твір наукового характеру «Программа и методика эксплуатационных испытаний колес грузовых вагонов» / С. В. Мямлін, Л. А. Мурадян, В. Ю. Шапошник, В. Г. Анофрієв. зареєстр. 17.06.2015. 1 с.
73. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 60178. Літературний твір наукового характеру «Програма та методика дослідження експлуатаційних властивостей боковин візків з використанням пружних елементів, що зменшують не обресорені частини візків вантажних вагонів» / С. В. Мямлін, Л. А. Мурадян, В. Ю. Шапошник, А. А. Міщенко. зареєстр. 17.06.2015. 1 с.



## ЗМІСТ

ВСТУП .....	19
РОЗДІЛ 1 .....	31
АНАЛІЗ ВІДМОВ, МЕТОДИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ ВАГОНІВ .....	31
1.1 Аналіз технічного стану парку вантажних вагонів України та їх відмов.....	31
1.2 Методи підвищення надійності вантажних вагонів на етапах життєвого циклу.....	40
1.3 Теоретичні положення дослідження показників надійності вантажних вагонів .....	44
1.4 Висновки до розділу 1 .....	70
РОЗДІЛ 2 .....	73
ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ НА ЕТАПАХ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ .....	73
2.1 Удосконалення алгоритму дослідження надійності вантажних вагонів на етапах життєвого циклу .....	73
2.2 Оцінка показників зносу елементів вантажних вагонів із застосуванням класичної теорії ймовірностей .....	80
2.3 Прогнозування показників надійності вантажних вагонів з урахуванням терміну їх експлуатації.....	92
2.4 Висновки до розділу 2.....	105
РОЗДІЛ 3 .....	107
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ НА ЕТАПАХ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ .....	107
3.1 Формування показників надійності вагонів на етапі проєктування.....	107
3.1.1 Параметрична модель елементів вагона «міцність – навантаження» .....	107
3.1.2 Математичне моделювання надійності вагонів на етапі проєктування.....	112
3.1.3 Визначення граничного ресурсу складових елементів вантажних вагонів .....	145
3.1.4 Формування коефіцієнта функціональної надійності вагонів .....	150
3.2 Визначення показників надійності вагонів на етапі виготовлення .....	156
3.2.1 Технологічні особливості виготовлення деталей вантажних вагонів .....	156

3.2.2 Вплив технології виготовлення складових елементів на надійність вантажного вагона .....	163
3.3 Оцінка показників надійності вантажних вагонів на етапі експлуатації.....	168
3.4 Висновки до розділу 3.....	188
РОЗДІЛ 4 .....	190
ФОРМУВАННЯ СИСТЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ РІЗНИХ КОНСТРУКЦІЙ .....	190
4.1 Розробка індивідуальних моделей прогнозу показників надійності вантажних вагонів протягом життєвого циклу з урахуванням ймовірнісного характеру відмов .....	190
4.2 Створення системи дослідження показників надійності вантажних вагонів з урахуванням поточного технічного стану на етапах життєвого циклу .....	225
4.3 Висновки до розділу 4.....	242
РОЗДІЛ 5 .....	244
РЕЗУЛЬТАТИ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ .....	244
5.1 Оцінка експлуатаційних характеристик нових і модернізованих вантажних вагонів.....	244
5.2 Планування експерименту з визначення показників надійності вантажних вагонів.....	250
5.3 Результати експлуатаційних випробувань вантажних вагонів .....	266
5.4 Аналіз результатів порівняльних експлуатаційних випробувань залізничних коліс (середньоміцних та високоміцних) вантажних вагонів та різних методів виготовлення (литих та суцільнокатаних) .....	288
5.5 Техніко-економічна оцінка життєвого циклу вантажного вагона з урахуванням запропонованих технічних та технологічних рішень .....	295
5.6 Висновки до розділу 5.....	312
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	314
БІБЛІОГРАФІЯ .....	319
ДОДАТОК А.....	340
ДОДАТОК Б .....	357
ДОДАТОК В.....	364
ДОДАТОК Г .....	371

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** Залізничний транспорт займає значну частину ринку транспортних послуг, пов'язаних з організацією та забезпеченням процесу перевезення вантажів. Одним із його головних завдань є забезпечення безпеки руху поїздів, на яку безпосередньо впливає надійність елементів рухомого складу та інфраструктури. Підвищення рівня безпеки руху поїздів є важливою складовою ефективної роботи й розвитку залізничного транспорту. Проблема підтримання необхідного рівня безпеки руху поїздів багато в чому визначається технічним станом вагонного парку й рівнем його технічного обслуговування та ремонту.

Вантажні перевезення є основною дохідною діяльністю вітчизняних залізниць, при цьому відмови вантажних вагонів, за статистичними даними на залізничному транспорті, займають значну частку в усій структурі відмов.

Як відомо, на надійність вагонів впливає багато факторів, серед яких: особливості конструкції й технології виготовлення всіх їх складових, умови експлуатації й система технічного обслуговування та ремонту.

Надійність вантажних вагонів під час експлуатації забезпечується за рахунок науково обґрунтованої й економічно доцільної системи їх технічного обслуговування та ремонту, важливим показником якої є обсяг фінансових витрат, що припадає на весь термін служби (LCC): інвестиційне придбання нового рухомого складу, витрати на експлуатацію, технічне обслуговування та утилізацію. Найбільша стаття витрат припадає на експлуатацію, ремонт та технічне обслуговування вантажних вагонів.

На етапі життєвого циклу – розробка та проектування вагонів необхідно закласти достатні показники за міцністю конструкції для певної технології виготовлення, а також врахувати експлуатаційні фактори й досвід ведення вагонного господарства. Зважаючи на особливості роботи залізничного транспорту, вантажні вагони в умовах експлуатації повинні

перебувати в постійній готовності. Таку готовність забезпечує існуюча система технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів, важливим показником якої є ймовірність виконання завдання. Тобто наскільки якісно й повно виконано завдання з технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів, настільки впевнено можна говорити про готовність рухомого складу до виконання завдань з відповідним рівнем безвідмовності.

Підвищення надійності та довговічності, збільшення ресурсу вузлів і деталей вагонів потребує створення нових або вдосконалення існуючих їх конструкцій. При цьому надійність контролюється на всіх етапах життєвого циклу нових зразків вагонів, зокрема й під час експлуатаційних випробувань, у ході яких накопичуються статистичні дані про їх технічний стан, рівень зносу, кількість відмов і пошкоджень.

Однією з проблем існуючих методів визначення технічного стану, які базуються на класичних імовірнісних методах, є складність адекватного прогнозування моменту виникнення відмови, оскільки моменту відмови технічного об'єкта (особливо тривалого використання) зазвичай передують складні внутрішні зміни. Ці зміни у вантажних вагонах можуть проявлятися по-різному залежно від місця та характеру самої відмови, а кожен технічний стан вантажного вагона повинен характеризуватися відповідними показниками.

Створення системи дослідження надійності вантажних вагонів з використанням методів визначення показників їх надійності на етапах життєвого циклу є, безумовно, актуальною науково-прикладною проблемою для залізничного транспорту України, вирішення якої надасть можливість підвищити надійність і створити раціональну систему технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів з урахуванням їх технічного стану з метою забезпечення високого рівня безпеки руху та зменшення експлуатаційних витрат.

Вагомий внесок у вирішення проблеми підвищення надійності рухомого складу зробили відомі вчені: Абашкін В. В., Андрієвський В. Г., Анісімов П. С., Боднар Б. Є., Босов А. А., Бороненко Ю. П., Горбенко А. П., Горобець В. Л., Девятков В. Ф., Донченко А. В., Гайдамака А. В., Іванов С. Г., Капіца М. І., Лосєв А. В., Мартинов І. Е., Маслієв В. Г., Мямлін С. В., Перов С. В., Трет'яков О. В., Устич П. А., Шавшишвілі А. Д., Шевченко В. В., Чебаненко В. М., Цюренко В. М. та ін. Питаннями удосконалення системи технічного обслуговування та ремонту рухомого складу займалися Бабанін О. Б., Боднар Б. Є., Босов А. А., Бутько Т. В., Вайчунас Г., Войнов К. М., Головінов Г. Г., Головка В. Ф., Дайлідка С., Дьомін Ю. В., Капіца М. І., Кельріх М. Б., Мартинов І. Е., Мямлін В. В., Путято А. В., Савчук О. М., Сенько В. І., Солонько В. Г., Тартаковський Е. Д. та інші.

Значний внесок у теорію та практику розробки питань міцності й безвідмовності конструкцій зробили вітчизняні і зарубіжні вчені: Ржаніцин А. Р., Фрейденталь А. І., Стрілецький М. С., Діментберг М. Ф., Серенсен С. В., Болотін В. В., Когаєв В. П., Одінг І. А., Іванов Р. Х., Махутов М. А., Гусенков О. М., Гусєв О. С., Винокуров В. О., Троценко В. Т., Паріс П., Сі Дж., Ердоган Ф., Ірвін Дж., Нотта Дж., Брок Д., Райс Дж., Хеллал К., Колінз Дж., Сіраторі М., Мієсі Т., Мапусіта Х. та багато інших.

Вирішенню цих самих питань безпосередньо в галузі залізничного транспорту присвячені роботи таких авторів, як: Вершинський С. В., Воронін М. М., Данилов В. М., Ісаєв І. П., Кисельов С. М., Костенко М. О., Котуранов В. М., Лапшин В. Ф., Лозбінев В. П., Матвеєвичев О. П., Нікольський Є. М., Нікольський Л. М., Попов О. О., Савоськин О. М., Саврухін А. В., Соколов М. М., Устич П. А., Хусідов В. Д., Шадур Л. А. та інших видатних вчених.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана відповідно до пріоритетних напрямків розвитку залізничної галузі, що визначені в Національній транспортній

стратегії України до 2030 року (Розпорядження Кабінету Міністрів України від 30.05.2018 №430-р), а також пов'язана з науково-дослідними роботами, що виконувалися в Дніпровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна: «Випробування зразків нової техніки у дослідних маршрутах на напрямку Роковата–Ужгород–Кошице» (ДР № 0106U002252), «Розробка інноваційних конструкцій вантажних вагонів для гірських залізниць з урахуванням новітніх матеріалів та застосуванням сучасних технологій зварювання» (ДР № 0116U003751), у яких автор брав участь як виконавець та співавтор звітів, та «Визначення сили натиснення на гальмівні колодки пасажирських вагонів з урахуванням навантаження на колесо. Експлуатаційні випробування колодок гальмівних залізничного транспорту» (№ ДР 0116U006842) та «Експлуатаційні випробування втулок з композиційних матеріалів та виробів поліуретанових для вантажних вагонів» (ДР № 0116U003752), у яких автор є керівником та автором звітів.

**Мета та завдання дослідження.** *Метою* роботи є розвиток наукових основ поліпшення надійності вантажних вагонів та безпеки руху за рахунок формування системи дослідження їх надійності на етапах життєвого циклу.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі *завдання*:

- виконати аналіз рівня безпеки руху у вагонному господарстві залізниць України;
- проаналізувати існуючі методи забезпечення надійності вантажних вагонів;
- розробити методи визначення надійності окремих вузлів вантажних вагонів протягом життєвого циклу;
- розробити математичні моделі для прогнозування величини зносу деталей вантажних вагонів протягом життєвого циклу;

- розробити алгоритм визначення показників надійності вантажних вагонів для прогнозування напрацювання окремих деталей та вузлів або вагона в цілому протягом життєвого циклу;
- виконати теоретичні дослідження взаємного впливу окремих елементів вагона на їх показники надійності;
- розробити математичну модель визначення граничного ресурсу структурних елементів вагона з урахуванням виконання технічних дій та впровадження інноваційних конструктивних і технологічних рішень у процесі ремонту вагона;
- запропонувати коефіцієнт функціональної надійності вантажних вагонів;
- розробити метод розрахунку показників надійності вагонів протягом життєвого циклу з урахуванням особливостей технології їх виготовлення;
- виконати теоретичні дослідження показників надійності вантажних вагонів при різних системах технічного обслуговування та ремонту протягом відповідного етапу життєвого циклу;
- розробити модель прогнозування відмов вантажних вагонів для формування системи забезпечення їх надійності протягом життєвого циклу;
- виконати експериментальні дослідження з визначення показників надійності нових і модернізованих вантажних вагонів;
- виконати техніко-економічне обґрунтування запропонованих технічних і технологічних рішень.

*Об'єктом дослідження* є процес формування показників надійності вантажних вагонів з урахуванням зміни їх технічного стану протягом основних етапів життєвого циклу (проектування, виготовлення та експлуатації).

*Предмет дослідження* – показники надійності вантажних вагонів протягом життєвого циклу з урахуванням особливостей їх конструкції, технологій виготовлення та умов експлуатації.

**Методи дослідження.** Математичні моделі, що описують експлуатаційні характеристики досліджуваних деталей, розроблялися на базі теорії ймовірностей та математичної статистики. Для розрахунку показників надійності елементів, вузлів та вагона в цілому застосовувалася теорія надійності технічних систем. За допомогою методів математичного моделювання та фізики твердого тіла формувалася математична модель впливу фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей на надійність виробів. Для моделювання величини температури в зоні контакту «колесо – гальмівна колодка» використовувалися чисельні методи розв’язання інтегральних та диференціальних рівнянь. Експериментальні та аналітичні дослідження виконувалися методом безпосередніх вимірів на дослідних вагонах та за допомогою статистичних методів. Для формування програми випробувань застосовувалися методи планування експерименту.

При побудові системи надійності використано: елементи математичної та нечіткої логіки – для розв’язання задачі приналежності про відмови вагона; теорія множин – для формування множини, що описує роботу вагона; математичний апарат комбінаторики – для аналізу варіантів відмов; елементи теорії прийняття рішень, що дозволяє вибрати найімовірнішу причину відмови; методи системного підходу, аналізу та синтезу – для формування системи визначення показників надійності вантажних вагонів з використанням результатів теоретичних та експериментальних даних.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-прикладну проблему поліпшення надійності вантажних вагонів на етапах життєвого циклу для підвищення ефективності їх використання та поліпшення рівня безпеки руху, а саме:

- вперше отримано структурну модель для оцінки граничного ресурсу складових елементів конструкції вагона з урахуванням виконання регламентних ремонтних робіт на етапі експлуатації та ремонту;
- вперше розроблено метод оцінки надійності вантажних вагонів протягом життєвого циклу з використанням елементів нечіткої логіки та



інтелектуальних систем, що враховує неоднорідний характер інформації про особливості їх експлуатації;

- вперше сформульовано поняття коефіцієнта функціональної надійності вантажних вагонів, за допомогою якого можна оцінити гарантований термін безпечної експлуатації вагона протягом життєвого циклу з урахуванням кількісних та якісних показників функціонування вантажних вагонів, а також умов експлуатації;

- удосконалено систему досліджень показників надійності вантажних вагонів, у якій аналізується інформація про відмови, що, на відміну від існуючої, дозволяє врахувати індивідуальні особливості вагонів протягом усього життєвого циклу;

- удосконалено математичну модель зміни технічного стану вантажного вагона, у якій розроблено послідовність визначення показників надійності вагонів та прогнозування кількісних показників надійності окремих деталей та вузлів, що, на відміну від існуючої, дозволяє здійснювати оцінку технічного стану вагона протягом життєвого циклу з урахуванням конкретних експлуатаційних умов;

- удосконалено математичну модель процесу взаємодії контактуючих деталей вагона для визначення величини зношування деталей та з'єднань елементів вантажних вагонів протягом життєвого циклу з урахуванням законів розподілу випадкових величин відмов окремих елементів, що, на відміну від існуючої, дозволяє враховувати показники надійності всіх основних комплектуючих елементів вагонів та прогнозувати терміни безпечної їх експлуатації;

- удосконалено математичну модель процесу зміни технічного стану вагона протягом життєвого циклу з визначенням відмов ресурсовизначальних елементів вантажних вагонів завдяки врахуванню в ній імовірнісних показників зміни технічного стану окремих ресурсовизначальних елементів, що, на відміну від існуючої, дозволяє

враховувати зміну фізико-механічних характеристик ресурсовизначальних елементів;

- удосконалено математичну модель теплового балансу триботехнічної пари механічної системи вагона, яка дозволяє на початку життєвого циклу – етап проектування, підбирати матеріали гальмівних колодок з необхідними фізико-хімічними, механічними та триботехнічними властивостями із забезпеченням безпечної та ефективної роботи гальмівної системи й підвищенням рівня надійності в процесі експлуатації вантажних вагонів, що, на відміну від існуючої, дозволяє врахувати поглинання й розсіювання теплоти в колісній парі та її відтік від гальмівної колодки до колеса та оцінити ефективність процесу гальмування;

- удосконалено метод розрахунку показників надійності вагонів на етапі життєвого циклу – виготовлення, який, на відміну від існуючого, передбачає можливість прогнозування відмов з урахуванням особливостей технологічного процесу виготовлення складових елементів вагона для запобігання виникненню дефектів у процесі подальшої експлуатації;

- удосконалено метод оцінки експлуатаційних характеристик вантажних вагонів, що, на відміну від існуючого, містить контрольовані параметри для системи дослідження надійності вантажних вагонів як свідчення (симптоми), які визначаються протягом етапу життєвого циклу – експлуатація, і дають можливість встановити та підвищити необхідні показники надійності вантажних вагонів за комплексними ознаками та скоротити непродуктивні експлуатаційні витрати;

- набув подальшого розвитку метод визначення термінів виконання технічного обслуговування та регламентних видів ремонту вантажних вагонів протягом етапу життєвого циклу – експлуатація, що, на відміну від існуючого, містить комплекс показників експлуатаційної надійності: коефіцієнт готовності, ймовірності безвідмовної роботи та ймовірності виконання завдань, на основі яких здійснюється корегування

термінів виконання регламентних робіт для відповідних моделей вантажних вагонів з урахуванням умов експлуатації;

- набув подальшого розвитку метод визначення показників надійності вантажних вагонів протягом життєвого циклу, що базується на аналізі та синтезі теоретико-експериментальних даних про технічний стан та основні показники надійності вагона як механічної багатоелементної системи, що, на відміну від існуючого, дозволяє оцінити безвідмовність і технічний стан вантажного вагона за ресурсовизначальним елементом та створити умови для запобігання передбаченим відмовам.

**Практичне значення отриманих результатів.** Наукові результати, отримані в дисертаційній роботі, а також запропоновані методології, розроблені моделі та підходи можуть бути використані для вирішення проблеми підвищення надійності вантажних вагонів та безпеки руху поїздів на залізницях України та інших держав на етапах життєвого циклу – від проектування та виготовлення вагонів до процесу їх експлуатації.

Запропонована й розроблена система досліджень надійності вантажних вагонів дозволяє відстежувати зміну їх технічного стану на етапі життєвого циклу – експлуатація, корегувати та вчасно впроваджувати керівні дії у вигляді регламентної роботи чи додаткових заходів для забезпечення необхідного рівня безпеки руху.

Отримані результати роботи використовуються:

- у ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» під час розробки нових та модернізації вагонів у процесі проектування та виготовлення (акт впровадження від 25.10.2016);

- у ПАТ «Інтерпайп НТЗ» у вигляді у вигляді звітів, що включають значення вимірних величин зносу, розраховані інтенсивності зносу, та прогнозовані значення ресурсу залізничних коліс (акт впровадження від 15.01.2020);

- у ВАТ «Трібо» (Україна), якому надані рекомендації щодо виготовлення нових композиційних гальмівних колодок, а також результати експериментальних досліджень (акт впровадження від 17.01.2018);

- у ремонтних вагонних депо «Батуринська» та «Нижньодніпровськ-Вузол» для яких надані рекомендації щодо стратегії виконання технічного обслуговування та ремонту вагонів (акт впровадження відповідно від 12.02.2020 та 20.03.2018);

- у навчальному процесі під час підготовки магістрів за спеціальністю 273 «Залізничний транспорт» спеціалізації «Вагони та вагонне господарство» та під час дипломного проєктування (акт впровадження від 18.02.2020).

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові положення, розробки й результати теоретичних та експериментальних досліджень, що виносяться на захист, отримані автором самостійно.

Статті [130, 131, 133, 135, 134, 136, 137, 138, 145, 154, 169] опубліковані одноосібно.

У роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок автора полягає у такому. У роботах: [152, 170, 173, 177] запропоновані методологічні аспекти до побудови системи технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів; [13, 14, 15, 16, 42, 44, 97, 141, 156, 168] – отримано результати випробувань гальмівних колодок вагонів; [139, 142, 140, 161] – виконано аналіз можливих причин скорочення ресурсу роботи залізничних коліс; [146] – теоретично обґрунтовано плани досліджень надійності механічних систем; [149, 176] – викладено наукове обґрунтування зниження ресурсу вантажних вагонів на дослідних маршрутах; [150] – розроблено методологію з визначення технічного стану вагонів при експлуатації; [45, 166] – обґрунтовано можливість підвищення показників надійності при технічному обслуговуванні та ремонті; [155, 157, 159, 178, 206, 207] – запропоновано технічні рішення до удосконалення п’ятникового вузла вантажного вагона; [147, 167] – виконано експлуатаційні дослідження литих залізничних коліс; [12, 148] – запропоновано варіанти удосконалення конструкції гальмівної колодки; [132, 144] – виконано аналіз відмов та надійності вантажних вагонів; [151] – обґрунтовано можливості застосування засобів захисту сучасного рухомого складу; [174] – теоретично

обґрунтовано можливість застосування основних законів розподілу випадкових величин; [175] – запропоновано методологію визначення надійності вантажних вагонів; [183] – виконано аналіз несправностей гальмівної системи вантажних вагонів; [153, 160, 164, 196, 218] – отримано результати утворення дефектів на поверхні кочення суцільнокатаних коліс при експлуатації; [18, 200] – здійснено аналіз експлуатаційних показників високоміцних залізничних коліс; [158, 163, 162, 164, 165, 171, 215, 216, 217, 219] – виконано обробку статистичних даних щодо зносу основних елементів піввагонів під час експлуатаційних випробувань; [250] – запропоновано схему технічного рішення для корисної моделі при здійсненні вимірів дефектів залізничних коліс.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та були схвалені на 66-й, 67-й, 68-й, 69-й, 70-й 71-й, 72-й та 74-й, 75-й, 76-й, 77-й та 78-й Міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпро, ДНУЗТ, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 рр.); XII, XIII, XIV Міжнародних конференціях «Проблемы механики железнодорожного транспорта. Безопасность движения, динамика, прочность подвижного состава, энергосбережение» (Дніпропетровськ, ДНУЗТ, 2008, 2012, 2016 рр.); Четвертій науково-технічній конференції «Транспортная инфраструктура сибирского района» (Іркутськ, ІРІТ, 2013 р.); X Науково-практичній конференції «Безопасность движения поездов» (Москва, МІТ, 2009 р.); 16-му Міжнародному конгресі з колісних пар (IWC) (Кейптаун, Південно-Африканська Республіка, 2010 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції «Розвиток сучасних технологій виробництва вітчизняних підприємств – основа для зниження зносу пари «рейка–колесо» (Дніпропетровськ, ІНТЕРПАЙП НТЗ, 2012 р.).

У повному обсязі дисертація доповідалася та була схвалена на міжкафедральному науковому семінарі в Дніпровському національному

університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (25.02.2020 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 41 науковій праці, з яких: 24 наукові статті надруковано у фахових виданнях, з яких 11 – у закордонних виданнях та в журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз даних, 28 публікацій апробаційного характеру і тез доповідей у матеріалах міжнародних наукових конференцій, а також 1 патент та 3 свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг роботи становить 377 сторінок, з яких основного тексту – 318 сторінок, які містять 85 рисунків та 17 таблиць. Розташовані на окремих сторінках рисунки та таблиці займають 10 сторінок. Список використаних джерел із 290 найменувань розміщено на 21 сторінках; 4 додатки викладено на 38 сторінках.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ВІДМОВ, МЕТОДИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ ВАГОНІВ

#### 1.1 Аналіз технічного стану парку вантажних вагонів України та їх відмов

Вантажні вагони експлуатуються в специфічних умовах. Агресивний вплив вантажу, пошкодження під час операцій завантаження й розвантаження, значні експлуатаційні навантаження, зношений рухомий склад, незадовільний стан колії тощо призводять до пошкодження й потрапляння вагонів у поточний відчіпний ремонт. Графічно розподіл несправностей вагонів у 2013–2015 рр., що призвели до транспортних подій, за даними Департаменту вагонного господарства ПАТ «Укрзалізниця» наведено на рис. 1.1. Цей розподіл вказує на позитивну динаміку зниження несправностей гальмівного обладнання, кузовів та автозчепів вагонів у 2013–2015 рр.; іншу динаміку (збільшення) мають буксові вузли й візки.

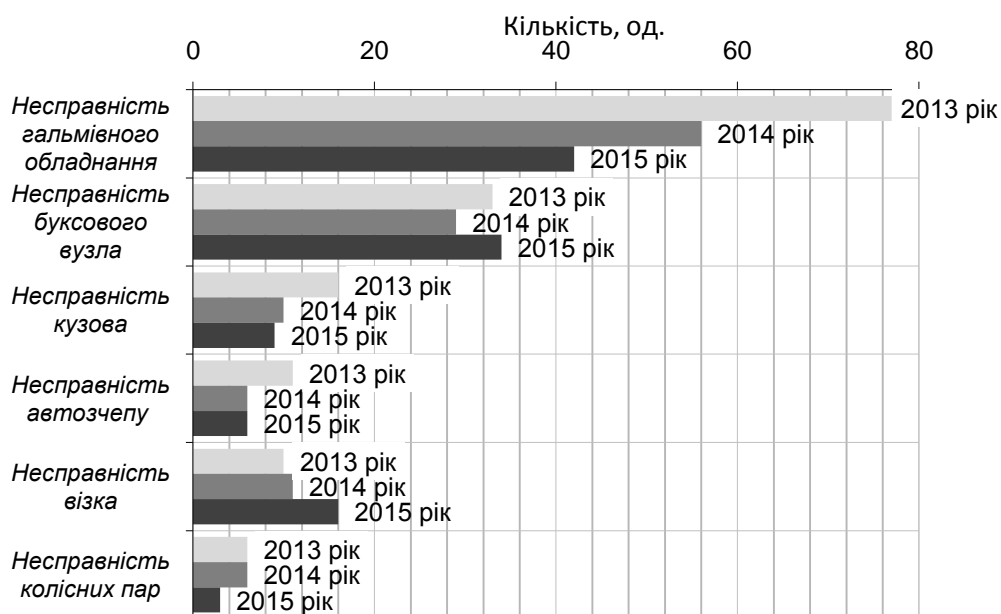


Рисунок 1.1 – Розподіл несправностей вагонів у 2013–2015 рр., що виявлені в експлуатації та загрожують безпеці руху

У процесі виконання досліджень були отримані дані про пошкодження вагонів, які надходили в плановий ремонт на РФ «Придніпровська залізниця» в 2013–2015 рр., що наведено на рис. 1.2.

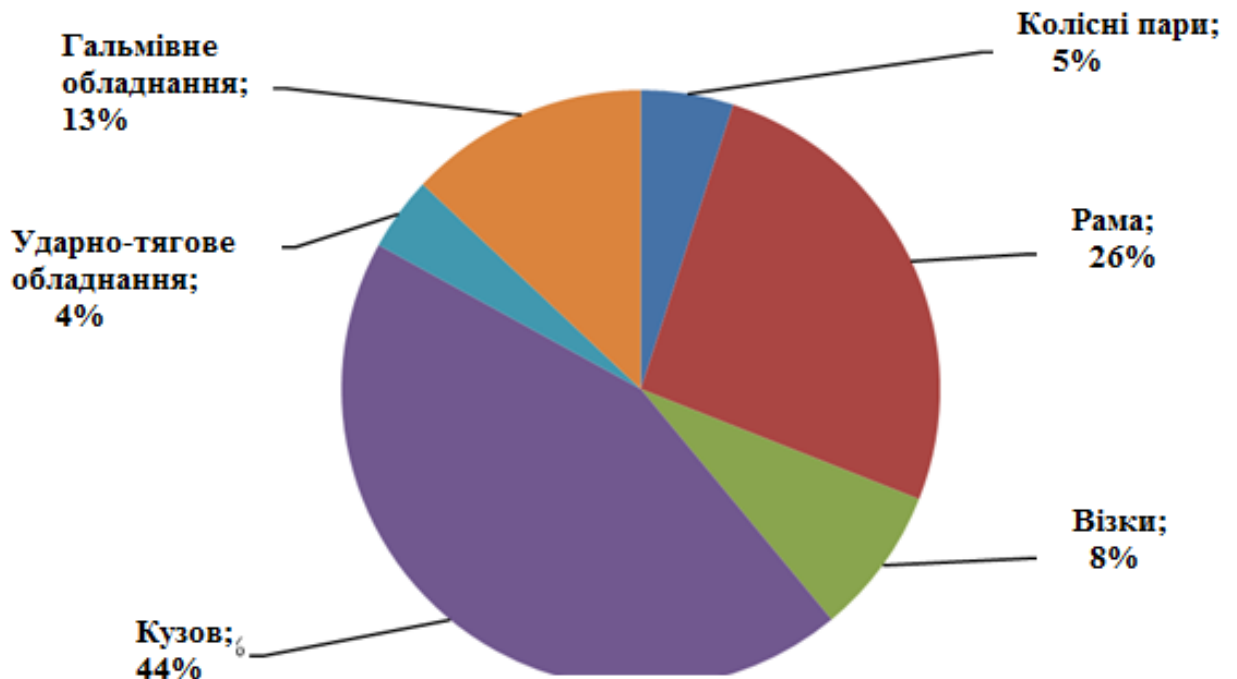


Рисунок 1.2 – Розподіл пошкоджень вантажних вагонів за 2013–2015 рр., що виявлені при плановому деповському ремонті, за даними Придніпровської залізниці

Як видно з рис. 1.2, найбільший відсоток пошкоджень припадає на кузов вагона – 44 %, раму – 26 % і гальмівне обладнання – 13 %. Більш детально несправності зазначених елементів та вузлів вагонів (з діаграмами розподілу) протягом 2013–2015 рр. наведено в додатку А (рис. А.1–А.18).

Так, на рис. А.1 наведено розподіл несправностей гальмівної системи вагонів у 2013–2015 рр. Він підтверджує зниження кількості несправностей гальмівного обладнання, що вказує на більш якісне проведення технічного обслуговування та ремонту вагонів, а також застосування більш ефективних технічних рішень. На рис А.2 наведено розподіл несправностей буксових вузлів вагонів протягом 2013–2015 рр., на рис. А.3 – розподіл несправностей



кузовів, на рис. А.4 – розподіл несправностей автозчепів і на рис. А.5 – розподіл несправностей візка за вказаний період. Усі зазначені розподіли несправностей свідчать про неоднозначну тенденцію у відмовах вагонів. Окремо слід вказати на виникнення протягом 2013–2015 рр. несправностей різних складових елементів тієї чи іншої системи або вузла. Несправності колісних пар вагонів протягом 2013–2015 рр. в основному полягали в тому, що були наявні:

- повзуни більше ніж 2 мм;
- навари розміром 2-5 мм;
- тонкомірний гребінь;
- підріз гребеня колеса колісної пари.

Інформацію про кількість тріщин дисків, ободів, гребенів колісних пар вагонів, виявлених на етапі експлуатації, під час ремонту, до та після наплавлення гребенів, за 2013–2015 рр. наведено в додатку А на рис. А.6.

Загальну кількість відмов вагонів через несправності роликів букс на залізницях України, які виявлені приладами контролю колісних пар та за зовнішніми ознаками оглядачами вагонів протягом 2013-2015 рр., наведено у вигляді розподілу в додатку А на рис. А.7.

Сумарну кількість відмов вагонів, які надійшли в поточний ремонт за несправностями буксового вузла та гальмівного обладнання після планового ремонту з вини вагоноремонтних підприємств Укрзалізниці протягом 2013-2015 рр. наведено на діаграмі (додаток А, рис. А.8).

Проаналізувавши всі наведені статистичні дані, окреслюється така картина. Однозначно можна зробити висновок, що щороку наявна динаміка – позитивна або негативна, тобто стверджувати про підвищення чи зниження рівня надійності вагонів у 2014 чи у 2015 році, спираючись на наведені дані, не можна. Також не можна констатувати, що підвищилась якість виконання технічного обслуговування та ремонту вагонів, оскільки кількість відчеплень вагонів через несправності в середньому залишається практично на одному рівні. Так, в окремих випадках спостерігається позитивна динаміка щодо

зменшення кількості деяких несправностей елементів, деталей і вузлів вагонів, але в загальному обсязі це не є доказом підвищення будь-якого параметра надійності.

Також слід зауважити, що характер виникнення несправностей вагонів є доволі різним. Найбільша кількість несправностей вантажних вагонів (51 %) має технологічний характер, 39 % – експлуатаційний характер, а решта 10 % – це пошкодження з інших причин.

За останні роки збільшилася кількість пошкоджень рухомого складу, які мають технологічний характер. Це зумовлено значним терміном служби рухомого складу, недостатнім забезпеченням ремонтних депо матеріалами й запчастинами та їх низькою якістю, зниженням матеріальної зацікавленості працівників ремонтних підприємств і повільним впровадженням сучасного діагностичного обладнання.

Експлуатаційний характер несправностей виникає через природний знос елементів, деталей і вузлів вагона в процесі експлуатації і не пов'язаний з якістю виготовлення або ремонтом.

Інші пошкодження відбуваються через порушення встановлених правил експлуатації вантажних вагонів на коліях загального користування й коліях промислових підприємств.

Порівнюючи відмови вагонів за типами, найбільш відмовонебезпечними, тобто найбільш витратними в утриманні й першорядними за увагою щодо безпеки руху та збереження вантажу, є піввагони, на які припадає до 58 % відмов; на парк інших вагонів припадає до 14 % (мінераловози, зерновози, цементовози); на криті вагони – до 10 %; цистерни і платформи – до 9 % відмов на кожному.

Несправності вагонів усіх типів, у результаті яких відбулися транспортні пригоди за останні п'ять років, можна розподілити таким чином: несправності й відмови в роботі гальмівного обладнання в гарантійний термін експлуатації – 41 %; несправності буксових вузлів – 21 %; несправності кузова вагона – 7 %; несправності автозчепів, що призвели до

саморозчеплень, – 4 %; несправність візків – 7 %; несправність колісних пар – 3 %.

Основною й головною причиною настання транспортних пригод є несвоєчасне вилучення з експлуатації рухомого складу, технічний стан якого не відповідає вимогам ПТЕ. Тобто залишаються можливі великі ризики виникнення порушень безпеки руху поїздів як зараз, так і в майбутньому.

На сьогодні гострим питанням у вагонному господарстві залізниць України є якість проведення планового ремонту візків, а саме:

- на похилих площинах надресорних балок не видаляються раніше приварені пластини з подальшим наплавленням та механічною обробкою;
- не відновлюються опорні частини підп'ятника надресорної балки;
- не провадиться перехід на модернізацію С14.01;
- дефекти пружин

Ремонт колісних пар та буксових вузлів часто виконується з порушенням технології, що впливає на якість ремонту, а саме:

- неякісно здійснюється ремонт підшипників;
- поверхня кочення колісних після обточки не відповідає максимальному шаблону;
- не відновлюється різь М20 і М110 на осях та не усуваються деякі інші несправності.

Приклади пошкоджень, зокрема й таких, які пов'язані з проведенням неякісного ремонту, наведено в додатку А, на рис. А.9–А.17.

Виконуючи технічне обслуговування, оглядачі вагонів не завжди звертають увагу на стан важільної передачі та не проводять її регулювання, відправляючи поїзди на перегони із колісними парами, затиснутими гальмівними колодками, та іншими недоліками (додаток А, рис. А.18).

Внаслідок невиявлення оглядачами вагона зносу різі як на ніпелі, так і в трійнику відбувається випадання ніпеля з різьбового з'єднання з трійником гальмівної магістралі з подальшим спадом тиску в ній (додаток А, рис. А.19).

Ремонт та технічне обслуговування автозчепних пристроїв виконуються неналежним чином, не виявляються та не усуваються всі недоліки, внаслідок чого створюються передумови до виникнення транспортних подій. Прикладом несправності може бути саморозчеплення автозчепів між вагонами, основною причиною якого є випадання клина тягового хомута автозчепу вагона через відсутність спеціальної підтримуючої планки та зламу кріпильного болта, що не було виявлено оглядачами вагонів під час проведення технічного обслуговування (додаток А, рис. А.20).

Як зазначалося раніше, на залізницях несвоєчасно вилучаються із експлуатації вагони, технічний стан яких не відповідає вимогам ПТЕ, тобто з такими несправностями, з якими заборонена експлуатація, наприклад: несправність механізмів автозчепу, центрувальних балок, вищербини на поверхні кочення колісних пар, відсутність гальмівних колодок, гострий накат гребеня, обриви кронштейнів кріплення гальмівного обладнання, неповна укомплектованість кінцевих кранів, тріщини надресорних та хребтових балок, відсутність кріпильних механізмів п'ятників до рами вагона та інше (додаток А, рис. А.21–А.31).

У період з 2014 по 2016 рік спостерігається збільшення кількості відчеплень вагонів у поточний ремонт через несправності вузлів (рис. 1.3)

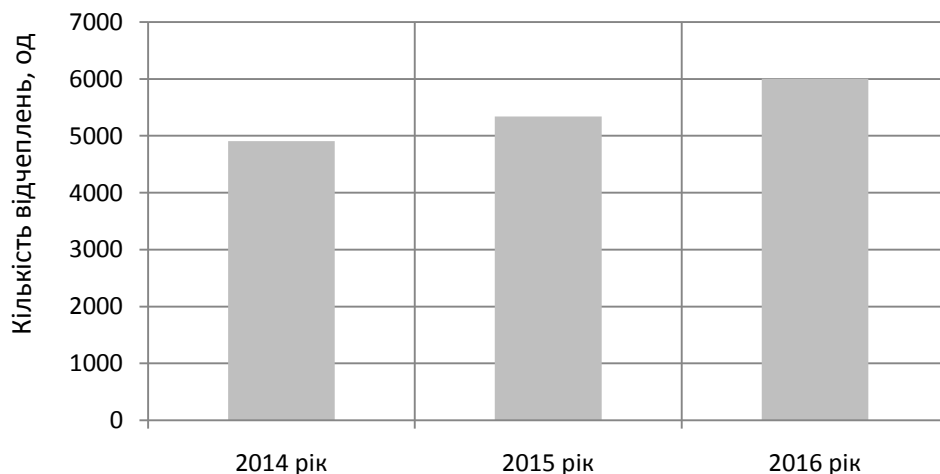


Рисунок 1.3 – Статистика відчеплень вагонів при технічному обслуговуванні через несправності вузлів протягом 2014–2016 рр.

У результаті відчеплень вагонів у поточний ремонт через несправності вузлів з вини заводів-виробників та вагоноремонтних підприємств Укрзалізниці, тобто через незабезпечення гарантованого пробігу вантажних вагонів, вагонне господарство зазнало значних збитків. У період з 2014 по 2016 рік спостерігається збільшення питомої ваги експлуатаційних збитків вагонного господарства через передчасні відчеплення вантажних вагонів на показник виконаної роботи (рис. 1.4).

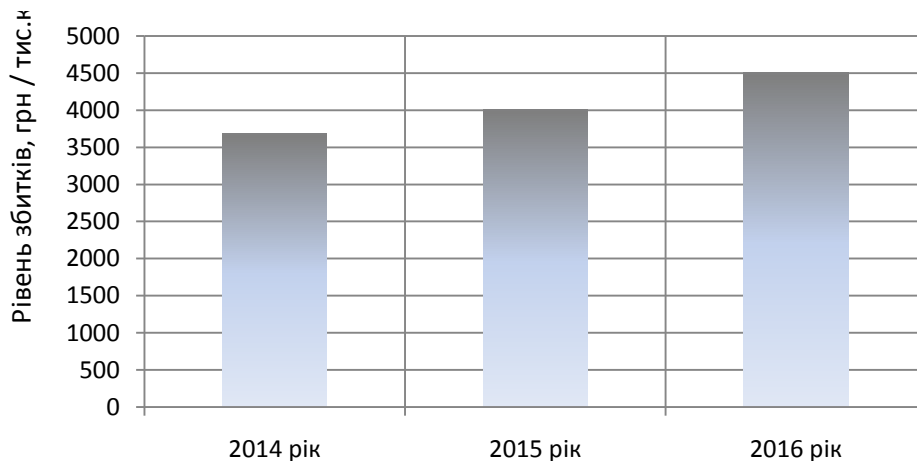


Рисунок 1.4 – Питома вага експлуатаційних збитків вагонного господарства через передчасні відчеплення на показник виконаної роботи одним вантажним вагоном

Як бачимо, якщо кількість відчеплень через незабезпечення гарантованого пробігу вантажних вагонів зростатиме, вагонне господарство зазнаватиме ще більших збитків.

Аналіз вищенаведених даних про пошкодження ліг в основу початку робіт по дослідженню підвищення надійності вантажних вагонів протягом їхнього життєвого циклу

Особливо актуальним на сьогодні є забезпечення надійності вантажних вагонів на всіх етапах життєвого циклу, оскільки використовуваний парк рухомого складу є морально та фізично застарілим, що вимагає інших підходів до повноти проведення та якості технічного обслуговування та ремонтів. Також це стосується й нових вантажних вагонів, на які діє

гарантований пробіг до ремонту. Проте ці терміни практично не дотримуються на експлуатованому парку вантажних вагонів. Тому і для нових вантажних вагонів необхідно розробити заходи із забезпечення показників надійності в процесі експлуатації, тобто на всіх етапах їх життєвого циклу.

Окрім того, слід зазначити, що виконання технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів здійснюється відповідно до нормативів, установлених планово-запобіжною системою підтримки технічного стану. Це, у свою чергу, часто призводить до передчасної заміни деталей та вузлів вантажних вагонів, які могли б ще експлуатуватись. І в цьому питанні планово-запобіжна система не передбачає жодних винятків. Тобто планово має відбуватися заміна навіть придатних деталей чи вузлів вантажного вагона, що призводить до збільшення експлуатаційних витрат на відповідному етапі життєвого циклу [179]. Зниження таких витрат можна досягти, якщо переглянути систему технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів, тобто виконувати заміну залежно від технічного стану й продовжувати експлуатацію таких вузлів до наступного ремонту або впровадити заходи щодо перегляду (збільшення) міжремонтного пробігу із забезпеченням надійності вантажного вагона в цілому. Це є важливою проблемою, яка повинна бути вирішена найближчим часом.

Аналіз безпеки руху у вагонному господарстві залізниць України вказує на необхідність модернізації та вдосконалення старого рухомого складу вагоноремонтними заводами й виготовлення більш сучасних вагонів усіх типів для підвищення рівня безпеки руху поїздів. Тобто існує потреба в конструкторських розробках сучасного рухомого складу, які дозволять, насамперед, забезпечити високий рівень надійності й тим самим гарантувати підвищення рівня безпеки руху. Останнього можна досягти за допомогою застосування перспективних технологічних методів виготовлення й відновлення робочих поверхонь деталей вантажних вагонів.

Як відомо [51, 59,113, 121, 122, 172, 202, 219, 215, 219], на стан надійності вагонів при їх виготовленні й підтримку цього стану на достатньому рівні в період експлуатації значно впливають процеси старіння, втоми й руйнування металів і сплавів. Також слід зазначити, що поряд з процесами старіння вагонів, інтенсивно відбуваються процеси механічного та корозійного зношування, особливо це стосується кузовів піввагонів.

Зважаючи на складність процесів, що відбуваються в поверхневих шарах твердих тіл при зношуванні, відмінності умов і режимів роботи вантажних вагонів, а також на різні причини зношування, неможливо запропонувати строгі одиничні класифікаційні ознаки всього різноманіття процесів зношування. Але водночас можна констатувати, що в кузовах вантажних вагонів наявні механічне, корозійно-механічне зношування та корозія окремо.

До механічного відносять абразивне зношування [19, 21, 41, 48, 121, 149, 151, 202, 205, 231, 232], при якому зношення матеріалу відбувається в результаті різальної або дряпальної дії твердих частинок. Такими частинками на залізничному транспорті є вантажі, що перевозяться: вугілля, щебінь, гравій тощо, які, потрапляючи в кузов у процесі навантаження (розвантаження) і перебуваючи там під час руху, впливають на його внутрішню поверхню. Частинки зазначених вантажів можуть перебувати в закріпленому або вільному стані.

Корозійно-механічне зношування [41, 50, 99] відбувається в результаті сумарного впливу механічного зношування та взаємодії матеріалу із середовищем.

Внаслідок хімічної взаємодії із зовнішнім середовищем відбувається руйнування металів [41, 50, 103] – корозія, яка може бути суцільною або місцевою.

Під час тертя в корозійних середовищах істотно змінюється характер та інтенсивність руйнування поверхні. При цьому силовий вплив може

розрізнятися за видом: контактна взаємодія при періодичному або знакозмінному навантаженні, при ударі тощо.

У теорії надійності [68] подано визначення деградаційної відмови – це відмова, зумовлена природними процесами старіння, зношування, корозії і втоми при дотриманні всіх встановлених правил і (або) норм проектування, виготовлення й експлуатації.

## **1.2 Методи підвищення надійності вантажних вагонів на етапах життєвого циклу**

Надійність вантажних вагонів має бути керованою на кожному етапі життєвого циклу: при проектуванні, виготовленні, експлуатації.

Останнім часом увагу дослідників різних напрямків привертають властивості робочих поверхонь елементів та деталей, які є ресурсовизначальними для різних видів техніки, зокрема й вантажних вагонів [13, 20, 21, 47, 63, 101, 105, 115, 121, 149, 151, 205, 206, 230, 231, 251]. Навчитися створювати поверхні тертя деталей машин із заданими властивостями й керувати фізико-хімічними процесами, що відбуваються в них, – одне з першочергових завдань, що стоїть перед фахівцями залізничного транспорту, які виготовляють, експлуатують, обслуговують і ремонтують рухомий склад. Знос складових елементів та деталей є дестабілізатором технічного стану вантажних вагонів. Забезпечити керований ресурс вагонів у цьому випадку можливо стабілізацією стаціонарного технічного стану трибосистем, а отже, експлуатаційних властивостей елементів та деталей. Останнє досягається за допомогою застосування різних технологій, спрямованих на підвищення фізико-механічних і триботехнічних характеристик деталей [11, 16, 48, 46, 107, 115, 116, 135, 151, 159, 205, 206, 227, 230, 231, 234].

У світовій практиці якість технології оцінюється не тільки високими технічними, але й економічними показниками [269, 279]. Перевага віддається високоефективним безвідходним і ресурсозберігаючим технологіям, які



забезпечують високу якість і надійність виробів. Особливої цінності технології набувають у тому випадку, якщо вони, використовуючи відходи виробництва, забезпечують деталям властивості, які не поступаються існуючим [3].

Успішне вирішення цих завдань полягає: по-перше, у розробці нових технологій підвищення таких показників, як довговічність та зносостійкість. По-друге, в узагальненні розрізних експериментальних даних за механізмом зносу з метою створення загальної бази даних «тертя-зносу-руйнування» різного роду матеріалів від початку їх виготовлення до повного руйнування. А потім необхідно проводити пошуки й розробляти нові технології виготовлення елементів та деталей, які знижують знос, підвищують фізико-механічні та триботехнічні властивості матеріалів на етапі їх виготовлення й обробки.

З іншого боку, підвищення ресурсу елементів та деталей вантажних вагонів пов'язано з необхідністю застосування різних способів зміцнення деталей, експлуатаційні властивості яких – зносостійкість, динамічна і циклічна міцність – повинні перевищувати відповідні показники для нових деталей. Тому технологія зміцнення деталей вантажних вагонів повинна базуватися на застосуванні таких способів і засобів зміцнення й механічної обробки, які поряд з високою продуктивністю дозволяють не тільки зберегти, але й істотно підвищити довговічність елементів та деталей [241, 240]. Таким чином, важливим етапом у рамках вирішення проблеми зносостійкості й довговічності елементів та деталей вантажних вагонів стає розробка нових ефективних і екологічно чистих технологій зміцнення.

Аналіз технологічних методів підвищення зносостійкості елементів та деталей вантажних вагонів [63, 115, 149, 151, 205, 208, 230, 231] показав, що для підвищення їх ресурсу може бути застосовано одночасно кілька різних методів зміцнення, оскільки використання декількох технологічних методів у

комплексі з конструкторськими рішеннями, правильним підходом до процесу експлуатації вантажних вагонів дасть найбільший ефект.

Використання відомих технологічних методів підвищення зносостійкості елементів та деталей вантажних вагонів дозволяє зменшити їх знос в 1,2– 10,0 разів, але вони мають і певні недоліки. Наприклад, основними недоліками об'ємної термообробки є:

- деформації елемента та деталі при загартуванні;
- значні залишкові напруження;
- нерівномірна твердість за глибиною елемента чи деталі;
- видалення вуглецю з поверхні елемента чи деталі;
- можливість утворення гартівних тріщин, особливо при великому перерізі;
- висока енергоємність процесу.

Поверхнева хіміко-термічна обробка є одним з найпоширеніших методів підвищення зносостійкості деталей машин [63, 115, 121], але до його недоліків слід віднести високу вартість і тривалість. Основними недоліками легування й модифікування є підвищена витрата матеріалів, оскільки легуючий елемент розподіляється у всьому об'ємі заготовки, а зношуванню піддається не вся деталь. Для уведення легуючих елементів у сталь або чавун необхідно здійснювати значний нагрів металу, який неможливий в умовах вагоноремонтного депо, а в разі виплавки в електропечах, внаслідок високого перегріву, чавун має дрібнозернисту структуру, що негативно позначається на його зносостійкості. При значній масі елемента чи деталі й невеликих розмірах граничного зносу легування матеріалу в повному об'ємі економічно нераціональне, оскільки призводить до великої витрати легуючих елементів. Більш ефективним, порівняно з об'ємним легуванням [63, 115, 121], є метод поверхневого (локального) легування, що веде до зниження загальної вартості виливків і дає можливість отримати зносостійкі робочі поверхні з поліпшеними властивостями, подібно до того, як при високому легуванні матеріалу деталі. До недоліків способу слід віднести малий припуск на

механічну обробку й можливість повного видалення легованого шару при обробці. Спосіб вимагає точних методів виливання.

До нових перспективних процесів легування заготовок можна віднести лазерне легування. Високі можливості лазерів визначаються локалізацією термічного впливу й управління процесом в широкому діапазоні технологічних режимів. Широке впровадження лазерного зміцнення деталей вантажних вагонів при масовому виробництві цілком можливе, враховуючи тривалість періоду обробки й характеристики технологічного обладнання.

Характеристики міцності деталей, що працюють при змінних навантаженнях, можуть бути підвищені в кілька разів за рахунок застосування поверхневої пластичної деформації.

Для підвищення корозійної стійкості на деталі наносять покриття електролітичними або хімічними методами. Корозійну стійкість підвищують цинкуванням, кадміюванням, нікелюванням, фосфатуванням, лудінням, а також за допомогою комбінування зазначених процесів. Крім того, зносостійкість і корозійну стійкість елемента та деталі підвищують наплавленням на робочі поверхні твердих сплавів [63, 202, 208]. Наплавлення широко застосовують для відновлення й зміцнення зношених елементів та деталей вагонів.

Наприклад, у 60 % випадків знос кузовів піввагонів має корозійно-абразивний характер. При цьому на сьогодні абразивну зносостійкість поверхні підвищують шляхом зміцнення матеріалу методами хіміко-термічної, лазерної або плазмової обробки, а також за допомогою різних покриттів підвищеної твердості, які забезпечують зниження інтенсивності зношування кузовів до 10 разів.

У США і Канаді для запобігання дії атмосферних опадів на внутрішню поверхню кузовів піввагонів (особливо взимку) конструктивно застосовують насувні дахи. Це дозволяє уникнути одночасної дії і абразивного зносу, і корозійного. Останнім часом і в країнах СНД також почали випуск піввагонів зі знімним дахом, наприклад моделі 12-119, 12-171, 12-141.

З усіх технологічних методів підвищення зносостійкості деталей вантажних вагонів для створення поверхонь із заданими змінними властивостями теоретично можуть бути використані такі:

- управління структуроутворенням у процесі виготовлення;
- поверхневе (місцеве) легування;
- поверхнева термічна обробка;
- зміцнення пластичним деформуванням;
- термомеханічна обробка;
- лазерне гартування, легування і модифікування.

Зміцнення деталей шляхом модифікування поверхні має низку переваг порівняно з нанесенням зміцнювальних покриттів. В останнє десятиліття почали використовувати лазерну модифікацію поверхонь тертя. Але широкого застосування вона не отримала, по-перше, через високу вартість; по-друге – однозначних висновків (100 % позитивних або негативних) дослідниками ще не зроблено.

За необхідності застосування певного технологічного методу підвищення зносостійкості елементів та деталей вантажних вагонів алгоритм його вибору має ґрунтуватися на даних, що характеризують знос і міцність від втоми, а також на визначенні необхідних властивостей елементів та деталей у кожній точці робочої поверхні й параметрів технологічного процесу.

### **1.3 Теоретичні положення дослідження показників надійності вантажних вагонів**

Визначення терміна «надійність» та інших супутніх термінів наведено в ГОСТах, ОСТах, РТМ, РД, ДСТУ [56–62, 82, 83, 123], а також деяких працях [35, 36, 70, 86, 121, 175, 241]. Проаналізуємо існуючий понятійний апарат теорії надійності.

У [82] наводиться таке визначення надійності: це властивість об'єкта зберігати в часі в установлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати потрібні функції в заданих режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання та транспортування. Крім того, є дві примітки, перша з яких полягає в тому, що надійність є комплексною властивістю, яка залежно від призначення об'єкта й умов його застосування може містити безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність та збережуваність чи певні поєднання цих властивостей; друга, що наведений термін використовують лише для загального не кількісного опису вказаних властивостей.

Тобто в ДСТУ прописано, що це властивість об'єкта. Тобто чітко вживається однина, добре, що хоч в примітці зазначено «комплексна», а далі перераховується безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність та збережуваність. Тож за логікою правильніше було б сформулювати, що надійність – це комплекс властивостей об'єкта.

Крім того, необхідно зауважити, що у визначенні терміна «надійність» йдеться про «параметри, які характеризують здатність виконувати потрібні функції». У цьому випадку, можливо, безвідмовність і довговічність є цими параметрами, а можливо, безвідмовність – це імовірнісна функція, а довговічність – функція часу. І таких варіантів можна запропонувати багато.

У роботах [121, 241] вважають, що надійність – це здатність об'єкта виконувати задані функції, зберігаючи в часі значення певних експлуатаційних властивостей у заданих межах при заданих режимах і умовах використання, технічного обслуговування, ремонту, зберігання і транспортування. Крім того, як і у примітці до ДСТУ, автори вказують, що надійність – комплексна властивість, яка залежно від призначення об'єкта та умов його експлуатації може містити безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність і збережуваність окремо або в їх поєднанні.

У працях [86, 175] показано, що автори закладають у поняття «надійність» саме властивість, визначення якої дається і в ГОСТі, і в ДСТУ, а

інші дослідники вважають, що надійність – це здатність [121, 241]. Тобто різні автори трактують поняття надійності по-різному: що це властивість щось зберігати, або щось виконувати і т. д. З іншого боку, зберігати або виконувати – це функціональні, ймовірніше, технологічні особливості, і властивостей об'єктів не стосуються, це вже результат, дія або наслідок властивостей. Тобто, як було сказано раніше, можна було б пояснити надійність як наслідок комплексу властивостей, наприклад конструктивних чи технологічних, із закладеними фізико-механічними, фізико-хімічними, трибологічними тощо.

Автори роботи [86] стверджують, що надійність – це ймовірнісний показник, що визначає ймовірність того, що в заданому інтервалі часу або в межах заданого напрацювання не виникає відмови. Також вони вказують, що надійність конструкції залежить від здатності матеріалу чинити опір руйнуванню в разі виникнення пікових напружень. У такому випадку надійність має ймовірнісно-статистичний підхід. Тобто безвідмовність замінює надійність і є самостійною величиною.

Ймовірнісно-статистична теорія – це самостійна теорія, яка використовується для оцінки ймовірності настання чи звершення тієї чи іншої події. Ця теорія працює на принципах оцінки настання або відсутності настання подій, тобто обліку та розрахунку звершених та незвершених подій у роботі об'єкта (вагона) – відмов. На основі цієї теорії (за допомогою статистичних даних) можна передбачати (прогнозувати) настання різних подій, тобто в нашому випадку оцінити наслідок надійності – виникнення відмов.

Розглядаючи далі поняття надійності, можна констатувати, що на основі теорії ймовірності та математичної статистики не вдасться підрахувати безвідмовність об'єкта, оскільки це є його безперервна функція, тому набагато простіше й легше оперувати з категорією «відмова». Відмова як подія піддається статистичній обробці, а далі на основі отриманих статистичних даних може бути оцінена ймовірність настання цієї події

(відмови) в будь-який заданий проміжок часу [86]. Виходячи з цього, відмова є основою для поняття «безвідмовність», а відповідно, і «надійність».

Розглянемо безвідмовність, яка, на думку авторів, є прямим і найбільш важливим показником надійності.

У ДСТУ [82] вказано, що безвідмовність – це властивість об’єкта виконувати потрібні функції в певних умовах протягом заданого інтервалу часу чи напрацювання. Безвідмовність вагонів є особливо важливою, оскільки від неї залежать життя людей. Першорядне значення безвідмовність вагонів відіграє на залізниці ще й тому, що відмова вагонів викликає перерву в роботі залізничної лінії, станції тощо.

З визначення безвідмовності випливає, що її обчислюють часом або напрацюванням до моменту виникнення відмови, встановлення причин відмов, винуватців їх виникнення та розробки заходів щодо зниження ймовірності їх виникнення [129]. При цьому основою класифікації відмов є характер виникнення та особливості перебігу процесів, що призводять до відмови (рис. 1.5).

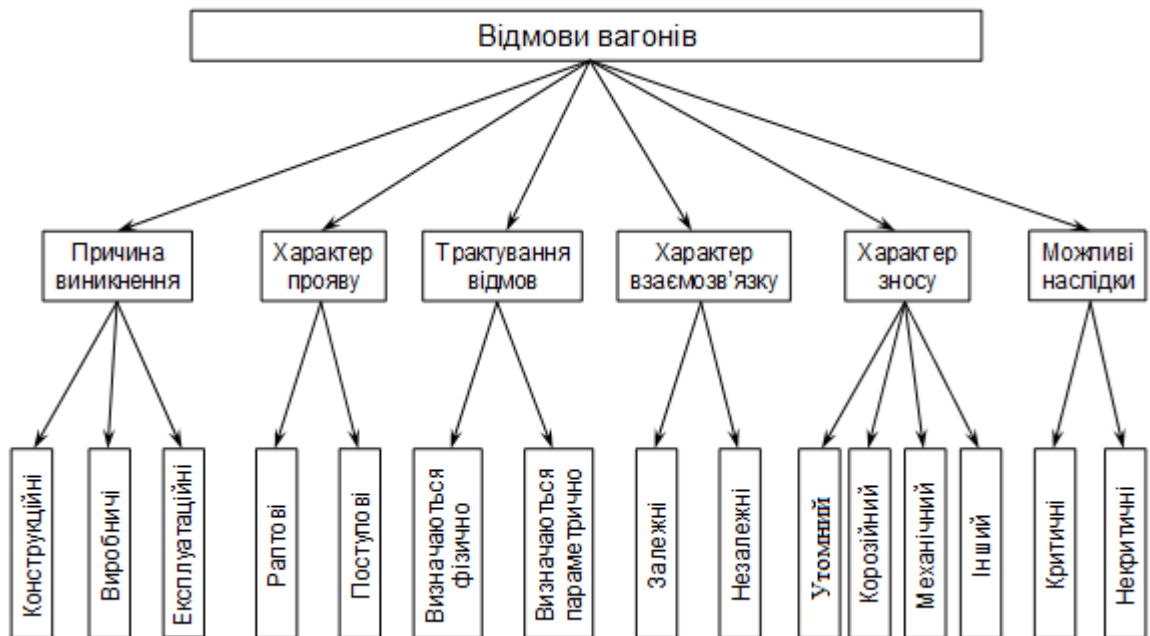


Рисунок 1.5 – Класифікація відмов

Відмови ділять: за причиною виникнення, характером прояву, взаємозв'язку та зносу, трактуванням відмов і можливими наслідками. Крім того, відмови бувають ресурсні та деградаційні.

Відповідно до [82, 83], відмова – це подія, яка полягає у втраті об'єктом здатності виконувати потрібну функцію, тобто в порушенні працездатного стану об'єкта. Також подано примітку про те, що несправність є станом та причиною відмови.

Дослідження відмов вантажних вагонів протягом життєвого циклу можна подати у вигляді схеми, яка наведена на рис. 1.6.

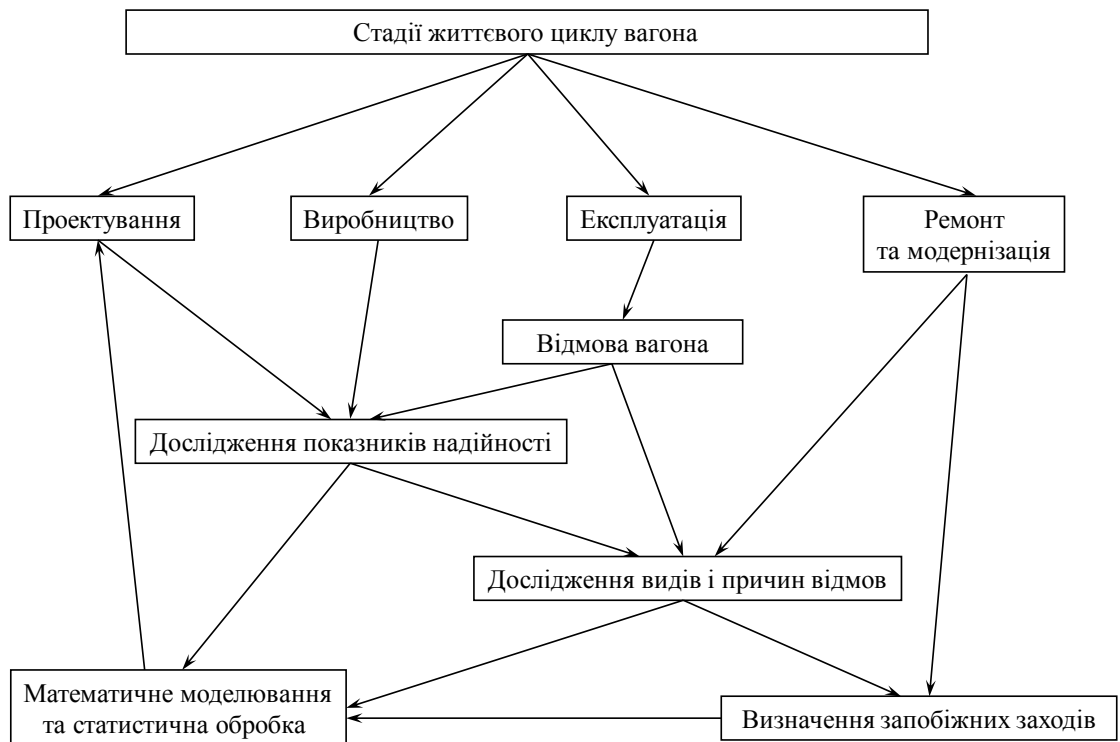


Рисунок 1.6 – Схема досліджень відмов для життєвого циклу вагона

Зі збільшенням кількості елементів, що входять до конструкції вагона (наприклад, вантажного), при стабільній надійності кожного з елементів знижується надійність всього вагона, при цьому вагон розглядається як складна механічна система, яка складається з послідовно з'єднаних елементів.



Слід зауважити, що безвідмовність характеризується: ймовірністю безвідмовної роботи, інтенсивністю відмов, параметром потоку відмов, середніми напрацюваннями до відмови та на відмову, гама-відсотковим напрацюванням на відмову [82, 83].

Відомо, що ймовірність безвідмовної роботи  $P(t)$  [39, 56, 241] – ймовірність того, що в межах заданого пробігу (напрацювання) вагона відмова не виникає. Цей показник має такі властивості:

- $P(t) = 1$  – тобто до початку роботи ( $t = 0$ ) вагон був безумовно працездатним;
- $P(t)$  – функція часу, яка з часом не зростає;
- $\lim_{t \rightarrow \infty} P(t) = 0$  – означає, що вагон не може зберігати свою працездатність необмежено довго.

Оскільки ймовірність безвідмовної роботи  $P(t)$  і відмова є взаємно протилежні події, то оцінку ймовірності відмови визначають за залежністю [26, 39, 241]

$$F(t) = 1 - P(t). \quad (1.1)$$

При цьому, для функції  $F(t)$  справедливі такі відношення:

$$0 \leq F(t) \leq 1; \quad F(0) = 0; \quad F(\infty) = 1. \quad (1.2)$$

Ймовірність відмови  $F(t)$  – це ймовірність того, що в межах заданого пробігу (напрацювання) вагона виникне відмова.

Більш наочно продемонструвати взаємозалежність ймовірностей безвідмовної роботи й відмови можна за допомогою рис. 1.7. Ймовірність відмови  $F(t)$  характеризує ймовірність того, що випадковий час  $T$  роботи вагона до відмови менше заданого часу  $t$  ( $t \geq T$ ). Під  $T$  слід розуміти

безперервну випадкову величину, для якої існує щільність розподілу напрацювання до відмови [26, 39, 241]:

$$f(t) = q(t) = \frac{d}{dt} Q(t), \quad (1.3)$$

де  $Q(t)$  – функція розподілу часу до відмови, що збігається з функцією  $F(t)$ :

$$Q(t) = F(t) = \int_0^t q(t) dt. \quad (1.4)$$

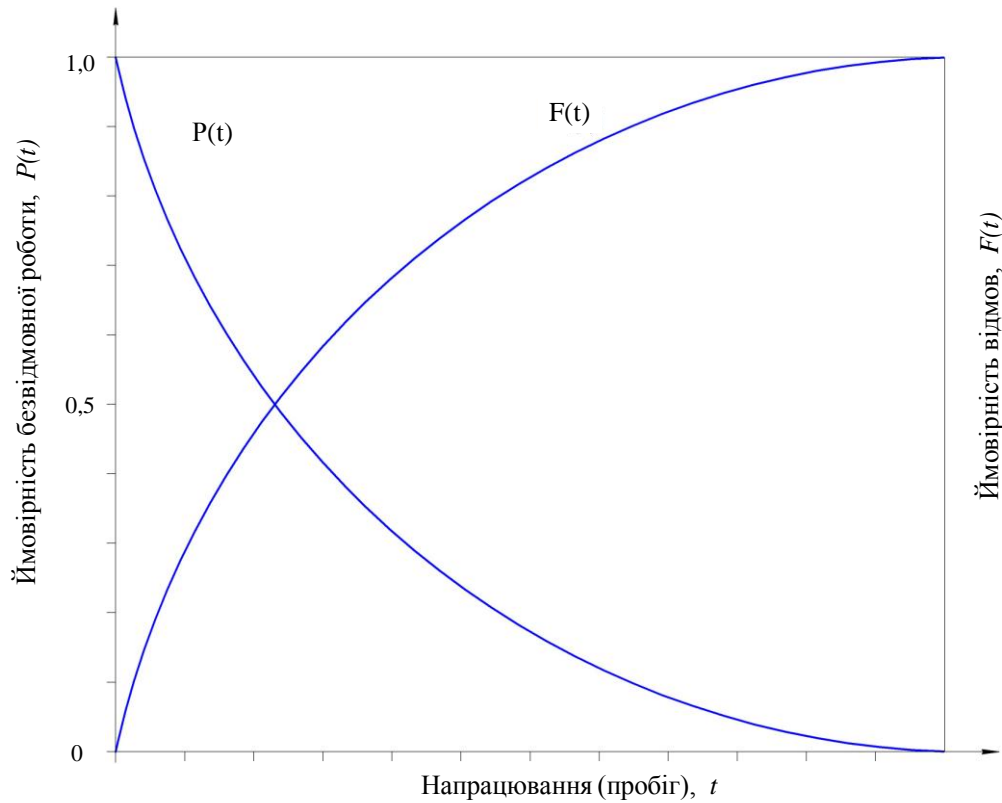


Рисунок 1.7 – Ймовірності безвідмовної роботи і відмови залежно від напрацювання

Статистичну ймовірність безвідмовної роботи  $\bar{P}(t)$  визначають за формулою [26, 39, 241]:

$$\bar{P}(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (1.5)$$

де  $N_0$  – кількість вагонів на початку випробувань;  $n(t)$  – кількість вагонів, що відмовили за час  $t$ .

Статистичну ймовірність відмови вагона  $\bar{F}(t)$  визначають за формулою [26, 39, 241]

$$\bar{F}(t) = 1 - \bar{P}(t) = \frac{n(t)}{N_0}. \quad (1.6)$$

Графічна залежність розподілу функції  $f(t)$  наведена на рис. 1.8.

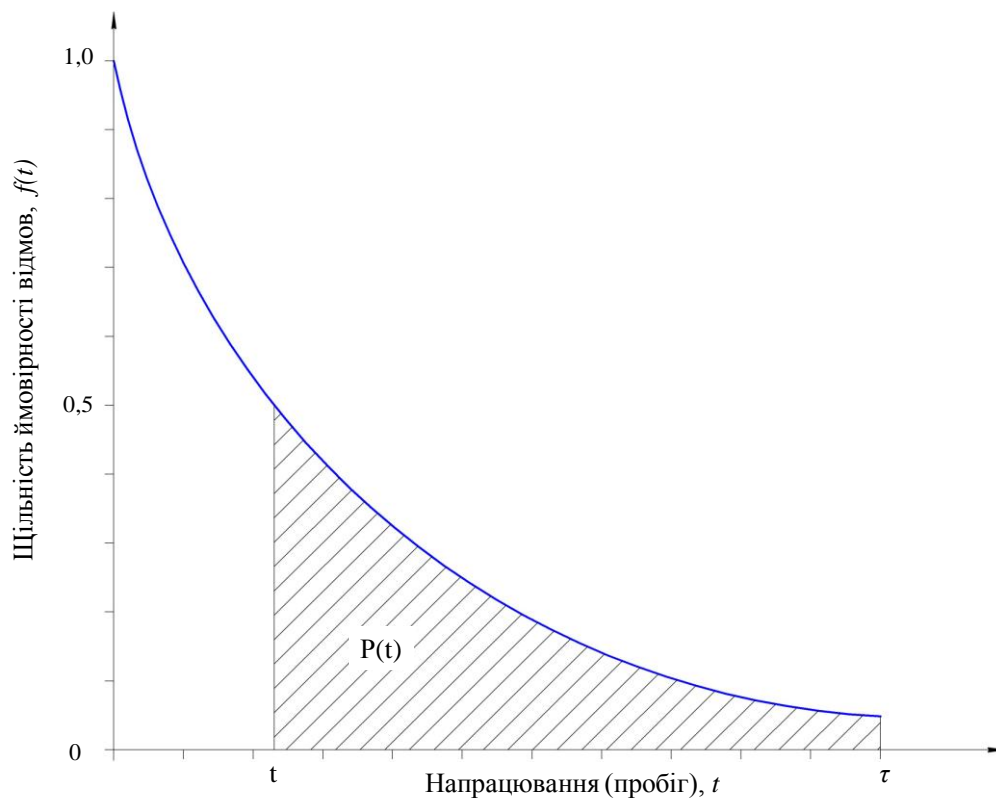


Рисунок 1.8 – Графічна залежність розподілу функції  $f(t)$  з моменту першої відмови

Статистично визначити щільність ймовірності  $\bar{f}(\Delta t)$  можна за допомогою формули [26, 39, 241]

$$\bar{f}(\Delta t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t}, \quad (1.7)$$

де  $n(\Delta t)$  – кількість відмов за інтервал часу  $\Delta t$ .

Тоді можна записати:

- для ймовірності відмов [26, 39, 241]:

$$F(t) = Q \int_0^t f(\tau) d\tau; \quad (1.8)$$

- для ймовірності безвідмовної роботи [19, 32, 216]:

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(\tau) d\tau. \quad (1.9)$$

Середнє напрацювання до відмови  $T_{сер}$  – математичне сподівання напрацювання вагона до першої відмови (середній час до відмови) [26, 39, 241]:

$$T_{сер} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = -t \cdot P(t) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt, \quad (1.10)$$

де  $t$  – час від початку роботи вагона до його відмови.

Статистичну оцінку середнього напрацювання до відмови визначають за формулою [26, 39, 241]:

$$\bar{T}_{cep} = \frac{1}{N_0} \cdot \sum_{i=1}^{N_0} t_i, \quad (1.11)$$

де  $t_i$  – час справної роботи  $i$ -го вагона.

Напрацювання на відмову – це відношення напрацювання відновлюваного вагона до математичного сподівання кількості його відмов протягом цього напрацювання [26, 39, 241]:

$$T_0 = \frac{t}{M \left[ \overset{\leftarrow}{\underset{\rightarrow}{\mathbb{C}}} \right]}, \quad (1.12)$$

де  $M \left[ \overset{\leftarrow}{\underset{\rightarrow}{\mathbb{C}}} \right]$  – математичне сподівання кількості відмов протягом напрацювання  $t$ .

Якщо після кожної відмови вагон відновлюється до початкового стану, то середній час між відмовами дорівнює середньому часу до відмови, тобто статистичне середнє напрацювання на відмову визначається за формулою [26, 39, 241]:

$$\bar{T}_0 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_{cepi}, \quad (1.13)$$

де  $t_{cepi}$  – напрацювання між  $(i-1)$ -ю та  $i$ -ю відмовами вагона;  $n$  – кількість відмов вагона.

При досить великій кількості відмов вагонів  $t_{cep}$  буде наближатися до середнього часу між двома сусідніми відмовами. Якщо випробування проводяться не з одним, а з декількома однотипними вагонами, то середній час між відмовами можна визначити з виразу [26, 39, 241]:

$$\bar{T}_0 = \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^M t_{\text{сепі}}, \quad (1.14)$$

де  $M$  – кількість однотипних вагонів.

Інтенсивність відмов – умовна щільність ймовірності виникнення відмови вагона, яка визначається для конкретного моменту часу за умови, що до цього моменту відмова не виникла [26, 39, 241]:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{\frac{d}{dt} F(t)}{P(t)} = \frac{\frac{d}{dt} (1 - P(t))}{P(t)} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (1.15)$$

Інтенсивність відмов вагона показує, яка частина елементів виходить з працездатного стану за одиницю часу відносно середньої кількості справно працюючих елементів.

Тобто, якщо конструкція вагона спроектована й виготовлена без грубих помилок, то крива інтенсивності відмови  $\lambda(t)$  має вигляд [26, 39, 241], наведений на рис. 1.9.

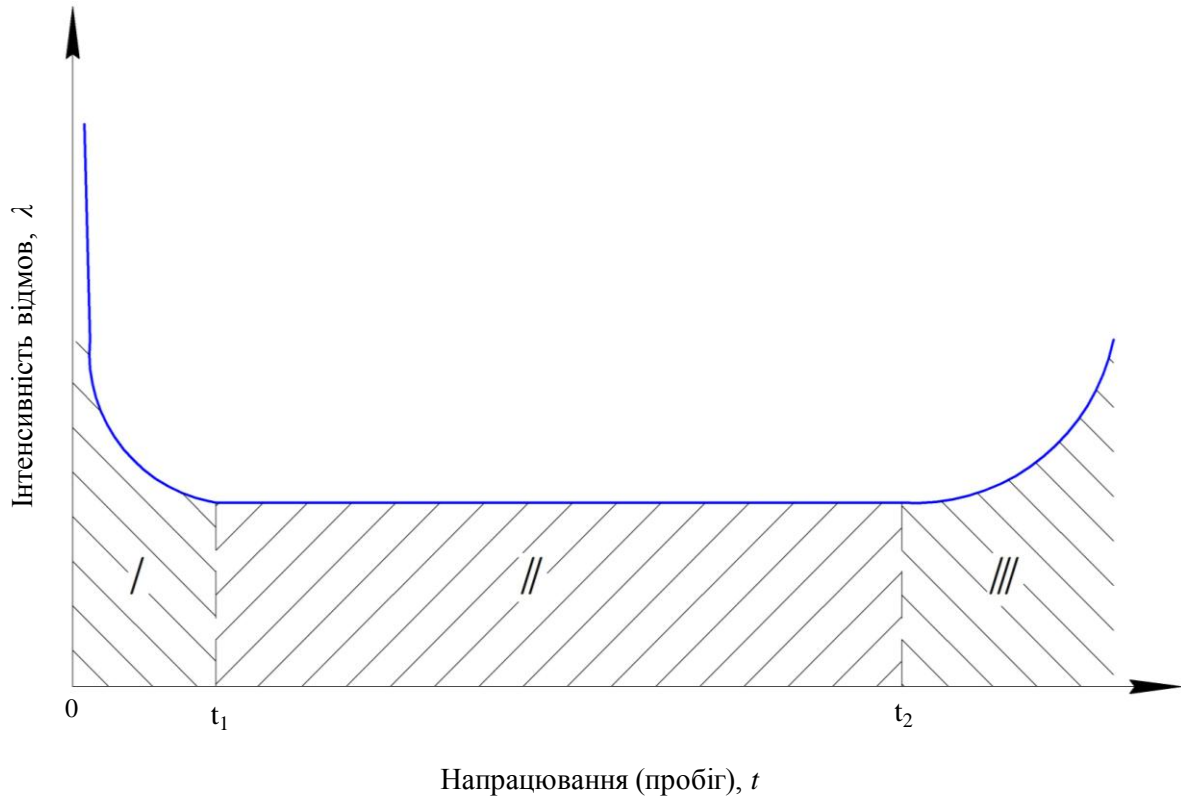


Рисунок 1.9 – Інтенсивність відмов вантажного вагона для життєвого циклу

Як бачимо з наведеної залежності, існує декілька часових інтервалів для інтенсивності відмов вагона. Перша зона для вагона характеризується підвищеним значенням інтенсивності відмов. Пояснити таку ситуацію можна тим, що в будь-якій партії випущених вагонів чи їх складових при випробуваннях завжди наявні дефектні зразки, які утворюються внаслідок конструкторських, технологічних чи експлуатаційних помилок. Далі ці зразки не беруть участі у випробуваннях. Тобто відбувається спадання інтенсивності відмов, що призводить до початку стану, що характерний для II зони, наведеної на рис. 1.7.

Ця зона відрізняється від інших постійністю інтенсивності відмов вагонів, тобто це є період нормальної експлуатації, який триває в інтервалі  $t_1 \dots t_2$  і є реальним терміном служби вагона.

Остання, III зона характеризується поступовою втратою працездатності та накопиченням прихованих відмов у конструкції вагонів, тобто старінням. У цьому випадку, інтенсивність відмов вагонів підвищується через значні зміни властивостей: фізико-механічних, фізико-хімічних, трибологічних тощо.

Розв'язуючи співвідношення (1.15) як лінійне однорідне диференціальне рівняння першого порядку щодо функції безвідмовності, отримаємо зв'язок між  $\lambda(t)$  і  $P(t)$ :

$$\lambda(t)dt = -\frac{dP(t)}{P(t)};$$

$$\int_0^t \lambda(t)dt = -\int_0^t \frac{dP(t)}{P(t)}.$$

Первісна підінтегральної функції дорівнює

$$\ln P(t),$$

тоді

$$\int_0^t \lambda(t)dt = \ln P(0) - \ln P(t).$$

При початковій умові  $P(0) = 1$  отримаємо

$$\ln P(t) = -\int_0^t \lambda(t)dt,$$

звідки для вагона



$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right). \quad (1.16)$$

Зокрема, коли  $\lambda(t) = \text{const}$ , останній вираз являє собою експоненціальний закон розподілу (надійності). За цим законом ймовірність безвідмовної роботи елементів вагонів, що мають інтенсивність відмов  $\lambda$ , зменшується за часом за експоненціальною кривою (рис. 1.10).

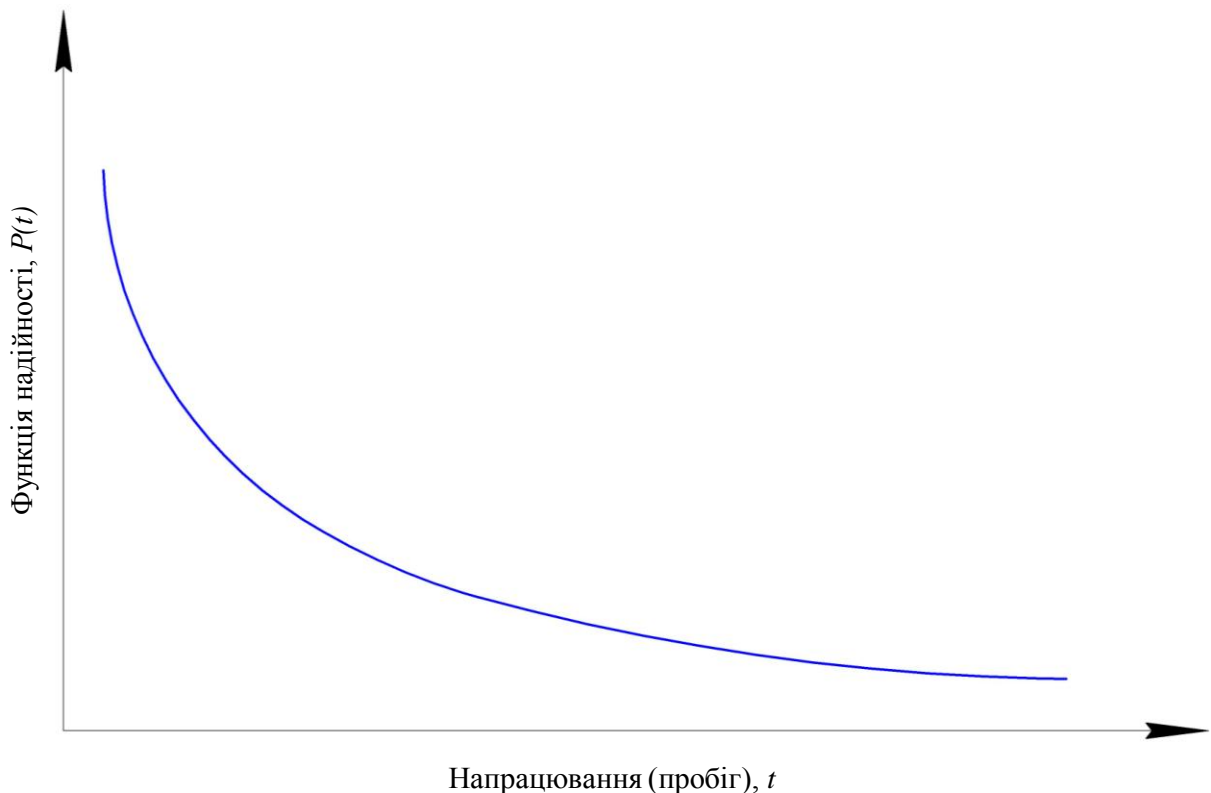


Рисунок 1.10 – Функція надійності (за експоненціальним розподілом)

Така залежність властива для періоду нормальної експлуатації вагона, коли ефекти зносу і старіння невідчутні. Таку криву можна називати функцією надійності. Вона має велике значення для практичного використання, коли необхідно знати, з якою ймовірністю вагон (вантажний або пасажирський) здатен виконувати задачу, що вимагає певної тривалості безвідмовної роботи.

Підставивши значення  $P(t)$  в (1.10), отримаємо:

$$T_{\text{сеп}} = \int_0^{\infty} e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} dt.$$

Якщо  $\lambda(t)$  дорівнює постійній величині, то

$$T_{\text{сеп}} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}, \quad (1.17)$$

де  $\lambda = \frac{1}{T_{\text{сеп}}}$  – середня кількість відмов вагона за одиницю часу. Тоді

(1.16) набуде вигляду

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (1.18)$$

Дисперсію часу безвідмовної роботи можна визначити за формулою [39, 56]

$$D[T] = \int_0^{\infty} \left(t - \frac{1}{\lambda}\right)^2 \lambda e^{-\lambda t} dt.$$

Після інтегрування останнього виразу отримаємо значення  $1/\lambda^2$ , а середньоквадратичне відхилення буде дорівнювати  $\sigma = 1/\lambda$ .

Таким чином, для нормального періоду експлуатації вагонів інтенсивність відмов залишається постійною і справедливою є показова модель надійності, час безвідмовної роботи має експоненціальний закон розподілу.

Статистично визначити інтенсивність відмов можна на основі такої формули [26, 39, 241]:

$$\bar{\lambda} = \frac{n \Delta t}{N_{\text{сер}} \cdot \Delta t}, \quad (1.19)$$

де  $N_{\text{сер}} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2}$  – середня кількість справно працюючих вагонів у інтервалі  $\Delta t$  ( $N_i$  – кількість вагонів, що справно працюють на початку інтервалу  $\Delta t$ ;  $N_{i+1}$  – кількість вагонів, що справно працюють в кінці інтервалу  $\Delta t$ ).

Параметр потоку відмов (середня частота відмов)  $\omega(t)$  – щільність ймовірності виникнення відмови відновлюваного вагона, що визначена для конкретного моменту часу.

Оскільки вагон складається з  $n$  елементів, що перебувають у нормальній експлуатації і працюють в однакових умовах, і в ньому за час  $t$  спостерігалось  $m$  відмов, то параметр потоку відмов становитиме:

$$\omega = \frac{m}{n \cdot t}. \quad (1.20)$$

У випадку коли  $\lambda(t) = \text{const}$ , середня частота відмов дорівнює:

$$\omega(t) = \lambda(t) = \text{const}.$$

Параметр потоку відмов використовують як показник безвідмовності відновлюваних об'єктів, до яких належать вантажні та пасажирські вагони, причому час відновлення вагонів не враховується. Для вагонів моменти відмов на осі часу утворюють потік відмов. Характеристикою такого потоку є математичне сподівання кількості відмов за час  $t$ :

$$\Omega \langle t \rangle = M \langle \mathbf{K} \rangle. \quad (1.21)$$

Параметр потоку відмов  $\omega \langle t \rangle$  характеризує середню кількість відмов вагонів, що очікуються на малому інтервалі часу, і визначається за формулою

$$\omega \langle t \rangle = \Omega' \langle t \rangle = \frac{M \langle \mathbf{K} \rangle_{t-\Delta t} - M \langle \mathbf{K} \rangle_t}{\Delta t}. \quad (1.22)$$

Статистичний характер визначення параметра потоку відмов вагонів  $\bar{\omega} \langle t \rangle$  має такий вигляд:

$$\bar{\omega} \langle t \rangle = \frac{n_1 \langle \Delta t \rangle}{N_0 \cdot \Delta t}, \quad (1.23)$$

де  $n_1 \langle \Delta t \rangle$  – загальна кількість відмов вагонів за інтервал часу (напрацювання)  $\Delta t$ .

Усереднений параметр потоку відмов вагонів  $\omega^* \langle t \rangle$  являє собою відношення математичного сподівання кількості відмов вагона за останнє напрацювання до значення цього напрацювання. Тобто математично можна записати:

$$\omega^* \langle t \rangle = \frac{M \langle \mathbf{K} \rangle_{t_2} - n \langle \mathbf{K} \rangle_{t_1}}{t_2 - t_1}. \quad (1.24)$$

Порівняно з параметром потоку відмов вагонів  $\omega \langle t \rangle$  у формулі (1.24) розглядається кількість відмов за кінцевий (останній) відрізок часу  $[t_1, t_2]$ , причому  $t_1 \leq t \leq t_2$ .

Статистичний характер визначення зазначеного параметра має такий вигляд:

$$\bar{\omega}^* = \frac{n_2 - n_1}{t_2 - t_1}. \quad (1.25)$$

Наступним показником надійності є довговічність. Для вагонів це їхня властивість виконувати необхідні функції до переходу в граничний стан за встановленої системи технічного обслуговування та ремонту. Довговічність вагонів може бути самостійним показником, який характеризує якість роботи деталей та вузлів у випадку, коли в ході експлуатації очікується чи відбувається їх відмова внаслідок процесів зносу та старіння.

Основними показниками довговічності є ресурс та строк служби [26, 39, 56].

Ресурс вагонів визначається пробігом (напрацюванням), а строк служби – календарною тривалістю від початку експлуатації до моменту появи граничного стану.

Гамма-відсотковий ресурс – це напрацювання, протягом якого вагон не досягне граничного стану із заданою ймовірністю  $\gamma$ . Тобто чим менше  $\gamma$ , тим більший ресурс вагона, і навпаки.

Гамма-відсотковий ресурс визначають за рівнянням

$$1 - F_r(t) = \int_{M_\gamma}^{\infty} f_r(t) dt = \frac{\gamma}{100}, \quad (1.26)$$

де  $F_r(t)$  – функція розподілу ресурсу вагона;  $f_r(t)$  – щільність розподілу ресурсу;  $t=M$  – поточне значення ресурсу.

Гамма-відсотковий ресурс визначають за експериментальним розподілом ресурсів партії вагонів. У цьому випадку використовують

експериментальні залежності, що включають значення усереднених ресурсів вагонів та їх поточне значення.

Медіанний ресурс – це гамма-відсотковий ресурс за ймовірності  $\gamma=50\%$ .

Медіанний ресурс можна обчислити за рівнянням

$$\int_0^{M_{0,5}} f_r(t) dt = 0,5. \quad (1.27)$$

Медіанний ресурс вагонів визначають аналогічно гамма-відсотковому ресурсу з побудовою деяких експериментальних залежностей.

Середній ресурс – це математичне сподівання ресурсу однотипних вагонів.

Ймовірнісне значення середнього ресурсу вагонів можна визначити для поточного значення ресурсу  $t=M$  за формулою:

$$\bar{M} = \int_0^{\infty} t \cdot f_r(t) dt. \quad (1.28)$$

Якщо зібрані експериментальні дані щодо ресурсів однотипних вагонів, статистичне значення середнього ресурсу можна визначити за формулою

$$\tilde{M} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M_i, \quad (1.29)$$

де  $N$  – загальна кількість експериментальних вагонів;  $M_i$  – зібрані експериментальні ресурси однотипних вагонів.

Середній сумарний ресурс – це середній ресурс вагона від початку експлуатації до його списання після виконання декількох капітальних

ремонтів. Такий ресурс розраховується як середнє арифметичне від ресурсів (напрацювань) після всіх проведених капітальних ремонтів.

Крім цього також розрізняють [26, 39, 241]:

- призначений ресурс – сумарне напрацювання вагона, за якого незалежно від його стану експлуатація завершується;
- середній ремонтний ресурс – середнє значення ресурсу між суміжними капітальними ремонтами вагона;
- середній ресурс до капітального ремонту – середнє значення ресурсу для партії однотипних вагонів від початку експлуатації кожного з них до настання необхідності проведення першого капітального ремонту (КР);
- гамма-відсотковий строк служби – це календарна тривалість експлуатації вагона аналогічно до гамма-відсоткового ресурсу.

Гамма-відсотковий строк служби однотипних вагонів визначається з виразу [26, 39, 241]:

$$\int_{T_{L\gamma}}^{\infty} f_L(t) dt = \frac{\lambda}{100}, \quad (1.30)$$

де  $T_{L\gamma}$  – гамма-відсотковий строк служби однотипних вагонів;  $f_L(t)$  – щільність розподілу строку служби однотипних вагонів.

Також розрізняють: середній строк служби, середній міжремонтний строк служби, середній строк служби до першого капітального ремонту, середній строк служби до списання, середній міжремонтний строк служби та медіанний строк служби. Знаючи функцію розподілу щільності строку служби вагонів та використовуючи підхід, який наведено для ресурсу, можна визначити всі вищеперелічені показники. Графічно це можна подати так (рис. 1.11) [26, 39, 241].

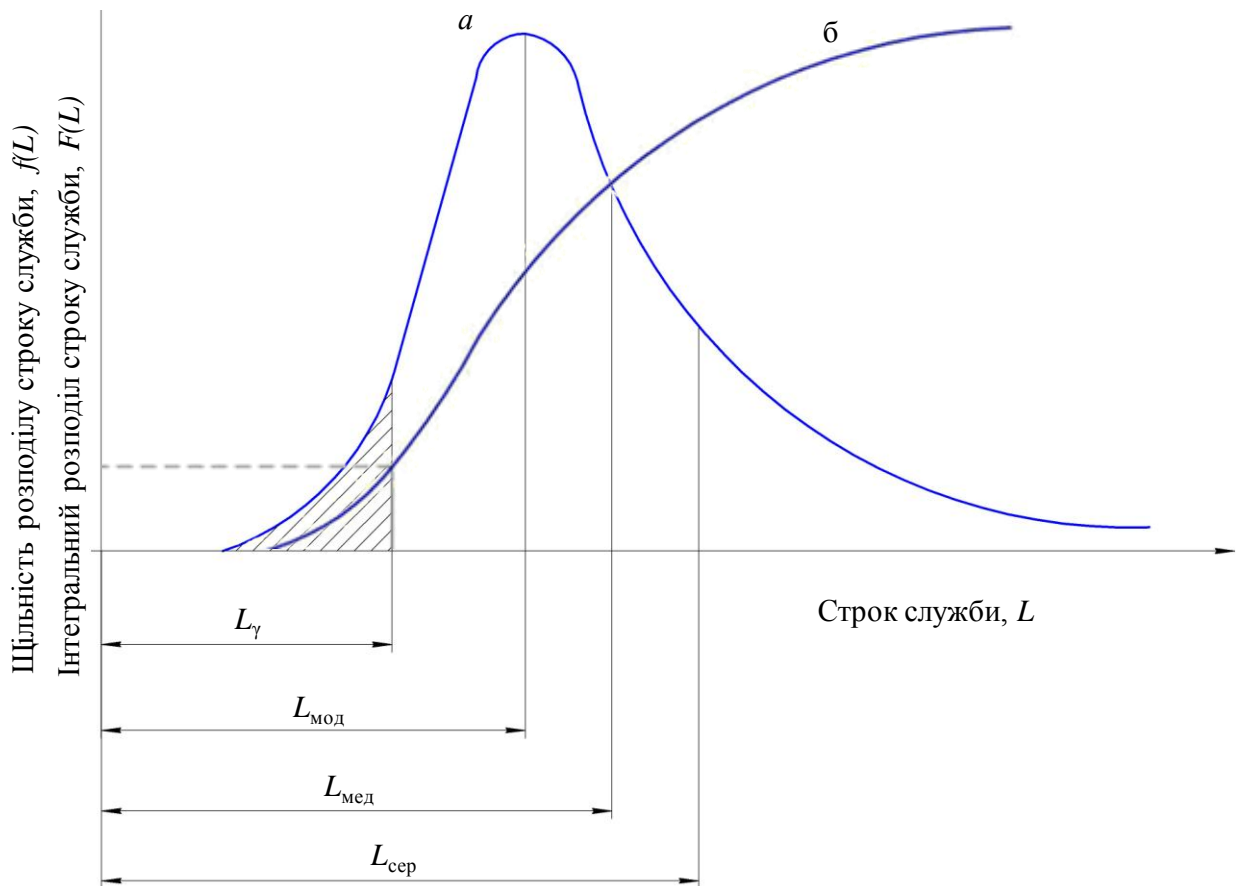


Рисунок 1.11 – Щільність розподілу (*a*) та інтегральний розподіл (*б*) строку служби вагонів

Як зазначалось, надійність містить ремонтпридатність і збережуваність [82]. Ремонтпридатність – це властивість вагона (чи будь-якого об'єкта) бути пристосованим до підтримання та відновлення стану, у якому він здатний виконувати потрібні функції за допомогою технічного обслуговування та ремонту, а збережуваність – властивість зберігати в заданих межах значення параметрів, що характеризують здатність вагона (об'єкта) виконувати потрібні функції під час і після зберігання та (чи) транспортування.

Показниками ремонтпридатності є такі. Ймовірність відновлення вагона в заданий час – ймовірність того, що час відновлення вагона не перевищить заданого. Час, що витрачається на виявлення та усунення відмов, є випадковою величиною, що залежить від багатьох факторів: кваліфікації



обслуговуючого персоналу, якості застосовуваних у системі підходів, повноти контролю, моніторингу тощо. Закон розподілу часу виявлення й усунення відмов вагонів наближається до експоненціального.

Середній час відновлення вагонів  $t_g$  – це математичне сподівання часу відновлення їх працездатності, тобто часу, витраченого на пошук і усунення несправностей. Якщо на відшукування та усунення  $m$  відмов вагонів було витрачено час  $t_1, t_1, \dots, t_m$ , то середній час відновлення вагона можна визначити як

$$t_g = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_i. \quad (1.31)$$

Існують такі показники збережуваності вагонів. У режимі зберігання та (чи) транспортування вагонів, так само як і в режимі використання, можуть виникати відмови, тому збережуваність характеризується показниками, аналогічними показникам безвідмовності: ймовірністю невникнення відмов протягом заданого часу зберігання (транспортування), середнім часом зберігання до відмови, інтенсивністю відмов і параметром потоку відмов при зберіганні. Однак основним у експлуатації вагонів є їх застосування, безпосереднє використання за призначенням, тому особливого значення набуває оцінка впливу зберігання і транспортування на подальшу поведінку вагонів у робочому режимі. Показники зберігання характеризують величину терміну зберігання – календарної тривалості зберігання (транспортування) вагона в заданих умовах, протягом і після якого зберігаються значення заданих характеристик у встановлених межах.

Середній термін зберігання вагона – це математичне сподівання терміну зберігання. Гамма-процентний термін зберігання – це термін зберігання, який буде досягнутий вагоном із заданою ймовірністю  $\gamma$ -відсотків.

Підсумовуючи вищенаведене, можна стверджувати, що на сьогодні існує теорія надійності у вигляді окремого випадку ймовірнісно-статистичної теорії, яка використовується для визначення або передбачення настання відмов об'єкта.

У теорії надійності співіснують два напрямки, які споріднені за ідеологією та загальною системою понять, але відрізняються за підходами [26, 39, 241]. Перший напрямок полягає у системності, статистичності, тобто математична теорія надійності, другий – можна назвати фізичною теорією надійності. Об'єктом системної (статистичної, математичної) теорії надійності є системи з елементів, що взаємодіють між собою в сенсі збереження працездатності за логічними схемами: графами, деревами відмов тощо.

Вихідну інформацію в системній теорії надійності, як правило, утворюють показники надійності елементів, що визначаються шляхом статистичної обробки результатів випробувань і (або) експлуатаційних даних. Завдання системної теорії надійності вирішують у рамках теорії ймовірностей і математичної статистики, тобто без залучення фізичних моделей відмов і тих фізичних явищ, які викликають і супроводжують виникнення відмов.

Витоки фізичної теорії надійності можна знайти в ранніх роботах зі статистичного тлумачення коефіцієнтів запасу при розрахунку інженерних конструкцій [4, 26, 54]. Відмітна риса фізичної теорії надійності полягає в тому, що підтримання працездатності системи й можливості виникнення відмов розглядають у ній як результат взаємодії між системою і зовнішніми впливами (експлуатаційними навантаженнями, умовами середовища тощо), а також механічними, фізичними й хімічними процесами, які відбуваються в компонентах системи в процесі її експлуатації. Поряд із засобами теорії ймовірностей і математичної статистики у фізичній теорії надійності широко використовують моделі й методи природничих і технічних наук.

Фізична теорія надійності вказує, що насамперед безвідмовність вагонів забезпечується постійністю або незначною зміною фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей (у допустимих межах) кожного елемента. Тобто повинна бути забезпечена збережуваність фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей кожного елемента вагона в первісному (вихідному) вигляді або з деякою їх незначною зміною, яка не призведе до істотного погіршення внутрішнього стану матеріалів елементів, деталей та вузлів. Передусім це стосується збережуваності таких властивостей, як: мікроструктура, хімічний і фазовий склад матеріалів, які безпосередньо впливають на зміну твердості, міцності, пластичності, зносостійкості, корозійної, ерозійної стійкості та інших властивостей. У свою чергу незмінність або незначна зміна (у допустимих межах) зазначених властивостей забезпечує тривалу й безвідмовну роботу елементів та вагона в цілому, в основі якої і лежить фізична надійність.

Слід зазначити, що фізична надійність різного роду матеріалів і є основою будь-якої надійності (експлуатаційної, локальної, комплексної та ін.) як окремих елементів, деталей та вузлів, так і вагона у цілому. Водночас якщо до матеріалів елементів, деталей та вузлів вагона можна застосувати поняття тільки фізичної надійності, то до конструкцій різних вагонів, поряд з фізичною надійністю, можуть бути застосовані поняття конструктивної і технологічної надійності. Технічна література й нормативна документація не містять таких понять. Але введення цих термінів постійно диктується виробничою необхідністю, особливо на етапах проєктування та виготовлення вагонів. Крім того, слід вказати на існування експлуатаційної надійності вагонів, яка має безпосередній зв'язок з фізичною надійністю, у тому числі й з конструктивною, і з технологічною. Під час проєктування вагонів, відповідно до норм [241], у конструкторську надійність закладається ймовірність безвідмовної роботи з певним (необхідним) значенням, тобто на цьому етапі використовується математичний апарат теорії надійності без урахування можливих (у процесі виготовлення й експлуатації) змін фізико-

механічних та фізико-хімічних властивостей окремих елементів, деталей тощо.

У процесі виробництва вагонів (у початковий момент часу) з різних матеріалів виготовляються деталі та вузли, яким властива певна (спроєктована) конструкція, яка надалі буде працювати в певному вагоні. Надійність, а в остаточному підсумку й безвідмовність, цієї деталі, буде визначатися не тільки вихідними властивостями матеріалу, а й тим, яким чином конструкція елементів і деталей буде впливати на втрату фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей у процесі взаємодії цих елементів протягом експлуатації вагонів. Наприклад, якщо спроектувати елемент чи деталь вагона так, що в них будуть наявні концентратори напружень (гострі кути, нераціонально розташовані отвори тощо), то внаслідок статичних і динамічних навантажень під час експлуатації в зонах концентрації напружень будуть утворюватися тріщини з подальшим руйнуванням конструкції окремого вузла чи вагона в цілому. Якщо спроектувати конструкцію зазначених елементів чи деталей з галтелями, то згаданих процесів руйнування не відбудеться, тобто загальна надійність конструкції вагона буде дещо вищою.

Також особливістю конструктивної надійності вагонів є зберігання вихідної (спроєктованої) конструкції елементів чи деталей в процесі експлуатації в первісному вигляді. Наприклад, якщо в процесі експлуатації різнотипних вагонів конструкція елементів, деталей чи вузлів не зазнає істотних змін, то забезпечення її працездатності й безвідмовності буде гарантоване.

Якщо в процесі роботи під час експлуатації вагонів у конструкції сталося довільне зміщення одних її елементів відносно інших за межі допустимого або втрата окремих елементів (через тривалу вібрацію відбулося розкручування гайок, випадання болтів або окремих елементів, деталей, стався їх перекид тощо), то така конструкція зрештою виявиться непрацездатною і ненадійною. Отже, недотримання збереження початкового

(вихідного) взаємного орієнтування елементів чи деталей конструкції або зміна її комплектності може бути причиною відмови, тобто така відмова буде ознакою низького рівня конструктивної надійності вагона, а в деяких випадках і технологічної надійності.

Першорядне значення надійності пов'язано з тим, що її рівень значною мірою визначає розвиток автоматизації виробничих процесів, інтенсифікації робочих процесів, економії матеріалів і енергії.

Актуальність надійності зростає у зв'язку зі складністю сучасних машин і важливістю функцій, які вони виконують [26, 34-36, 38, 88, 98, 117, 126, 224, 225, 226, 228, 229, 263]. Сучасні технічні засоби складаються з безлічі взаємодіючих механізмів, апаратів і приладів. Відмова хоча б одного елемента складної системи призводить до порушення роботи всієї системи.

У сучасній теорії надійності однією з проблем є складність і часто невизначеність процесів, що відбуваються в об'єкті і його елементах, залежність явищ від багатьох причин (початкового стану, особливостей зберігання, транспортування і експлуатації, технічного обслуговування і ремонтів, кваліфікації обслуговуючого персоналу та ін.), які роблять задачу точного визначення моменту відмови об'єкта практично нерозв'язною.

Останні дослідження надійності, що проводилися для різних виробів, машин і агрегатів [36, 39], показують, що для розрахунку показників безвідмовності, довговічності й збережаності вагонів можна застосувати ймовірнісно-фізичний метод, що враховує немінучі під час експлуатації вагонів витрати ресурсів [26, 35, 133, 180].

Методика встановлення кількісних показників надійності ґрунтується на вивченні фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей і параметрів різних типів технічних засобів, на основі якого можна виявити закономірності процесів старіння елементів чи деталей з часом чи напрацюванням (при витраті ресурсу), а також виконати визначення аналітичних залежностей зазначених процесів з показниками надійності вагонів. У ході вивчення процесів старіння вагонів, тобто деградаційних

процесів, можна застосувати математичні методи дослідження внутрішніх змін фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей із залученням теорії випадкових процесів та з використанням стохастичних рівнянь, а також фізичне моделювання використання ресурсу елементів, деталей та вузлів вагона з проведенням випробувань на безвідмовність.

Використання деградаційних моделей на основі випадкових процесів і стохастичних кінетичних рівнянь дозволяє знайти залежності ймовірності безвідмовної роботи (чи відмови) і фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей (або конкретного параметра), що призвели до відмови вагона. Отримані результати розв'язання стохастичних рівнянь, що описують внутрішні властивості елементів чи деталей різних технічних засобів, неодноразово підтверджені тривалими випробуваннями розроблених фізичних моделей, що дозволяють із залученням статистичного апарату зробити достовірні адекватні висновки [26, 36, 39]. Це, у свою чергу, надає можливість виконати розрахунки фізичної надійності різнотипних вагонів у процесі старіння і використання ресурсу з урахуванням процесів деградації в матеріалах їх елементів та деталей у випадку, коли функцією напрацювання є інтенсивність відмов. Зазначений підхід забезпечує розв'язання багатьох практичних задач, що існують у сучасній теорії надійності.

#### **1.4 Висновки до розділу 1**

1. За результатами аналізу стану безпеки руху в структурі Державної адміністрації залізничного транспорту України протягом 2013–2015 рр. можна зробити висновок про те, що основною і головною причиною настання транспортних подій є несвоєчасне вилучення із експлуатації рухомого складу, технічний стан якого не відповідає вимогам ПТЕ. Вагон має складну конструкцію, що складається із значної кількості елементів з неоднаковою довговічністю. Частина деталей, вузлів і вагона в цілому отримують пошкодження (конструкторські, технологічні, експлуатаційні)

раніше планового виду ремонту, у той час як інші елементи мають більш тривале напрацювання до відмови, ніж міжремонтний термін. Несвоєчасний ремонт вагонів, який має елементи з різною довговічністю, призводить до значних збитків.

2. Виконаний аналіз досліджень у теорії надійності показав значні розбіжності у визначенні терміна «надійність». На сьогодні теорія надійності існує тільки у вигляді окремого випадку ймовірно-статистичної теорії, яка використовується для визначення або передбачення настання відмов об'єкта.

3. Існуюча методологія вивчення надійності спирається на морально застарілу термінологію й не використовує у своїх розрахунках (теорії) багатий експериментальний матеріал і результати практичного досвіду. В основу цієї методології покладені математичні методи дослідження, що базуються на результатах відмов техніки без урахування причин, що їх викликають. Тільки комплекс досліджуваних і тісно пов'язаних між собою питань у вивченні надійності може дати повну й достовірну картину досліджуваного явища при відповідній відмові. Цей комплекс повинен містити методологію та відповідну термінологію, що буде відповідати дійсності.

4. Показники надійності можна регулювати на етапах життєвого циклу вагонів (проєктування, виготовлення, експлуатація), що дозволяє використовувати сучасні засоби та методи проєктування, обчислень, технологій виготовлення, ремонту й обслуговування

5. Успішне вирішення зазначених завдань полягає, по-перше, у розробці нових технологій підвищення надійності. По-друге, в узагальненні розрізних експериментальних даних за механізмом зносу з метою створення загальної бази даних «тертя–знос–руйнування» різного роду матеріалів від початку їх виготовлення до повного руйнування. А потім необхідно проводити пошуки й розробляти нові технології виготовлення елементів та деталей, які знижують знос, підвищують фізико-механічні та триботехнічні властивості матеріалів на етапах їх виготовлення й обробки.

6. Запропоновано схему дослідження відмов вантажних вагонів з урахуванням існуючої класифікації пошкоджень механічних систем.

Вирішення вищеперелічених питань дозволить підвищити надійність рухомого складу та безпеку руху поїздів, а також, відповідно, підвищити техніко-економічні показники роботи залізниць.



## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ НА ЕТАПАХ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ

#### 2.1 Удосконалення алгоритму дослідження надійності вантажних вагонів на етапах життєвого циклу

Аналіз досліджень у теорії надійності, що виконаний у попередньому розділі, показав значні розбіжності у визначенні терміна «надійність».

Розрахунки надійності мають на меті отримання кількісних значень показників надійності вагона (вантажного чи пасажирського). Ці розрахунки є обов'язковим елементом на етапах розробки, створення й використання будь-яких технічних систем [4, 26, 35, 36, 39, 88, 98, 117, 126, 201, 224, 225, 226, 228, 229, 241, 263].

При аналізі надійності вагона основна складність пов'язана зі складанням структурної схеми розрахунку й аналітичних (розрахункових) формул. Якщо вони є (наприклад, взяті з довідника), то розрахунок не становить труднощів і має переваги перед іншими способами дослідження надійності.

Існуючі розрахункові формули отримані при значній кількості обмежень (припущень). Найбільш часто такими обмеженнями є:

- обов'язковість експоненціального розподілу часу до відмови вагона й часу відновлення його працездатності;
- досліджувані процеси – марковські, досліджувані потоки подій – найпростіші;
- у розрахунках враховуються тільки середні значення показників надійності.

На етапі проєктування вагонів виконують розрахунок надійності для прогнозування очікуваних показників надійності.

Під час проєктування нових конструкцій вагонів результати розрахунків надійності використовуються для обґрунтування вибору технічних рішень для елементів, деталей та вузлів, що входять у конструкцію вагона, а також для вибору технологій проведення технічного обслуговування, діагностики та ремонту, постановки на контроль, обґрунтування структури обслуговуючої системи, вимог до надійності елементів, деталей та вузлів.

Етап виготовлення вагонів містить технологічний процес виробництва, який являє собою складний комплекс взаємодій виконавців і обладнання з перетворення вихідних матеріалів у вагон, що складається з процесів (етапів) виготовлення деталей, їх збирання та монтажу, випробування і регулювання. Під час випробувань вагонів визначення показників надійності виконується з метою оцінки відповідності показників надійності випробуваних елементів, деталей та вузлів заданим у технічному завданні вимогам [100, 194, 238].

На етапі експлуатації вагонів розрахунки показників надійності використовуються для вибору й обґрунтування складу та обсягу запасних частин замість тих, що відмовили, а також для проведення обґрунтованого планування на технічне обслуговування й ремонт.

Вище було розглянуто існування математичної та фізичної теорій надійності [4, 26, 39, 125], на основі яких складено алгоритм, до якого входить структурна схема дослідження надійності вантажних вагонів (рис. 2.1).

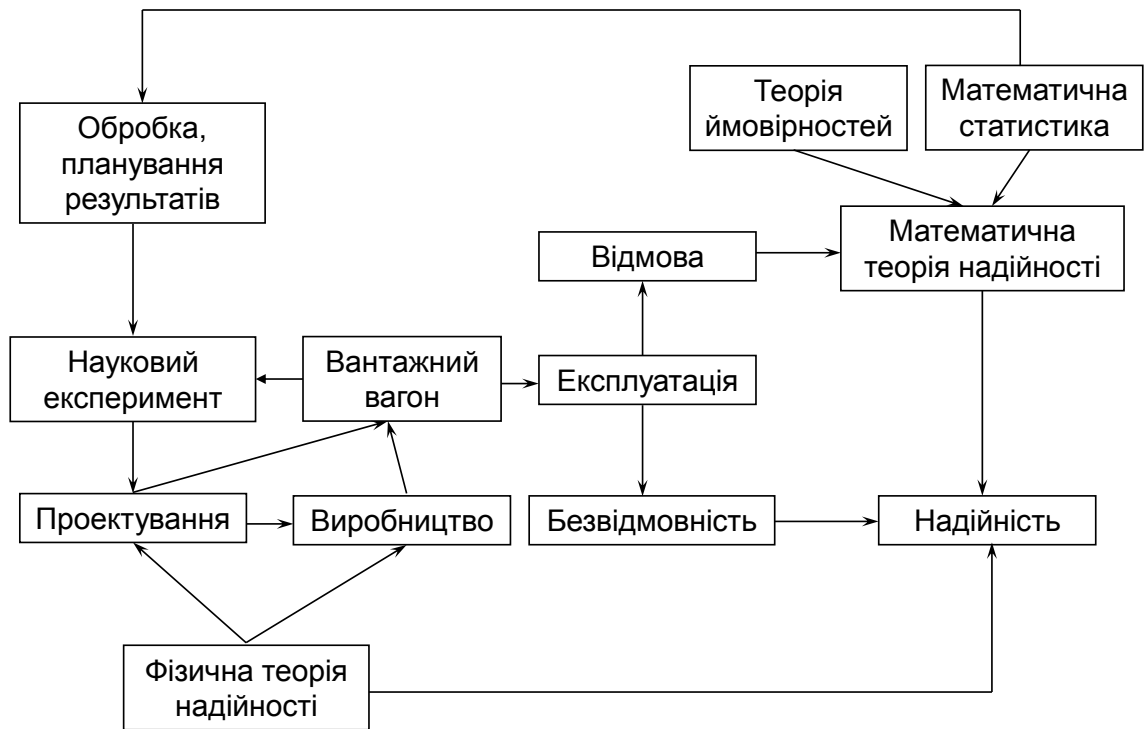


Рисунок 2.1 – Структурна схема дослідження надійності вантажного вагона

Розглядаючи існуючий алгоритм у вигляді структурної схеми дослідження надійності вантажного вагона, слід зазначити, що він (рис. 2.1) повинен містити дещо інші блоки та зв'язки (рис. 2.2), що наведено у вигляді блок-схеми дослідження надійності на тому самому прикладі для вантажного вагона.

Запропонована структурна схема (що включена до алгоритму) дослідження показників надійності вантажного вагона (див. рис. 2.2) відрізняється від існуючої тим, що:

- надійність охоплює конструкторську, технологічну та експлуатаційну складові. Тобто окремо на кожному етапі існування вантажного вагона переглядаються показники надійності й при цьому враховуються ті чи інші

конструкторські, технологічні, експлуатаційні чинники, що впливають на загальну надійність вантажного вагона;

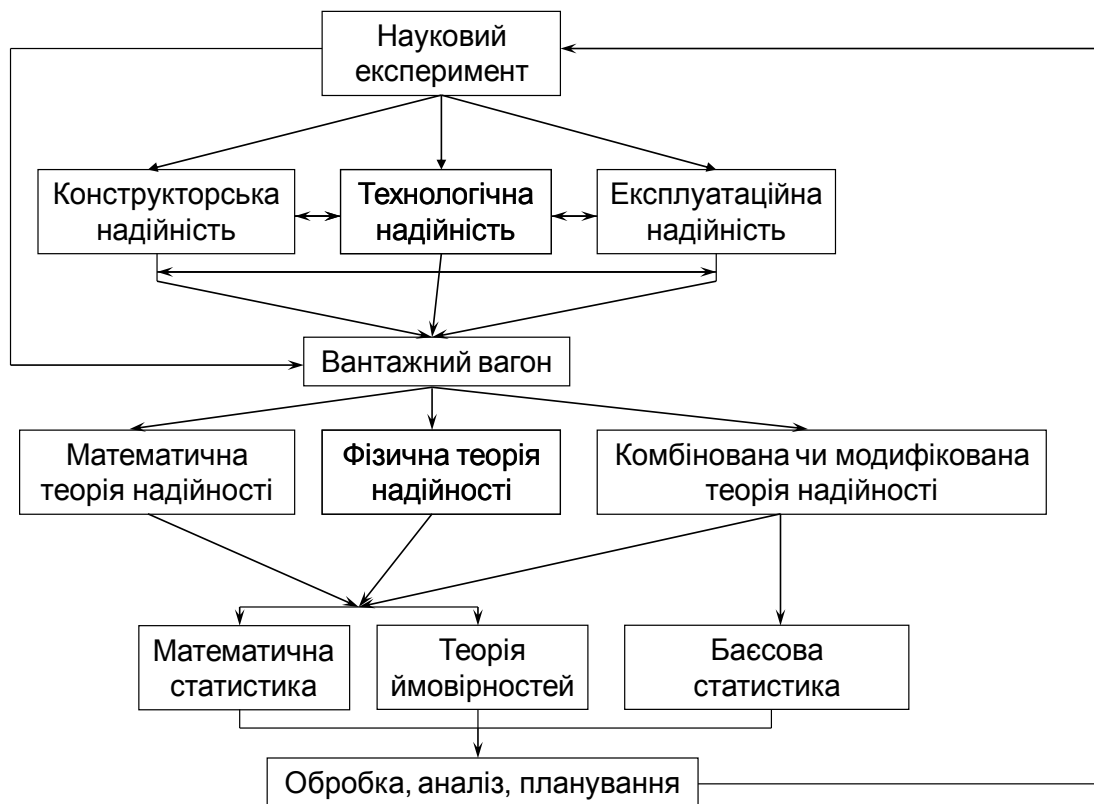


Рисунок 2.2 – Запропонована структурна схема дослідження показників надійності вантажного вагона

- науковий експеримент включає моделювання роботи вантажного вагона в різних умовах та експлуатаційних режимах. На етапі експерименту в надійність вантажного вагона закладаються параметри, що отримані в результаті математичного моделювання для певних умов експлуатації;

- теорія надійності охоплює математичні й фізичні засади, тобто є комбінованою, а застосування Баєсової статистики надає можливість описати різні стани вантажного вагона з розбиванням його на основні складові та з відповідною ймовірністю для кожного з них описувати його загальну надійність.

Метою побудованої системи надійності вантажного вагона є підвищення безпеки руху та експлуатації на основі виявлення можливих

критичних відмов у процесі експлуатації з розробленням конструктивних, технологічних і експлуатаційних заходів, що спрямовані на підвищення ймовірності безвідмовної роботи вагона зі зниженням ймовірності тяжкості можливих наслідків таких відмов; підвищення конструкторської, технологічної та експлуатаційної надійності вагонів шляхом виявлення й усунення причин можливих критичних відмов, що можуть призвести до наслідків різної тяжкості.

При використанні запропонованої методології дослідження надійності вантажного вагона повинні бути вирішені поставлені завдання, що полягають:

- у виявленні можливих видів відмов елементів, деталей, вузлів вагона на визначеному рівні розукрупнення складових структурних частин із залученням Баєсової статистики;

- у вивченні потенційних причин, можливих механізмів і умов, при яких можуть з'явитися та підсилитися виявлені відмови структурних складових вагона;

- у проведенні класифікації виявлених відмов за ступенем тяжкості (критичність наслідків), у постійному виявленні критичних відмов різнотипних вагонів з подальшим складанням і періодичним коригуванням самого переліку критичних елементів, деталей, вузлів, а також модифікацією технологічних процесів виготовлення зазначених структурних елементів;

- в оцінці існуючих засобів контролю працездатності та надійності вагонів під час їх експлуатації з метою своєчасного вияву критичних відмов з їх індикацією та подальшим обґрунтуванням необхідності введення додаткових засобів чи програмних продуктів, призначених для контролю та діагностики;

- у генеруванні пропозицій щодо змін на проєктному та технологічному етапах виготовлення вагона і його елементів, деталей та вузлів (усіх структурних елементів), що спрямовані на підвищення рівня надійності та на зниження ймовірності настання тяжких наслідків у випадку прояву

критичних відмов та, крім того, будь-яких інших відмов, зокрема із залученням Баєсової статистики;

- в оцінці достатності контрольних, перевірочних та профілактичних заходів безпеки руху поїздів або визначенні необхідності введення додаткових заходів із запобігання, насамперед, критичним відмовам вагонів в існуючій чи розробленій системах технічного обслуговування й ремонту під час їх експлуатації;

- в аналізі ефективності існуючих заходів безпеки руху поїздів з можливим їх вдосконаленням;

- в аналізі можливих помилок обслуговуючого персоналу під час експлуатації вагонів (під час виконання технічного обслуговування) та під час проведення їх ремонту з оцінкою наслідків таких помилок і розробкою додаткових заходів, спрямованих на зменшення дії людського фактора.

Методологія вивчення надійності вантажного вагона повинна включати методи якісного аналізу потенційних відмов і можливих наслідків та кількісного аналізу відмов щодо їх критичності. Величину наслідків потенційних відмов якісно необхідно оцінювати з урахуванням загрози життю людей, екологічних та матеріальних збитків.

Проведення кількісного аналізу відмов щодо їх критичності необхідно здійснювати на основі критеріїв врахування: оцінки наслідків, очікуваної ймовірності появи та швидкості розвитку відмови вагона визначеного виду. Для надання кількісної оцінки наслідків відмов вагонів можна застосувати [32, 95, 102]:

- експертні методи;
- показники, що являють собою числові характеристики функції втрат (математичне сподівання).

Такий аналіз необхідно проводити, починаючи з етапу розробки нових вагонів (при проєктуванні), і повторювати неодноразово під час експлуатації з відповідним напрацюванням конкретної конструкції, а також на етапі

технології виготовлення з усуненням усіх можливих недоліків, що можуть призвести до відмов вагонів під час експлуатації.

Найважливіший результат при побудові системи надійності вагонів досягається за допомогою переліку критичних елементів, деталей та вузлів, а також технологічних процесів (при виготовленні вагонів). На кожному етапі існування вагона на основі проведеного аналізу необхідно корегувати такий перелік. Особливо слід звернути увагу на будь-яку відмову елемента, деталі чи вузла вагона, яка неминуче призведе до повної відмови вагона в цілому та, крім того, якщо в момент проведення аналізу були відсутні достовірні дані про їх якість і надійність у відповідних умовах застосування.

У перелік критичних процесів виготовлення необхідно включати технологічні процеси, що безпосередньо пов'язані з виробництвом критичних елементів, та процеси, вплив яких на якість виготовлення елементів та деталей і надійність вагона в цілому та його структурних елементів під час проведення безпосереднього аналізу заздалегідь невідомі чи недостатньо вивчені.

Кожний критичний елемент конструкції вагона, що включений до відповідного переліку, повинен містити достатню інформацію, пов'язану:

- з причинами включення в такий перелік (категорія критичності відмови, будь-які інші ознаки критичності);
- описом причин і можливих наслідків відмов;
- рівнем надійності елемента, деталі чи вузла вагона, обчисленим на основі статистичних даних із залученням Баєсової статистики;
- заходами щодо підвищення конструктивної, технологічної і експлуатаційної надійності, які спрямовані на зменшення ймовірності відмов елементів, деталей та вузлів із забезпеченням найменших людських, матеріальних та екологічних втрат;
- додатковими пропозиціями щодо внесення змін як у конструкцію вагона, так і в його окремі структурні складові (етап проєктування), а також у технологічний процес (етап виготовлення);

- пропозиціями щодо проведення додаткових досліджень і випробувань відповідних зразків елементів, деталей, вузлів чи вагона в цілому з метою відпрацювання й отримання необхідної інформації про стан їх (його) надійності в конкретних визначених умовах застосування (експлуатації).

Вивчати надійність вагонів можна із залученням таких методів [29, 35, 241]:

- структурного;
- функціонального;
- комбінованого.

Вивчаючи надійність вагона в цілому, аналіз, в основному, необхідно здійснювати комбінованим методом, що поєднує елементи структурного й функціонального. Це дозволяє виконати найбільш повний і вичерпний аналіз.

## **2.2 Оцінка показників зносу елементів вантажних вагонів із застосуванням класичної теорії ймовірностей**

Одним з найважливіших завдань, які ставляться до рухомого складу залізниць, є підвищення надійності, збільшення ресурсу вузлів і деталей, що, у свою чергу, вимагає створення нових або вдосконалення існуючих зразків вагонної техніки [42, 88, 98, 117, 126, 150, 173, 174, 182, 224, 225, 226, 228, 229, 263].

Надійність контролюється на кожному етапі життєвого циклу нових зразків вагонів, зокрема й під час експлуатаційних випробувань, коли накопичуються статистичні дані про стан їх зношування, відмови й пошкодження [26, 27, 139, 146, 136, 149, 131].

Збір і первинна обробка інформації про надійність вагонів, з урахуванням подальшої повної математичної обробки, повинна забезпечити [4, 35, 39, 88, 98, 117, 126, 224, 255, 263]:

- отримання порівнянних і об'єктивних даних про надійність вагонів та їх складових частин;



- можливість узагальнення результатів обробки інформації про надійність.

Збір та обробка інформації про надійність вагонів повинна проводитися з метою отримання достовірних даних, що забезпечують можливість і впровадження [35, 96, 136, 146]:

- конструктивних удосконалень з метою підвищення надійності;
- удосконалень технології виготовлення, складання, контролю та випробувань, спрямованих на забезпечення необхідного рівня надійності;
- організаційно-технічних заходів, спрямованих на дотримання правил технічної експлуатації, підвищення ефективності технічного обслуговування, якості ремонту та оптимізації витрат на його проведення.

Статистична інформація про надійність і технічний стан вагонів повинна забезпечити можливість вирішення таких завдань [35, 36, 173, 174, 241]:

- визначення причин виникнення відмов і несправностей;
- встановлення і коригування нормованих показників надійності;
- виявлення систем, агрегатів, вузлів і деталей, що лімітують надійність вагонів;
- визначення номенклатури та кількості запасних частин і матеріалів;
- виявлення впливу умов і режимів експлуатації на надійність;
- визначення економічної ефективності від підвищення надійності деталей і вузлів вагонів.

Знання теоретичних законів розподілу показників надійності вагонів дає можливість прогнозувати їх надійність на певний період з певною ймовірністю і з урахуванням цього будувати технічну політику в галузі експлуатації.

Найбільше значення для вирішення завдань забезпечення надійності вагонів мають такі закони розподілу випадкових величин [35, 173, 174, 241]: експоненціальний, нормальний та закон Вейбулла–Гнеденка.

Розподіл значень багатьох показників надійності підпорядковується експоненціальному закону. Експоненціальний закон у теорії надійності набув найширшого застосування, оскільки він простий для практичного використання [44, 149, 241]. Практично всі завдання, які наявні в теорії надійності, з використанням закону експоненціального розподілу вирішуються набагато простіше, ніж у разі використання інших законів розподілу. Цей закон описує надійність роботи вагона в період його нормальної експлуатації, коли поступові відмови (зношення) ще не проявляються і надійність характеризується раптовими відмовами. Ці відмови викликаються несприятливим поєднанням різних факторів і тому мають постійну інтенсивність відмов  $\lambda$ . Суттєвою перевагою цього закону є те, що він має один параметр.

Експоненціальним законом розподілу випадкових величин описується час безвідмовної роботи складових вагона до появи поступових відмов [35, 241]. Крім того, цей закон використовують для вирішення проблем, пов'язаних з технічним обслуговуванням і ремонтом вагонів. Експоненціальний розподіл можна застосувати для опису часу безвідмовної роботи вагона як системи з великою кількістю послідовно з'єднаних елементів за умови, що кожен з елементів окремо не робить впливу на відмови інших елементів вагона. Застосування експоненціального закону в багатьох випадках дозволяє істотно спростити розрахункові формули.

Умова  $\lambda(t) = \lambda = const$  достатня для використання експоненціального закону розподілу під час опису надійності вагонів [35, 36, 173, 241].

Гіпотезу про експоненціальний розподіл напрацювання до відмови можна перевірити статистично. Тобто, як зазначалося в попередньому розділі, якщо конструкція вагона спроектована й виготовлена без грубих помилок, то крива інтенсивності відмови  $\lambda(t)$  має вигляд, наведений на рис. 1.10.

Нормальний закон розподілу часто називають законом Гаусса [35, 36]. Цей закон займає важливе місце в описі надійності вагонів і порівняно з іншими законами розподілу найбільш часто використовується в теоретичних і практичних розрахунках.

Основна особливість цього закону полягає в тому, що він є граничним законом, до якого наближаються інші закони розподілу [241]. Вивчаючи надійність вагонів, нормальний закон розподілу використовують для опису поступових відмов, коли розподіл часу безвідмовної роботи на початку має низьку щільність, потім максимальну й далі щільність знижується, тобто нормальним розподілом описують напрацювання на відмову ходових частин вантажних вагонів внаслідок їх зносу і старіння.

Якщо на зміну значення випадкової величини (величини зносу) впливають багато приблизно рівнозначних чинників, то в такому випадку розподіл завжди підпорядковується нормальному закону.

Так, для вантажних вагонів у період їх старіння або прогресуючого зношування (див. рис. 1.10) напрацювання до відмови за зношеним станом і, відповідно, періоди до капітального ремонту добре узгоджуються з нормальним законом розподілу.

Крива щільності розподілу нормального закону має симетричний, колоколоподібний вигляд. При цьому крива  $f(t)$  на 99,73 % укладається в інтервал  $6\sigma$  [241]. Інакше кажучи, ймовірність потрапляння значення  $t$  в межі  $(\bar{t} + 3\sigma)$  близька до одиниці. Оскільки інтенсивність відмов  $\lambda(t)$  монотонно зростає, то такий закон відносять до старіючих [35].

Серед існуючих безперервних розподілів закон Вейбулла–Гнеденка [241] є одним з найбільш часто вживаних в оцінці надійності вагонів за результатами випробувань та експлуатації, а також при вивченні розкидів у їх строках служби. Також його використовують для оцінки надійності вузлів, деталей і з'єднань вагонів. Таке широке використання цього закону пояснюється тим, що він являє собою двопараметричний розподіл.

Слід зазначити, що за допомогою закону Вейбулла–Гнеденка можна описати випадковий процес утворення тріщин у різних матеріалах як у окремих частинах, так і у вагоні в цілому.

Також слід зауважити, що експоненціальний закон розподілу являє собою окремий випадок закону розподілу Вейбулла–Гнеденка (при  $a = 1$ ) [35, 36, 173, 241]. Існують й інші окремі випадки цього закону розподілу. Ця обставина надала можливість для широкого застосування закону Вейбулла–Гнеденка при обробці значень показників надійності різної техніки, зокрема й вантажних вагонів.

Запишемо основні ознаки, що властиві експоненціальному закону [35, 173, 241] для відповідних показників надійності вагона (графічна залежність інтенсивності відмов за експоненціальним законом наведена в попередньому розділі на рис. 1.6):

- функція розподілу напрацювання до відмови:

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t), \quad t \geq 0; \quad (2.1)$$

- щільність розподілу:

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t), \quad t \geq 0; \quad (2.2)$$

- ймовірність відмов:

$$p(t) = \exp(-\lambda t), \quad t \geq 0; \quad (2.3)$$

- інтенсивність відмов:

$$\lambda(t) = \lambda = \text{const}. \quad (2.4)$$

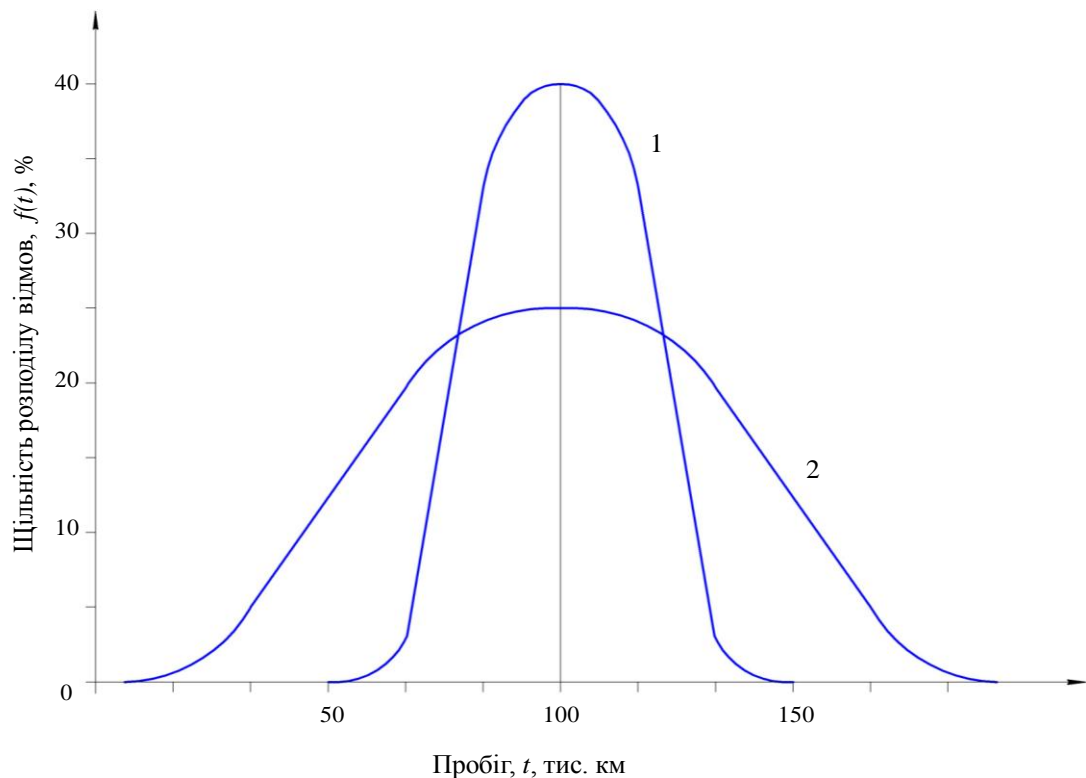
Також пропишемо ознаки розподілу для нормального закону для відповідних показників надійності вагона.

Відповідно до [35, 36, 241], щільність розподілу нормального закону при описі чи дослідженні надійності вагонів має вигляд:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2.5)$$

де  $a$  і  $\sigma^2$  – відповідно математичне сподівання і дисперсія випадкової величини, що розглядається.

На основі зібраних статистичних даних щодо відмов елементів вагонів за критерієм зносу наведемо наочно щільність розподілу за нормальним законом (рис. 2.3).



1 – гребінь колісних пар універсальних піввагонів; 2 – гальмівні колодки (пасажирські й вантажні вагони)

Рисунок 2.3 – Щільність розподілу відмов елементів вагонів за критерієм зносу

На графічному розподілі для гальмівних чавунних колодок як пасажирських, так і вантажних вагонів, крім показника зносу, було враховано й інші граничні відхилення від нормативно встановлених вимог. Також щільність розподілу для двох елементів вагонів показує виконання нормального закону у вигляді симетричності з центральним значенням (у цьому випадку майже 123 тис. км пробігу). Звідси впливає основна властивість нормального розподілу: розсіювання випадкової величини з ймовірністю 0,997 вкладається на ділянці  $\bar{t} \pm 3\sigma$  (так зване правило трьох сигм), з ймовірністю 0,955 – на ділянці  $\bar{t} \pm 2\sigma$  (так зване правило двох сигм), а з ймовірністю 0,685 – на ділянці  $\bar{t} \pm \sigma$  (так зване правило однієї сигми).

Функція розподілу нормального закону при описі чи дослідженні надійності вагона має вигляд [241]

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}\right) dt. \quad (2.6)$$

Ймовірність того, що значення випадкової величини  $\tau$  буде міститися в інтервалі  $t_1 \dots t_2$ , обчислюється за формулою

$$P\{t_1 \leq \tau \leq t_2\} = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt = \Phi\left(\frac{t_2 - a}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{t_1 - a}{\sigma}\right), \quad (2.7)$$

де  $\Phi(x)$  – функція, значення якої затабульовані [39].

У випадку коли під випадковою величиною розуміється додатна величина  $\xi$  (наприклад, напрацювання до відмови ходової частини, тривалість ремонту вагона, його складових тощо), то необхідно використовувати зрізаний теоретичний розподіл [35, 39]:

$$p(t) = P \left\{ \xi \geq t \right\} = \frac{c}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} \exp \left( -\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2} \right) dt, \quad (2.8)$$

де множник  $c$  вибирається з умови  $P(0)=1$ . Оскільки середньоквадратичне відхилення  $\sigma$  завжди значно менше, ніж величина  $a$ , то можна прийняти  $c = 1$ .

Пропишемо основні ознаки розподілу напрацювання до відмови за законом Вейбулла–Гнеденка відповідно до [39, 241]:

- функція розподілу має вигляд:

$$F(t) = 1 - \exp \left( -\lambda t^a \right), \quad (2.9)$$

де  $\lambda, a$  – параметри закону розподілу;

- щільність розподілу описується залежністю:

$$f(t) = \lambda a t^{a-1} \cdot \exp \left( -\lambda t^a \right), \quad (2.10)$$

- ймовірність відмови має такий вигляд:

$$p(t) = \exp \left( -\lambda t^a \right), \quad (2.11)$$

- інтенсивність відмов при використанні закону має таку залежність:

$$\lambda(t) = \lambda a t^{a-1}. \quad (2.12)$$

Графічно щільність розподілу напрацювання вагона до відмови за законом Вейбулла–Гнеденка для зібраних статистичних даних на прикладі п'ятника універсального піввагона можна зобразити таким чином (рис. 2.4).

Як видно з наведеного розподілу, цьому закону властиві зміщення пробігу вагона  $t_{зм}$  та правобічна асиметрія. Зазначене зміщення може виникати у випадку порожніх пробігів вагонів (наприклад, до депо приписки чи іноземного власника), тобто в цьому випадку процес зносу п'ятника (найбільш інтенсивний, що приводить до відмови) відбувається з деяким запізненням.

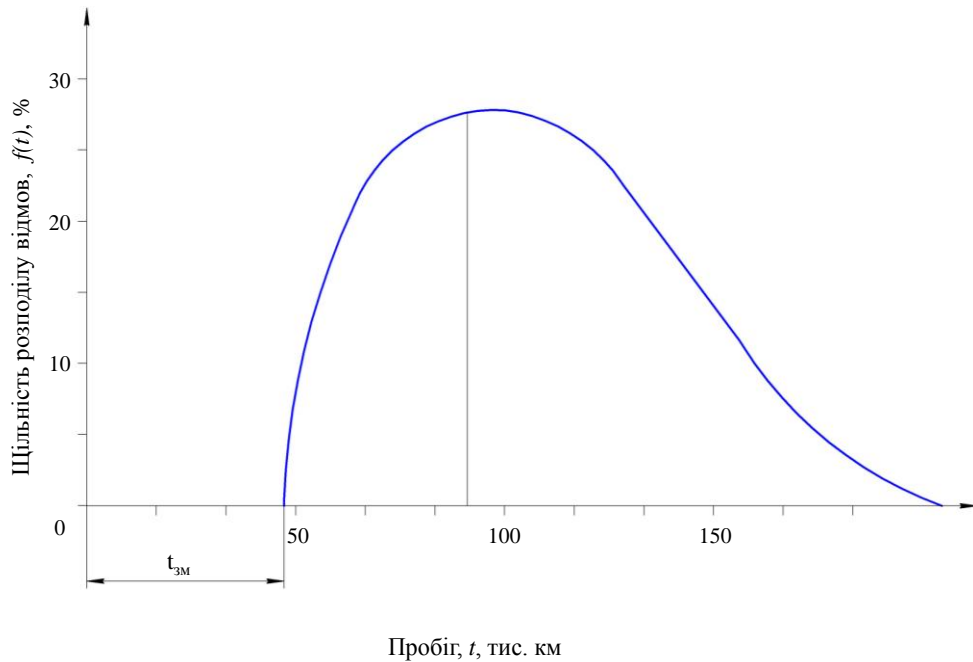


Рисунок 2.4 – Щільність розподілу напрацювання вагона до відмови за законом Вейбулла–Гнеденка на прикладі п'ятника універсального піввагона

Отже, прогнозовані показники надійності роботи деталей, вузлів чи вагона в цілому (вантажного чи пасажирського) залежать від правильно обраної моделі.

Вибір моделі надійності є складною науково-технічною задачею. Вона може бути вирішена методами математичної статистики, якщо є значний обсяг статистичного матеріалу про відмови досліджуваних елементів, деталей, вузлів чи вагонів у цілому. Зважаючи на доволі високу конструкторську надійність різнотипних вагонів і їх структурних складових елементів, як правило, зібраних статистичних даних про відмови й причини



відмов не дуже багато. Тому, вибираючи модель надійності, у цьому випадку необхідно керуватися результатами прискорених випробувань, фізичними міркуваннями та попереднім досвідом.

У разі наближених оцінок часто вибирається експоненціальна модель як найбільш зручна з позиції аналітичних перетворень. Цю модель рекомендується використовувати при виконанні розрахунків надійності за відсутності інших вихідних даних, крім значень інтенсивності відмов елементів, деталей чи вузлів вагонів. У разі наявності більш повних вихідних даних доцільно користуватися більш точними моделями, наприклад моделлю Вейбулла–Гнеденка.

Продемонструємо можливість застосування законів розподілу випадкових величин для визначення показників надійності вагонів.

Величину зносу деталей або з'єднань вагонів можна визначити як експериментально, так і теоретично, з використанням фізико-математичних засад [35, 36, 173, 241]. Але якщо відомі характеристики величини зносу деталей або з'єднань вагонів з відповідною ймовірністю, то розрахунок середньої величини зводиться до розрахунку наступного інтеграла [22]:

$$\bar{\Delta} = \int_0^{\infty} f(\Delta, F) \cdot P \cdot dF, \quad (2.13)$$

де  $f(\Delta, F)$  – функціональна залежність величини зносу деталей або з'єднань вантажних вагонів від деякого параметра  $F$ .

Оскільки були розглянуті закони розподілу для опису показників надійності, то запишемо залежності середньої величини зносу елементів чи деталей вантажних вагонів для визначення та прогнозування надійності в наступному вигляді:

- для нормального закону:

$$\bar{\Delta} = \int_0^{\infty} f(\Delta, F) \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{F - \bar{F}}{2\sigma^2}\right) \cdot dF; \quad (2.14)$$

- для експоненціального закону:

$$\bar{\Delta} = \int_0^{\infty} f(\Delta, F) \cdot \lambda \exp(-\lambda F) \cdot dF; \quad (2.15)$$

- для закону Вейбулла–Гнеденка:

$$\bar{\Delta} = \int_0^{\infty} f(\Delta, F) \cdot \lambda \alpha F^{\alpha-1} \exp(-\lambda F^{\alpha}) \cdot dF. \quad (2.16)$$

На прикладі суцільнокатаних коліс (серійних зі сталі марки 2 і підвищеної твердості зі сталі марки Т), що виготовлені на ПАТ "ІНТЕРПАЙП НТЗ", розглянемо процес їх зносу (2.14)–(2.16), де  $F$  – пробіг вагона. Колеса зі сталі марки Т призначені для збільшення міжремонтного пробігу вантажного вагону за рахунок збільшення терміну служби коліс [139, 174, 196]. Результати наведені на рис. 2.5.

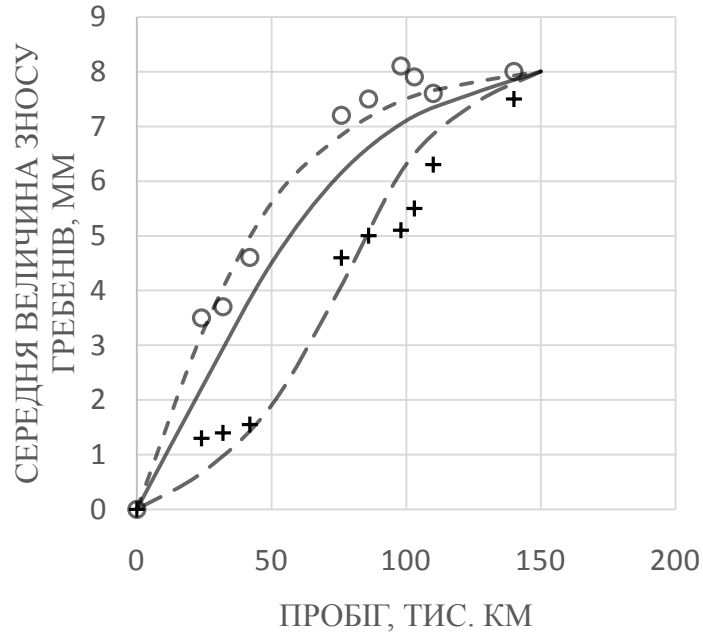
Як видно з рис. 2.5, на основі запропонованих виразів для визначення величини зносу деталей або з'єднань вантажних вагонів залежно від обраного закону розподілу можна оцінити надійність елементів за критерієм зносу. При цьому побудовані залежності величин зносу суцільнокатаних коліс зі сталі марки 2 та зі сталі підвищеної твердості марки Т для різних законів розподілу випадкових величин вказують на те, що нормальний закон розподілу більш точно описує виникнення раптових відмов, експоненціальний закон – розподіл поступових відмов, а закон Вейбулла–Гнеденка – середнє значення величини зносу, що вказує на прийнятність його застосування у випадках відмов деталей та вузлів вагона за зносом..

Адекватність отриманих виразів (2.14) - (2.16) було підтверджено за допомогою обробки результатів експериментальних даних (див. рис.2.5),

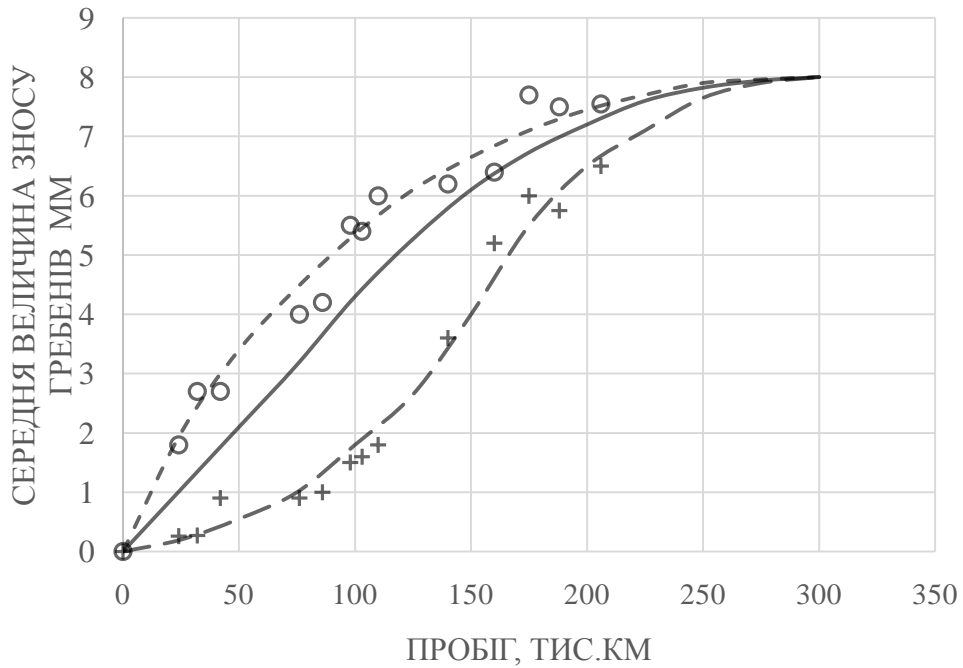
отриманих при експлуатаційних випробуваннях, де експериментальні значення мають позначення:

- поступові відмови – «+»,
- раптові відмови – «0».

а



б



Позначення законів розподілу:

--- експоненціальний; — нормальний; --- Вейбулла-Гнеденка

Рисунок 2.5 – Залежність середньої величини зносу гребенів суцільнокатаних коліс зі сталі марки 2 (а) та зі сталі підвищеної твердості марки Т (б) від пробігу для законів розподілу

### 2.3 Прогнозування показників надійності вантажних вагонів з урахуванням терміну їх експлуатації

Розглянемо положення ймовірнісно-фізичного підходу до задач теорії надійності, авторами якого є В. М. Грибов, В. Ван-Желен та інші науковці [70, 52].

Технічний стан вагонів залежить від значень внутрішніх параметрів (мікроструктура, хімічний та фазовий склад матеріалів)  $D_i$ , які в процесі експлуатації не будуть залишатись незмінними. З накопиченням напрацювання і затратою ресурсу внутрішні параметри змінюються (знижуються з позиції надійності), тим самим наближаючись до відповідних граничних значень:

$$D_i \rightarrow D_{\text{пр}i}.$$

Початковий технічний стан вагона буде визначатись таким вектором:

$$D_o = (D_{o1}, D_{o2}, \dots, D_{oi}), \quad (2.17)$$

де  $D_{oi}$  – значення визначального параметра, що отриманий для  $i$ -го елемента в початковий момент спостереження за технічним станом вагона.

Відповідно граничному стану, а отже і граничному періоду напрацювання  $T_{\text{сп}}$  вагона, буде відповідати такий вектор:

$$D_{\text{п}} = (D_{\text{п}1}, D_{\text{п}2}, \dots, D_{\text{п}i}). \quad (2.18)$$

Компоненти векторів ( $D_o$  і  $D_{\text{п}}$ ) відповідно до (2.17) і (2.18) відрізняються між собою. Цей факт можна охарактеризувати параметром зміни технічного стану  $\alpha$  для  $i$ -го періоду напрацювання (пробігу) вагона. За своїм змістом ця величина випадкова і характеризує зміну визначального параметра на одиницю напрацювання (пробігу), що можна визначити як одиницю виміру параметра технічного стану, поділену на одиницю напрацювання вагона.

Аналогічно до (2.17) і (2.18), параметр технічного стану структурних елементів вагона для певних моментів напрацювання також можна подати у вигляді векторів:

$$\alpha_1 = (\alpha_{11}, \alpha_{12}, \dots, \alpha_{1i}); \quad (2.19)$$

$$\alpha_{\text{п}} = (\alpha_{\text{п}1}, \alpha_{\text{п}2}, \dots, \alpha_{\text{п}i}), \quad (2.20)$$

де  $\alpha_1, \alpha_{\text{п}}$  – відповідно параметри зміни технічного стану структурного елемента вагона за перший і граничний періоди напрацювання (пробігу).

Деякі результати математико-статистичної обробки бази даних про відмови структурних елементів вагонів [130,174] вказують, що зміну технічного стану вагона в цілому можна описати рівнянням:

$$D_t = D_o \exp \left( -\alpha_t t \right), \quad (2.21)$$

де  $D_t, D_o$  – відповідно вектори технічних станів вагона для визначеного і початкового моментів напрацювання (пробігу) за деякою відповідною інформацією;

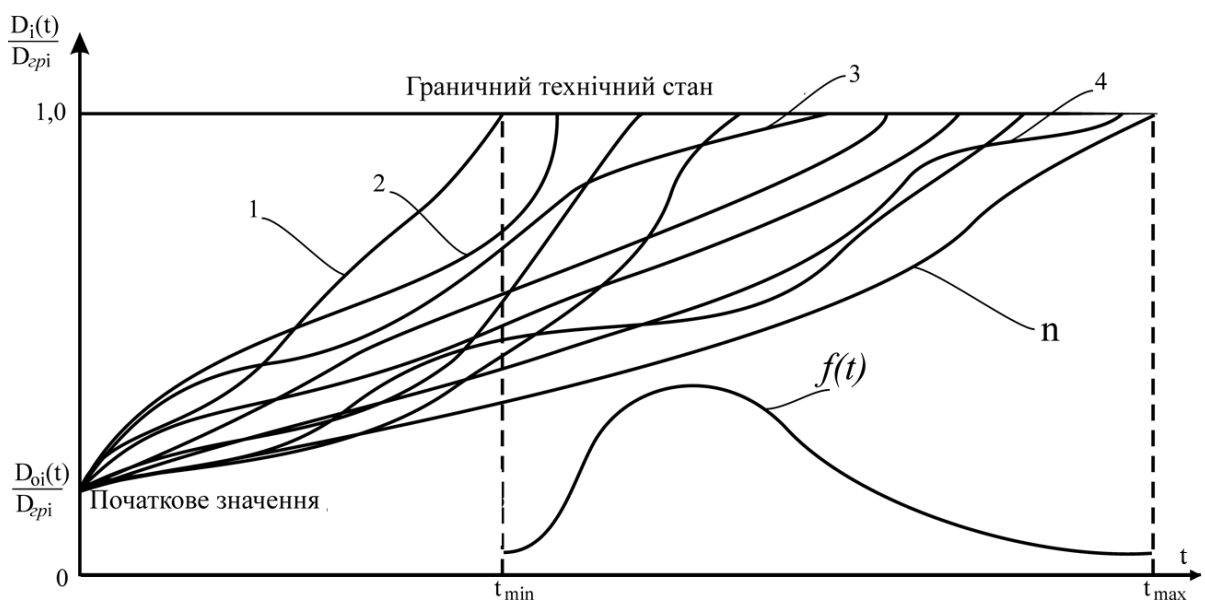
$\alpha_i$  – параметр зміни технічного стану вагона за відповідне напрацювання (пробіг)  $t$ .

Експоненціальний закон зміни величин визначальних параметрів найбільш повно відображує характер зниження технічного стану вагона через визначену своєрідність складного комплексу процесів, що відповідають природному спрацюванню його елементів, деталей та вузлів.

У момент досягнення визначальним параметром складових структурних елементів вагона граничного значення відбудеться його відмова. Умову відмови вагона можна записати таким чином:

$$\lim_{D_i \rightarrow D_{сп}} \left( \frac{D_i}{D_{сп}} \right) = 1. \quad (2.22)$$

Процес деградації внутрішніх властивостей структурних елементів вагона, який призводить до втрати працездатності (відмови) згідно з рівнянням (2.22), тобто випадкові траєкторії (реалізації) переходу визначальних параметрів від початкових значень  $D_{oi}$ , до граничних значень  $D_{спi}$ , можна інтерпретувати схемою, наведеною на рис 2.6.



1,2...n – криві, що характеризують зміну відповідного параметра від їх значень у початковому і граничному станах;  $f(t)$  – щільність розподілу граничних значень цих параметрів

Рисунок 2.6 – Схема процесу деградації внутрішніх властивостей структурних елементів вагона

Якщо уявити, що ми можемо «спостерігати» деградації і «фіксувати» моменти досягнення визначальними параметрами  $D_i$  своїх граничних значень  $D_{epi}$ , то в інтервалі часу від  $t_{\min}$  до  $t_{\max}$  одержимо масив напрацювань (пробігів)  $\{t_i\}$ . Обробивши масив  $\{t_i\}$  відомим методом, тобто поділивши інтервал  $t_{\min} \dots t_{\max}$  на  $l$  інтервалів довжиною  $\Delta t$  і підрахувавши кількість відмов  $n(\Delta t)$  на кожному інтервалі, одержимо щільність розподілу відмов у зазначеному інтервалі напрацювань (пробігів). Під час математичного моделювання процесів деградації «спостереження» і «фіксації» здійснюються на основі розв'язання (2.22) при заданих початкових і граничних умовах.

Одержана умовна щільність  $\omega(D)$  ймовірності реалізації тієї чи іншої траєкторії (рис. 2.6) має простий зв'язок із щільністю розподілу напрацювання (пробігу) вагона до відмови:

$$f(D) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial \omega(D)}{\partial t} dD. \quad (2.23)$$

Деградація властивостей структурних елементів вагона може мати як монотонний (рис. 2.6, криві 1, 2), так і немонотонний характер (рис. 2.6, криві 3, 4). Розв'язання рівняння щільності ймовірності (2.23) для монотонного й немонотонного процесів деградації структурних елементів вагона повинно відрізнятися лише різними граничними умовами.

Зміна визначальних параметрів елементів вагона у процесі експлуатації описується стохастичним марковським процесом, коли перехід фізичних параметрів від одного значення до іншого (з одного стану в інший) має ймовірнісний характер, тобто є марковським процесом дифузійного типу. При цьому умовну щільність ймовірності переходу з одного стану в інший  $\omega(D)$  можна визначити за допомогою такого рівняння в частинних похідних, яке подібне до рівняння дифузії в теорії переносу речовин у фізиці твердого тіла [70]:

$$\frac{\partial \omega(D)}{\partial t} + a \frac{\partial \omega(D)}{\partial D} - b^2 \frac{\partial^2 \omega(D)}{\partial D^2} = 0, \quad (2.24)$$

де  $t$  – напрацювання (пробіг) вагона;

$a$  – середня швидкість зміни визначального параметра структурного елемента (по-іншому – коефіцієнт зносу);

$D = D(t)$  – визначальний параметр структурного елемента, що визначає його технічний стан;

$b$  – коефіцієнт потоку ймовірностей технічного стану структурного елемента, причому  $b^2$  є середньою швидкістю зміни дисперсії визначального параметра структурного елемента.

Тоді вираз для закону розподілу тривалості експлуатації вагона до відмови, тобто математична модель відмов, відповідно до (2.21) буде мати вигляд:

$$f(t) = \frac{1}{bt\sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(t-at)^2}{2b^2t}\right]. \quad (2.24)$$



Рівняння (2.24) буде являти собою математичну модель зміни технічного стану вагона за визначальними параметрами структурних елементів.

Вказаний розподіл у науковій літературі [70, 74, 233] одержав назву DN-розподіл або дифузійний немонотонний розподіл, через те що він впливає з розв'язку рівняння потоку (дифузії) ймовірностей.

Крім того, коефіцієнт дифузії ймовірностей технічного стану вагона  $b$  буде дорівнювати:

$$b = \frac{\sigma_a}{\sqrt{a}} = \frac{\sigma_a \sqrt{a}}{\sqrt{a} \sqrt{a}} = \frac{\sigma_a}{a} \sqrt{a}. \quad (2.25)$$

У виразі (2.25) відношення  $\sigma_a / a$  є коефіцієнтом варіації  $V_3$  процесу зміни технічного стану вагона. У моделі відмов коефіцієнт варіації напрацювання (пробігу) до відмови  $V$  будь-якого елемента, деталі чи вузла вагона збігається з коефіцієнтом варіації швидкості змін, що відбуваються у внутрішніх процесах зміни технічного стану вагона  $V_3$ .

Для коефіцієнта потоку ймовірностей технічного стану вагона  $b$  можна записати таке співвідношення:

$$b = V \sqrt{a}. \quad (2.26)$$

Досвід проведення теоретичних оцінок за зазначеною математичною моделлю свідчить про те, що зручніше користуватися не середньою швидкістю зміни технічного стану  $a$ , а оберненою до неї величиною:

$$\mu = \frac{1}{a}. \quad (2.27)$$

Тоді з урахуванням наведених співвідношень (2.26) і (2.27) щільність розподілу набуде такого вигляду:

$$f(t) = \frac{\sqrt{\mu}}{V_i t \sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(t-t_0)^2}{2V_i^2 \mu t}\right], \quad (2.28)$$

де  $\mu$  – масштабний параметр розподілу;

$V$  – коефіцієнт варіації напрацювання (пробігу) до відмови – параметр форми розподілу.

З'ясуємо з позицій теорії надійності зміст масштабного параметра розподілу  $\mu$ . Для цього покажемо, що він є не що інше, як середнє значення напрацювання (пробігу) вагона  $t$ , тобто математичне сподівання напрацювання до відмови.

Відповідно до роботи [233], математичне сподівання випадкової величини  $t$  є першим початковим статистичним моментом. Оскільки напрацювання (пробіг) вагона  $t$  є безперервною випадковою величиною в області визначення  $(0, \infty)$ , то тоді вираз для математичного сподівання напрацювання (пробігу) вагона до відмови  $T_o$  набуде такого вигляду:

$$T_o = \int_0^{\infty} t f(t) dt. \quad (2.29)$$

Підставимо вираз (2.28) у останній вираз (2.29) і в результаті отримаємо напрацювання (пробіг) вагона до відмови в такому вигляді:

$$\begin{aligned}
T_o &= \int_0^{\infty} t \frac{\sqrt{\mu}}{2V_t t \sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{\mu - t^2}{2V_t^2 \mu t}\right] dt = \int_0^{\infty} \frac{\sqrt{\mu}}{2V_t \sqrt{2\pi t}} \exp\left(-\frac{\mu^2 - 2\mu t + t^2}{2V_t^2 \mu t}\right) dt = \\
&= \frac{\sqrt{\mu} \exp V_t^{-2}}{V_t \sqrt{2\pi t}} \int_0^{\infty} t^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{\mu}{2V_t^2} \cdot \frac{1}{t} - \frac{t}{2V_t^2 \mu}\right) dt, \\
T_o &= \frac{\sqrt{\mu}}{V_t \sqrt{2\pi}} \exp V_t^{-2} \int_0^{\infty} \sqrt{\mu} \cdot V_t \sqrt{\frac{\pi}{2}} \exp V_t^{-2} dt = \mu. \quad (2.30)
\end{aligned}$$

Таким чином, у наведеній моделі масштабний параметр розподілу відмов  $\mu$  має фізичний зміст середнього напрацювання (пробігу) вагона до відмови.

Використовуючи результати робіт [70, 233], можна визначити статистичні параметри наведеної моделі:

- дисперсію напрацювання (пробігу) вагона  $t$  до відмови:

$$\sigma_t^2 = \int_0^{\infty} (\mu - t)^2 f(t) dt, \quad (2.31)$$

- статистичні моменти відмов:

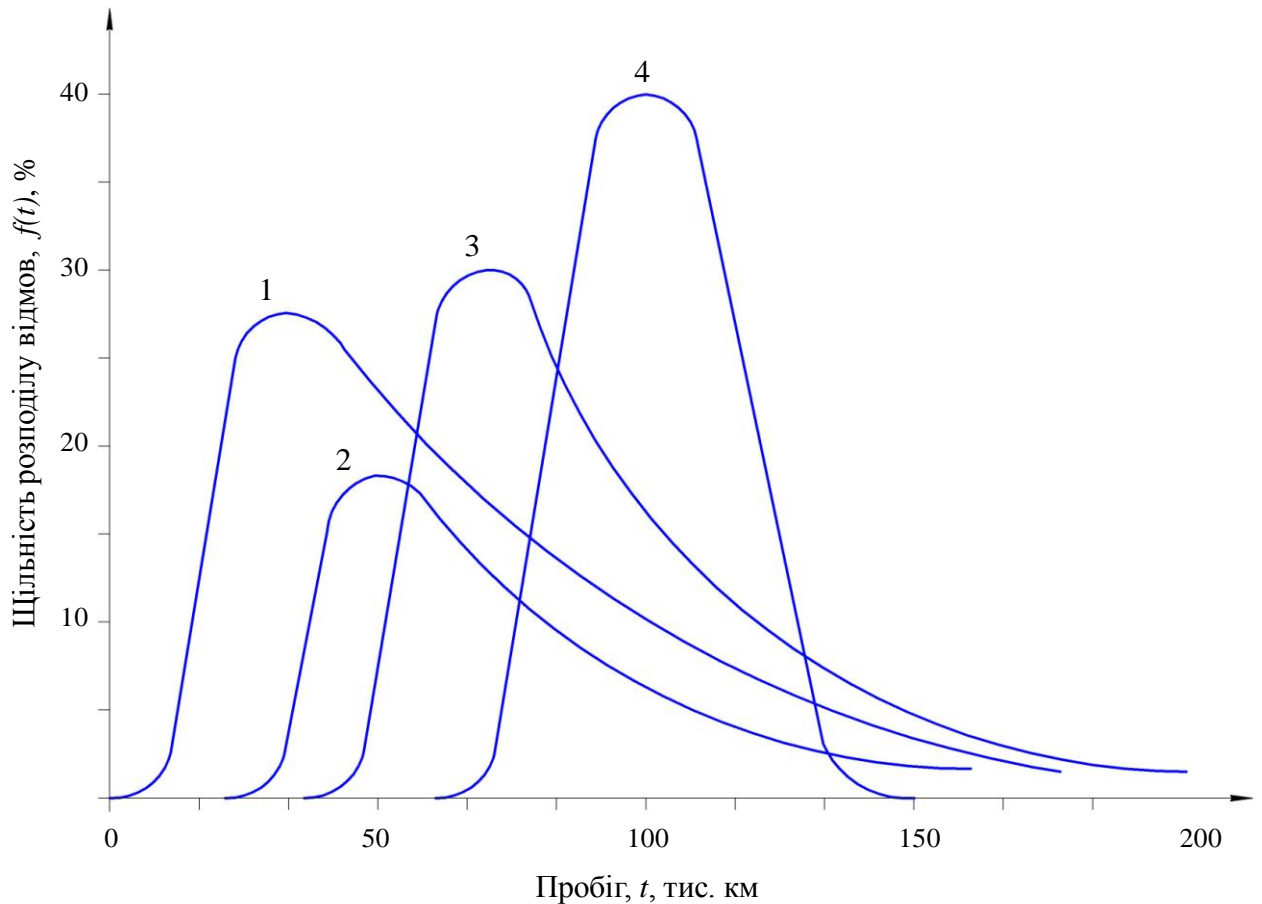
$$M_t = \mu; \quad \sigma_t^2 = \mu^2 V_t^2; \quad A_s = 3V_t; \quad E_x = 15V_t^2. \quad (2.32)$$

де  $M_t$  – математичне сподівання розподілу;

$A_s$  – асиметрія розподілу;

$E_x$  – ексцес – характеризує ступінь гостроти розподілу.

Наведемо приклад цього розподілу для статистичних даних щодо відмов вантажних вагонів (рис. 2.7).



$$1 - V_i = 1,0; \quad 2 - V_i = 0,75; \quad 3 - V_i = 0,5; \quad 4 - V_i = 0,25$$

Рисунок 2.7 – Розподіл відмов гальмівного обладнання вантажних вагонів при  $\mu = \text{const}$  і  $\mu = 100$  тис. км для параметра форми

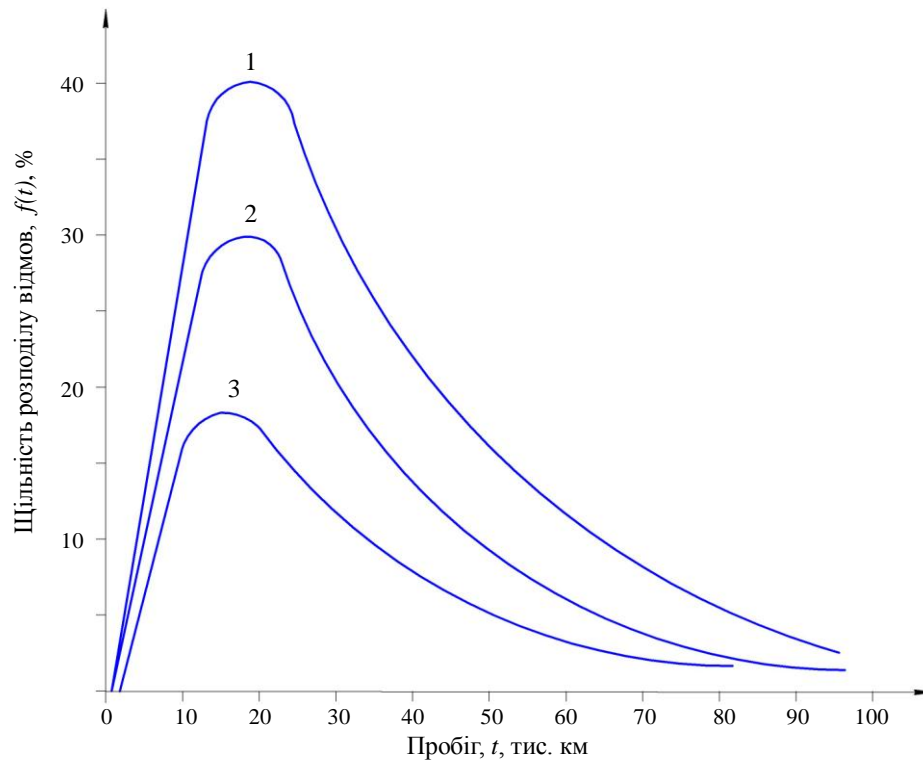
Аналізуючи основні характеристики наведеного розподілу, слід зазначити таке:

- асиметрія  $A_x$  і ексцес  $E_x$  отриманого розподілу додатні, а математичне сподівання  $M_x$  зміщене праворуч відносно медіани, тобто щільність цього розподілу є асиметричною одномодальною кривою з більш витягнутою правою віткою (усі наведені криві 1-4 на рис. 2.7);

- при фіксованому масштабному параметрі розподілу (математичному сподіванні напрацювання (пробігу) вагона до відмови  $\mu = 100$  тис. км пробігу) зі зменшенням параметра форми  $V_i$  максимум щільності розподілу  $f$  зміщується праворуч за стрілкою годинника з одночасним зменшенням амплітуди розподілу (криві 1, 2 рис. 2.7) і подальшим її збільшенням (криві 3,

4 рис. 2.7), причому всі центральні статистичні моменти розподілу (дисперсія, асиметрія та ексцес) зменшуються;

- при фіксованому параметрі форми (коефіцієнті варіації  $V_r$ ) зі збільшенням масштабного параметра розподілу  $\mu$ , тобто зі зсувом розподілу вправо за стрілкою годинника, він деформується таким чином, що дисперсія збільшується, а коефіцієнти асиметрії й ексцесу залишаються сталими. Приклад зазначеного випадку при  $V_r = const$  наведено на рис. 2.8.



1 –  $\mu$  при 40 тис. км; 2 –  $\mu$  при 50 тис. км; 3 –  $\mu$  при 60 тис. км

Рисунок 2.8 – Розподіл відмов гальмівного обладнання вантажних вагонів при  $V_r = const$  і  $V_r = 1$  для масштабного параметра розподілу:

Крім того, для цього розподілу характерна така властивість, як стійкість до зміни швидкості зміни технічного стану структурних елементів вагона.

Абсцису  $t_m$  точок максимуму  $f$  можна визначити з рівняння

$$\frac{\partial f}{\partial t} = 0, \quad (2.33)$$

з якого можна отримати однорідне квадратне рівняння виду

$$t_m^2 + 3V_t^2 \mu t_m - \mu^2 = 0,$$

яке необхідно розв'язати відносно  $t_m$  при заданих параметрах  $V_t$  і  $\mu$ .

Другу координату точок максимуму щільності наведеного розподілу – ординату функції  $f$  можна знайти шляхом підстановки у вираз (2.28) значення  $t_m$  і відповідних значень  $V_t$  і  $\mu$ .

Диференціальній функції щільності розподілу (2.28) буде відповідати інтегральна функція розподілу, яку можна записати в такому вигляді:

$$F = \Phi\left(\frac{t - \mu}{V_t \sqrt{\mu \cdot t}}\right) + \exp\left(\frac{2}{V_t^2}\right) \Phi\left(-\frac{t + \mu}{V_t \sqrt{\mu \cdot t}}\right), \quad (2.34)$$

де  $\Phi(z)$  – затабульований інтеграл ймовірності (функція Лапласа) [39], який має вигляд:

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx.$$

Зауважимо, що функція  $\Phi(z)$  має такі властивості:

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} \Phi(x) = 0; \quad \Phi(x) = 1 - \Phi(-x); \quad \lim_{x \rightarrow \infty} \Phi(x) = 1.$$

При значеннях аргументу на межі інтервалу  $-4 < z < 4$  значення інтеграла ймовірності  $\Phi(z)$  відповідно дорівнюють нулю й одиниці.

Крім зазначених властивостей наведеної моделі, необхідно виділити також такі [70]:

- універсальний характер моделі підтверджується тим, що при  $V_t^2 \rightarrow 0$  наведений розподіл асимптотично збігається з нормальним законом розподілу;

- інтенсивність відмов наведеного розподілу має немонотонний характер і в асимптотичному наближенні прямує до певного сталого значення;

- параметри наведеного розподілу можуть бути оцінені як на основі статистики відмов, так і на основі аналізу фізичних процесів зміни технічного стану елементів, деталей та вузлів вагона, що призводять до відмов, а також на основі спільного використання деякої статистичної інформації.

Ступінь адекватності моделі технічного стану вагона встановлюється залежністю від її можливостей щодо вирівнювання статистичних даних деякої статистичної інформації, а також шляхом зіставлення прогнозованих теоретичних розподілів відмов вагонів з базою експериментальних даних [220].

Наведений розподіл можна вважати моделлю надійності вагона в різних умовах експлуатації, яка залежить як від внутрішніх, так і від зовнішніх факторів, а також визначається сукупністю певних критеріїв.

Модель має певний ступінь адекватності, який залежить від рівня отримання статистичної інформації, ступеня її об'єктивності й точності.

Метод розрахунку на основі зазначеного розподілу як ймовірнісно-фізичної моделі принципово відрізняється від усіх відомих строгих ймовірнісних методів тим, що він розглядає неперервну (континуальну) множину станів елементів, деталей і систем вагона неперервно в часі. Це,

безсумнівно, є якіснішим описом поведінки елементів вагона, що витрачають свій ресурс з часом – зі збільшенням напрацювання. Конкретна фізична інтерпретація констант ймовірно-фізичних моделей розподілу відмов дає можливість оцінити їх за результатами дослідження визначених параметрів, які характеризують технічний стан вагона. Якщо можна знайти параметр, що інформує про витрату ресурсу елемента вагона, то, оцінивши швидкість його зміни і знаючи його граничне значення, можна прогнозувати всі необхідні кількісні показники надійності досліджуваних елементів, деталей та вузлів і вагона в цілому [133].

Припустимо, що вага параметра технічного стану вагона  $\xi_i$  (структурного елемента) буде визначатись за формулою

$$\xi_i = \frac{\varphi_i}{\sum \varphi_i}, \quad (2.35)$$

де  $\varphi_i$  – значущість відповідного параметра технічного стану вагона (структурного елемента), отриманого при певному напрацюванні (пробігу) вагона.

Тоді загальна вага всіх параметрів технічного стану вагона (структурних елементів), що беруться до уваги та враховуються надалі

$$\sum \xi_i = 1. \quad (2.36)$$

Підсумовуючи вищенаведене й використовуючи елементи теорії ймовірностей, дамо визначення для ймовірності безвідмовної роботи вагона при накопиченні пошкоджень матеріалів у його структурних елементах. Тоді, з урахуванням випадковості процесів, що відбуваються, маємо:



$$P \leq \prod_{i=1}^n P_{ji} \xi_{ji} + \Delta P_{ji} \xi_{ji}, \quad (2.37)$$

$$P_{ji} \leq 1, \quad (2.38)$$

де  $P_{ji}$  – ймовірність безвідмовної роботи вагона, що виявлена для  $j$ -го пошкодження в  $i$ -му структурному елементі;

$\Delta P_{ji}$  – вплив непрогнозованих факторів на ймовірність безвідмовної роботи вагона при накопиченні даних для  $j$ -го пошкодження.

Слід зауважити, що точність цього прогнозу буде зростати з виконанням умови

$$\Delta P_{ji} \Rightarrow 0, \quad (2.39)$$

тобто

$$\Delta P_{ji} \xi_{ji} \Rightarrow 0. \quad (2.40)$$

## 2.4 Висновки до розділу 2

За результатами досліджень, виконаних у цьому розділі, можна зробити такі висновки:

1. Запропоновано структурну схему дослідження надійності об'єкта на прикладі вантажного вагона, яка охоплює конструкторську, технологічну та експлуатаційну надійність; науковий експеримент передбачає моделювання роботи вантажного вагона в різних умовах та експлуатаційних режимах; теорія надійності подана як комбінована або модифікована, що охоплює математичні й фізичні основи, а застосування Бассової статистики надає можливість описати різні стани вантажного вагона на життєвому циклі з

розбиванням його на основні складові та з відповідною ймовірністю для кожної складової описувати загальну надійність. Отримані результати дозволяють надати повну й достовірну картину надійності при відповідній відмові вантажного вагона та удосконалити підходи до дослідження надійності вагона в цілому.

2. Для основних законів розподілу випадкових величин запропоновано вирази для оцінки величини зносу елементів чи деталей вантажних вагонів, які дають можливість охарактеризувати, залежно від обраного закону розподілу, надійність елементів за критерієм зносу.

3. На основі ймовірнісно-фізичного підходу розроблено модель для прогнозування надійності вагонів, на основі якої можна прогнозувати всі необхідні кількісні показники надійності досліджуваних елементів, деталей та вузлів або вагона в цілому.

## РОЗДІЛ 3

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ НА ЕТАПАХ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ

#### **3.1 Формування показників надійності вагонів на етапі проектування**

##### **3.1.1 Параметрична модель елементів вагона «міцність – навантаження»**

На етапі життєвого циклу – етапі проектування закладається конструкторська надійність, яка реалізується у процесі виготовлення. Від конструкторської надійності буде залежати успішне функціонування вагонів у тих чи інших умовах експлуатації. На етапі проектування використовують довідкову інформацію про режими роботи вагонів і навантаження, які будуть нести елементи, деталі та вузли або вагон у цілому. При розрахунках конструктивних елементів вагона задаються довірчими інтервалами, що наведені в нормативно-довідковій літературі, і в результаті отримують необхідну ймовірність безвідмовної роботи.

Вибір статистичних запасів міцності різних конструкцій базується на використанні параметричної моделі «міцність – навантаження». Методи цієї групи є найстарішими методами теорії надійності [84, 101, 187, 192, 281, 286].

В основу розрахунків надійності з використанням цієї моделі закладено принцип, що кожен елемент конструкції має певну міцність стосовно діючих на нього навантажень. При цьому під навантаженням слід розуміти будь-які чинники, що впливають на ефективність функціонування вагона, такі як: механічні дії, температури, вібрації, коливання тощо, а міцність буде

характеризувати здатність вагона зберігати свої закладені властивості при впливі зазначених навантажень.

Вихідними даними при розрахунках безвідмовності структурних елементів вагона є [4, 70, 233]:

$$f_s(\bar{S}) \text{ і } f_s(\bar{s}),$$

що являють собою щільності ймовірності розподілу відповідно міцності й навантаження. При цьому вектори параметрів  $\bar{S}$  і  $\bar{s}$  характеризують відповідно міцність і навантаження.

Безвідмовна робота вагона буде визначатись умовою [4, 70, 74, 233]:

$$\bar{S} > \bar{s} \quad \text{або} \quad \bar{S} - \bar{s} > 0.$$

Тоді вираз для ймовірності безвідмовної роботи вагона буде мати такий вигляд [4, 70, 74, 233]:

$$P = F\{\bar{S} > \bar{s}\} = F\{\bar{S} - \bar{s} > 0\} = \int_{-\infty}^{\infty} f_{\bar{s}}(\bar{s}) \left[ \int_{-\infty}^{\infty} f_{\bar{S}}(\bar{S}) d\bar{S} \right] d\bar{s}. \quad (3.1)$$

Для непросторового (лінійного) випадку вираз для ймовірності безвідмовної роботи вагона буде мати вигляд [4, 70, 74, 233]:

$$P = F\{S > s\} = F\{S - s > 0\} = \int_{-\infty}^{\infty} f_s(s) \left[ \int_{-\infty}^{\infty} f_S(S) dS \right] ds. \quad (3.2)$$

Наведемо деякі розрахункові формули для визначення ймовірності безвідмовної роботи вагона для трьох законів розподілу: нормального, експоненціального та Вейбулла–Гнеденка.

У випадку якщо міцність структурних елементів вагона розподілена за нормальним законом у вигляді щільності [4, 70, 74, 233]:

$$f_s(S) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{S - \mu_s}{\sigma_s} \right)^2 \right], \quad (3.3)$$

а навантаження, що діє на вагон, – теж за нормальним законом розподілено із щільністю [4, 70, 74, 233]:

$$f_s(s) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{s - \mu_s}{\sigma_s} \right)^2 \right], \quad (3.4)$$

то вираз для визначення ймовірності безвідмовної роботи вагона можна записати таким чином [4, 70, 74, 233]:

$$P = 1 - \Phi \left( -\frac{\mu_s + \mu_s}{\sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_s^2}} \right). \quad (3.5)$$

У випадку якщо міцність структурних елементів вагона розподілена за експоненціальним законом у вигляді щільності [4, 70, 74, 233]:

$$f_s(S) = \lambda_s \exp \left[ -\lambda_s S \right], \quad (3.6)$$

а навантаження, що діє на вагон, – також за експоненціальним законом розподілено із щільністю [4, 70, 74, 233]

$$f_s(s) = \lambda_s \exp \left[ -\lambda_s s \right], \quad (3.7)$$

то вираз для визначення ймовірності безвідмовної роботи вагона можна записати таким чином [4, 70, 74, 233]:

$$P = \frac{\lambda_s}{\lambda_s + \lambda_s}. \quad (3.8)$$

У випадку якщо міцність структурних елементів вагона розподілена за нормальним законом, а навантаження, що діє на вагон, – за експоненціальним законом, то вираз для визначення ймовірності безвідмовної роботи вагона можна записати таким чином [4, 70, 74, 233]:

$$P = 1 - \Phi\left(-\frac{\mu_s}{\sigma_s}\right) - \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\mu_s \lambda_s - \lambda_s^2 \sigma_s^2\right)\right] \left[1 - \Phi\left(-\frac{\mu_s - \lambda_s^2 \sigma_s^2}{\sigma_s}\right)\right]. \quad (3.9)$$

У випадку якщо міцність структурних елементів вагона розподілена за експоненціальним законом, а навантаження, що діє на вагон, розподілено за нормальним законом, то вираз для визначення ймовірності безвідмовної роботи вагона можна записати так [4, 70, 74, 233]:

$$P = \Phi\left(-\frac{\mu_s}{\sigma_s}\right) - \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\mu_s \lambda_s - \lambda_s^2 \sigma_s^2\right)\right] \left[1 - \Phi\left(-\frac{\mu_s - \lambda_s \sigma_s^2}{\sigma_s}\right)\right]. \quad (3.10)$$

У випадку якщо міцність структурних елементів вагона розподілена за Законом Вейбулла–Гнеденка у вигляді щільності [4, 70, 74, 233]

$$f_s(S) = \frac{\beta}{\left(\theta - S_0\right)^\beta} \left(\theta - S_0\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{S - S_0}{\theta - S_0}\right)^\beta\right], \quad (3.11)$$

а навантаження, що діє на вагон, – за нормальним законом, то вираз для визначення ймовірності безвідмовної роботи вагона можна записати таким чином [4, 70, 74, 233]:

$$P = \Phi\left(\frac{S_0 - \mu_s}{\sigma_s}\right) + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left(\frac{\theta - S_0}{\sigma_s}\right) \times \int_0^{\infty} \exp\left[-y^\beta - \frac{1}{2}\left(\frac{\theta - S_0}{\sigma_s} y + \frac{S_0 - \mu_s}{\sigma_s}\right)^2\right] dy. \quad (3.12)$$

Для випадку коли міцність структурних елементів вагона розподілена за Законом Вейбулла–Гнеденка з такою щільністю [4, 70, 74, 233]:

$$f_s(S) = \frac{\beta_s}{\theta_s} \frac{(S - S_0)^{\beta_s - 1}}{\theta_s} \exp\left[-\left(\frac{S - S_0}{\theta_s}\right)^{\beta_s}\right], \quad (3.13)$$

а навантаження, що діють на вагон, також розподілено за Законом Вейбулла–Гнеденка зі щільністю [4, 70, 74, 233]

$$f_s(s) = \frac{\beta_s}{\theta_s} \left(\frac{s - S_0}{\theta_s}\right)^{\beta_s - 1} \exp\left[-\left(\frac{s - S_0}{\theta_s}\right)^{\beta_s}\right], \quad (3.14)$$

то вираз для визначення ймовірності безвідмовної роботи вагона можна записати таким чином [4, 70, 74, 233]:

$$P = 1 - \int_0^{\infty} \exp\left[-y^\beta - \left(\frac{\theta_s}{\theta_s} y^{-\beta_s} + \frac{S_0 - S_0}{\theta_s}\right)^{\beta_s}\right] dy. \quad (3.15)$$

Використання вищенаведених залежностей зазначеної моделі «міцність – навантаження» можливе, лише коли в наявності є великий обсяг статистичних даних щодо відмов складових структурних елементів вагонів.

Крім того, на етапі проєктування, необхідно застосовувати математичне моделювання теплового й напружено-деформованого станів структурних елементів вагонів.

### **3.1.2 Математичне моделювання надійності вагонів на етапі проєктування**

Як відомо [28, 35, 261, 275], математичне моделювання являє собою один з найбільш ефективних інструментів аналізу теплового і напружено-деформованого станів елементів рухомого складу залізничного транспорту під час їх розробки і випробувань, зокрема це стосується і структурних елементів вагонів. Найбільша складність при побудові розрахункових схем таких елементів полягає в моделюванні процесів теплообміну в зонах фрикційних контактів (наприклад, гальмівні колодки – колісна пара). У разі спрощеного підходу до вирішення такої задачі прийнято припускати [9, 192], що пульсуючий тепловий потік, який виникає через неповне перекриття елементів, які утворюють пару тертя, доцільно розглядати як постійний і усереднений за один оберт тепловий потік. Але в роботі [28] показано, що при усередненні відбувається порушення подібності. Тому отримані результати є недостовірними, а моделі, що побудовані на такому припущенні, є непридатними для розрахунків вузлів тертя рухомого складу, зокрема й вагонів.

Моделювання взаємодії гальмівної колодки і колеса, як механічної системи, відбувається за допомогою системи тіл, які описуються геометрично, з наділенням фізичними властивостями кожного, і надалі моделюються на основі перебігу процесів, а також їх умов взаємодії [248]. Тому при моделюванні необхідно виділяти:

- геометричну модель взаємодіючих елементів;



- фізичну модель взаємодіючих елементів;
- моделювання перебігу процесів у взаємодіючих елементах і умови їх взаємодії.

При побудові моделі складність розв'язання залежить від вибору перебігу процесів у взаємодіючих елементах і умов їх взаємодії, а геометрична модель впливає на складність задання граничних умов. Виходячи з цього, слід виділити два підходи до послідовності розв'язання:

- вибір моделі перебігу процесів у взаємодіючих елементах і умов їх взаємодії з подальшою побудовою геометричної та фізичної моделей;
- спочатку будується геометрична модель, потім здійснюється вибір моделі перебігу процесів у взаємодіючих елементах і умов їх взаємодії, а потім будується фізична модель.

Перший наведений підхід буде обмежувати форми геометричних моделей можливостями методів розв'язання на основі обраної моделі перебігу процесів у взаємодіючих елементах і умов їх взаємодії з імовірним значним відхиленням геометричної моделі від вихідних взаємодіючих елементів, у свою чергу, останнє буде вимагати обґрунтування щодо вибору передбачуваних геометричних припущень.

Другий підхід полягає в наявності універсальних методів моделювання перебігу процесів у взаємодіючих елементах і умов їх взаємодії, наприклад, метод кінцевих елементів (МКЕ) або метод кінцевих різниць (МКР), тому побудова геометричної та фізичної моделей здійснюється з необхідним ступенем відповідності реальній взаємодії елементів [92, 93].

Геометрична модель являє собою частину простору, який обмежений поверхнями реальних взаємодіючих елементів, причому включення деяких технологічних елементів вихідного контуру (фаски, різь, зварні шви) не виконується в тому випадку, якщо вони не є об'єктами вивчення в цій моделі.

Під фізичною моделлю мається на увазі об'єкт, наділений фізичними властивостями, такими як пружність, теплопровідність, теплоємність, об'єкт, описаний геометричною моделлю. У фізичній моделі також моделюються

властивості матеріалу, які характеризуються параметрами, такими як модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, коефіцієнт теплопровідності, питома теплоємність.

Моделювання процесів ґрунтується на законах фізики і їх розвитку у відповідних розділах наук [28, 192]. Для моделювання руху й поглинання теплоти в нерухомому середовищі в розділі математичної фізики розглядається рівняння теплопровідності [28]. Питання моделювання взаємодії тіл між собою розглядаються в контактних задачах [19, 192].

У геометричній або фізичній моделях для опису перебігу процесів у взаємодіючих елементах і умов їх взаємодії наявна низка припущень, оскільки такі моделі не можуть бути ідеальними. Однією з особливостей теплового розрахунку колодкових гальм є обертання колеса щодо нерухомих колодок. З огляду на обертання колеса й притиснення колодок не по всій поверхні тертя, точки колеса виявляються то під колодкою, в осередку дії теплоти, то на вільній поверхні, де відбувається теплообмін із середовищем. Але оскільки колесо обертається зі швидкістю набагато більшою, ніж швидкість поширення теплоти, то можна вважати, що температура в будь-якій фіксованій точці колеса за час одного оберту зміниться на сумарний тепловий потік на певному радіусі за один оберт колеса. Таке припущення вказує на рівномірність розподілу теплового потоку по всій взаємодіючій поверхні колеса для визначеного напрямку. Тобто для кожного кола з центром на осі обертання колеса величина теплового потоку постійна при збереженні сумарної величини загального теплового потоку, що надходить до колеса.

Моделювання теплового процесу, що враховує обертання колеса, за умови розташування частини його поверхні то в контакті з колодкою, то з навколишнім середовищем, призведе до значного збільшення кількості обчислень як при використанні МКЕ, так і МКР. При цьому сам вплив отриманих стрибків температури на процеси при гальмуванні буде локальним. Слід зазначити, що процес зносу при взаємодії елементів

колодкового гальма викликатиме значне температурне розширення самих колодок, а також призведе до перерозподілу контактних тисків між взаємодіючими елементами.

Покажемо, яким чином можна проаналізувати кінетику теплових процесів у взаємодіючих елементах вагонів.

Під час роботи колодкового гальма виникає тепловий потік на поверхнях тертя як в металі колеса, так і в матеріалі колодки, а далі при конвективному обміні відбувається розсіювання в навколишнє середовище. Через повторний режим роботи гальм вагонів відбувається процес нагрівання та охолодження як колеса, так і колодок. Процес тепловиділення при терті взаємодіючих елементів відбувається по плямах контакту поверхонь фактичного дотикання. Ці плями в процесі взаємодії елементів колодкового гальма зазнають змін і, у свою чергу, відбувається їх переміщення вздовж поверхонь номінальних контактів у результаті зносу. Зміна й переміщення плям контакту взаємодіючих елементів визначається характером фізико-механічних і фізико-хімічних процесів, які відбуваються в процесі тертя і зношування, як на мікрорівні, так і на макрорівні. При цьому на ці процеси особливий вплив здійснюють значення температури, навантажень, швидкості ковзання та стан навколишнього середовища. Закономірності розподілів і міграцій фактичних контактних плям як за контурною, так і за номінальною поверхнями тертя на сьогодні невідомі.

У разі поширення тепла температуру при спільній дії декількох джерел необхідно розглядати як суму температур від дій кожного джерела. Максимальну температуру на фактичній контактній плямі взаємодіючих елементів колодкового гальма  $t_{\max}$  можна знайти як суму таких складових [89, 90]:

- вихідна температура колеса або колодки  $t_0$ ;
- об'ємна температура  $t_v$ ;
- середня температура номінальної поверхні контакту  $\bar{t}$ ;

- температура спалаху на фактичній контактній плямі (стрибок температури в процесі тертя)  $t_{BCП}$ .

Згідно з даними роботи [28], температура спалаху на фактичній контактній плямі має значення менше ніж 5 % середньої температури  $\bar{t}$ , тоді величиною  $t_{BCП}$  можна знехтувати. У результаті максимальна температура на фактичній контактній плямі взаємодіючих елементів колодкового гальма буде складатися з трьох складових:

$$t_{\max} = t_0 + t_v + \bar{t}.$$

З іншого боку, сам механізм теплообміну у взаємодіючих матеріалах можна охарактеризувати залежністю температурного поля [28, 192]:

$$t = f(x, y, z, \tau), \quad (3.16)$$

де  $t$  – температура, °С;

$x, y, z$  – координати точки;

$\tau$  – відповідний момент часу, с.

Тоді температурне поле являє собою сукупність раптових значень температури в усіх точках розглянутого тіла у відповідний момент часу. При цьому рівняння (3.16) буде описувати нестационарне температурне поле.

Якщо припустити, що  $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$ , то температурне поле буде стаціонарним:

$$t = f_1(x, y, z). \quad (3.17)$$

У неоднорідному температурному полі можна виділити ряд ізотермічних поверхонь, тобто поверхонь з однаковою температурою, яка змінюється при переході від однієї поверхні до іншої. Характер такої зміни,

тобто ступінь неоднорідності температурного поля, може бути визначений поняттям градієнта температури. Отже, градієнтом температури є вектор, спрямований по нормалі до ізотермічної поверхні в бік зростання температури й чисельно рівний похідній від температури за цим напрямком.

Якщо він є одиничним вектором в напрямку нормалі, тоді

$$\text{grad}t = \vec{n}_0 \frac{\partial t}{\partial n},$$

де  $\vec{n}_0$  – одиничний вектор, нормальний до ізотермічної поверхні й спрямований у бік зростання температури;

$\frac{\partial t}{\partial n}$  – похідна температура по нормалі  $n$ .

У декартовій системі координат вектор градієнта може бути записаний у вигляді [28, 192]:

$$\vec{\text{grad}}t = \vec{i} \frac{\partial t}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial t}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial t}{\partial z}. \quad (3.18)$$

Основний закон теплопровідності Фур'є [28] визначає, що кількість теплоти  $dQ$ , що проходить через елемент ізотермічної поверхні  $dS$  за проміжок часу  $d\tau$ , пропорційна градієнту температури, у зв'язку з чим можна записати:

$$dQ = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dS d\tau, \quad (3.19)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності.

При цьому величина  $\Phi = \frac{dQ}{d\tau}$ , рівна кількості теплоти, що проходить через елемент поверхні колодкового гальма  $dS$  за одиницю часу, є тепловим потоком. Отже, щільність теплового потоку буде визначати тепловий потік через одиницю поверхні [28, 192]:

$$\bar{q} = \frac{d\Phi}{dS}.$$

Оскільки  $\bar{q}$  – це величина векторна і напрямком теплового потоку протилежний напрямку градієнта температури, то у векторній формі теплопровідність буде визначатися виразом такого вигляду [28, 192]:

$$\bar{q} = -\lambda \cdot \text{grad } t. \quad (3.20)$$

Поряд з теплопередачею, у матеріалах елементів колодкового гальма в процесі нагрівання бере участь і тепловіддача, яка визначає теплообмін між поверхнями взаємодіючих елементів і навколишнім середовищем. Основним законом тепловіддачі в процесі нагрівання є закон Ньютона–Рихмана:

$$q = \alpha(t_n - t_{cp}), \quad (3.21)$$

де  $t_n$  – температура поверхні одного з елементів колодкового гальма;

$t_{cp}$  – температура навколишнього середовища;

$\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі.

Рівняння (3.19)–(3.20) дають можливість визначити щільність теплового потоку й кількість теплоти, що проходить через певну поверхню в заданий проміжок часу при відомому температурному полі. У свою чергу, знаходження температурного поля  $t(x, y, z, \tau)$  здійснюється з використанням

диференціального рівняння теплопровідності, що виходить з першого закону термодинаміки, тобто закону збереження енергії в теплових процесах [8, 28, 192]:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = -\operatorname{div} \vec{q} + q_v, \quad (3.22)$$

де  $c$  – масова питома теплоємність відповідного матеріалу;

$\rho$  – щільність відповідного матеріалу;

$\operatorname{div} \vec{q}$  – щільність розподілених в елементах колодкового гальма джерел тепла;

$q_v$  – внутрішні джерела тепла.

З урахуванням основного закону теплопровідності Фур'є, рівняння (3.22) можна записати в такому вигляді:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \operatorname{div} (\lambda \cdot \operatorname{grad} t) + q_v. \quad (3.23)$$

У разі якщо величина коефіцієнта теплопровідності є постійною, то її можна винести з-під знака  $\operatorname{div}$  і тоді з урахуванням виразу (3.18) остаточний вигляд рівняння теплопровідності можна записати таким чином:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + q_v. \quad (3.24)$$

У простіших задачах найчастіше внутрішні джерела тепла в різних тілах відсутні, тобто  $q_v = 0$ . Тоді рівняння (3.24) можна використати у вигляді [28, 192]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (3.25)$$

де  $a = \lambda / c\rho$  – теплопровідність, яка визначає швидкість зміни температурного поля у відповідному матеріалі.

Рівняння (3.23)–(3.25) є рівняннями розв’язку крайових задач, які можуть бути реалізовані тільки для конкретної постановки задачі, що містить такі умови:

- геометричні (розміри, форма, рівняння поверхні, що обмежує тіло);
- фізичні (усі теплофізичні характеристики матеріалу тіла і його щільність);
- початкові (розподіл температури в тілі як функція координат в початковий момент часу:  $t_{\tau=0} = f(x, y, z)$ );
- граничні умови (на поверхні, що обмежує тіло, як функція часу).

Граничні умови можуть бути задані декількома способами:

- граничні умови I роду – задається температура на поверхні тіла у вигляді функції часу:  $t(x, y, z)_{нов} = f(\tau)$ ;
- граничні умови II роду – на поверхні тіла задаються щільності теплового потоку:  $q(x, y, z)_{нов} = q(\tau)$ ;

Граничні умови III роду записуються у вигляді рівняння Ньютона–Рихмана, що задає закон теплообміну між поверхнями взаємодіючих елементів і навколишнім середовищем [28, 192]:

$$q(x, y, z)_{нов} = \alpha(t_n - t_{сеп}).$$

На практиці часто застосовуються спрощені методи розв’язання температурних задач, які зводяться до реалізації стаціонарного режиму, тобто усталеного режиму, при якому температурне поле не змінюється з



часом. Тоді диференціальне рівняння теплопровідності подається у вигляді [28, 192]:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0.$$

Рівняння може бути розв'язано для будь-якого типу граничних умов при задаванні геометричних розмірів елементів, теплопровідності матеріалів і коефіцієнта тепловіддачі.

Слід вказати на той факт, що в загальному випадку для визначення залежності від часу температурного поля необхідно розв'язати рівняння (3.24) або (3.25) одним з доступних методів – аналітичним або числовим. Аналітичний розв'язок можна отримати лише для простих геометричних форм, а саме: необмеженої плоскої стінки або нескінченно довгого циліндра чи кулі.

У більш складних випадках, які необхідно реалізовувати, застосовують різні числові методи, а саме:

- МКР;
- інтегродиференційний метод (метод балансу);
- МКЕ.

Розглянемо детальніше теплові процеси, які відбуваються при взаємодії елементів колодкового гальма вагона.

Для визначення теплового потоку, який пронизує елементи колодкового гальма, запишемо рівняння переносу [36]:

$$k\Delta u(x_i, \tau) + w(x_i, \tau) = \frac{\eta \partial u(x_i, \tau)}{\partial \tau}, \quad (3.26)$$

де  $i = 1, 2, 3, \dots$  ;

$\Delta$  – оператор Лапласа;

$u(x_i, \tau)$  – вихідна функція, що описує теплове поле;

$w(x_i, \tau)$  – функція геометричних координат і часу;

$\tau$  – час;

$k, \eta$  – коефіцієнти теплового поля;

$x_i, \tau$  – змінні, що задаються.

Запишемо рівняння (3.26) з узагальненими криволінійними параметрами в ортогональній системі координат. Задамося криволінійною ортогональною системою координат  $\xi_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ), у якій поодинокі орти  $\vec{e}_i$  рівні:

$$\vec{e}_i = \frac{\partial \vec{r}}{\partial \xi_i} : \left| \frac{\partial \vec{r}}{\partial \xi_i} \right|, \quad (3.27)$$

де  $\vec{r}$  – радіус-вектор точки зі значенням криволінійної координати.

Причому значення модуля похідної радіус-вектора за криволінійною координатою дорівнює (параметр Ляме) [28, 192]

$$h_j(\xi_j) = \left| \frac{\partial \vec{r}_j}{\partial \xi_j} \right| = \left[ \sum_{i=1}^3 \left( \frac{\partial x_i}{\partial \xi_j} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad j = 1, 2, 3. \quad (3.28)$$

Елементи довжин, площ поверхні, а також об'ємів у такій системі координат через параметри Ляме зв'язуються з приростами координат [28, 192]:

$$dl_i = h_i d\xi_i; \quad dS_{ij} = h_i h_j d\xi_i d\xi_j; \quad dV = \prod_1^3 h_i d\xi_i. \quad (3.29)$$

Описати градієнт цієї функції в криволінійній системі координат можна на основі формули [28]:

$$\vec{\nabla} = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{h_i} \frac{\partial}{\partial \xi_i} \vec{e}_i = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial l_i} \vec{e}_i. \quad (3.30)$$

Тоді оператор Лапласа можна записати в такому вигляді [28, 192]:

$$\Delta = \text{div} \left( \vec{\nabla} \right) = \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla}. \quad (3.31)$$

Оскільки система координат ортогональна, то підстановкою (3.30) у (3.31) отримаємо такий вираз:

$$\Delta = \frac{1}{J} \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left( \frac{J}{h_i^2} \frac{\partial}{\partial \xi_i} \right) = \frac{1}{J} \sum_{i=1}^3 h_i \frac{\partial}{\partial l_i} \left( \frac{J}{h_i} \frac{\partial}{\partial l_i} \right), \quad (3.32)$$

де  $J$  – параметр перетворення використовуваної декартової системи координат в криволінійну,  $J = \prod_{i=1}^3 h_i$ .

Наведений вираз (3.26) в узагальненій системі координат набуде такого вигляду:

$$\frac{1}{J} \sum_{i=1}^3 k_{ii} h_i \frac{\partial}{\partial l_i} \left( \frac{J}{h_i} \frac{\partial}{\partial l_i} \right) + w = \eta \frac{\partial u}{\partial \tau}. \quad (3.33)$$

У декартовій системі параметри Ляме  $h_i = 1$  і  $x_i = \xi_i$ ; тоді  $dl_i = dx_i$ ,  $J = 1$ . Рівняння теплового переносу (3.33) у разі застосування декартової системи координат буде мати такий вигляд:

$$\sum_{i=1}^3 k_{ii} \frac{\partial^2 u}{\partial l_i^2} + w(x_i, \tau) = \eta \frac{\partial u}{\partial \tau}. \quad (3.34)$$

Між декартовими координатами й циліндричною системою координат існує такий зв'язок ( $\xi_1 = r$ ,  $\xi_2 = \theta$ ,  $\xi_3 = z$ ) [28]:

$$x = x_1 = r \cos \theta; y = x_2 = r \sin \theta; z = x_3 = z.$$

Використовуючи значення похідних, наведених функцій зв'язку, запишемо рівняння (3.33) в такому вигляді:

$$\sum_{i=1}^3 k_{ii} \frac{\partial^2 u}{\partial l_i^2} + k_{11} \frac{1}{h_2} \frac{\partial u}{\partial l_1} + w(r, \theta, z, \tau) = \eta \frac{\partial u}{\partial \tau}. \quad (3.35)$$

При сферичній системі координат, коли  $\xi_1 = r$ ,  $\xi_2 = \theta$ ,  $\xi_3 = \beta$ , існує зв'язок [28, 192]:

$$x = r \cos \theta \sin \beta; y = r \sin \theta \sin \beta; z = r \cos \beta.$$

Тоді рівняння (3.33) буде таким:

$$\sum_{i=1}^3 k_{ii} \frac{\partial^2 u}{\partial l_i^2} + k_{11} \frac{2}{h_3} \frac{\partial u}{\partial l_1} + k_{33} \frac{1}{h_3} \operatorname{ctg} \beta \frac{\partial u}{\partial l_3} + w(r, \theta, z, \tau) = \eta \frac{\partial u}{\partial \tau}. \quad (3.36)$$

Згідно з виразом (3.29) видно, що:

$$\frac{\partial}{\partial l_i} = \frac{1}{h_i} \cdot \frac{\partial}{\partial \xi_i}. \quad (3.37)$$

При уведенні рівного числа змінюють свій напрямок орти, при цьому рівняння (3.33)–(3.36) в узагальненому вигляді можна записати таким чином:

$$\sum_{i=1}^3 k_{ii} \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial l_i^2} + \frac{S-1}{h_s} \frac{(1-\delta_{i,2})(2\delta_{i,1} + \delta_{i,3} - \delta_{S,2})}{1+\delta_{S,3}} \operatorname{ctg} \delta_{i,3} \delta_{S,3} \frac{\partial u}{\partial l_i} \right] + w(\xi_i, \tau) = \eta \frac{\partial u}{\partial \tau}. \quad (3.38)$$

де  $\eta = c_p \rho$  – об'ємна теплоємність;

$w$  – об'ємна величина щільності потужності для внутрішнього тепла;

$\delta_{ij}$  – символ Кронекера;

$$\begin{cases} \delta_{ij} = 1 & \text{при } i = j; \\ \delta_{ij} = 0 & \text{при } i \neq j. \end{cases}$$

У наведеному рівнянні коефіцієнти анізотропної теплопровідності  $k_{ii}$  є головними тензорами [9], а вихідною скалярною величиною є температура  $T(\xi_i, \tau)$ .

Розглянемо можливі крайові умови для поставленої задачі.

Початкове поле задається в нульовий момент часу  $\tau = 0$ , при цьому:

$$u(\xi_1, \xi_2, \xi_3, 0) = u_0(\xi_1, \xi_2, \xi_3). \quad (3.39)$$

а граничні умови необхідно сформулювати на границях або якійсь частині області для визначення поставленої задачі. Варіанти цих умов можуть бути такими.

Головною граничною умовою може бути поле температур, тобто:

$$T(\tau) = f(\tau), \quad \xi_i \in S. \quad (3.40)$$

Граничну умову можна задати узагальненою для складного теплообміну як природну, при цьому

$$q_{\lambda} + q_K^{e,i} + q_R^{e,i} + q^e(\tau)_{S_i} = 0, \quad (3.41)$$

де  $q_{\lambda}$  – кондуктивний теплообмін;

$q_K^{e,i}$  – конвективний теплообмін, який виникає як на зовнішній  $e$ , так і на внутрішній  $i$  поверхнях колеса;

$q_R^{e,i}$  – радіаційний теплообмін;

$q^e(\tau)$  – джерело тепла, що пов'язане з процесом тертя в часі при взаємодії колодки з колесом;

$S_i$  – поверхня колеса, що подається у вигляді  $i$ -ї ділянки границь. При цьому утворюються зовнішні або внутрішні границі певної області колеса в цілому.

Як відомо [19, 28], при постановці граничних умов у задачах теплопровідності існує такий поділ:

- випадок, коли  $T(x_i, \tau) = f(x_i)$ , а функція задається у вигляді константи  $T(x_i, \tau) = T_c$ ;

- коли сума теплообміну на поверхні колеса  $(q_{\lambda} + q^e)_{S_i} = 0$ , а  $q_{\lambda}$  описується залежностями закону Фур'є;

- коли сума кондуктивних і конвективних теплообмінних процесів на поверхні колеса  $(q_{\lambda} + q_k)_{S_i} = 0$ , а  $q_k$  описується залежностями закону Ньютона;

- випадок, коли поля і потоки двох середовищ рівні  $T_i(x_i)_{S_k} = T_j(x_j)_{S_k}$ ;  
 $q_{\lambda i}(x_i)_{S_k} = q_{\lambda j}(x_j)_{S_k}$ .

У разі граничної умови 2-го роду  $q_{\lambda}$  описується за допомогою закону Фур'є [28, 192]:

$$\mathbf{q}_{\lambda, S_j} = \left( \sum_{i=1}^3 \lambda_{ii} \frac{\partial T}{\partial l_i} \vec{e}_i \right)_{S_j}. \quad (3.42)$$

Для випадку 3-го роду  $q_K$  описується законом Ньютона [192]:

$$\mathbf{q}_{K, S_j} = \alpha_{S_j} \left( T - T_{cep} \right) = \alpha_{S_j} T - \alpha_{S_j} T_{cep}, \quad (3.43)$$

де  $\alpha_{S_j}$  – коефіцієнт теплообміну для природної або змішаної конвекції;

$T_{cep}$  – температура середовища.

Радіаційний компонент описується законом Стефана–Больцмана [192]:

$$\mathbf{q}_{R, S_j} = \varepsilon_{S_j} \sigma_0 \left( T^4 - T_{cep}^4 \right), \quad (3.44)$$

де  $\varepsilon_{S_j}$  – напівсферичний інтегральний ступінь чорноти поверхні;

$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>К<sup>4</sup> – стала Стефана–Больцмана.

Тоді гранична умова в узагальненому вигляді набуде вигляду [28, 192]:

$$\sum_{i=1}^3 \lambda_{ii} \frac{\partial T}{\partial l_i} \vec{e}_i + \alpha_{S_j} T + D_{S_j} = 0, \quad (3.45)$$

де, у свою чергу,  $D_{S_j}$  описується такою залежністю [28, 192]:

$$D_{S_j} = -\alpha_{S_j} T_{cep} + q_R^{e,i} + q^e(\tau). \quad (3.46)$$

Радіаційний компонент для граничної умови подають лінеаризованим [192]:

$$q_R = \alpha_R (T - T_{cep}), \quad (3.47)$$

$$\text{де } \alpha_R = \varepsilon_{S_j} \sigma_0 (T^3 + T^2 T_{cep} + T T_{cep}^2 + T_{cep}^3).$$

Для об'єднання з конвективним теплообміном необхідно ввести сумарний коефіцієнт  $\alpha = \alpha_R + \alpha_{S_j}$ . При цьому розрахунок величини  $\alpha_R$  слід здійснювати виходячи з того, що  $T \approx T^*$ , де остання величина становить деяку характерну температуру теплового процесу при терті [9].

У разі внутрішнього теплообміну процедура лінеаризації є небажаною [28].

Температурне поле, яке виникає в кожному елементі колодкового гальма й характеризується градієнтами температур, впливає на розподіл температурних напружень, які необхідно враховувати при проєктуванні конструкцій і механізмів зазначеного гальма.

Щоб визначити розподіл температурного поля, необхідно розв'язати задачу теорії теплопровідності. Задача теорії нестационарної теплопровідності є крайовою задачею математичної фізики, яка зводиться до розв'язання диференціального рівняння теплового балансу в області  $V$ , що зайнята теплом, при відповідних крайових умовах на певному розділі (границі).

Загальний вигляд рівняння теплопровідності в суцільному середовищі можна навести в такому вигляді [28, 192]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + RT + Q = c\rho \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (3.48)$$

де  $T$  – температура, К;



$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  – коефіцієнти теплопровідності в напрямку осей анізотропії  $x, y, z$ , Вт / (м · К);

$Q$  – джерело тепла всередині тіла, яке вважається позитивним, якщо тепло підводиться до тіла, Вт / м;

$R$  – внутрішнє джерело, що пропорційне температурі, Вт / (м<sup>3</sup> · К).

Усі коефіцієнти рівняння  $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ , а також  $c, \rho, Q$  можуть змінюватися в часі.

Розв'язання рівняння (3.48) має задовольняти крайові умови.

Якщо на деякій частині розділу (границі) відома температура, то

$$T = T_B(S), \quad (3.49)$$

де  $T_B$  – температура на границі у вигляді функції координат точок поверхні  $S$ .

Якщо на розділі відбувається конвективний теплообмін, який характеризується величиною  $h(T - T_\infty)$ , або заданий потік тепла  $q$ , то гранична умова буде мати вигляд [28]:

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} l_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} l_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} l_z + h(T - T_\infty) + q = 0, \quad (3.50)$$

де  $h$  – коефіцієнт тепловіддачі на розділі, Вт / (м · К);

$T$  – температура на розділі;

$T_\infty$  – температура навколишнього середовища;

$l_x, l_y, l_z$  – напрямні косинуси нормалі до точки поверхні;

$q$  – потік тепла на розділі, який вважається позитивним, якщо тепло витрачається тілом, Вт / м<sup>3</sup>.

Потік тепла  $q$  і конвективна втрата тепла  $h(T - T_\infty)$  не повинні спостерігатися на одній і тій самій ділянці поверхні розділу. Якщо

конвективний теплообмін відсутній і потік тепла дорівнює нулю, то рівняння (3.50) зводиться до співвідношення [28, 192]:

$$\frac{dT}{dn} = 0, \quad (3.51)$$

яке відображає умову існування теплоізованого розділу (границі) ( $n$ – зовнішня нормаль) [18]. Рівняння (3.51) може бути переписано у вигляді двох виразів:

$$q|_{S_q} = - \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} l_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} l_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} l_z \right), \quad (3.52)$$

де  $S_q$  – частина границі з тепловим потоком  $q$ .

$$h(T - T_\infty)|_{S_h} = - \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} l_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} l_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} l_z \right), \quad (3.53)$$

де  $S_h$  – частина границі з теплообміном із зовнішнім середовищем і із зовнішніми початковими умовами:

$$T(x, y, z)|_{t=0} = T_0(x, y, z), \quad (3.54)$$

де  $T_0(x, y, z)$  – температура в початковий момент часу.

Для наведеної температурної задачі об'єктом є колодкові гальма, в елементах яких при підведенні теплоти одночасно відбуваються процеси поглинання й проведення цієї теплоти. Залежності, які описують ці процеси, пов'язують температуру або швидкість збільшення температури з енергією, яка перебуває в нескінченно малій області. Самі енергетичні характеристики є адитивними величинами, а температура повинна визначатися в будь-якій

точці заданого простору, тому температура повинна апроксимуватися поліномом всередині кінцевого елемента, а складові основних рівнянь – матимуть сенс енергетичних характеристик.

За допомогою закону Фур'є, який описує проведення теплоти у твердому тілі (колесі), встановлюється зв'язок між кількістю теплоти  $d^2Q$ , яка пройшла через площу поверхні  $dS$  за певний час  $dt$ , з похідною за температурою в напрямку зовнішньої нормалі до  $dS$ , а саме надходження енергії в об'єм  $V$  через  $dS$  буде відповідати додатному значенню похідної [28, 192]:

$$d^2Q = \lambda \frac{dT}{dn} dS dt = \lambda(\nabla T; n) dS dt = \lambda(\nabla T; dS) dt, \quad (3.55)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності у визначеному напрямку;

$\nabla$  – оператор Набла, причому

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} e_x + \frac{\partial}{\partial y} e_y + \frac{\partial}{\partial z} e_z;$$

$e_x, e_y, e_z$  – орти декартової системи координат;

$(\nabla T; dS)$  – скалярний добуток градієнта температури і псевдовектора  $ndS$  площі.

З іншого боку, можна записати вираз, що буде враховувати поглинання теплоти  $d^2Q$  об'ємом  $dV$  і масою  $dm$  [28, 192]:

$$d^2Q = -cdmdT = -\rho dVdT, \quad (3.56)$$

де  $c$  – питома теплоємність середовища;

$\rho$  – щільність середовища.

У виразі (3.56) показано, що поглинання теплоти всередині об'єму  $dV$  призведе до рівномірного підвищення температури на величину  $dT$ .

Також при розгляді середовища можна припустити існування джерела теплоти з певною напруженістю  $\vec{H}$ , тоді для величини поглинання теплоти  $d^2Q$  можна припустити пропорційність температури й записати рівняння теплового балансу у вигляді

$$-\oint_V c\rho \frac{\partial T}{\partial t} dV + \oint_S \lambda(\nabla T; dS) dt = \oint_V (H - RT) dV, \quad (3.57)$$

де  $d^2Q = HdVdT$  – джерело теплоти;

$d^2Q = -RTdVdT$  – поглинання теплоти.

Застосовуючи теорему Остроградського–Гаусса [28, 192]:

$$\oint_S \lambda(\nabla T; dS) dt = \oint_V \operatorname{div} \lambda \nabla T dV,$$

останнє рівняння (3.57) перебудується і в результаті отримаємо рівняння нестационарної теплопровідності, що враховує розбіжність градієнта температури в просторі [28, 192]:

$$\oint_{\forall V} \left( -c\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \operatorname{div} \lambda \nabla T - (H - RT) \right) dV = 0, \quad (3.58)$$

тобто для будь-якого  $V$ , якщо підінтегральний вираз дорівнює нулю, виконується рівність [28, 192]:

$$-c\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \operatorname{div} \lambda \nabla T = H - RT. \quad (3.59)$$

Останній вираз можна записати в такому вигляді:

- для ізотропного середовища:

$$-\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\lambda \Delta T}{c\rho} = \frac{H - RT}{c\rho}. \quad (3.60)$$

- для ортотропного середовища:

$$-c\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = H - RT, \quad (3.61)$$

де  $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  – коефіцієнти теплопровідності за осями.

Далі необхідно задати початкові умови розподілу температур у всіх точках колодкового гальма:

$$T(x, y, z)|_{t=0} = f_0(x, y, z). \quad (3.62)$$

У процесі тертя колодок об колесо на границі контакту відбувається підведення теплоти, що протягом певного часу пошириться всередину колеса, при цьому відбувається підвищення температури в усіх точках контакту, що задано попередньою умовою. У результаті утворюється градієнт температури, який можна пов'язати з поверхневою щільністю теплової потужності. Тому можна записати:

$$\lambda \nabla T = \frac{d^2 Q}{dS dt} n. \quad (3.63)$$

Крім того, при температурі на границі контакту, що перевищує температуру навколишнього середовища, можливий процес відтоку тепла через механізм конвективного обміну з навколишнім середовищем і

випромінюванням енергії. Існує цілий ряд емпіричних формул, призначених для розрахунку конвективного обміну. Такі формули відображають перепад температур між колодковим гальмом і навколишнім середовищем, а також особливості процесу теплообміну, зміну параметрів, таких як швидкість, щільність, в'язкість, теплопровідність і теплоємність середовища.

Нульове значення градієнта температури означає або теплоізольовану границю, або розташування точки обчислення градієнта в площині симетрії температурного поля. Якщо теплове навантаження й геометрична форма тіла симетричні, це дозволяє вести розрахунок для частини тіла, що вирізана загальними площинами симетрії.

У підсумку можна записати систему рівнянь для нестационарної теплопровідності довільної точки ортотропного середовища і їх граничні умови:

$$\left\{ \begin{array}{l} -c\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = H - RT \\ \left\{ \begin{array}{l} T(x, y, z)|_{t=0} = f_0(x, y, z) \\ \lambda \nabla T = \frac{d^2 Q}{dS dt} n \\ \lambda \nabla T = f(T - T_0) n \\ d^2 Q = HdVdT \\ d^2 Q = -RTdVdT \end{array} \right. \end{array} \right. , \quad (3.64)$$

де  $f(T - T_0)$  – функція відтоку теплоти, що враховує конвективний теплообмін.

Розглядаючи певну точку з координатами  $x, y, z$  кінцевого елемента, що характеризується температурним параметром, приходимо до того, що для будь-якої точки кінцевого елемента буде справедлива рівність:

$$T(x, y, z, t) = N^T(x, y, z)T(t) = T^T N. \quad (3.65)$$

З огляду на (3.65), основне рівняння теплопровідності після перетворень матиме такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 -c\rho \frac{\partial}{\partial t} \ln T + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial}{\partial x} \ln N^T \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial}{\partial y} \ln N^T \right) + \\
 + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial}{\partial z} \ln N^T \right) - \frac{H}{N^T T} = -R.
 \end{aligned}
 \tag{3.66}$$

Наведений вираз буде справедливий для будь-якої точки кінцевого елемента, на які розбиваються взаємодіючі тіла колодкового гальма вагона.

Слід зазначити, що складові, що входять у диференціальне рівняння теплопровідності (3.66), є об'ємною щільністю теплової потужності. При цьому в граничні умови теплообміну буде входити поверхнева щільність теплової потужності.

Для складання функціонала необхідно скористатися варіаційним підходом [28, 192], у якому оперуючі функціонали отримуються за правилами математики, однак їх фізичний зміст, в основному, не проглядається.

У варіаційному підході ставиться задача із знаходження функції, яка буде задовольняти граничні умови і яка забезпечує екстремум певного функціонала. Задамося функціоналом такого виду [28, 192]:

$$J(T) = \iiint_V F(x, y, z, t, T, T_x, T_y, T_z, T_t) dx dy dz,
 \tag{3.67}$$

тоді необхідна умова екстремуму  $\delta J = 0$  приводить до рівняння Ейлера–Остроградського [28, 192]:

$$-F_T + \frac{\partial}{\partial x} F_{T_x} + \frac{\partial}{\partial y} F_{T_y} + \frac{\partial}{\partial z} F_{T_z} = 0,
 \tag{3.68}$$

$$\text{де } F_T = \frac{\partial F}{\partial T};$$

$$T_x = \frac{\partial T}{\partial x};$$

$$T_y = \frac{\partial T}{\partial y};$$

$$T_z = \frac{\partial T}{\partial z}.$$

Виконаємо зіставлення членів основного рівняння системи (3.64):

$$-c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - H + RT; \quad \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right),$$

та членів виразу (3.68):

$$-F_T; \quad \frac{\partial}{\partial x} F_{T_x}.$$

У результаті отримаємо:

$$-\frac{\partial F}{\partial T} = -c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - H + RT \rightarrow \int \partial F = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} T + HT - \frac{1}{2} RT^2$$

$$\frac{\partial}{\partial x} F_{T_x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) \rightarrow F_{T_x} = \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} \rightarrow \int \partial F = \frac{1}{2} \lambda_x \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2.$$

Використовуючи аналогію, отримаємо рівняння для визначення  $F$  у такому вигляді:



$$F = \frac{1}{2} \left( 2c\rho \frac{\partial T}{\partial t} T + 2HT - RT^2 + \lambda_x \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \lambda_y \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \lambda_z \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right) \quad (3.69)$$

Тоді функціонал набуде вигляду:

$$J(T) = \int_V \left( c\rho \frac{\partial T}{\partial t} T + HT - \frac{RT^2}{2} \right) dV + \frac{1}{2} \int_V \left( \lambda_x \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \lambda_y \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \lambda_z \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right) dV. \quad (3.70)$$

В останній вираз для функціонала підставимо значення температури (3.65) кінцевого елемента, а далі проведемо інтегрування за об'ємом, у результаті отримаємо:

$$J(T) = \int_{\Omega} \left( c\rho \frac{\partial T^T N}{\partial t} N^T T + H N^T T - \frac{R T^T N N^T T T}{2} \right) d\Omega + \frac{1}{2} \int_{\Omega} \left( \lambda_x \frac{\partial}{\partial x} T^T N \frac{\partial}{\partial x} N^T T + \lambda_y \frac{\partial}{\partial y} T^T N \frac{\partial}{\partial y} N^T T + \lambda_z \frac{\partial}{\partial z} T^T N \frac{\partial}{\partial z} N^T T \right) d\Omega, \quad (3.71)$$

або, здійснюючи перетворення, отримаємо такий вираз:

$$J(T) = T \int_{\Omega} \left( c\rho \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right)^T N N^T + H N^T \right) d\Omega +$$

$$+ \frac{1}{2} T^T T \int_{\Omega} \left( \lambda_x \frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial N^T}{\partial x} + \lambda_y \frac{\partial N}{\partial y} \frac{\partial N^T}{\partial y} + \lambda_z \frac{\partial N}{\partial z} \frac{\partial N^T}{\partial z} - R N N^T \right) d\Omega. \quad (3.72)$$

Для задоволення наведеного функціонала рівняння (3.66) необхідно виконання умови мінімуму:

$$\frac{\delta J(T)}{\delta T} = 0,$$

тоді можна записати таке:

$$\int_{\Omega} (c\rho N N^T + H N^T) d\Omega + T \int_{\Omega} \left( \lambda_x \frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial N^T}{\partial x} + \lambda_y \frac{\partial N}{\partial y} \frac{\partial N^T}{\partial y} + \lambda_z \frac{\partial N}{\partial z} \frac{\partial N^T}{\partial z} - R N N^T \right) d\Omega = 0. \quad (3.73)$$

Бачимо, що для вузлів кінцевого елемента члени виразу (3.73) мають розмірність теплової потужності, що свідчить про належність цього рівняння до теплового балансу потужностей для певних вузлів кінцевого елемента.

Уведемо такі позначення:

- для матриці теплоємності кінцевого елемента:

$$C = \int_{\Omega} c\rho N N^T d\Omega; \quad (3.74)$$

- для матриці теплопровідності кінцевого елемента:

$$M = \int_{\Omega} \left( \lambda_x \frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial N^T}{\partial x} + \lambda_y \frac{\partial N}{\partial y} \frac{\partial N^T}{\partial y} + \lambda_z \frac{\partial N}{\partial z} \frac{\partial N^T}{\partial z} \right) d\Omega; \quad (3.75)$$

- для матриці об'ємного джерела теплової потужності кінцевого елемента:

$$U = \int_{\Omega} H N^T d\Omega; \quad (3.76)$$

- для матриці температури поглинання теплової потужності кінцевого елемента:

$$W = T \int_{\Omega} R N N^T d\Omega. \quad (3.77)$$

Для приведення потоку теплової потужності, що діє на границях вузлів кінцевого елемента колодкового гальма, можна застосувати метод Гальоркіна [28]:

- для випадку притоку теплоти:

$$P_G = \int_G q N dG; \quad (3.78)$$

- для випадку відтоку теплоти:

$$H = \int_G N f(N^T T - T_0) dG; \quad (3.79)$$

де  $G$ – поверхня кінцевого елемента.

Відповідно до цих та прийнятих позначень вираз для балансу потужностей для певного кінцевого елемента з підведеною тепловою потужністю, у якому здійснюється теплообмін по гранях, набуде такого вигляду:

$$WT \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) + C \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) + MT = U + P_G - H. \quad (3.80)$$

При лінеаризації функції  $f(T - T_0)$  щодо різниці температур, як згадувалося вище, отримаємо формулу Ньютона і, використовуючи метод Гальоркіна, запишемо такий вираз для  $H$ :

$$H = H_M T - H_0. \quad (3.81)$$

У цьому виразі  $H_M$  представляє матрицю зовнішньої теплопровідності, а  $H_0$ – вектор додаткової потужності, що викликаний наявністю початкової температури колодкового гальма.

Підставимо останню рівність у вираз (3.64):

$$WT \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) + C \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) + MT = U + P_G - H_M T + H_0. \quad (3.82)$$

Зробимо групування представлених доданків в останньому виразі і, крім того, уведемо нові позначення:

- для узагальненого вектора вузлової потужності:

$$b = U + P_G + H_0;$$

- узагальненої матриці теплопровідності:

$$A = M + H_M.$$

З урахуванням прийнятих позначень, рівняння теплопровідності для кінцевого елемента колодкового гальма з граничними умовами запишемо в такому вигляді:

$$WT \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) + C \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) + AT = b. \quad (3.83)$$

МКЕ є варіаційним методом, а сам функціонал енергії в цій області необхідно подавати сумою функціоналів окремих частин областей – кінцевих елементів. Область кожного елемента має певний закон розподілу вихідних функцій. При цьому кусково-безперервна апроксимація може бути реалізована на основі спеціальних апроксимуючих функцій [80]. За допомогою цих функцій визначаються вихідні безперервні величини в межах кожного кінцевого елемента через значення величин у вузлових точках, крім того, за допомогою системи еквівалентних вузлових сил задається значення досліджуваних величин. Тобто отримані залежності для колодкового гальма вагона дозволять на етапі проектування визначити температурне поле на основі МКЕ, що буде реалізовуватися в процесі експлуатації.

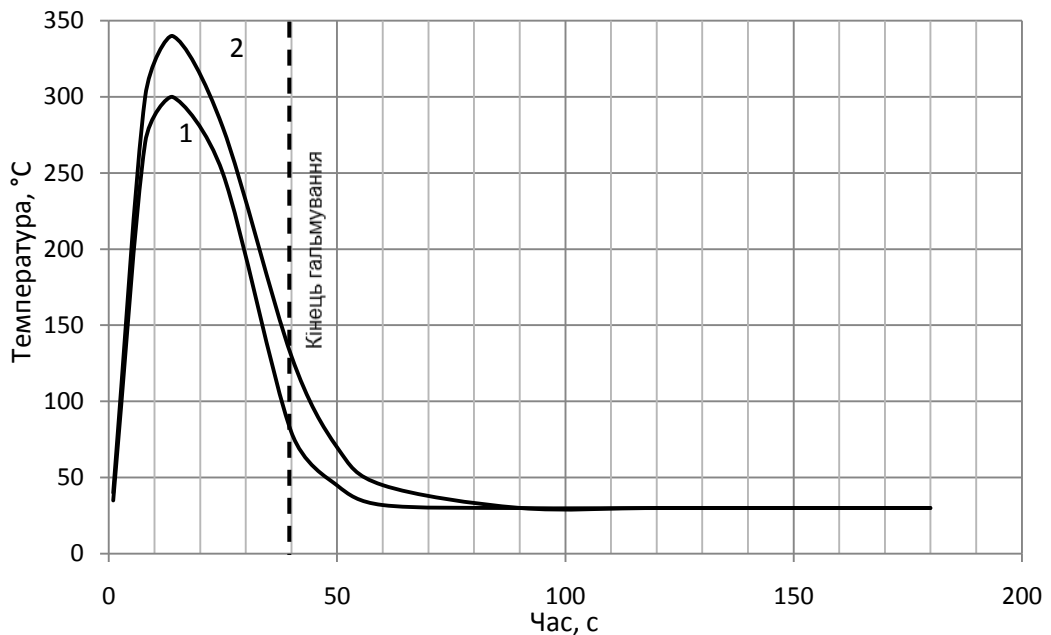
Далі наведемо результати моделювання для взаємодіючих елементів «гальмівна колодка – колесо». При цьому було проведено моделювання двох основних режимів, які мають найбільш екстремальні значення температури колеса:

- екстрене гальмування до повної зупинки;
- тривале гальмування на затяжному спуску.

При моделюванні виходили з таких припущень: значення для осьового навантаження приймалося рівним 25 т/вісь; сила натиснення гальмівної

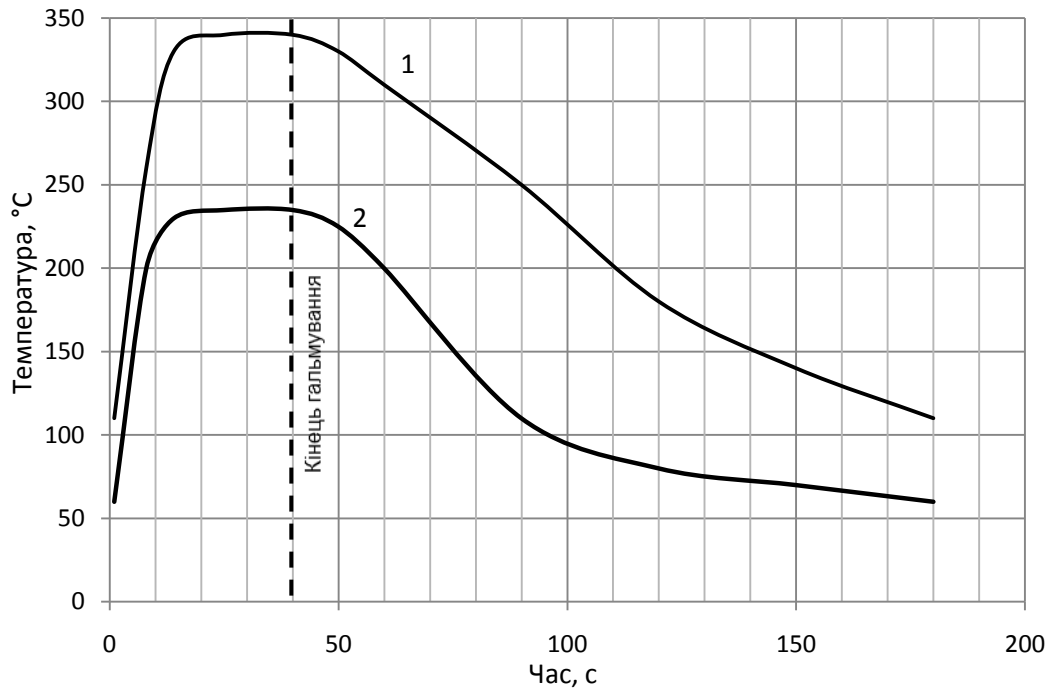
колодки вважалася постійною зі значенням 5 т; застосування нових гальмівних колодок як чавунних, так і композиційних; температура навколишнього середовища  $+30^{\circ}\text{C}$ . При моделюванні процесу гальмування до зупинки початкова швидкість приймалася рівною 120 км/год. При моделюванні режиму тривалого гальмування вагона на затяжному спуску швидкість приймалася постійною зі значенням 60 км/год, а зовнішній тепловий потік приймався також незмінним у часі. При цьому було розглянуто зміну температурного поля самого колеса до появи усталеного режиму.

На рис. 3.1 та 3.2 наведено залежності температур гальмівних колодок і коліс від часу для точки, що розташована на поверхні кочення в середині зони контакту з гальмівною колодкою, де наявні найбільші значення температури при екстремому гальмуванні до повної зупинки.



1 – чавунні колодки; 2 – композиційні колодки (2ТР-37-01)

Рисунок 3.1 – Залежність температури колеса при екстремому гальмуванні до повної зупинки від часу взаємодії з колодками



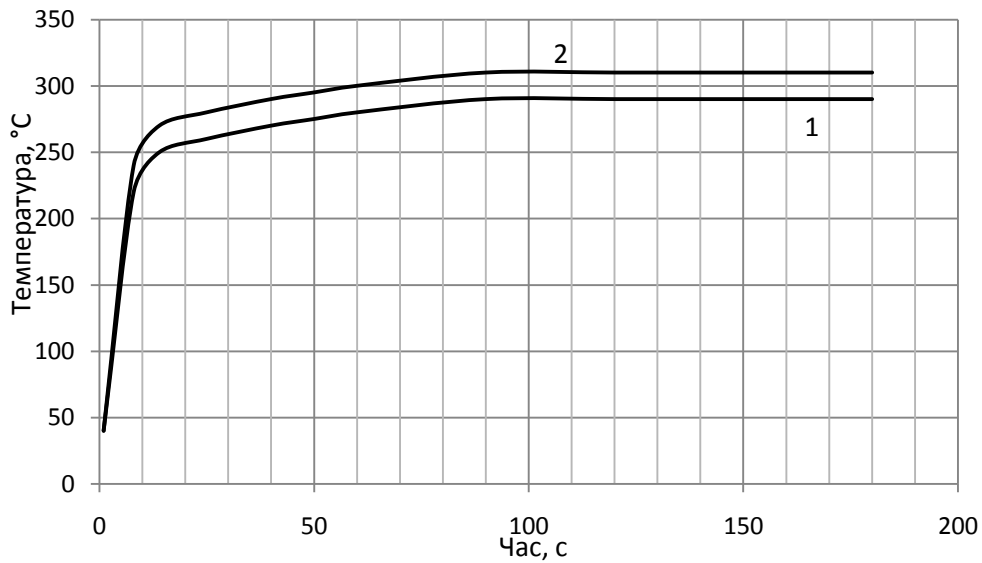
1 – чавунні колодки; 2 – композиційні колодки (2ТР-37-01)

Рисунок 3.2 – Залежність температури гальмівних колодок при екстремому гальмуванні до повної зупинки від часу взаємодії з колесами

Як видно з графічної залежності (рис. 3.1), у початковий період гальмування температура різко зростає й уже на 8 с досягає значення 300 °C при взаємодії з композиційними колодками (крива 2), а при взаємодії з чавунними колодками – 270 °C. Максимального значення температура сягає на 14-й секунді гальмування. Потім температура починає падати, що пов'язано зі зниженням теплового потоку. Нарешті, після зупинки вагона (припинення теплового потоку) починається більш сильний спад температури, поки вона не досягне значення температури навколишнього середовища: для композиційних колодок – через 89 с; для чавунних – на 63-й с. Час від початку гальмування до повної зупинки склав 44 с.

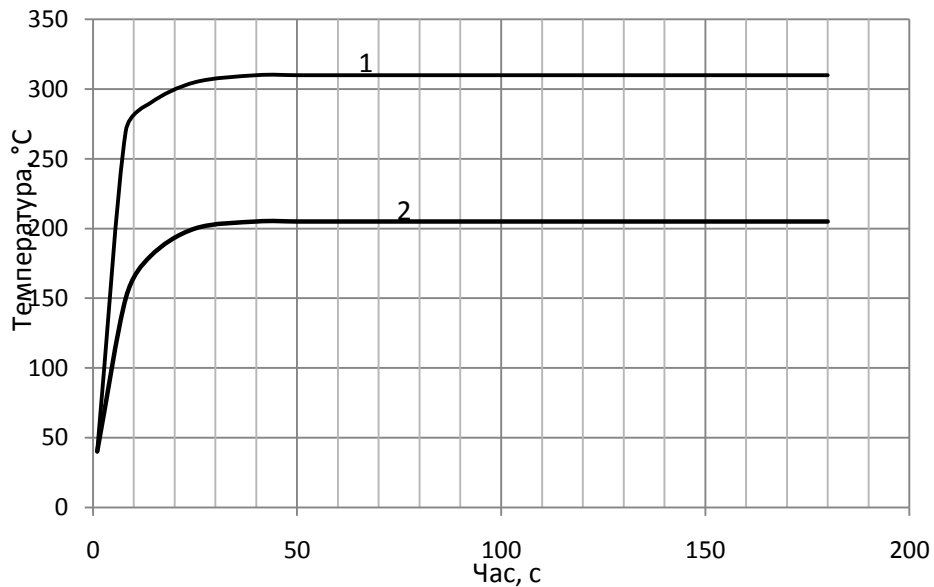
З наступної залежності (рис. 3.2) видно, що в початковий період гальмування температура гальмівних колодок різко зростає і вже на 8-й секунді досягає значення 200 °C (для композиційних колодок (крива 2)) та 260 °C (для чавунних колодок (крива 1)). Максимального значення

температура сягає на 25-й секунді гальмування. Потім після 40 с температура починає знижуватися, що також пов'язано зі зниженням теплового потоку у взаємодіючих елементах.



1 – чавунні колодки; 2 – композиційні колодки (2ТР-37-01)

Рисунок 3.3 – Залежність температури колеса для режиму тривалого гальмування на зтяжному спуску від часу взаємодії з колодками



1 – чавунні колодки; 2 – композиційні колодки (2ТР-37-01)

Рисунок 3.4 – Залежність температури гальмівних колодок для режиму тривалого гальмування на зтяжному спуску від часу взаємодії з колесами



На рис. 3.3 та 3.4 наведено графічні залежності температур гальмівних колодок і коліс від часу для режиму тривалого гальмування на затяжному спуску.

Загальний характер зміни температурної кривої включає три виражені ділянки (рис. 3.3, 3.4). На першій, початковій ділянці температура різко зростає за законом, близьким до лінійного. На другій, перехідній ділянці відбувається сповільнене підвищення температури. І на третій ділянці температура встановлюється на максимальному значенні, що становить для колеса при взаємодії з: чавунними колодками – 291°C; композиційними колодками – 311°C. Режим, коли відбувається зміна (зниження) температури, встановлюється на 514-й секунді від початку гальмування.

### **3.1.3 Визначення граничного ресурсу складових елементів вантажних вагонів**

Усі фактори, що визначають надійність, безвідмовність і довговічність вагонів, можна розділити на три групи [22, 23, 201]:

- міцнісні властивості, зносостійкість і корозійна стійкість матеріалів елементів вагонів;
- експлуатаційні фактори;
- рівень організації технічного впливу на технічний стан.

Згідно з дослідженнями, виконаними в роботах [22, 95], довговічність, ресурс і напрацювання різноманітних матеріалів деталей машин можна описати за допомогою рівняння:

$$\tau = \tau_o \exp\left(\frac{U_o - \gamma\sigma}{kT}\right), \quad (3.84)$$

де  $\tau_o$ ,  $U_o$  і  $\gamma$  – параметри, що характеризують відповідно міцнісні властивості, енергію активації та коефіцієнт чутливості матеріалів структурних елементів вагонів;

$\sigma$  – прикладене напруження до складових структурних елементів вагонів;

$T$  – абсолютна температура;

$k$  – стала Больцмана.

Коефіцієнт чутливості  $\gamma$  характеризує різноманітні внутрішні фізико-хімічні процеси в матеріалах структурних елементів вагонів: дифузія в об'ємі матеріалу і поверхневих шарах, накопичення і переміщення точкових дефектів і дислокацій; руйнування міжатомних зв'язків у металах і сплавах, руйнування хімічних зв'язків, ланцюгів, макромолекул включень; дія поверхнево-активних речовин. Цей коефіцієнт змінюється із зміною міцності одного й того самого матеріалу: чим більша міцність, тим менше  $\gamma$ .

Оскільки ресурс структурних елементів вагонів залежить від швидкості накопичення дефектів у матеріалі, а процес накопичення дефектів є випадковим, то й ресурс розподіляється за визначеним ймовірнісним законом.

Із кінетичної концепції руйнування матеріалів [95, 244] відомо, що в навантаженому елементі з часом накопичуються дефекти, у результаті чого відбуваються незворотні зміни, що призводять до руйнування. Подібна закономірність накопичення пошкоджень зберігається як за постійних, так і за змінних значень напруження.

Сумарний стохастичний вплив дефектів у матеріалі й навантаження відображено у фізико-математичному підході трактування міцності [95], згідно з яким ймовірність виникнення відмов під впливом руйнівних сил будь-якої природи виражається величиною:

$$q = \int_0^t \frac{\partial q}{\partial t} dt = \int_0^t \frac{\partial q}{\partial (\Delta\Pi)} \cdot \frac{\partial (\Delta\Pi)}{\partial t}, \quad (3.85)$$

а інтенсивність відмов

$$\lambda = \frac{\partial q}{\partial t}. \quad (3.86)$$

При  $P \rightarrow 1$

$$\lambda = \frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial (\Delta\Pi)} \cdot \frac{\partial (\Delta\Pi)}{\partial t}, \quad (3.87)$$

де  $\Delta\Pi$  – запас міцності;

$\frac{\partial (\Delta\Pi)}{\partial t}$  – швидкість зміни запасу міцності в результаті накопичення

дефектів у об'ємі й на поверхні відповідного елемента під впливом фізико-хімічних процесів;

$\frac{\partial q}{\partial (\Delta\Pi)}$  – визначає ймовірнісні міцнісні характеристики матеріалів

(співвідношення навантаження і міцності відповідного взаємодіючого структурного елемента вагона).

Із наведених виразів (3.85)–(3.87) випливає, що якщо співвідношення навантаження й міцності не зумовлює відмов, то  $\lambda$  характеризує зміну міцності внаслідок тільки внутрішніх процесів (старіння матеріалу), а в умовах гранично повільних внутрішніх процесів основну роль відіграють навантажувально-міцнісні особливості. В умовах експлуатації складових структурних елементів вагонів проявляються обидва фактори.

На рис. 3.5 наведемо схему руйнування структурних елементів вагона в процесі старіння, на якій внутрішні напруження  $S_p(t)$  зображено для нормального стаціонарного процесу, а міцність  $S_n(t)$  – у вигляді випадкової функції, що монотонно спадає під впливом накопичення дефектів матеріалів у процесі старіння. Внутрішні напруження  $S_p(t)$  спадають також під впливом накопичення дефектів матеріалів у процесі старіння. Суцільною лінією  $S_n(t)$  позначено середньостатистичні значення міцності матеріалу.

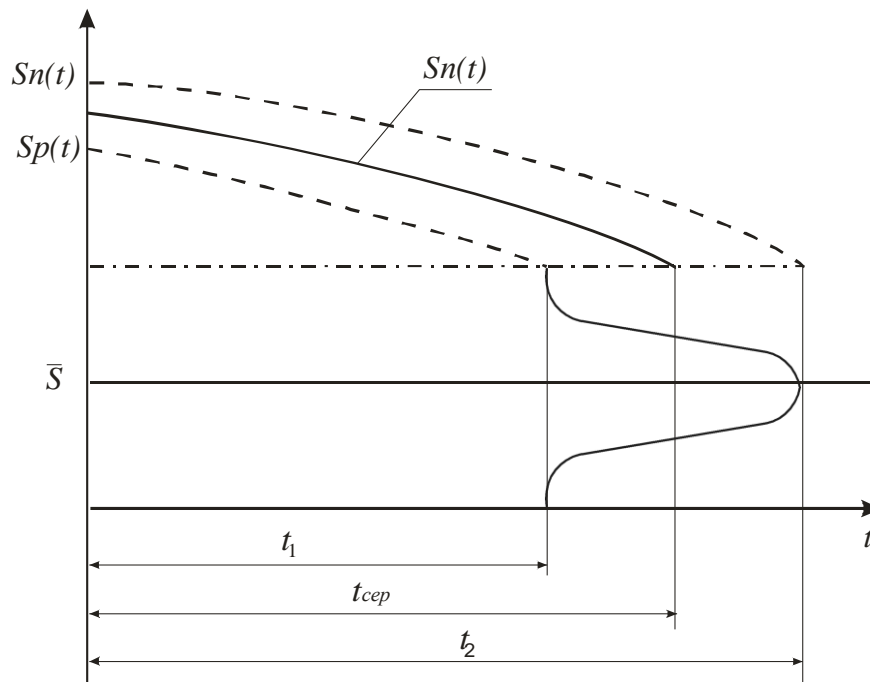


Рисунок 3.5 – Схема руйнування структурних елементів вагона

На основі наведеної схеми руйнування в процесі старіння, тобто на всьому життєвому циклі вантажного вагона, та врахувавши його залишковий ресурс, можна спрогнозувати середній граничний ресурс як структурних елементів вагона, так і вагона в цілому:

$$\bar{T} = t_{ep} + t_{зал}, \quad (3.88)$$

де  $t_{ep}$  – теоретичний граничний ресурс будь-якого структурного елемента вагона згідно з кінетичною концепцією руйнування для його

сполучених матеріалів, при якому на практиці повинна припинятись експлуатація вузла чи вагона в цілому;

$t_{зал}$  – залишковий ресурс, який має відлік від початку закінчення теоретичного граничного ресурсу.

Згідно зі схемою руйнування теоретичний граничний ресурс структурних елементів вагона з урахуванням проведення технічного обслуговування й ремонту (поточного, деповського, капітального) можна подати у такому вигляді:

$$t_{zp} = \frac{1}{K_n} \left( \sum_{i=1}^n \bar{t}_i \pm \sum_{i=1}^n k_{ii} \sigma_{ii} + \sum_{i=1}^n t_{pi} P_i(\tau) R_{ii}(z) \pm \sum_{i=1}^n k_{ii} \sigma_{ipi} \right) K_l, \quad (3.89)$$

де  $K_n$  – коефіцієнт використання пробігу вантажного вагона;

$\bar{t}_i$  – середня тривалість безвідмовної роботи структурних елементів вагона до повного відновлення технічного стану за умови виконання технічного обслуговування та ремонту;

$k_{ii}$  – довірчий коефіцієнт, який залежить від умов експлуатації вагона й закону розподілу його ресурсу на  $i$ -му життєвому циклі;

$\sigma_{ii}$  – середньоквадратичне відхилення на  $i$ -му життєвому циклі;

$t_{pi}$  – напрацювання між роботами з технічного обслуговування та ремонту на  $i$ -му життєвому циклі вагона;

$n$  – кількість технічних обслуговувань та ремонтів;

$\sigma_{ipi}$  – середнє квадратичне відхилення напрацювання між роботами з технічного обслуговування та ремонту вагона;

$R_{ii}(z)$  – ймовірність виконання завдання при технічному обслуговуванні та ремонту вагона;

$P_i(\tau)$  – ймовірність безвідмовної роботи між роботами з технічного обслуговування та ремонту на  $i$ -му життєвому циклі вагона;

$K_I$  – коефіцієнт, який враховує інноваційні конструктивні та технологічні рішення в процесі ремонту вагона у випадку, коли застосовуються нові матеріали чи технології, що змінюють значення величин зносу, і, відповідно, мають прямий вплив на ресурс. Цей коефіцієнт можна розрахувати за такою формулою:

$$K_I = k_{np} \frac{I_{занр}}{I_{зад}}, \quad (3.90)$$

де  $k_{np}$  – коефіцієнт, що враховує пристосованість інноваційних конструктивних та технологічних рішень у процесі ремонту вагона, чисельно характеризує відповідні зміни величин зносу порівняно з базовою конструкцією вагона;

$I_{зад}$ ,  $I_{занр}$  – бальна характеристика заданого (зазвичай повинна дорівнювати 1) та запропонованого (інноваційного) рішення в процесі ремонту вагона (значення повинне бути  $>1$ ).

Величини  $R_{\tau_i}(z)$ ,  $P_i(\tau)$  в системі технічного обслуговування та ремонту на  $i$ -му життєвому циклі вагона будуть розглянуті в наступних підрозділах.

### 3.1.4 Формування коефіцієнта функціональної надійності вагонів

На початку зауважимо, що багатий експлуатаційний досвід різнотипних вагонів майже не використовується в процесі проектування, що впливає на якість функціонування та надійність у цілому [214]. Інформація про відмови вагонів, що відбуваються в процесі їх експлуатації, особливо критичні, повинна оброблятися першочергово перед початком проектування нової конструкції вагона. Крім того, конструктори-проектувальники на

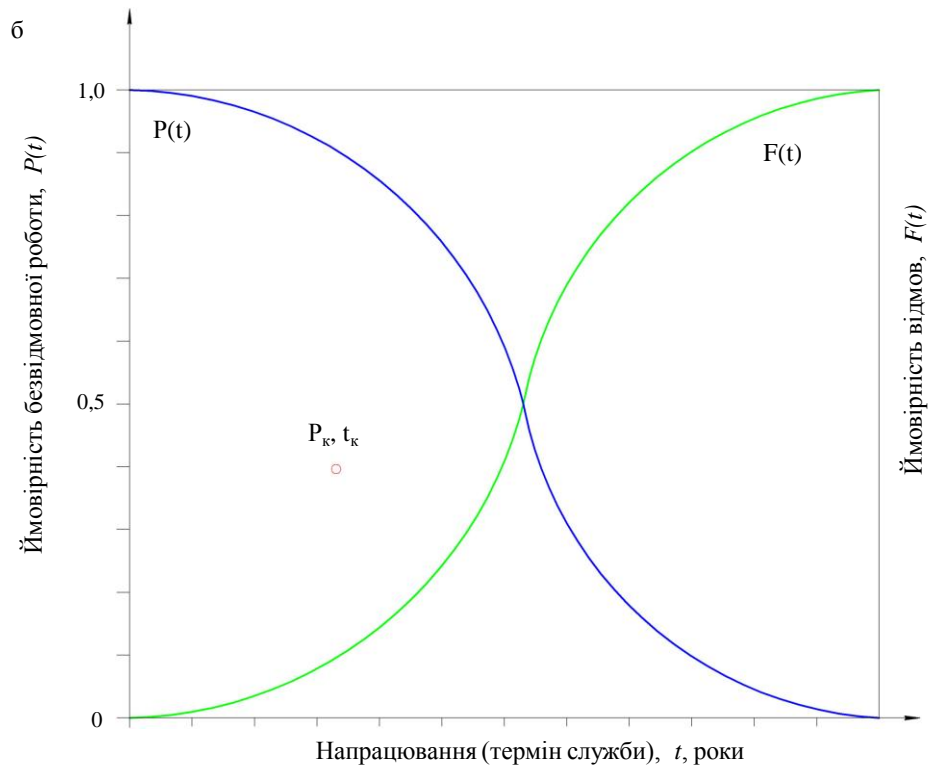
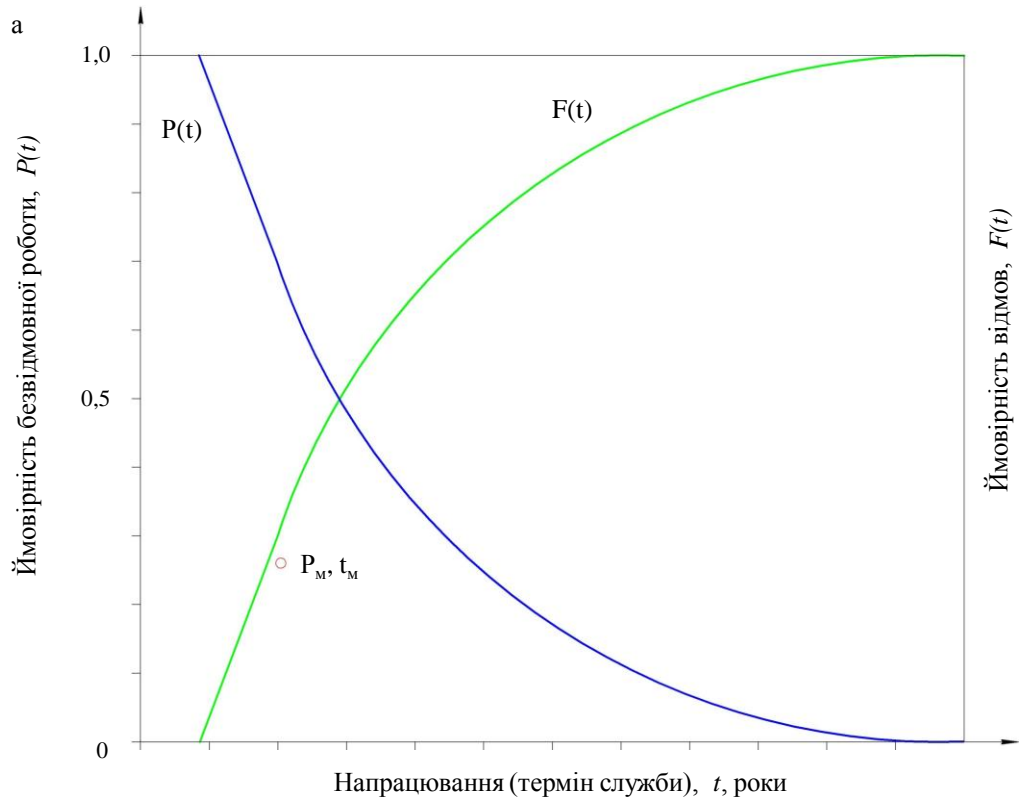
початковому етапі існування вагона можуть запобігти настанню критичних відмов під час експлуатації на основі існуючої статистичної інформації й тим самим перерозподілити ймовірність настання критичних відмов у бік менш критичних.

У цьому підрозділі спробуємо показати, яким чином можна на етапі проєктування вагона (підбираючи відповідні властивості матеріалів елементів, деталей та вузлів, а також вводячи запобіжні конструкторські елементи для забезпечення безпеки руху поїздів чи інші інноваційні рішення) зробити перерозподіл критичних відмов та зменшити їх кількість.

Для вирішення поставленої задачі введено декілька припущень.

Існує низка випадків, коли наявна інформація про відмови вагонів, які мають різний характер. Розглянемо випадки відмов вагонів з механічним і корозійним зносом та втомним руйнуванням. При цьому вважатимемо, що відомі розподіли функцій імовірності відмов вагонів  $F(\cdot)$  за вказаними видами зносу. Так, для випадку відмов вагонів за механічним зносом щільність розподілу підпорядковується експоненціальному розподілу. Для випадку відмов вагонів за корозійним зносом приймемо, що щільність розподілу підпорядковується нормальному закону. У випадку дослідження відмов вагонів за втомним руйнуванням вважатимемо, що щільність розподілу підпорядковується закону Вейбулла–Гнеденка.

Відповідно до зібраних статистичних даних, наведемо на рис. 3.6 графічні залежності ймовірності відмов  $F(\cdot)$  та ймовірності безвідмовної роботи універсальних піввагонів  $P(\cdot)$  для відповідних видів зносу. При цьому розподіл функцій покажемо на часовій абсцисі, оскільки для подальших міркувань повинні бути однакові величини вимірювання [129].



а – механічний знос; б – корозія; в – втомне руйнування

Рисунок 3.6 – Залежності ймовірності відмов та ймовірності безвідмовної роботи універсальних піввагонів від терміну служби



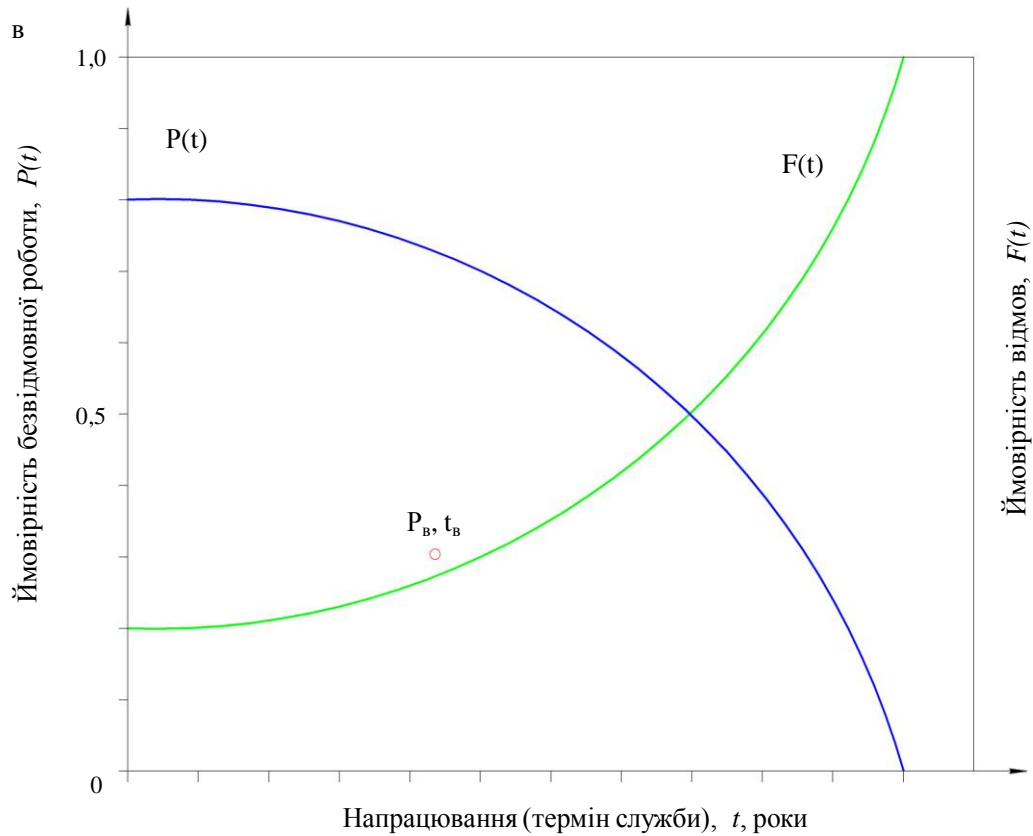


Рисунок 3.6 – Закінчення

Якщо придивитися до наведених на рис. 3.6 залежностей, то центр ваги площі, що обмежена лінією ймовірності безвідмовної роботи  $P(t)$ , буде мати значення за віссю ординат нижче за 0,5. Тобто припустимо, що центр ваги зазначеної площі буде визначальним для конструкторської оцінки експлуатаційної надійності вагона та можливості його подальшої експлуатації, а також вказуватиме на необхідність впровадження інших заходів, наприклад направлення вагона до підприємств з відновлення ресурсу за зазначеними відмовами. Крім того, при відповідному напрацюванні того чи іншого вагона (або групи вагонів) бачимо, наскільки спадає значення ймовірності безвідмовної роботи, тим самим можна стверджувати про високу ймовірність настання критичної відмови. Це на проєктному етапі дозволяє закласти нові або підвищити існуючі відповідні фізико-механічні чи фізико-хімічні властивості матеріалів структурних елементів вагона з метою забезпечення більш високої ймовірності безвідмовної роботи на

відповідному життєвому циклі його існування. На який саме структурний елемент треба звернути увагу для недопущення критичних відмов вагона під час проектування, покажемо таким чином.

Спочатку дамо назву точкам  $P_m, t_m; P_k, t_k; P_g, t_g$  – ордината та абсциса вагових коефіцієнтів функціональної надійності (коефіцієнти функціональної надійності вагонів під час експлуатації), що вказують на небезпеку подальшої експлуатації вагонів на залізниці (критичні елементи). Як зазначалося в першому розділі, критичні структурні елементи вагонів будуть мати першочергове значення при забезпеченні надійності, працездатності, безпеки руху поїздів тощо. Тобто зазначені коефіцієнти дають можливість здійснити оцінку та прогноз економічних втрат, екологічних наслідків або загроз людському життю, але обмежимося розглядом їх зв'язку з надійністю вагонів.

Для цього далі застосуємо метод центру ваги й знайдемо значення напрацювання для загального коефіцієнта функціональної надійності вагонів  $K_{ен}^t$  (тобто абсцису  $t_{КЕН}$ ) за формулою

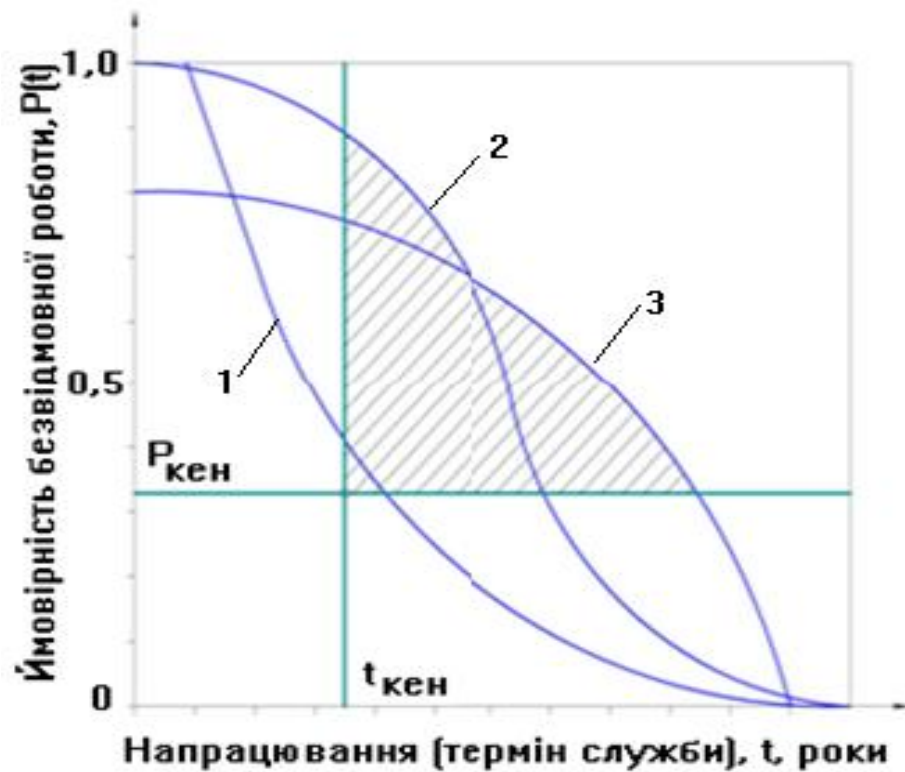
$$K_{ен}^t = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n P_i} = \frac{P_m \cdot t_m + P_k \cdot t_k + P_g \cdot t_g}{P_m + P_k + P_g}, \quad (3.91)$$

а значення  $K_{ен}^P$ , тобто ординату  $P_{КЕН}$ , за аналогічною формулою:

$$K_{ен}^P = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} = \frac{P_m \cdot t_m + P_k \cdot t_k + P_g \cdot t_g}{t_m + t_k + t_g}, \quad (3.92)$$

Значення координат зазначеного коефіцієнта  $(P_{КЕН}, t_{КЕН})$  за результатами розрахунку наведемо графічно на плані розподілу ймовірності

їх безвідмовної роботи у вигляді граничних: вертикальної та горизонтальної ліній (рис. 3.7).



1- механічне зношення, 2-корозія, 3- втомне руйнування

Рисунок 3.7 – Коефіцієнт функціональної надійності вагонів на плані розподілу ймовірності їх безвідмовної роботи

Заштрихована площа на рис. 3.7 вказує на початок того моменту, коли буде існувати висока ймовірність настання критичної відмови (у процесі експлуатації необхідно починати планувати заходи щодо підвищення надійності вагонів за допомогою ремонтно-відновлювальних робіт). Це особлива зона для всіх можливих станів життєвого циклу існування вагонів, у якій їх експлуатація повинна перебувати під особливим контролем власників та працівників залізниці, особливо вагонного господарства.

Перетин горизонтальної лінії з ординатою  $P_{крит}$  з кривими ймовірності безвідмовної роботи  $P(t)$  з відповідними видами зносу дає точки, які слід назвати кризовими, тобто при величині такого напрацювання вагона експлуатаційна надійність виходить за критичну межу.

Також слід зазначити, що наведена методика визначення коефіцієнта функціональної надійності вагонів дозволяє врахувати застосування нових конструкцій та матеріалів (наприклад, колісних пар чи кузова). Тобто, знаючи у скільки разів, наприклад, інтенсивність зносу гребенів колісних пар менша за існуючі аналоги, можна побудувати такий розподіл (див. рис. 3.6, а), але з урахуванням зниження ймовірності відмов вагонів. Далі, використовуючи вирази (3.91) та (3.92), визначити значення нового коефіцієнта функціональної надійності, який набуде більших значень як за ординатою, так і за абсцисою порівняно з попередніми. Це і буде основою на етапі проектування нових конструкцій вагонів для запобігання та недопущення критичних відмов. Тим самим буде забезпечено унеможливлення критичних екологічних наслідків, загроз людському життю, а також економічних збитків.

## **3.2 Визначення показників надійності вагонів на етапі виготовлення**

### **3.2.1 Технологічні особливості виготовлення деталей вантажних вагонів**

Одними з основних якісних показників, що визначають надійність вагонів, є технологічна та експлуатаційна спадковість їх складових елементів (деталей). Ці явища визначаються в готовій конструкції вагона технологією виготовлення його складових елементів (деталей), а також умовами та режимами його експлуатації. Зокрема, технологічна спадковість виражається в перенесенні геометричних і фізико-механічних властивостей елементів вагона (деталі, сполучення, складальні одиниці) від попередніх технологічних операцій до подальших. У свою чергу, явище експлуатаційної спадковості пов'язано не тільки з особливостями прийнятого технологічного процесу, а й з вибором раціональної конструкції розглядуваного вузла вагона

з умовами й режимами експлуатації. Дослідження технологічної та експлуатаційної спадковості дозволяє розкрити механізм формування комплексу діючих факторів, від яких певною мірою залежить працездатність вагона в цілому у визначених умовах експлуатації.

Для багатьох елементів вагона критерієм, що визначає ресурс окремих деталей, є їх зношування, тобто поступова зміна розмірів і форми робочих поверхонь, а також властивостей їх матеріалів. При цьому збільшуються зазори в сполученнях рухомих деталей і порушується щільність нерухомих посадок. Виниклі дефекти й пошкодження призводять до порушення режиму роботи вагона в цілому і до його передчасних відмов.

Виходячи з економії металу, матеріалів і засобів на виготовлення нових деталей, зношені складові елементи вагона підлягають відновленню й повторному використанню в експлуатації. Однак під час вибору способу відновлення елементів вагона практично не враховуються спадкові зв'язки (окремі геометричні, фізико-механічні, фізико-хімічні та інші параметри), багато з яких зберігаються й після відновлення його деталей.

Вперше механізм технологічного успадкування розглянуто в [110], з урахуванням етапу виготовлення деталей і складання машин. Більш детально були розглянуті основні етапи технологічної та експлуатаційної спадковості. Показано, що інтенсивність процесів втрати працездатності деталей і вузлів тертя машин залежить від структури основного металу й поверхневих шарів, фізико-механічних властивостей і напруженого стану матеріалу деталей сполучень, від точності розмірів, макро- і мікрогеометрії поверхонь тертя.

Однак спадкові зв'язки на етапах відновлення зношених деталей і повторної їх експлуатації практично залишаються невивченими [53, 55].

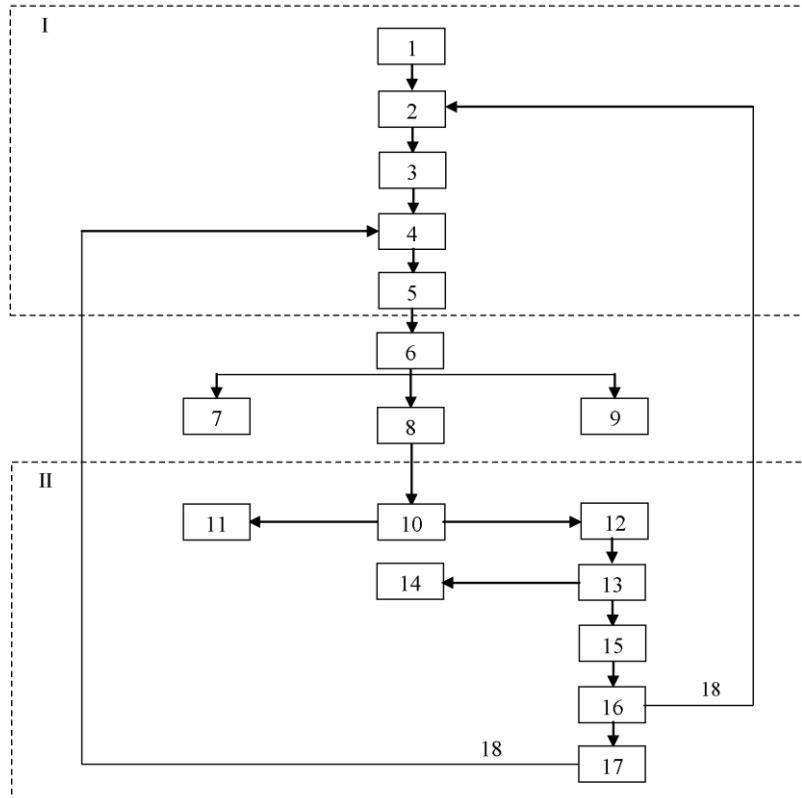
Виходячи з актуальності цього питання, далі, з урахуванням уявлень про технологічну й експлуатаційну спадковості, розглянуто основні питання, що пов'язані із забезпеченням якості відновлення елементів, деталей та вузлів вагона.

На рис. 3.8 (у верхній частині) показана I зона забезпечення необхідної технологічної та експлуатаційної спадковості елементів та деталей вагона заводського виготовлення. У нижній частині схеми зображена II зона, що являє собою зміну спадковості для відновлених елементів та деталей вагона. Як видно зі схеми, і в зоні зміни технологічної та експлуатаційної спадковості певною мірою зберігається «пам'ять» про вихідні спадкові зв'язки. Це стосується формування певних властивостей елементів та деталей (складальної одиниці) вагона при заводському їх виготовленні й за результатами першого періоду їх експлуатації.

З нижньої частини структурної схеми також видно, що вихідна «пам'ять» елемента чи деталі вагона при відновленні їх робочих поверхонь піддається послідовній зміні в результаті попередньої обробки під відновлення, при відновленні й чистовій обробці після відновної операції. Елементи та деталі вагона, що придатні для подальшої експлуатації, знову використовуються при складанні відремонтованих вузлів чи систем. Тому їх експлуатаційне успадкування доповнюється подальшою зміною «пам'яті», а отже, і властивостями самого об'єкта.

Елементи й деталі вагона зі зміненими властивостями при відновленні, звичайно, відрізняються від нових елементів і деталей і мають технологічну спадковість, а отже, надалі й експлуатаційне успадкування.

Оскільки зазначені на рис. 3.8 спадкові зв'язки, що стосуються відновлення елементів чи деталей, є найменш вивченими, то становлять значний інтерес для аналізу умов і характеру впливу на технологічну спадковість при відновленні основних геометричних і фізико-механічних параметрів елементів чи деталей вагона.



I – зона утворення технологічної та експлуатаційної спадковості елементів чи деталей вагона заводського виготовлення; II – зона зміни технологічної та експлуатаційної спадковості відновлених елементів чи деталей вагона; 1 – елементи або деталі заводського виготовлення (нові); 2 – технологічна спадковість; 3 – період експлуатації елемента чи деталі вагона; 4 – експлуатаційна спадковість; 5 – передача вагона в ремонт; 6 – дефектування елементів та деталей під час ремонту вагона; 7 – елементи та деталі, що придатні для подальшої експлуатації; 8 – елементи та деталі, що підлягають відновленню; 9 – елементи та деталі, які не підлягають відновленню (вилучені в брухт); 10 – вихідна «пам'ять» про первісний період експлуатації; 11 – порушення спадкових зв'язків через настання граничного стану; 12 – зміна «пам'яті» в результаті механічної обробки під відновлення; 13 – зміна «пам'яті» в результаті відновлення; 14 – порушення спадкових зв'язків через значні дефекти при прийнятому способі відновлення; 15 – зміна «пам'яті» в результаті остаточної обробки після відновлення; 16 – технологічна спадковість відновленого елемента чи деталі; 17 – експлуатаційна спадковість відновленого елемента чи деталі; 18 – зворотний зв'язок

Рисунок 3.8 – Процес забезпечення працездатності при відновленні зношених елементів і деталей вагона

Розглянемо структуру й фізико-механічні властивості матеріалу різних елементів та деталей. При цьому структура серцевини й різного роду дефекти металу (неметалеві включення, раковини, крихкості тощо), що виникають при литті, ковальсько-штампувальних, термічних та інших операціях, як правило, не тільки зберігаються надалі у всьому технологічному ланцюжку операцій при заводському виготовленні елемента чи деталі вагона, але й впливають на показники якості їх відновлення.

При відновленні зношених поверхонь, наприклад, колісних пар, забезпечення геометричних і фізико-механічних параметрів ускладнюється. По-перше, тому що виниклі в процесі виготовлення колісної пари й накопичені під час експлуатації внутрішні напруження значною мірою спадково зберігаються. По-друге, внаслідок того, що при наплавленні зношеної поверхні колісної пари, на поверхні поділу основний метал – наплавлений шар будуть виникати додаткові (найчастіше досить високі) залишкові напруження. Причиною їх виникнення, у першу чергу, є розширення або стиск кристалічних ґрат, як поверхневого шару основного металу, так і наплавленого шару. Тому в технологічному процесі відновлення зношених поверхонь колісної пари для зменшення внутрішніх напружень необхідно передбачати інші додаткові операції.

Також істотний вплив на експлуатаційні властивості елементів чи деталей вагона здійснюють величина і знак залишкових напружень у поверхневих шарах матеріалу. При термічній обробці напруження з'являються в результаті різної швидкості охолодження окремих частин готового елемента чи деталі вагона (термічні напруження й утворення нових фаз), що мають різні об'ємні характеристики (структурні напруження).

При механічній обробці залишкові напруження виникають при різних технологічних операціях через нерівномірну пластичну деформацію



поверхневого шару, локалізований нагрів тонких шарів, фазові перетворення металу в них, що призводить до утворення різних вторинних структур.

При відновленні зношених поверхонь елементів чи деталей, як правило, виникають додаткові залишкові напруження. Наприклад, при наплавленні зношених поверхонь колісної пари вони з'являються не тільки через нерівномірне нагрівання й охолодження, але й внаслідок усадки наплавленого металу й структурних перетворень.

При окремих методах відновлення за рахунок прийнятих режимів наплавлення, хімічного складу присадних матеріалів і флюсів вдається регулювати величину й знак залишкових напружень. Однак у більшості випадків у межах нанесеного покриття залишкові напруження змінюють знак, переходять від напружень стиску в поверхневому шарі в розтягуючі, досягаючи максимального значення, а далі, до границі наплавленого шару з основним металом знову знижуються.

Від макрогеометрії і хвилястості обробленої поверхні елемента чи деталі вагона значною мірою залежать експлуатаційні параметри їх сполучень, що визначають працездатність самих вузлів та агрегатів.

На величину й форму зазначених відхилень, головним чином, впливають умови виконання технологічного процесу: пружні й температурні деформації технологічної системи, розмірний знос інструменту тощо. Макровідхилення і хвилястість істотно впливають на величину площі контакту поверхонь сполучених елементів чи деталей і, як наслідок, на зносостійкість і контактну втому у вузлах тертя [61]. Наявність макрогеометрії і хвилястості призводить до зменшення опорної площі контакту до 5...10 разів і, як наслідок, відбувається підвищення інтенсивності зношування сполучених елементів та деталей вагона.

На величину фактичних тисків у зоні контакту елементів і деталей вагона, на умови їх змащування, а отже, на зносостійкість вузлів тертя сильно впливає шорсткість робочих поверхонь. Відомо [20, 48], що кожному технологічному методу обробки поверхні відповідають певні значення різних

параметрів шорсткості. Оскільки при відновленні проводиться нарощування шарів металу на поверхні елемента чи деталі, то при подальшій механічній обробці параметри шорсткості можуть змінитися.

В експлуатації для окремих елементів та деталей (складальних одиниць) вагонів характерне порушення працездатного стану настає через граничний стан [40, 106]. При цьому відновлення деталей неможливо або недоцільно. Характерним прикладом є колодка гальмівної системи. У подібних випадках відновлення працездатного стану цього елемента неможливе, і спадкові зв'язки порушуються.

При нанесенні покриттів на зношені поверхні елементів та деталей вагона можливі зовнішні дефекти, що виходять на поверхневий шар, і внутрішні дефекти, що розташовані всередині шару. Так, при відновленні зношених поверхонь наплавленням можливими дефектами є: тріщини в наплавленому шарі й у зоні сплаву з основним металом елемента чи деталі, пори і крихкості, шлакові включення, несплавлення шару з основним металом тощо. Подібні дефекти можуть привести до повного або значного порушення спадкових зв'язків. Для виключення таких дефектів застосовуються різні види наплавлення під дією захисних середовищ.

Окремі дефекти, що виникають при відновленні, пов'язані не тільки з прийнятою технологією, але є також накладенням факторів технологічної та експлуатаційної спадковості. Проте на практиці, призначаючи метод відновлення й послідовність технологічних операцій, що забезпечують отримання необхідної якості відновлюваної поверхні елемента чи деталі вагона, рідко виходять з об'єму впливу технологічної спадковості на експлуатаційні властивості вузлів тертя.

Таким чином, наведений аналіз сутності явищ технологічної та експлуатаційної спадковості при відновленні елементів та деталей вагонів показує, що при виборі методів і режимів відновлення необхідно насамперед виходити з виявлення закономірностей спадкових зв'язків у послідовності:

виготовлення елемента (деталі) – експлуатація – відновлення – експлуатація відновленого елемента (деталі).

### **3.2.2 Вплив технології виготовлення складових елементів на надійність вантажного вагона**

Технологічну надійність можна охарактеризувати процесами виготовлення вагона, тобто визначальними будуть фізико-механічні та фізико-хімічні властивості виконаних елементів та деталей, а також подальшим з'єднанням цих елементів та деталей в окремі вузли та вагон у цілому.

Цей вид надійності повинен описуватись на етапі технологічних процесів виготовлення елементів, деталей, вузлів чи вагона в цілому. Крім того, отримані в процесі виготовлення зазначені елементи з відповідними фізико-механічними та фізико-хімічними властивостями будуть впливати на їх триботехнічні характеристики в процесі експлуатації вагона, а загалом – зміна цих властивостей буде визначати рівень технологічної надійності.

Досліджуючи технологічну надійність структурних елементів вагона з позиції недопустимості технологічних дефектів під час виготовлення (відливання, прокат, волочіння, штамповка тощо), слід зазначити, що зниження надійності відбувається внаслідок однотипних чи багатотипних утворень дефектів (нерухомих дислокацій, що призводять до тріщин, зниження твердості, міцності тощо), що мають характер порушення цілісності структурних елементів вагона. Тому технологічну надійність вагона умовно можна розбити на кілька підсистем, яких буде досить небагато. Кожна з цих підсистем виходить з ладу внаслідок утворення технологічних дефектів тільки однотипних елементів, тобто її можна розглядати як систему, що складається з однотипних елементів  $i$ -го типу (де  $i = 1, 2, \dots, k$ ). Розрахувавши надійність кожної з підсистем, за відомими правилами неважко обчислити результуючу технологічну надійність вагона в цілому. На рівні технології виготовлення вагона будемо вважати, що в

структурних елементах відсутні зноси (оскільки не відбувається на цьому етапі взаємодії елементів), а всі прояви утворення технологічних дефектів будуть мати характер випадкових подій. У цьому випадку з прийнятною для практичних розрахунків точністю можна вважати, що потік утворення технологічних дефектів у процесі виготовлення є однорідним пуассонівським. Для таких потоків кількість технологічних дефектів на будь-якому проміжку часу буде розподілена згідно із законом Пуассона з параметром  $\lambda t$ , тобто ймовірність того, що на прогнозованому відрізку часу проявляться  $m$  технологічних дефектів структурних елементів вагона в експлуатації, буде розраховуватись відповідно до виразу [56]

$$Q_m(t) = \frac{(N\lambda t)^m}{m!} \exp(-N\lambda t), \quad (3.93)$$

де  $N$  – кількість структурних елементів у системі вантажного вагона, що розглядається;  $\lambda$  – інтенсивність технологічних відмов;  $t$  – напрацювання до відмови;  $m$  – кількість технологічних дефектів.

Ймовірність безвідмовної роботи розглядуваної системи вагона в цьому випадку буде підпорядковуватись експоненціальному закону розподілу [35, 56]:

$$P_0(t) = \exp(-N\lambda t). \quad (3.94)$$

Підставивши  $m$ ,  $N$ ,  $\lambda t$  в (3.93), отримаємо ймовірність того, що за час  $t$  відбудеться  $0, 1, 2, \dots, m$  технологічних дефектів структурних елементів відповідної системи вагона.

Для спрощення процесу визначення ймовірної кількості технологічних дефектів структурних елементів вагона за визначений період доцільно побудувати систему кривих, що будуть вказувати на залежність  $m$  від

параметра розподілу  $\lambda t$  і кількості структурних елементів  $N$  розглядуваної системи вагона. Для зручності користування такими кривими як аргумент приймемо узагальнений параметр  $N\lambda t$ . Діапазон можливих значень зазначеного параметра виберемо в інтервалі  $0 \dots 10$ , що відповідає існуючим технічним даним вантажного вагона. Щоб визначити, за якими значеннями параметра досягаються максимальні ймовірності появи технологічних дефектів структурних елементів вагона  $m$ , тобто знайти екстремуми функцій, треба обчислити першу похідну від виразу (3.93) за параметром і прирівняти її до нуля. У результаті маємо:

$$\frac{dq_m(t)}{d(N\lambda t)} = \frac{(N\lambda t)^m}{m!} \exp(-N\lambda t) \left( \frac{m}{N\lambda t} - 1 \right). \quad (3.95)$$

Приймаючи, що

$$\frac{dq_m(t)}{d(N\lambda t)} = 0,$$

отримаємо:

$$\frac{m}{N\lambda t} - 1 = 0,$$

або

$$N\lambda t = m. \quad (3.96)$$

Таким чином, виявлена проста закономірність появи відповідної кількості технологічних дефектів структурних елементів вагона при технологічному процесі виготовлення його структурних елементів, що можуть призвести до відмов під час експлуатації. Модою (найбільш ймовірним значенням) кількості технологічних дефектів  $m$  для узагальненого параметра  $N\lambda t$  є саме значення цього параметра.

На рис. 3.9 наведені залежності  $q_m(t) = f(N\lambda t)$ . Цікавим є і математичне сподівання кількості можливих відмов вагона при експлуатації у випадку утворення технологічних дефектів у технологічному процесі виготовлення структурних елементів, що відповідає конкретному значенню узагальненого параметра  $N\lambda t$ .

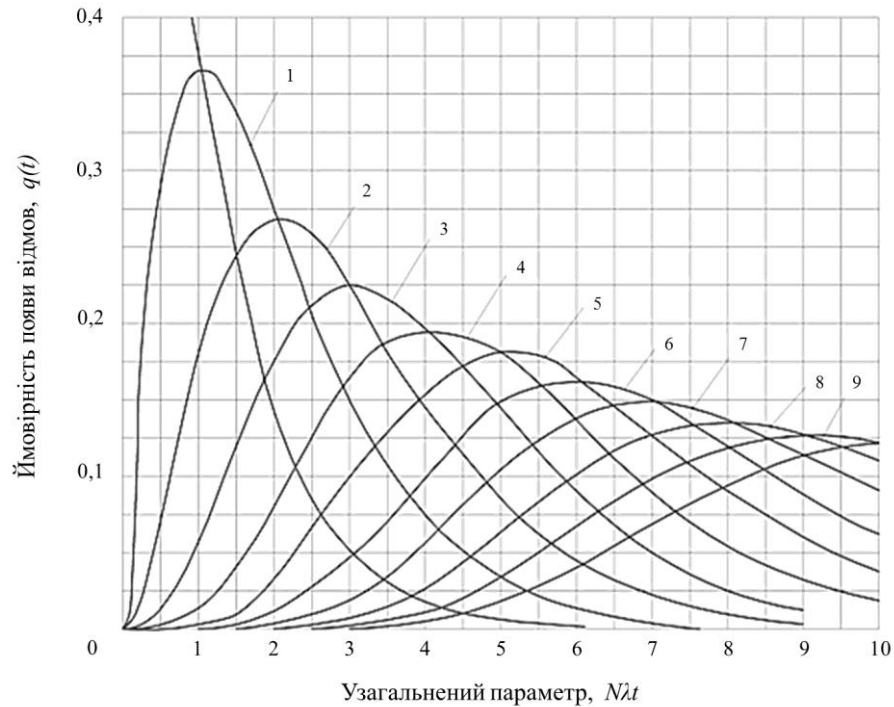


Рисунок 3.9 – Залежність ймовірності появи відмов при експлуатації у випадку утворення технологічних дефектів у технологічному процесі виготовлення структурних елементів від величини узагальненого параметра

Очевидно, що математичне сподівання кількості відмов структурних елементів вагона при експлуатації у випадку утворення технологічних дефектів у технологічному процесі виготовлення буде дорівнювати

$$M(m) = \sum_{j=1}^{\infty} n_j q_{mi}(t) \quad (3.97)$$

У практичних розрахунках без зниження точності обчислень можна обмежитися кінцевим числом  $j = r$ . Тоді, прийнявши, що  $r = N\lambda t = 10$ , отримаємо:

$$\begin{aligned}
 M(m) &= N\lambda t \exp(-N\lambda t) + \frac{(N\lambda t)^2}{1!} \exp(-N\lambda t) + \frac{(N\lambda t)^3}{2!} \exp(-N\lambda t) + \\
 &\quad + \frac{(N\lambda t)^4}{3!} \exp(-N\lambda t) + \dots = \\
 &= N\lambda t \exp(-N\lambda t) \left[ 1 + \frac{(N\lambda t)^2}{1!} + \frac{(N\lambda t)^3}{2!} + \frac{(N\lambda t)^4}{3!} \right]. \quad (3.98)
 \end{aligned}$$

Послідовність у квадратних дужках являє собою ряд, що збігається та має суму, рівну  $\exp(N\lambda t)$ . Підставляючи останнє значення у формулу (3.97), отримаємо:

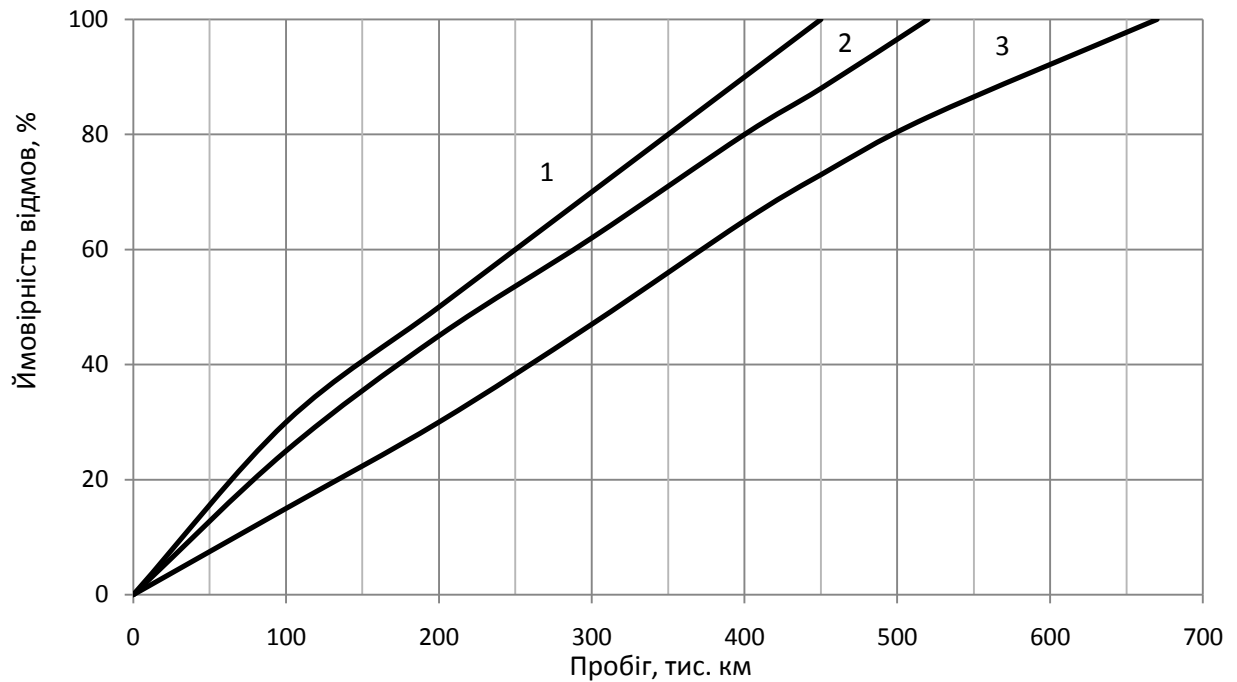
$$M(m) = N\lambda t, \quad (3.99)$$

тобто математичне сподівання кількості відмов структурних елементів вагона при експлуатації у випадку утворення технологічних дефектів у технологічному процесі виготовлення також дорівнює значенню узагальненого параметра.

У разі переходу до оцінки надійності вагона з позиції недопустимості утворення дефектів при виготовленні, як зазначалось, критичні пошкодження структурних елементів вагона мають характер випадкових подій.

Покажемо, яким чином технологічні дефекти будуть впливати на надійність ресурсовизначальних елементів вантажних вагонів при експлуатації.

Для універсальних піввагонів проведені дослідження впливу технологічних дефектів, що закладені при виготовленні їх кузовів (рис. 3.10).



1 – товщина металу не відповідає вимогам; 2 – дефекти зварювання; 3 – корозія через недостатньо оброблений та пофарбований кузов

Рисунок 3.10 – Залежність відмов кузовів універсальних піввагонів від технологічних дефектів

### 3.3 Оцінка показників надійності вантажних вагонів на етапі експлуатації

Функціонування будь-якої технічної системи, у тому числі й вагонів, являє собою реалізацію ймовірнісних процесів, оскільки процес зміни стану вагона (вантажного або пасажирського) є наслідком потоків відмов і потоків відновлень.

Щоб охарактеризувати ймовірнісний процес, необхідно вказати тип процесу і його числові характеристики. Найбільш часто для опису процесів, що відбуваються в технічних системах, використовується марковський процес [35].

Марковський процес [35, 108, 173] – це такий процес, у якого для кожного моменту часу ймовірність будь-якого стану вагона в майбутньому



залежить тільки від стану вагона в даний момент і не залежить від того, яким чином вагон прийшов у цей стан.

Необхідною умовою для марковського процесу є експоненціальній розподіл часу роботи до відмови й часу відновлення працездатності. Найважливіша числова характеристика такого процесу – ймовірність переходу вагона в той чи інший стан за заданий проміжок часу. Знаючи це, можна визначити ймовірності кожного з можливих станів вагона.

Як зазначалося раніше, на надійність рухомого складу (вантажні й пасажирські вагони) впливає конструкція і технологія виготовлення всіх складових, умови експлуатації та система технічного обслуговування й ремонту [35,173].

У зв'язку зі специфікою роботи залізничного транспорту, в умовах експлуатації вантажний рухомий склад повинен перебувати в постійній готовності. Таку готовність забезпечує існуюча система технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів, якій притаманний такий показник, як ймовірність виконання завдання. Тобто наскільки якісно й повно виконане завдання з технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів, настільки впевнено можна говорити й про готовність рухомого складу до виконання завдань з відповідним рівнем безвідмовності [2].

У ДСТУ 2860-94 [82] прописано, що готовність – це властивість об'єкта, бути здатним виконувати потрібні функції в заданих умовах у будь-який час чи протягом заданого інтервалу часу за умови забезпечення необхідними зовнішніми ресурсами. Крім того, у ДСТУ 2860-94 зроблено дві примітки, перша з яких полягає в тому, що така властивість залежить від поєднання властивостей безвідмовності, ремонтпридатності та забезпечення технічного обслуговування й ремонту; у другій – йдеться про те, що необхідні зовнішні ресурси, які не належать до ресурсів технічного обслуговування й ремонту, не впливають на властивість готовності об'єкта.

Виходячи з наведеного вище, можна стверджувати, що надійність вантажних вагонів в умовах експлуатації характеризується безвідмовністю, коефіцієнтом готовності та ймовірністю виконання завдань.

У мережі Укрзалізниці діє планово-запобіжна система ремонту вантажних вагонів, яка спрямована на забезпечення їх стабільної роботи за найменших витратах. Цією системою передбачається комплекс робіт, призначених для забезпечення стійкої роботи вагонного парку, підтримки його технічного стану, підвищення експлуатаційної надійності [173]. До цих робіт належать [35, 173, 237]:

- ТО – технічне обслуговування вантажних вагонів;
- ТОВ-1 – технічне обслуговування при підготовці вантажних вагонів до перевезень з відчепленням від состава;
- ТОВ-2 – технічне обслуговування вантажних вагонів з відчепленням від транзитних, прибулих чи сформованих на станції поїздів;
- ДР – деповський ремонт;
- КР – капітальний ремонт;
- КРП (ДРП) – капітальний (деповський) ремонт вагонів з продовженням терміну їх експлуатації.

Відповідно до прийнятої періодичності планових видів ремонту Укрзалізниця щорічно визначає потребу в ремонтах вагонів і встановлює планові завдання окремим залізницям та заводам. Крім того, Укрзалізницею затверджені норми простою вагонів у ремонті на заводах та в депо [186, 195, 246].

Але все-таки діюча стратегія повинна мати дещо інші принципи побудови [88, 98, 117, 126, 224-226, 228, 229, 263]. Стратегія проведення технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів у процесі їх експлуатації повинна будуватися на таких принципах інформації [173]:

- наявність об'єктивних даних про деталі, вузли та вагони в цілому. Така інформація може подаватися у вигляді характеристик безвідмовності та ремонтпридатності;

- наявність специфічних особливостей складових вагонів, а саме інформація про їх структуру, характеристику індикації відмов, наявність зовнішнього контролю працездатності;

- наявність даних про умови експлуатації вантажних вагонів у відповідній залізниці.

Існуюча планово-запобіжна система виконання технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів повинна мати оптимальні показники, що характеризують якість їх функціонування й експлуатації у цілому та ресурсовизначальних складових окремо.

Оптимізація стратегії технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів дозволить досягнути високої економічної ефективності за рахунок реорганізації структури такої системи та правил технічної експлуатації без залучення додаткових сил і засобів.

Розглянемо показники експлуатаційної надійності вантажних вагонів, які відображають якість їх функціонування при тривалій експлуатації:

- коефіцієнт готовності  $K$ ;
- ймовірність виконання завдання при TOP  $R(z)$ ;
- ймовірність безвідмовної роботи  $P$ .

Використаємо марковські та напівмарковські випадкові процеси відновлення залежно від часу  $\xi(t)$  [54, 173].

Для процесу відновлення у часі  $\xi(t)$  можна записати [23]:

$$K = \frac{MX^{(0)}}{M\tilde{X}}; \quad R(z) = \frac{MX^{(z)}}{M\tilde{X}}; \quad P = \frac{MP^{(z)}}{M\tilde{X}}, \quad (3.100)$$

де  $X^{(0)}$  – час справного функціонування вантажних вагонів у період відновлення;

$X^{(z)}$  – час перебування процесу  $\xi(t)$  в стані  $e_z$  – вагон працездатний і у справному стані пропрацює час, більший за  $z$ ;

$P^{(z)}$  – ймовірність безвідмовної роботи вантажних вагонів до часу, більшого за  $z$ ;

$\tilde{X}$  – тривалість періоду відновлення.

Для марковських і напівмарковських процесів  $\xi(t)$  з кінцевою множиною станів, згідно з [25, 108]:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^N M\tau_i^{(0)} \cdot p_i}{\sum_{i=1}^N M\tilde{\tau}_i \cdot p_i}; R(z) = \frac{\sum_{i=1}^N M\tau_i^{(z)} \cdot p_i}{\sum_{i=1}^N M\tilde{\tau}_i \cdot p_i}; P = \frac{\sum_{i=1}^N M\tilde{P}_i \cdot p_i}{\sum_{i=1}^N M\tilde{\tau}_i \cdot p_i}, \quad (3.101)$$

де  $p_i$  – стаціонарна ймовірність вкладеного ланцюга Маркова,  $1 \leq i \leq N$ ;

$\tau_i^{(0)}$  – час справного функціонування вантажного вагона за період, на якому  $\xi(t) = e_i$ ;

$\tilde{\tau}_i$  – тривалість періоду, на якому  $\xi(t) = e_i$ ;

$\tilde{P}_i$  – ймовірність безвідмовної роботи вантажного вагона за період, на якому  $\xi(t) = e_i$ .

У випадку обмеженої інформації, коли характеристики надійності точно не відомі, припустимо, що функції розподілу роботи вагона належать деякому класу. Опишемо деякі випадки:

- якщо існує функція розподілу часу безвідмовної роботи  $P(y)$  з окремими значеннями  $y = (y_0 = 0, y_1, \dots, y_n)$ , тобто  $P(y_i) = \pi_i, i = 0, \dots, n$ , то клас таких функцій позначимо як  $\Omega(n, y, \pi)$ ;

- при заданих моментах розподілу процесу експлуатації у вигляді [25, 49, 54, 108, 173]:

$$P(y) \Leftrightarrow \mu_k = \int_0^{\infty} x^k dF(x), k = 1, 2, \dots, m, \quad (3.102)$$

клас таких функцій позначимо через  $\Omega_m = \Omega(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m)$ .

Для визначення оптимізації стратегії технічного обслуговування та ремонту у вищеперелічених випадках, тобто для їх розв'язання, використаємо метод мінімаксу [54, 75, 284], що полягає в такому. Спочатку серед усіх функцій розподілу, які характеризують функціонування системи, знаходимо найгірші, а потім – визначаємо оптимальне управління.

Для процесу відновлення, функціонал якості роботи вантажного вагона якого позначимо через  $\tilde{J}(P, G, \Phi)$ , необхідно визначити функції  $P \in \Omega(n, y, \pi)$ ;  $\Phi \in \Omega$ ;  $G \in \Omega$ , при яких досягається [49, 54, 75, 173]:

$$\tilde{J} = \max_{G \in \Omega} \min_{\Phi \in \Omega} \min_{P \in \Omega(n, y, \pi)} \tilde{J}(P, G, \Phi), \quad (3.103)$$

де  $\Omega - \Omega(0, y, \pi)$ ;  $\Phi(x)$  – функція розподілу часу самостійного прояву відмови.

Якщо випадковий процес  $\xi(t)$ , що описує зміну технічного стану вантажного вагона, є процесом відновлення [25, 54, 75, 173], то функціонал  $\tilde{J}(P, \Phi, G)$  – дробово-лінійний, і тоді екстремум функціонала  $\tilde{J}(P, \Phi, G)$  по функціях  $P \in \Omega(n, y, \pi)$  досягається на одній із східчастих функцій  $P \in \Omega^*(n, y, \pi)$ , на якій  $\Omega^*(n, y, \pi)$  – множина функцій розподілу східчастого вигляду, що мають на кожному з напівінтервалів  $(-\infty, y_1), [y_1, y_2), \dots, [y_n, \infty)$  рівно один стрибок величини  $\Delta\pi_i = \pi_{i+1} - \pi_i$ .

Якщо припустити, що існують функції чисельника  $A$  і знаменника  $B$  функціонала  $\tilde{J}(P, \Phi, G)$  та їх екстремуми, то «якнайгіршою функцією» розподілу в класі  $\Omega(n, y, \pi)$  відносно функціонала  $\tilde{J}(P, \Phi, G)$  буде функція [25, 49, 54, 75, 173]:

$$F^*(y) = \begin{cases} 0 & \text{при } -\infty < y \leq 0, \\ \pi_{k+1} & \text{при } y_k < y \leq y_{k+1}, k = 0, \dots, n-1, \\ 1 & \text{при } y > y_n. \end{cases} \quad (3.104)$$

У разі коли періоди обслуговування призначаються детерміновано  $G(x) \in \Omega^*$  ( $\Omega^*$  – клас вироджених розподілів), мінімуму функціонала  $\tilde{J}(P^*, \Phi, G)$  можна досягти при  $\Phi(v) \in \Omega^*$  для будь-якого фіксованого  $G(x)$ , а тому [25, 49, 54, 75, 173]:

$$\tilde{J} = \max_{G \in \Omega^*} \min_{\Phi \in \Omega^*} \tilde{J}(P^*, \Phi, G) = \max_{0 \leq x \leq \infty} \min_{0 \leq v \leq \infty} = \frac{\sum_{i=0}^n A(x, v, y_i + 0) \Delta \pi_i}{\sum_{i=0}^n B(x, v, y_i + 0) \Delta \pi_i}. \quad (3.105)$$

У випадку обмеження  $P \in \Omega_m$  екстремум  $\tilde{J}(P)$  також досягається на східчастих функціях, але пошук їх складніший.

Під час розгляду оптимізації стратегії технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів при повній інформації приймаємо таке.

Розглянемо процес відновлення роботи вантажного вагона під час експлуатації. Припустимо, що в момент процесу відновлення  $\xi(t)$ , що розподілений за законом  $G(x)$ , призначається через час  $z$  проведення поточного, деповського чи капітального ремонтів. Тоді функціонали якості функціонування вантажного вагона можна описати таким рівнянням [25, 49, 54, 75, 173]:

$$J(G) = \frac{\int A(x) dG(x)}{\int B(x) dG(x)}. \quad (3.106)$$

При цьому виникає необхідність визначення закону розподілу функції  $G(x)$ , для якого можна задати границі [25, 49, 54, 75, 173]:

$$J(G_0) = \max_G J(G). \quad (3.107)$$

У випадку розгляду марковського і напівмарковського процесів роботи вантажного вагона під час експлуатації можна припустити, що в момент переходу процесу  $\xi(t)$  у граничний стан  $e_y$ ,  $1 \leq y \leq N$ , призначається через час  $t_y$  проведення поточного, деповського чи капітального ремонтів, що відбувається за розподіленням законом  $G_y(x)$ . У цьому випадку функціонали якості можна записати у вигляді дробово-лінійного функціонала [25, 49, 54, 75, 173]:

$$J(G_1, G_2, \dots, G_N) = \frac{\int A(x_1, x_2, \dots, x_N) dG_1(x_1) dG_2(x_2) \dots dG_N(x_N)}{\int B(x_1, x_2, \dots, x_N) dG_1(x_1) dG_2(x_2) \dots dG_N(x_N)}. \quad (3.108)$$

Далі необхідно визначити межі функцій розподілу  $G_i^0(x)$ ,  $1 \leq i \leq N$ , для яких [25, 49, 54, 75, 173]:

$$J(G_1^{(0)}, G_2^{(0)}, \dots, G_N^{(0)}) = \max_{G_i, i=1, \dots, N} J(G_1, G_2, \dots, G_N). \quad (3.109)$$

Якщо знайти екстремум дробово-лінійного функціонала за допомогою класу вироджених функцій розподілу [173]:

$$G(x) = \begin{cases} 0, & x \leq \tau, \\ 1, & x > \tau \end{cases}, \quad (3.110)$$

то для процесу відновлення можна записати [25, 49, 54, 75, 173]:

$$\max_G J(G) = \max_{\tau} \frac{A(\tau)}{B(\tau)} = \frac{A(\tau_0)}{B(\tau_0)}; \quad (3.111)$$

а для марковського чи напівмарковського процесів [25, 54, 75, 173]:

$$\max_{G_i, i=1, \dots, N} J(G_1, G_2, \dots, G_N) = \max_{\tau_i, i=1, \dots, N} \frac{A(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N)}{B(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N)} = \frac{A(\tau_1^{(0)}, \tau_2^{(0)}, \dots, \tau_N^{(0)})}{B(\tau_1^{(0)}, \tau_2^{(0)}, \dots, \tau_N^{(0)})}. \quad (3.112)$$

Як бачимо (вираз (3.111)), величина  $\tau_0$  буде визначати оптимальну періодичність проведення поточних, деповських та капітальних ремонтів вантажних вагонів при процесах відновлення.

Вектор  $\langle \tau_1^{(0)}, \tau_2^{(0)}, \dots, \tau_N^{(0)} \rangle$  виразу (3.112) визначає більш точно оптимальну періодичність проведення поточних, деповських та капітальних ремонтів у відповідному технічному стані вантажних вагонів  $e_v$ .

Якщо припустити, що час безвідмовної роботи вантажних вагонів  $\xi(t)$  з ймовірністю  $P$  розподілений за законом  $F(x) = P \xi < x$ , то в разі виявлення в них відмов через деякий випадковий час  $\xi(t)$  закон розподілу  $\Phi(x) = P \xi < x$ .

На початку експлуатації нового вагона  $t=0$  можна запропонувати проведення ремонту через час  $\eta$ , який розподілений за законом  $G(x) = P \eta < x$ . Якщо до призначеного моменту  $\eta$  складові вагона не відмовили (відбулася подія  $\xi > \eta$ ), то в момент  $\eta$  починають проводити планово-запобіжні дії, підвищуючи ймовірність безвідмовної роботи майже до 100%. Тривалість цих дій можна позначити як  $\gamma_1$ , а функцію її розподілу –  $F_1(t) = P \gamma_1 < t$ .

У випадку коли до призначеного моменту  $\eta$  складові елементи вагона відмовили ( $\xi \leq \eta$ ) та не відбулося самостійного прояву цієї відмови  $\xi + \theta \geq \eta$ , то в момент  $\eta$  починається виконання планового ремонту, тривалість якого дорівнює  $\gamma_2$ , а закон розподілу  $F(t) = P \gamma_2 < t$ .

Якщо відмови складових елементів вагона настали до призначеного моменту ( $\xi \leq \eta$ ) і самостійно проявилися до призначеного моменту ( $\xi + \theta \geq \eta$ ), то в момент виявлення відмови  $\xi + \theta$  починається позаплановий ремонт, тривалість якого дорівнює  $\gamma_3$ , а закон розподілу  $F_3(t) = P \gamma_3 < t$  [25, 49, 54, 75, 173].

Після виконання позапланових ремонтних робіт вантажних вагонів, коли підвищується ймовірність безвідмовної роботи, повинно здійснюватися перепланування термінів проведення подальших технічних дій.



Усі випадкові величини, що впливають на ймовірність безвідмовної роботи вантажного вагона, можна вважати незалежними з кінцевими першими моментами.

Оскільки час безвідмовної роботи  $\xi(t)$  вантажного вагона з ймовірністю  $P$  розподілено за законом  $F(x)$  (як зазначалося вище), то в цьому випадку для часу відмов можна записати тотожну рівність [25, 49, 54, 75, 173]:

$$\bar{F}(x) = 1 - F(x).$$

Тоді інтенсивність відмов вантажного вагона буде мати такий вигляд [25, 49, 54, 75, 173]:

$$\lambda(x) = \frac{f(x)}{F(x)}, \quad (3.113)$$

де  $f(x) = F'(x)$ .

Оптимальний період проведення поточних, деповських та капітальних ремонтів  $\tau_0$ , який максимізуватиме вибрані критерії якості функціонування вантажного вагона, буде характеризуватися параметрами експлуатаційної надійності:

- ймовірністю виконання завдання [25, 49, 54, 173]:

$$R_r(z) = \frac{\int_0^{\tau} \bar{F}(x+z) dx}{\left(\tau - \int_0^{\tau} \int_0^x F(x-y) d\Phi(y) dx + (M\gamma_3 - M\gamma_2)\right) \int_0^{\tau} F(\tau-x) d\Phi(x) + M\gamma_1 + (M\gamma_2 - M\gamma_1)F(\tau)}; \quad (3.114)$$

де в чисельнику наведено закон розподілу часу до відмови ( $x$ ) з урахуванням перебування вагона в певному технічному стані ( $z$ ); а в знаменнику наведено ресурс (напрацювання) з урахуванням розподілів часу перебування вагона в справному стані ( $y$ ), у стані, коли необхідний ремонт ( $\tau-x$ ), а також з урахуванням часу дій на виявлення можливих відмов  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ .

- коефіцієнтом готовності [25, 49, 54, 173]:

$$K(\tau) = R_\tau(0); \quad (3.115)$$

- ймовірністю безвідмовної роботи [25, 49, 54, 173]:

$$P(\tau) = \frac{\int_0^\tau F(x) dx - \int_0^\tau \int_0^x F(x-y) d\Phi(y) dx}{\int_0^\tau \bar{F}(x) dx} +$$

$$+ \frac{M\gamma_3 + M\gamma_2 \int_0^\tau F(\tau-x) d\Phi(x) + M\gamma_1 + (M\gamma_2 - M\gamma_1)F(\tau)}{\int_0^\tau \bar{F}(x) dx}, \quad (3.116)$$

де в чисельнику наведено закони розподілу часу до виникнення відмови з урахуванням можливих проявів раптових і прихованих відмов або настання відмови раніше встановленого терміну; а в знаменнику – закон розподілу часу до відмови ( $x$ ).

Останні рівняння (3.114)–(3.116) призначені для визначення оптимального періоду проведення поточних, деповських та капітальних ремонтів вантажних вагонів, а оптимальні значення критеріїв якості для окремих випадків індикації відмов можуть мати стаціонарні розв'язки: випадок раптової індикації [25, 49, 54, 173]:

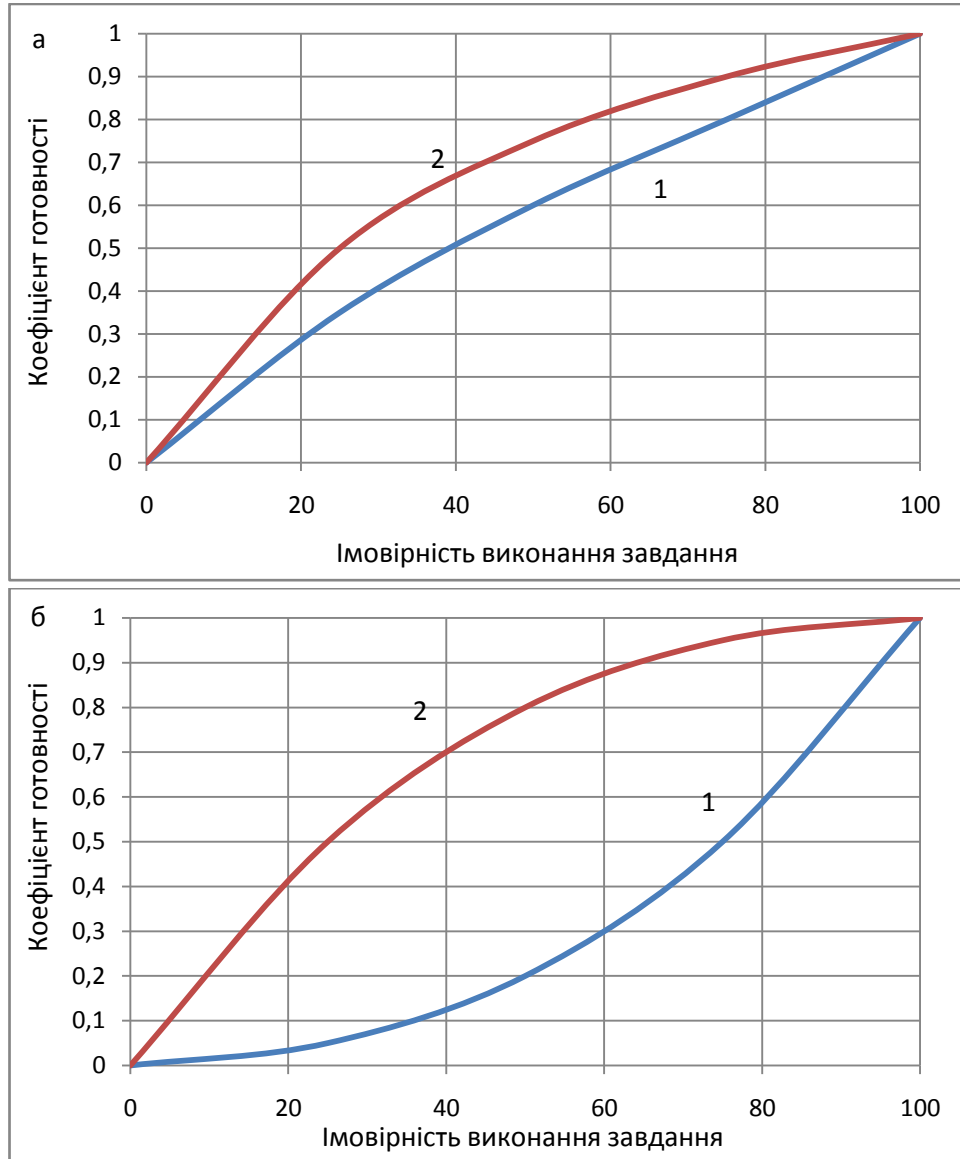
$$\Phi(x) = \begin{cases} 0, & x < 0, \\ 1, & x \geq 0, \end{cases} \quad (3.117)$$

і випадок відсутності самостійного прояву відмов [25, 49, 54, 173]:

$$\Phi(x) = 0 \text{ для } x < \infty. \quad (3.118)$$

Для окремих випадків індикації відмов структурних елементів вантажних вагонів на рис. 3.11 наведено залежності коефіцієнта готовності

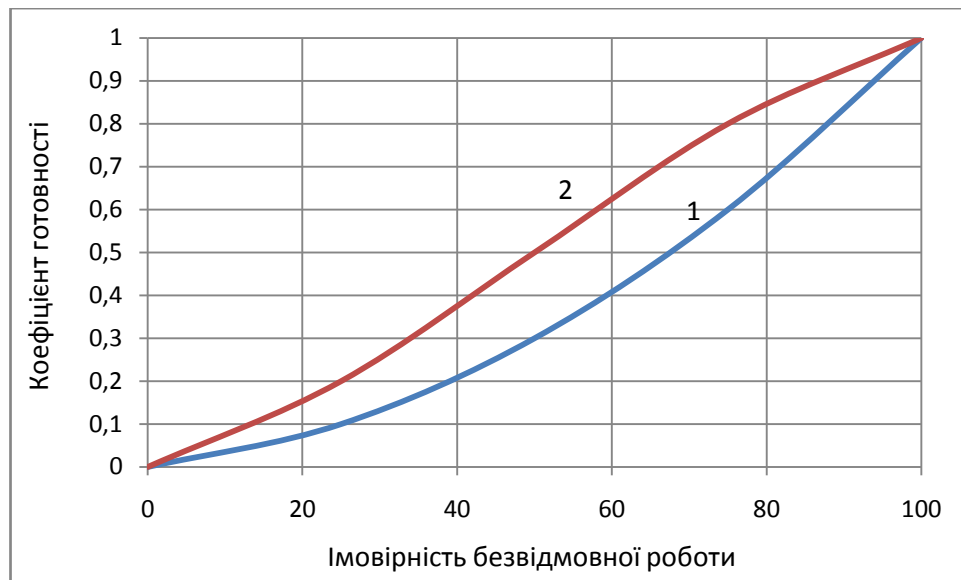
вантажних вагонів від ймовірності виконання завдань при поточних та деповських ремонтах.



1 – раптова індикація відмов; 2 – відсутність самостійного прояву відмов

Рисунок 3.11 – Залежність коефіцієнта готовності вантажних вагонів від ймовірності виконання завдання при поточному (а) та деповському (б) ремонтах

На рис. 3.12 наведено залежність коефіцієнта готовності вантажного вагона від ймовірності безвідмовної роботи структурних елементів для окремих випадків індикації їх відмов.



1 – раптова індикація відмов; 2 – відсутність самостійного прояву відмов

Рисунок 3.12 – Залежність коефіцієнта готовності вантажного вагона від ймовірності безвідмовної роботи структурних елементів у випадку

Під час вибору оптимальних термінів виконання поточних, деповських та капітальних ремонтів вантажних вагонів необхідно враховувати повноту інформації стосовно категорії відмов його структурних критичних елементів [54, 173].

У ході дослідження моделей технічного обслуговування, поточних, деповських та капітальних ремонтів, у яких значну роль відіграє структура системи, основна проблема полягає у визначенні оптимальної глибини профілактики, тобто обсягу тієї частини системи, яка підлягає оновленню (заміні) під час виконання ремонтних робіт. У багатьох випадках характеристиками структурних елементів вантажного вагона є напрацювання (пробіг) окремих елементів (ходова частина), а для математичного опису їх функціонування використовується апарат напівмарковських процесів [54, 173]. Основними показниками якості роботи вантажних вагонів є дробово-лінійні функціонали, а ремонт слід призначати детерміновано.

Розглянемо послідовну систему, що складається з  $N$  елементів. У ній можливе виконання ремонтних робіт двох видів: позапланових запобіжних, які повністю оновлюють систему, і позапланових поточних відчіпних ремонтів частини вантажного вагона, коли елемент, що відмовив, замінюється новим. Будемо вважати, що інформація про виникнення в структурних елементах вантажного вагона відмов надходить раптово [54].

Стратегія експлуатації вантажних вагонів полягає в такому. У початковий момент часу експлуатації вантажного вагона призначається виконання запобіжних робіт тоді, коли напрацювання (пробіг) досягає деякого заданого значення  $\tau$ .

Якщо до моменту початку запобіжних робіт відбувається відмова будь-якого структурного елемента вантажного вагона, то виконується позаплановий поточний відчіпний ремонт (заміна елемента чи вузла, що відмовили, новими, ідентичними за своїми характеристиками колишнім).

Будемо вважати, що під час поточного відчіпного ремонту будь-якого структурного елемента напрацювання (пробіг) вантажного вагона не збільшується.

Задамо такі характеристики функціонування структурних елементів вантажного вагона [25, 49, 54, 173]:

- $F_i(\cdot)$  – функція розподілу часу безвідмовної роботи  $i$ -го структурного елемента,  $i = 1, 2, \dots, N$ ;  $P_i(\cdot) = 1 - F_i(\cdot)$ ;
- $T_i$  – середнє напрацювання (пробіг)  $i$ -го структурного елемента вантажного вагона;
- $T_{\text{пп}}$  – середня тривалість технічного обслуговування (запобіжної профілактики);
- $t_i$  – середня тривалість поточного (аварійно-профілактичного) ремонту  $i$ -го структурного елемента вантажного вагона в разі його відмови;

-  $z$  – оперативний час відновлення роботи структурного елемента вантажного вагона, що необхідно затратити для виконання поставленого завдання.

Далі приймемо, що  $H_i(\tau)$  є функцією відновлення рекурентного потоку, що утворений послідовністю незалежних випадкових величин з функцією розподілу, перетворення Лапласа-Стільтєса для якої буде мати вигляд [25, 49, 54, 173]:

$$H_i^*(s) = \frac{F_i^*(s)}{1 - F_i^*(s)}, \quad (3.119)$$

де  $F_i^*(s)$ ,  $H_i^*(s)$  – перетворення Лапласа-Стільтєса функцій  $F_i(\tau)$  і  $H_i(\tau)$  відповідно.

Визначимо значення  $\tau$ , за яких показники якості функціонування структурних елементів вантажного вагона досягають екстремального значення.

При цьому вирази для основних показників якості роботи структурних елементів вантажного вагона у вигляді функціональних залежностей від  $\tau$  будуть мати такий вигляд [54, 173]:

$$K = \tau \left[ \tau + T_{nn} + \sum_{i=1}^N t_i H_i(\tau) \right]^{-1}; \quad (3.120)$$

$$R(z) = \prod_{i=1}^N \int_0^{\tau} \frac{P_i(x+z) + \int_0^x P_i(x+z-y) dH_i(y)}{\tau + T_{nn} + \sum_{i=1}^N t_i H_i(\tau)} dx. \quad (3.121)$$

Вищенаведені рівняння для визначення оптимальних значень напрацювання (пробігу) вантажних вагонів, у разі досягнення якого

необхідно проводити поточний, деповський чи капітальні ремонти, можна для кожного структурного елемента вузла чи вагона в цілому подати окремо.

За недостатності інформації про вид функцій розподілу можна використати мінімаксні стратегії [54], які дають гарантовані результати в цілому класі розподілів.

Розглянемо стратегію обслуговування послідовної системи, коли функції розподілу тривалості безвідмовної роботи структурних елементів вантажних вагонів  $F_i \in \Omega_i, i=1,2,\dots,N$  відомі лише в окремих фіксованих точках, тобто  $F_i \in \Omega_i(a_i, y_i, \pi_i) \equiv \Omega_i$ .

Через  $\Omega_i(a_i, y_i, \pi_i)$  позначимо множину функцій розподілу, які в заданих точках  $y_i = (y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{in_i})$  будуть набувати визначених заданих значень  $\pi_i = (\pi_{i1}, \pi_{i2}, \dots, \pi_{in_i})$  відповідно. Вважаємо, що поточні, деповські та капітальні ремонти всієї послідовної системи вантажного вагона призначаються детерміновано й починаються, коли напрацювання (пробіг) досягає значення  $\tau$ .

Відповідно до принципу мінімаксу розв'язання задачі розбивається на два етапи. На першому етапі відбувається визначення «найгірших функцій» розподілу в класах  $\Omega_i, i=1,2,\dots,N$ . При цьому введемо позначення через  $F_i^{\circ} \in \Omega_i$  – східчасту функцію розподілу вигляду [25, 49, 54, 173]:

$$F_i^{\circ} \in \Omega_i \equiv \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq 0, \\ \pi_{ik} & \text{при } y_{ik} < x \leq y_{i,k+1}, k = 0,1,2,\dots,n_i - 1, \\ 1 & \text{при } x > y_{i,n_i}, \end{cases} \quad (3.122)$$

де  $y_{i,0} = \pi_{i,0} = 0, i = 1,2,\dots,N$ .

При цьому [25, 49, 54, 173]:

$$F_i^{\circ} \in \Omega_i, i = 1,2,\dots,N.$$

Далі прийmemo, що  $H_i^{\circ} \in \Omega_i$  є функцією відновлення рекурентного потоку, що утворений послідовністю незалежних випадкових величин з функцією розподілу  $F_i^{\circ} \in \Omega_i$ . Відомо, що розподіли вигляду (3.122) є

«найгіршими» в класах  $\Omega_i$  стосовно основних показників якості функціонування вантажного вагона – коефіцієнта готовності та ймовірності безвідмовної роботи.

На другому етапі необхідно знайти оптимальне напрацювання (пробіг) вантажних вагонів до відповідного ремонту. У вказаних умовах задача визначення оптимального періоду виконання ремонтних робіт повинна зводитись до визначення екстремумів за  $\tau$  такої функції для коефіцієнта готовності [25, 49, 54, 158, 173]:

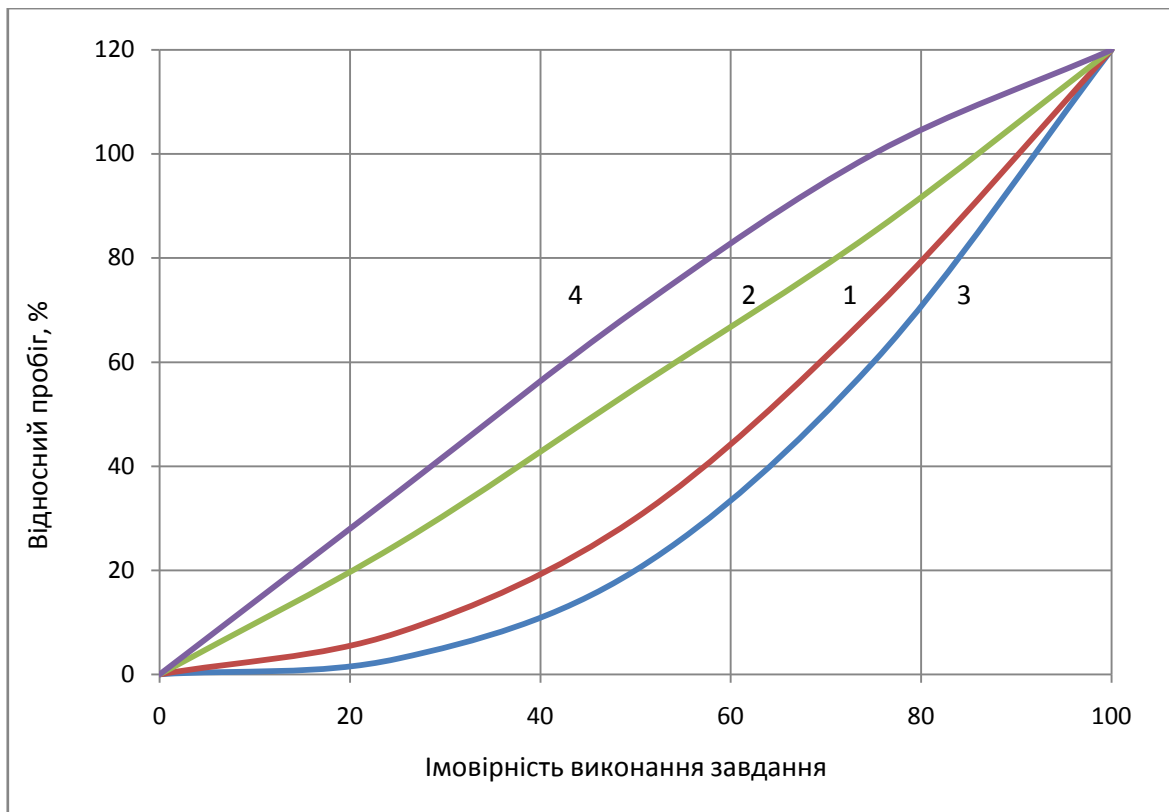
$$\max_{0 \leq \tau \leq \infty} \frac{\tau}{\tau + T_{nn} + \sum_{i=1}^N t_i H_i(\tau)}. \quad (3.123)$$

де  $t_i$  – середня тривалість відновлення  $i$ -го елемента;  $\tau$  – час безвідмовної роботи вагона;  $T_{nn}$  – середня тривалість технічного обслуговування;  $H_i(\tau)$  – функція відновлення  $i$ -го елемента;  $N$  – кількість структурних елементів.

Точки екстремумів наведеної функції будуть визначати оптимальні значення напрацювання (пробігу) вантажних вагонів, досягнувши яких необхідно проводити (виконувати) технічне обслуговування (запобіжні профілактичні роботи), а відповідні екстремальні значення вказаних функцій будуть вказувати на гарантовані величини показників якості функціонування структурних елементів вантажних вагонів, які забезпечуються в результаті застосування мінімаксної стратегії.

Відповідно до виразу (3.121) та взявши до уваги залежність (3.114), зобразимо графічно вплив ймовірності виконання завдання при проведенні технічного обслуговування та капітального ремонту вантажних вагонів на зміну їх напрацювання або пробігу (відносне значення) для окремих випадків індикації відмов їх структурних елементів (рис. 3.13).





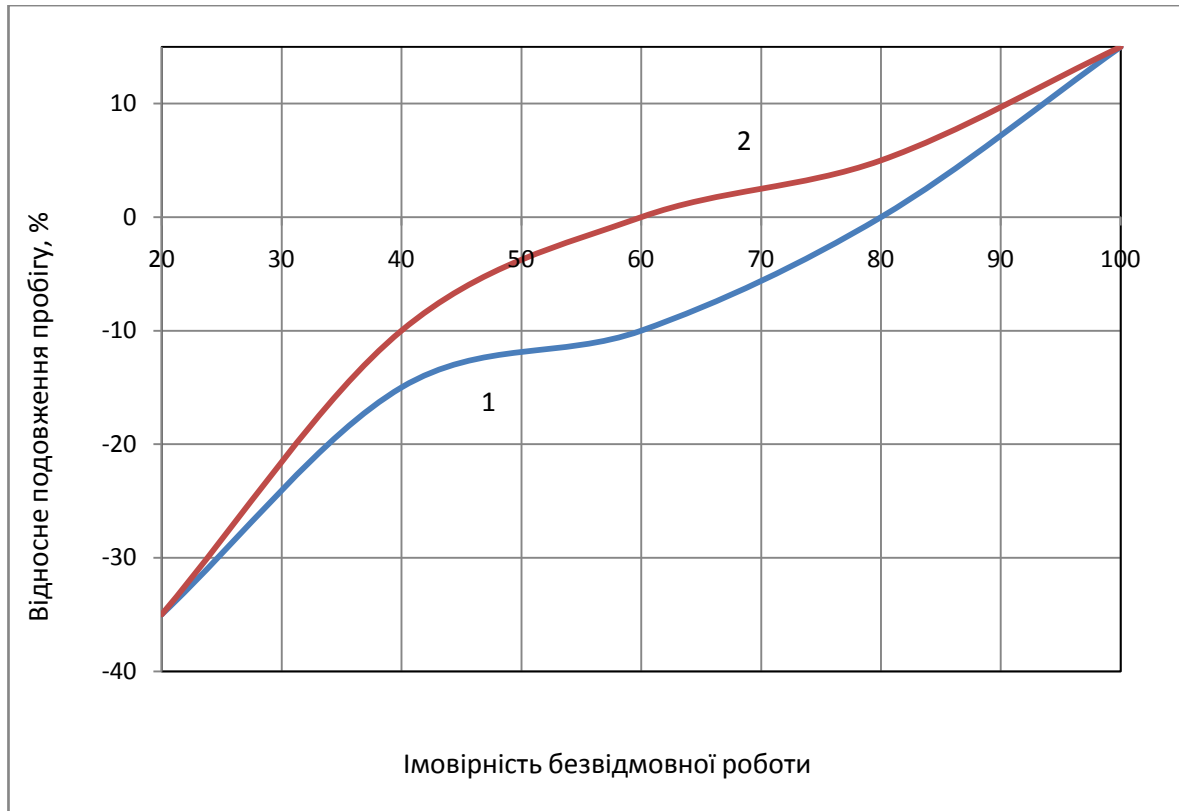
1, 3 – відсутність самостійного прояву відмов;

2, 4 – раптова індикація відмов

Рисунок 3.13 – Залежність відносного напрацювання (пробігу) вантажних вагонів від ймовірності виконання завдань при проведенні технічного обслуговування (1, 2) та капітального ремонту (3, 4)

Спостерігається відносне підвищення напрацювання (пробігу) вантажних вагонів (до 20 %) для різних випадків індикації відмов структурних елементів при забезпеченні 100 %-го значення ймовірності виконання поставленого завдання під час проведення технічного обслуговування чи капітального ремонту.

Урахувавши вираз (3.138) при зміні ймовірності безвідмовної роботи вантажних вагонів під час експлуатації, на основі залежностей (3.114) і (3.121) покажемо теоретичну зміну їх відносного напрацювання (пробігу) (рис. 3.14) для окремих випадків індикації відмов структурних елементів.

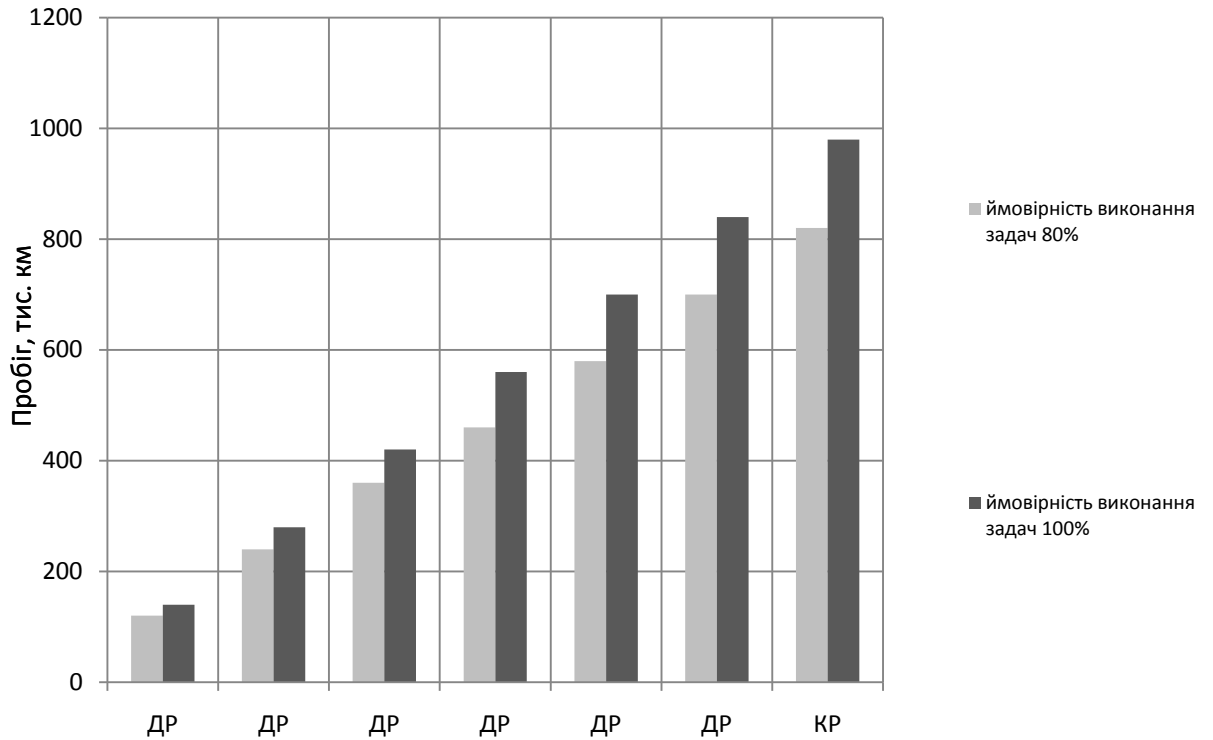


1 – раптова індикація відмов; 2 – відсутність самостійного прояву відмов

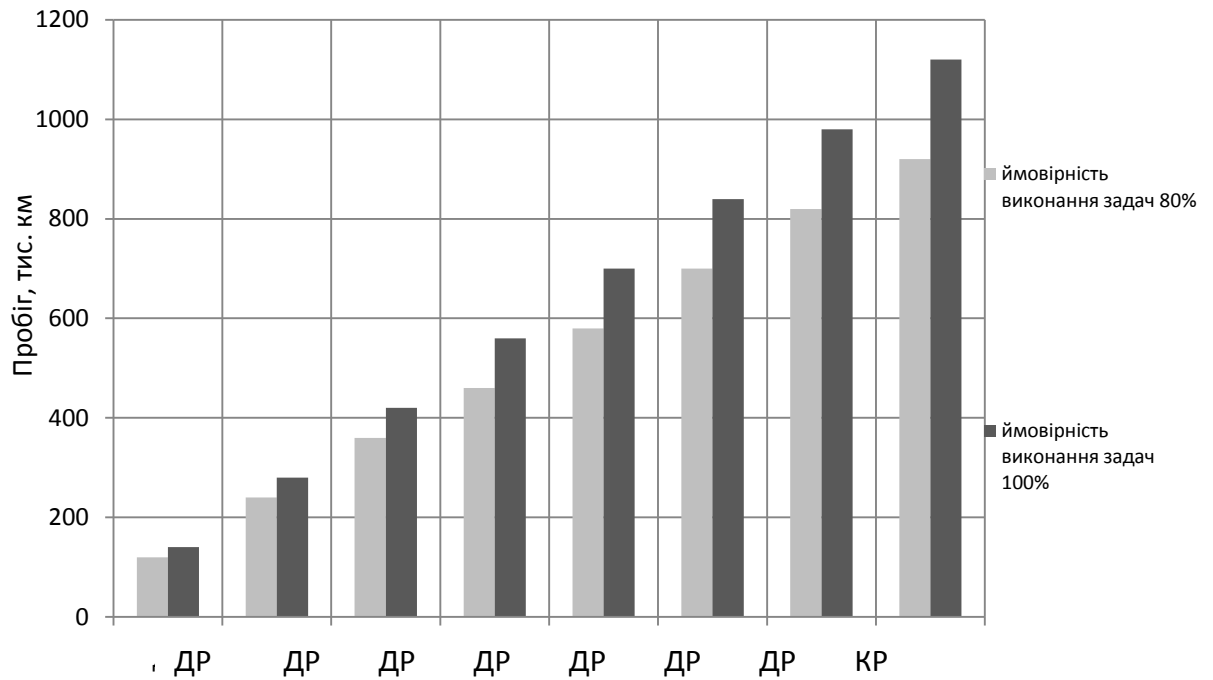
Рисунок 3.14 – Відносне подовження напрацювання (пробігу) вантажних вагонів при забезпеченні відповідного рівня ймовірності їх безвідмовної роботи під час експлуатації

При виборі оптимальних термінів проведення технічного обслуговування та поточних, деповських, капітальних ремонтів вантажних вагонів необхідно враховувати повноту інформації, що належить до категорії відмов.

Покажемо графічно для групи дослідних зразків вантажних вагонів на маршруті Кривий Ріг–Ужгород–Кошице від першого деповського ремонту, яку структуру буде мати система технічного обслуговування та ремонту з урахуванням ймовірнісно-фізичного методу (рис. 3.15).



а



б

Рисунок 3.15 – Структура ремонту універсальних піввагонів на маршруті Кривий Ріг–Ужгород–Кошице від першого деповського ремонту при ймовірності виконання завдання: а – 80 %; б – 100 %

### 3.4 Висновки до розділу 3

Під час дослідження надійності вантажного вагона виконано таке:

1. На етапі проектування проведено математичне моделювання взаємодії гальмівної колодки і колеса та отримано теплову модель, на основі якої можна розраховувати реальні експлуатаційні навантаження на взаємодіючі деталі з метою забезпечення необхідного рівня надійності цієї системи вагона.

2. Отримано вираз, що дозволяє на етапі розробки та проектування дати оцінку теоретичному граничному ресурсу структурних елементів вагона з урахуванням виконання технічних дій (технічного обслуговування, поточного, деповського, капітального ремонтів) та впровадження інноваційних конструктивних та технологічних рішень у процесі ремонту вагона у випадку, коли застосовуються нові матеріали чи технології, що змінюють значення величин зносу і відповідно мають прямий вплив на ресурс.

3. Сформовано поняття та отримано вираз для коефіцієнта функціональної надійності вагонів, що вказує на небезпеку подальшої експлуатації вагонів на залізниці. З використанням отриманих виразів зазначених коефіцієнтів можна прогнозувати небезпечний термін або небезпечний пробіг експлуатації вагонів.

4. Запропоновано потік утворення технологічних дефектів, що виявляються в процесі експлуатації (відмови), розглядати як пуассонівський; на основі припущення була виявлена проста закономірність появи відповідної кількості технологічних дефектів структурних елементів вагона при технологічному процесі виготовлення його структурних елементів. Запропоновано здійснювати перехід від структурних елементів вантажного вагона до вагона в цілому на основі виразів для структурної ентропії і тим самим переходити до оцінки показників надійності вантажних вагонів у цілому.

5. Для системи технічного обслуговування та ремонту було отримано аналітичні залежності ймовірності безвідмовної роботи, коефіцієнта готовності та ймовірності виконання завдання залежно від часової функції для визначення оптимального періоду проведення поточних, деповських та капітальних ремонтів. Побудована структура ремонту універсальних піввагонів на маршруті Кривий Ріг–Ужгород–Кошице від першого деповського ремонту вказує на необхідність перебудови планово-запобіжної системи технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів залежно від якості виконання технічних дій. Під перебудовою системи мається на увазі перегляд регламентних термінів проведення технічного обслуговування та ремонту – зменшення або збільшення напрацювання до ремонту конкретних моделей вантажних вагонів залежно від умов роботи.

## РОЗДІЛ 4

### ФОРМУВАННЯ СИСТЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ РІЗНИХ КОНСТРУКЦІЙ

#### **4.1 Розробка індивідуальних моделей прогнозу показників надійності вантажних вагонів протягом життєвого циклу з урахуванням ймовірнісного характеру відмов**

Сучасна методологія надійності як наука про методи її вивчення повинна містити цілий комплекс методів. Діалектичний метод необхідний для вивчення об'єкта дослідження в цілому. Також повинна бути прийнята термінологія, на яку спирається подальше експериментальне дослідження, і висновки.

Результати експериментальних досліджень піддаються статистичній обробці [126, 224, 225, 226, 228, 229, 263], а далі накопичена інформація підлягає аналізу й синтезу як одному з основних методів обробки результатів дослідження, після чого застосовуються методи індукції та дедукції, що дозволяють від окремих фактів та положень перейти до загальних висновків. І тільки тоді робляться теоретичні викладки, які є основою теорії надійності.

Основною метою збору статистичних даних є підвищення надійності вантажних вагонів на основі виявлення вузлів і деталей, які лімітують напрацювання до ремонту [4, 26, 88, 98, 108, 117, 126, 224, 225, 226, 227, 229, 262, 271].

Методика збору експериментальних даних про надійність в процесі експлуатації рухомого складу повинна забезпечувати:

- своєчасне отримання повних, об'єктивних та достовірних даних про відмови машин;
- оперативну обробку отриманих даних;

- координацію заходів щодо підвищення надійності, що проводяться проектними організаціями, заводами-виробниками і експлуатуючими організаціями.

Математична статистика має головне припущення, яке полягає в тому, що знання про деяку генеральну сукупність даних базується на обмеженій кількості зразків. Однак застосування на практиці цього припущення практично завжди дає велику помилку, оскільки не враховується інформація, яка раніше була відома [72, 102, 120, 124, 235]. Наведемо приклад. Здійснивши відбір кількох вантажних вагонів із сукупності для встановлення причин відмов колісних пар, необхідно визначити, чи існує зв'язок між проведеним технічним обслуговуванням (ремонт) та проведеним капітальним ремонтом колії. Для оцінки впливу проведеного капітального ремонту колії або технічного обслуговування (ремонт) вантажного вагона на відмови колісних пар можна просто користуватися наявними загальними даними щодо відмов вантажних вагонів на всій залізниці після проведених ремонтів і технічних обслуговувань. Слід зазначити, що на початку досліднику вже відомий вплив вищезазначених заходів. Безумовно, неякісно проведені технічне обслуговування (ремонт) вагона або виправно-підбивальні роботи колії призводять до накопичення пошкоджень у колісних парах, наслідком яких стануть відмови. Виходячи з наведеного прикладу, можна зробити висновок, що всі результати розрахунку традиційної статистики спрямовані на те, що в розпорядженні дослідника немає жодної інформації про об'єкт спостереження, а на практиці таке допущення майже ніколи не виконується. Тобто, при проведенні статистичних досліджень необхідно враховувати попередні дані, які вже відомі [189, 191, 260].

Події  $A$  і  $B$  у цьому випадку несумісні (рис. 4.1), тобто ані  $A$ , ані  $B$  не можуть відбутися разом.

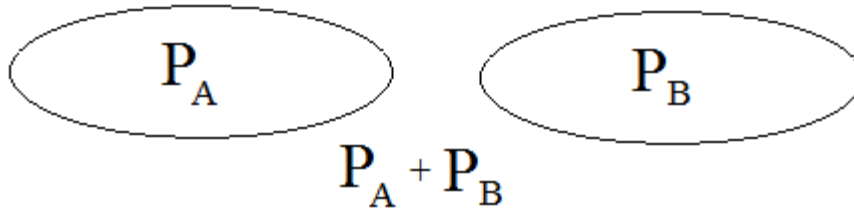


Рисунок 4.1 – Події несумісні

Випадкові події  $A$  і  $B$  сумісні (рис. 4.2), якщо під час випробування можуть відбутися обидві події.

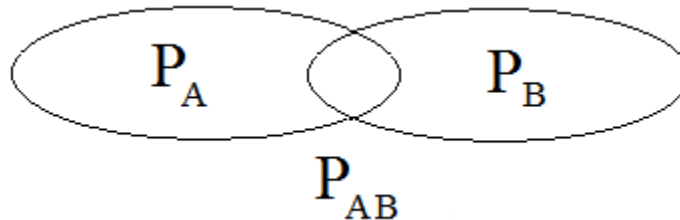


Рисунок 4.2 – Події сумісні

Якщо події  $A$  і  $B$  несумісні, то ймовірність появи або події  $A$  чи події  $B$ :

$$P(A+B) = P(A) + P(B). \quad (4.1)$$

Події  $A$  і  $B$  незалежні, якщо ймовірність появи події  $A$  не залежить від того, відбулася подія  $B$  чи ні. Якщо події  $A$  і  $B$  незалежні, то ймовірність появи і події  $A$ , і події  $B$ :

$$P(AB) = P(A) \cdot P(B). \quad (4.2)$$

Якщо випадкові події  $A$  і  $B$  сумісні (рис. 4.3), то ймовірність появи або  $A$ , або  $B$ :

$$P(A+B) = P(A) + P(B) - P(A) \cdot P(B). \quad (4.3)$$



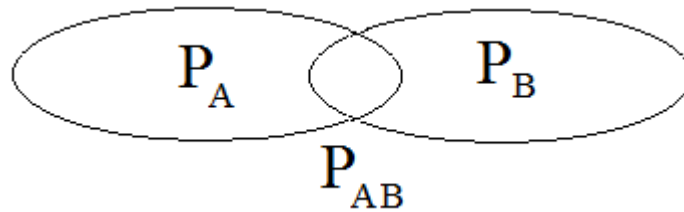


Рисунок 4.3 – Події  $A$  і  $B$  сумісні (та незалежні)

Якщо випадкові події  $A$  і  $B$  залежні (і сумісні) і ймовірності їх появи  $P(A)$  і  $P(B)$ , то ймовірність поєднання подій  $A$  і  $B$  (станеться і  $A$ , і  $B$ ):

$$P(AB) = P(A) \cdot P(B|A), \quad (4.4)$$

або

$$P(AB) = P(B) \cdot P(A|B), \quad (4.5)$$

де  $P(B/A)$  – умовна ймовірність, тобто ймовірність появи події  $B$ , за умови, що подія  $A$  відбулася, а  $P(A/B)$  – умовна ймовірність, тобто ймовірність появи події  $A$ , за умови, що подія  $B$  відбулася.

З формул (4.4) і (4.5) можна отримати формулу повної ймовірності:

$$P(A/B) = \frac{P(A) \cdot P(B/A)}{P(B)}, \quad (4.6)$$

де  $P(A)$  – апіорна ймовірність гіпотези  $A$ ;

$P(A/B)$  – ймовірність гіпотези  $A$  при настанні події  $B$  (апостеріорна ймовірність);

$P(B/A)$  – ймовірність настання події  $B$  при істинності гіпотези  $A$ ;

$P(B)$  – повна ймовірність настання події  $B$ .

Залежність (4.6), яка враховує умовну ймовірність, має назву формули Баєса [138].

У Баєсівській статистиці використовується формула Баєса, за допомогою якої можна визначити ймовірність якої-небудь події за умови, що відбулася інша статистично взаємозалежна з нею подія. Використовуючи формулу Баєса, можна з більшою точністю обчислити ймовірність, при цьому в розрахунок береться раніше відома інформація, а також дані, отримані в результаті нових спостережень:

Повну ймовірність настання події  $B$  розраховують за формулою [39]:

$$P(B) = \sum_{i=1}^N P(A_i) P(B|A_i) \quad (4.7)$$

де ймовірності, які наведені під знаком суми, відомі або можуть допускати експериментальну оцінку.

Використовуючи останню формулу для повної ймовірності, формулу Баєса можна записати в такому вигляді:

$$P(A_j|B) = \frac{P(A_j) P(B|A_j)}{\sum_{i=1}^N P(A_i) P(B|A_i)} \quad (4.8)$$

У Баєсівській статистиці задається і вирішується питання, пов'язане з тим, яким чином коригується попереднє знання з урахуванням нової інформації [132, 138, 270, 287]. Баєсівський аналіз починається з того, що відомо на цей момент, а потім розглядається зміна знання в процесі отримання нових відомостей, а небаєсівська статистика, яка включає методи вибіркового спостереження, виходить із знання про деяку групу об'єктів, тобто відбувається вибірка з цієї групи.

Баєсівська статистика містить модель, яка передбачає оновлення сформованих уявлень у світлі отриманого досвіду, тобто уявлення про параметри або характеристики регулярно переглядаються на основі

середньозваженої величини колишнього уявлення й результату останніх спостережень. Вага, що надається результатам останніх спостережень, буде залежати від дисперсії результатів спостережень за певний період часу.

Нехай  $\{F_\theta, \theta \in \Theta\}$  – деякий параметричний масив розподілів. Нехай виконана умова домінування щодо деякої міри  $\mu$  на  $R$ , тобто цей параметричний масив складається з розподілів, абсолютно безперервних щодо  $\mu$ . Позначимо через  $f_0$  щільність розподілу  $F_0$  відносно міри  $\mu$ . Нехай параметр  $\theta$  є випадковою величиною з щільністю  $q(t)$  відносно деякої міри  $\lambda$ . Тоді функція

$$f(t, x_1, \dots, x_n) = f_0(x_1, \dots, x_n)q(t), \quad (4.9)$$

є щільністю деякого розподілу в  $R^n \cdot \Theta$  відносно міри  $\mu^n \cdot \lambda$ .

Тоді Бассівською оцінкою параметра  $\theta$ , побудованою за вибіркою  $x_1, \dots, x_n$ , буде такий інтеграл [132, 138]:

$$\theta_{\Pi}^* = \int_{\Theta} t g(t|x_1, \dots, x_n) \lambda(dt), \quad (4.10)$$

де апостеріорна щільність  $g(t|x_1, \dots, x_n)$  параметра  $\theta$  обчислюється за формулою

$$g(t|x_1, \dots, x_n) = \frac{f_t(x_1, \dots, x_n)q(t)}{\int_{\Theta} f_s(t|x_1, \dots, x_n)q(s)\lambda(ds)}. \quad (4.11)$$

Досліджуючи відмови вантажних вагонів, підхід Баєса дозволяє оцінити виникнення кожної з відмов деталей чи вузлів окремо, а також у цілому через внесення змін у формулу (4.5) для повної ймовірності [132].

Створення нового вагона – складний і тривалий процес, у якому беруть участь вчені, конструктори, дизайнери, випробувачі, фахівці у сфері виробництва й експлуатації.

Життєвий цикл вагона являє собою сукупність взаємопов'язаних процесів створення та послідовної зміни стану вагона від формування вихідних вимог до неї до закінчення її експлуатації. Згідно з Єдиною системою державного управління якістю продукції, життєвий цикл прийнято ділити на стадії – частини життєвого циклу, що встановлюються в нормативно-технічній документації і характеризуються певним станом вагона, видом передбачених робіт і їх результатом.

Життєвий цикл вагона включає етапи створення, виробництва і експлуатації, кожен з яких має свої особливості й містить свої моделі, що складаються з певних операцій і процедур:

- створення вагона – цей етап починається з передпроектних досліджень і закінчується створенням вагона;
- виробництво вагона – цей етап включає постановку на виробництво, виробництво і зняття з виробництва;
- експлуатація вагона – на цій стадії реалізується, підтримується і відновлюється якість вагона.

Крім того, на етапі експлуатації виявляються прорахунки й помилки, які сталися під час проектування і виробництва вагона.

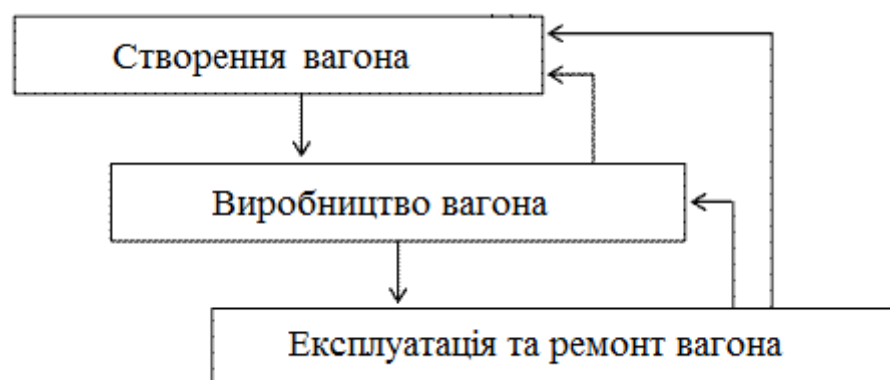


Рисунок 4.4 – Етапи життєвого циклу вантажного вагона

Як відомо, основні дані про надійність формуються на базі результатів експериментальних досліджень, які піддаються надалі статистичній обробці та аналізу, а далі накопичена інформація підлягає синтезу як одному з основних методів обробки результатів дослідження, після чого застосовуються методи індукції та дедукції, що дозволяють від окремих фактів та положень перейти до загальних висновків. І тільки тоді робляться теоретичні висновки, які є основою класичної теорії надійності.

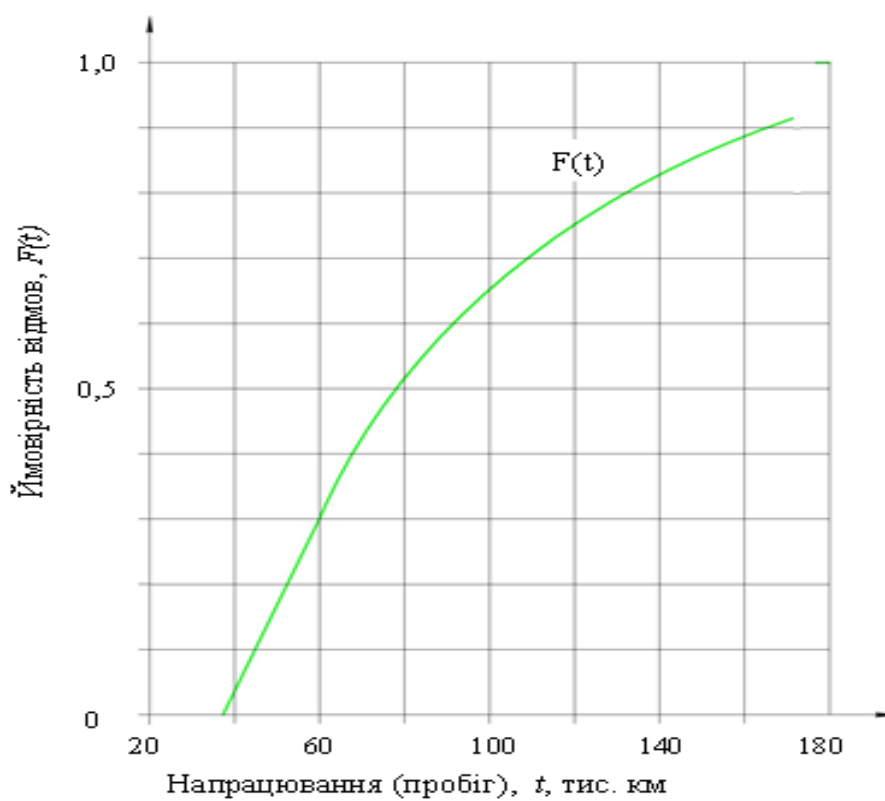
В основу отримання показників надійності покладено, безумовно, збір та обробку статистичних даних про відмови [257]. Основною метою збору статистичних даних є визначення показників надійності вантажного вагона.

Знос і пов'язані з ним фізичні ефекти для оцінки показників надійності визначаються великою кількістю чинників.

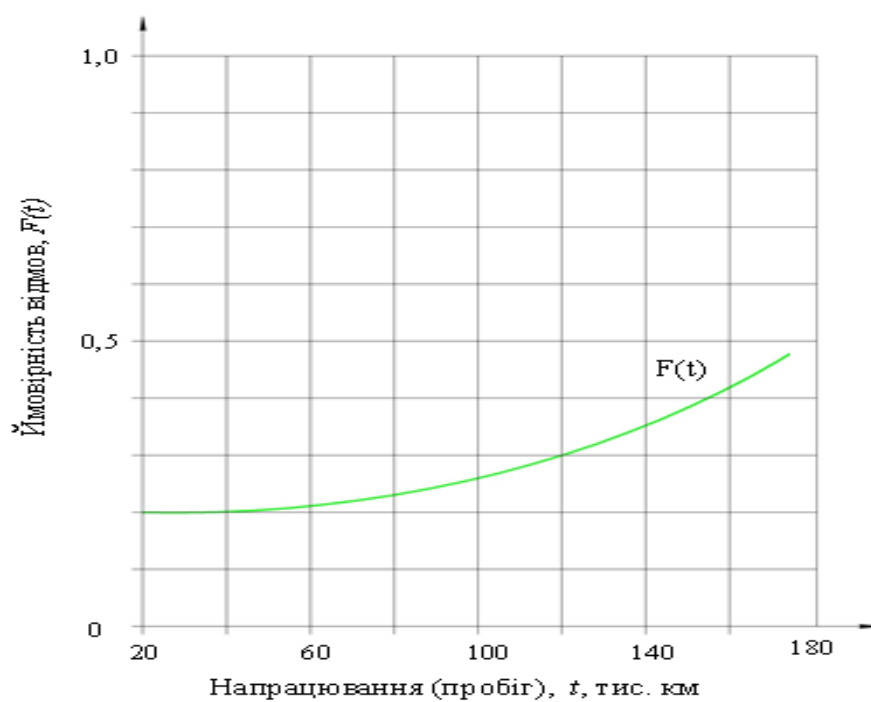
На сьогодні є велика кількість експериментальних даних про роботу вантажних вагонів у експлуатації. При цьому стоїть завдання в побудові інтелектуальної системи управління процесом експлуатації вантажних вагонів.

Проаналізуємо далі більш ретельно одну із моделей, а саме здійснимо обґрунтування Баєсівської моделі дослідження надійності вантажного вагона на етапах життєвого циклу [176].

Розглянемо вантажний вагон, у вузлах (колісних парах) якого виникає механічний знос (рис. 4.5, а) і зміна фізико-механічних характеристик (рис. 4.5, б) – втомне руйнування. Наведені криві побудовані на основі обробки середньостатистичних даних щодо відмов вантажних вагонів Укрзалізниці [81] з використанням методу раннього запобігання, розробленого Р. Коллакотом [103].



а



б

а – механічний знос; б – втомне руйнування

Рисунок 4.5 – Залежності ймовірності відмов вузлів вантажних вагонів (колісних пар) від пробігу

Щоб дослідити, наскільки ця модель є незалежною, розглянемо залежність ймовірності відмови від пробігу (напрацювання) в межах 160 тис. км.

Побудуємо таблицю відмов вантажних вагонів з використанням рис. 4.3.

Таблиця 4.1 – Розрахунок коефіцієнта відмов

Пробіг, тис. км	P(A)	P(B)	$P(A+B)=P(A)+P(B) - P(A) \cdot P(B)$	$P(AB)=P(A) \cdot P(B)$
40	0,05	0,20	0,24	0,01
60	0,21	0,24	0,40	0,05
80	0,42	0,24	0,56	0,10
100	0,56	0,26	0,77	0,15
120	0,66	0,30	0,76	0,20
140	0,74	0,35	0,83	0,26
160	0,80	0,42	0,88	0,34

У цій області середня похибка членів відповідає точності апроксимації цієї моделі (-16%), тобто апроксимація цієї області напрацювання вагона має прийнятну похибку, достатню для застосування Байєсівського підходу. Отже, можна вважати, що для дослідження зазначених залежностей прийнятна ця формула, тобто вона не виходить за рамки експериментальних даних, які отримані, тому ми можемо застосовувати в цій області описаний метод.

На практиці застосування Байєсівських методів реалізується через дискретизацію апріорного розподілу, оцінку відповідних дискретних значень функції правдоподібності, а потім оцінюються дискретні значення апостеріорного розподілу за формулою (4.8).

При цьому  $P(A_j)$  буде виступати в ролі апріорної ймовірності у визначеній точці  $A_j$  (у нашому випадку – це час чи пробіг), де  $j=1, \dots, N$ ;  $N$  – загальна кількість інтервалів дискретизації.  $P(B|A_j)$  буде мати дискретне

значення функції правдоподібності в точці  $A_j$ , а  $B$  характеризуватиме подію, що пов'язана з отриманням додаткових статистичних даних щодо відмов вантажних вагонів.

Якщо як апіорний розподіл використати нормальний розподіл, то, враховуючи дискретизацію, маємо:

$$P(A_j) = \frac{c}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{a_{j-1}}^{a_j} \exp\left(-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}\right) dt, \quad (4.12)$$

де  $a$  і  $\sigma^2$  – відповідно математичне сподівання і дисперсія пробігу (напрацювання) вантажного вагона до відмови для нормального закону розподілу, які визначаються на основі змін технічного стану;

$a_{j-1}$ ,  $a_j$  – дискретні значення пробігу (напрацювання) вантажного вагона до відмови в інтервалі від 0 до  $a_{max}$  з кроком  $\Delta = a_{max}/N$ ;  $A_j$  – точка, для якої визначена дискретна ймовірність  $A_j = (a_{j-1} + a_j)/2$ .

Описуючи функцію  $P(B|A_j)$  для вантажних вагонів, необхідно застосувати розподіл Вейбулла–Гнеденка [39], який з урахуванням дискретизації буде мати вигляд:

$$P(B|A_j) = \exp(-\lambda A_j^d), \quad (4.13)$$

де  $\lambda$  – параметр закону розподілу Вейбулла–Гнеденка;

$d$  – загальна кількість додаткових (накопичених) даних, що отримані за визначений проміжок пробігу (напрацювання).

Максимальне значення  $a_{max}$  необхідно вибирати з того, що точці  $a_{max}$  буде властива ймовірність з малим значенням, яким можна знехтувати, а також враховувати значення пробігу (напрацювання), для яких надано оцінку за додатковими даними.



Підсумовуючи вищезазначене, уточнюється значення напрацювання (пробігу) вантажного вагона до відмови на основі виразу:

$$\hat{T} = \sum_{j=1}^N A_j P(A_j|B). \quad (4.14)$$

Покажемо як зміниться напрацювання (пробіг) вантажного вагона до відмови для п'ятникового вузла піввагона після КР при використанні виразу (4.14) (рис. 4.6).

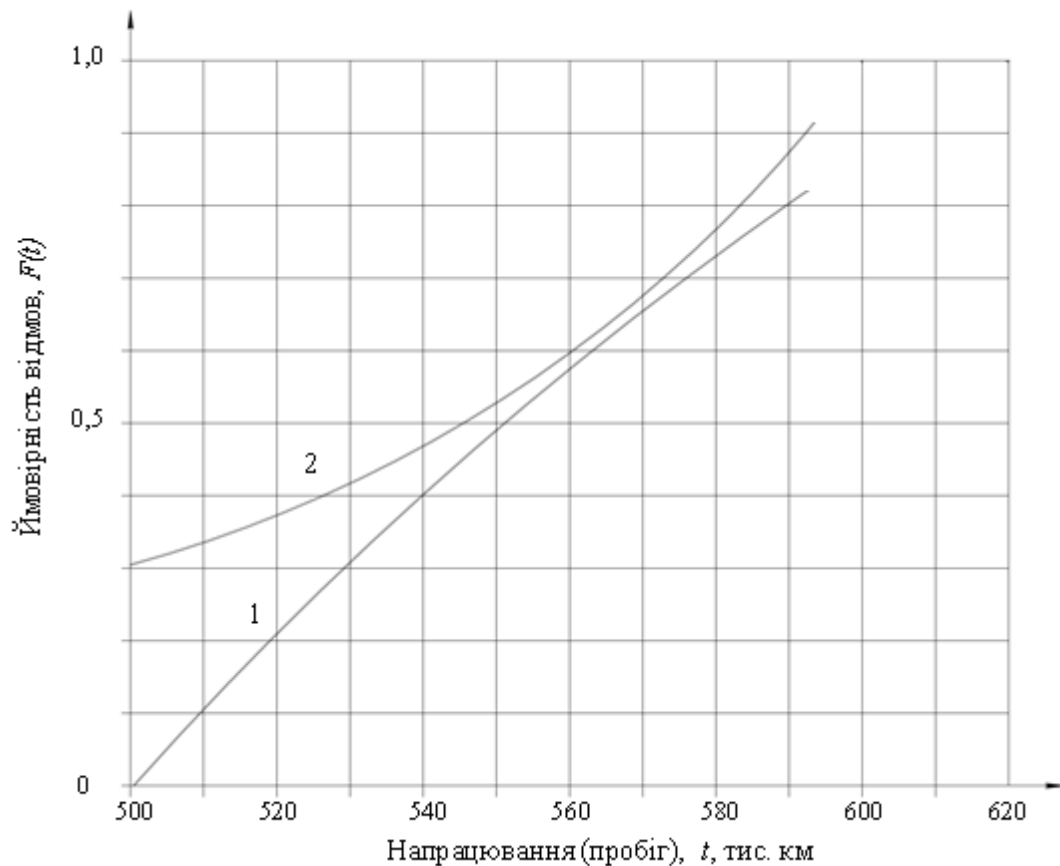


Рисунок 4.6 – Залежності ймовірності відмови п'ятникового вузла піввагона після КР від пробігу: 1 – при звичайній оцінці (відновлення ресурсу); б – при використанні виразу (4.9)

Крива 1 (рис. 4.6) побудована на основі обробки статистичних даних щодо відмов вантажних вагонів Укрзалізниці [159].

З рис. 4.6 (крива 2) спостерігається підвищене значення ймовірності відмов п'ятникового вузла після КР, і при напрацюванні 600 тис. км це значення стає критичним, про що не можна сказати при звичайній оцінці ймовірності відмов (крива 1). Останнє свідчить про те, що при визначенні ймовірності відмов п'ятникового вузла не враховується інформація про попереднє втомне руйнування і зміни, що відбулись до КР піввагона. На відміну від цього, вираз (4.14) урахує зміну фізико-механічних характеристик складових елементів п'ятникового вузла піввагона після проведення КР.

Для формування бази даних необхідно підготувати вихідні дані про технічний стан вантажних вагонів (табл. 4.2). Дані, наведені в табл. 4.2 і в наступних таблицях, отримані зі звітів вагонних депо Укрзалізниці та в результаті обробки статистичних даних.

Таблиця 4.2 – База вихідних даних про технічний стан вантажних вагонів

Модель вагона	Номер вагона	Рік побудови	Пробіг з початку експлуатації / після ТО / ремонту, тис. км	Вид і дата останнього ТО / ремонту	Дата планового виду ремонту	Пункт технічного огляду / обслуговування / ремонту	Несправність / відмова					Виконані технічні впливи	Пропозиції з модернізації
							Ходова частина	Гальмівна система	Кузов	Автомобільне	Інше		
12-1905	62139860	2014	189 / 0,5 / -	ТР-4 03.06.2015 / -	15-20.06.2018 - ДР-1	ВЧДЕ-7	Гострокінцевий накат гребенів колісних пар	Граничний знос гальмівних колодок	Обрив петлі люка	-	-	Відчеплення в ремонт	
12-7023	54147652	2010	335 / 1,0 / 125	ДР-1 05.11.2016	04-15.12.2019 – ДР-2	4187- Нижньодніпровськ-Вузол-ВЧДЕ / -	Нагрів буксового вузла	Повітродозподільник	Розширення кузова	-	Відрвана драбина	Відчеплення в поточний ремонт	Використання стандартних деталей в буксових вузлах
12-1905	62139837	2014	181 / 0,4 / -	ТР-4 15.01.2015	12-19.08.2017 - ДР-1	ВЧДЕ-3	Задири на лабиринтному кільці буксового вузла	Не відрегульована гальмівна важільна передача	Несправність механізму розвантажувального люка	-	-	Відчеплення в поточний ремонт	Використання якісних витратних матеріалів

Структуру бази вихідних даних до табл. 4.2 зручно представити у вигляді таких масивів інформації:

М-1 – масив орієнтований на визначення функції витрат на ТО і Р (табл. 4.3);

М-2 – масив орієнтований на оптимізацію ТО і Р (табл. 4.4);

М-3 – масив орієнтований на визначення величини потужності ремонтного господарства вагонів відповідного типу, який формується за даними паспортів вагонних депо Укрзалізниці;

М-4 – масив орієнтований на визначення додаткового діагностування вузлів вагонів залежно від року побудови (табл. 4.5).

Таблиця 4.3 – Вартісні показники й нормовані значення параметрів експлуатації вагонів

Найменування	Значення	Одиниці
Вартість піввагона без ПДВ	750000	грн
Ліквідна вартість піввагона	36000	грн
Норматив витрат на ДР	48000	грн
Норматив витрат на КР	77000	грн
Норматив витрат на ПР-2	12000	грн
Коефіцієнт технологічного запасу потужності ремонтного господарства	1,2	-
Параметр безпеки (безвідмовності) вагона	17	міс.
Довжина гарантійної ділянки ПТО	107	км
Оборот піввагона	12,6	доба
Потужність ремонтного господарства (ДР)	120 000	ваг./рік
Коефіцієнт точності визначення потреби в ДР піввагонів	0,1	-

Таблиця 4.4 – Показники надійності піввагонів у експлуатації

№	Найменування
1	Функція розподілу напрацювання вагона для знаходження небезпечної відмови, що може призвести до великих фінансових витрат. Це такі відмови, за якими може відбутись транспортна подія поїзда
2	Функція розподілу тривалості періоду між моментами появи й знаходженням небезпечної відмови
3	Середньостатистичні витрати часу на підтримку технічного стану вагона

Таблиця 4.5 – Масив даних про рік побудови вагонів

Рік виготовлення	Криті вагони	Платформи	Піввагони	Цистерни	
				4-вісні	8-вісні
1982	608	1269	153	608	8
1983	250	572	22	1697	0
1984	433	509	39	2193	4
1985	699	906	59	3059	7
1986	832	1189	60	3562	9
1987	1073	1385	96	3906	14
1988	1371	1470	122	3645	22
1989	5911	4721	196	3639	118
1990	7264	4936	458	3592	301
1991	6413	5563	1847	3917	314
1992	5907	5865	8877	3570	310
1993	5849	5484	12629	3637	298
1994	5508	3880	14467	3261	361
1995	5666	3414	15815	3039	494
1996	4403	3099	15465	2821	482
1997	3760	3102	15029	2445	414
1998	3471	2993	14892	2213	426
1999	3016	3102	14781	2741	482
2000	3300	3296	15406	3068	622
2001	3417	3713	15785	3170	714
2002	4059	3660	17040	2671	789
2003	2386	3293	16053	1914	572
2004	2042	3107	14762	2187	688
2005	1574	2847	14892	1916	716
2006	2783	2112	15269	663	278
2007	3910	130	9547	19	0
2008	2662	46	5951	103	0
2009	2183	8	3380	1535	0
2010	487	3	1864	4203	0
2011	296	0	2102	3969	0
2012	0	0	881	2220	0
2013	0	0	1055	855	0
2014	0	0	1107	450	0
2015	0	0	559	0	0

Тобто для бази вихідних даних можна записати модель у вигляді:

$$\text{БД} = \{M_1, M_2, M_3, M_4, M_5\}.$$

Бачимо, що моделю є кортеж, який постійно наповнюється проміжними даними.

Після завершення будівництва вагона в єдину базу вноситься інформація про вагон (дата і рік побудови, завод-виробник, тип, модель, реєстраційний номер, комплектація з відповідними обліковими номерами та ін.).

У процесі експлуатації вагонів підприємства з обслуговування (ПТО) і ремонту (вагонні депо, вагоноремонтні заводи) надають інформацію про всі відмови, пошкодження вагонів, про заміну деталей і вузлів, пробіг (порожній або у завантаженому стані). У результаті формується база, яка дозволить провести розрахунки й сформувані показники надійності як окремих деталей і вузлів, так і вагона в цілому. Залежно від запиту виводиться необхідна інформація, наприклад, залежно від року побудови вагона, заводу-виробника, терміну експлуатації та ін. Також можливим є порівняння однакових типів вагонів (деталей, вузлів), але різних виробників або в різні роки виробництва. Кількість досліджуваних об'єктів може бути необмеженою (від декількох десятків до кількох десятків тисяч одиниць). Ця інформація дозволить прийняти найбільш правильне рішення порівняно з існуючими методиками, де пропонується прийняти рішення за обмеженою кількістю досліджуваних об'єктів, але потрібних. Інформація в такому вигляді буде корисна як для виробників, УЗ, споживачів, так і для власників вагонів.

На підставі отриманих даних (табл. 4.2) формується таблиця показників надійності вантажних вагонів (табл. 4.6).

Таблиця 4.6 – Індивідуальні показники надійності моделей вантажних вагонів

Модель вагона	Кількість вагонів	Загальна кількість відмов / кількість відмов ресурсовизначальних елементів, од.	Поток відмов, од. / $10^6$ км пробігу	Інтенсивність відмов, $10^{-3}$ , од. / вагоно-год	Імовірність безвідмовної роботи вантажного вагона	
					при виявленні	після технічного впливу
12-7023	4000	15 / 2	79,3 / 10,6	1,4 / 0,2	0,9286	0,9988
12-132	2500	21 / 5	62,7 / 14,9	1,8 / 0,4	0,9282	0,9986
12-755	7800	17 / 3	93,9 / 16,5	1,6 / 0,3	0,9284	0,9987
*У чисельнику вказані значення для загальної кількості відмов, у знаменнику – значення відмов ресурсовизначальних елементів вантажних вагонів						

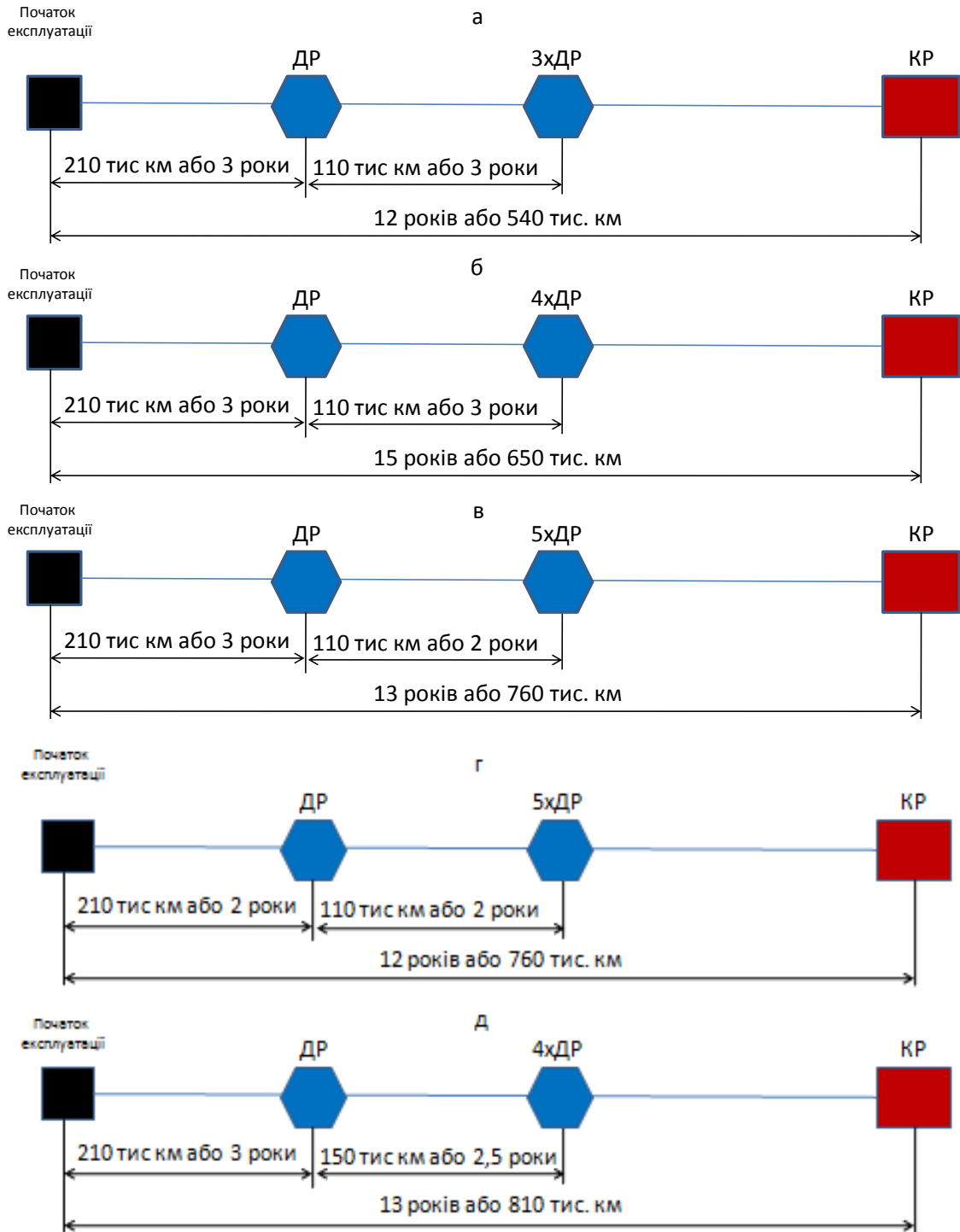
Відповідно до наведених у табл. 4.6 даних, допустимо встановлена норма імовірності безвідмовної роботи вантажного вагона становить 0,95, тому кожна відмова визначального вузла чи деталі впливає на показник імовірності, який розраховується за правилами теорії імовірностей, а кожен технічний вплив дозволяє підвищити загальну імовірність безвідмовної роботи вантажного вагона в цілому.

У результаті на кожному ПТО в комп'ютерну базу вносяться нові дані про відмови вантажних вагонів, на ремонтному підприємстві – вказуються усунені відмови. Нові сформовані дані впливатимуть на перерахунок індивідуальних показників надійності вантажних вагонів: кількості відмов, потоку й інтенсивності відмов та ймовірності безвідмовної роботи.

Граничне значення ймовірності безвідмовної роботи після здійснення технічних дій повинне відповідати значенню, більшому за нормативно встановлене при проектуванні, що дорівнює 0,95. У випадках менших значень потрібно звернути особливу увагу на ресурсовизначальні вузли вантажного вагона й направити в ремонт [24].

Відповідно до настанови [256] наведемо існуючу структуру ремонту вантажних вагонів (рис. 4.7). Тобто ця структура є основою для проведення ремонтів вантажних вагонів.

Слід зазначити, що норми виконання ДР і КР вантажних вагонів, що наведені в цій настанові ЦВ-0142, не відповідають установленим термінам заводів-виготівників. Тому до кожної моделі вагона слід підходити індивідуально [169].



а – криті універсальні; б – платформи універсальні; в – піввагони універсальні; г – цистерни для перевезення концентрованої сірчаної кислоти; д – рефрижератори 5-вагонна секція ЗА-5 та БМЗ

Рисунок 4.7 – Існуюча структура ремонту вантажних вагонів

Якщо використати запропоновану в роботі систему надійності, то структура буде змінюватись. Покажемо на прикладі моделі вагона 12-7023, яким чином буде змінюватись напрацювання й структура ремонту після внесення даних у систему надійності. Для цієї моделі піввагона встановлена така періодичність ремонту (рис. 4.8).

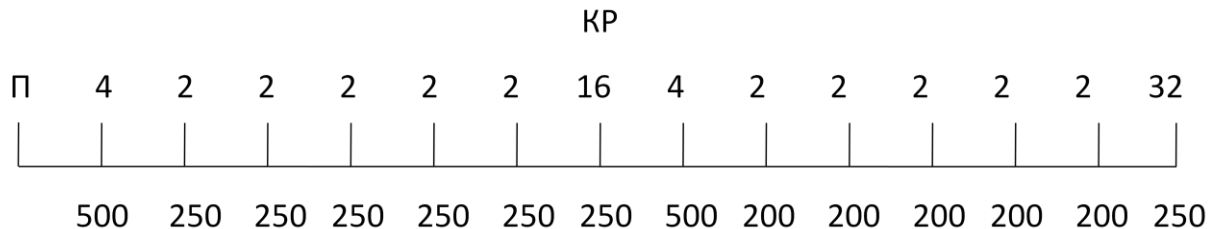


Рисунок 4.8 – Структура ремонту піввагона моделі 12-7023

З внесенням змін до системи надійності вантажних вагонів, тобто коли відбудеться зміна показників надійності, відповідно система запропонує таку періодичність і структуру для вагона моделі 12-7023 (рис. 4.9).

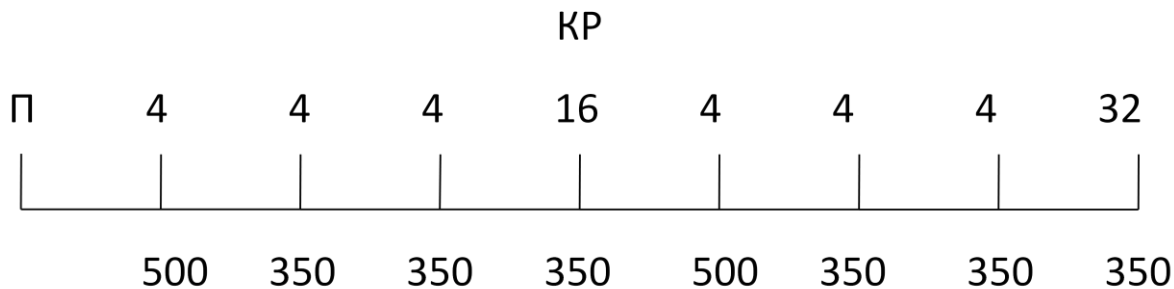


Рисунок 4.9 – Удосконалена система контролю за показниками надійності піввагона моделі 12-7023

З нової структури ремонту піввагона моделі 12-7023, побудованої за допомогою системи надійності [154], маємо такі результати. Структура ремонту була:

12 ДР + 1КР,

а стала:

6 ДР + 1КР.



В існуючому варіанті за весь життєвий цикл піввагон моделі 12-7023 має 13 технічних впливів ремонтного характеру, у запропонованому варіанті – 7 таких впливів. Тобто піввагон моделі 12-7023 буде перебувати менше часу в ремонтному просторі.

Представимо модель забезпечення надійності вагона протягом життєвого циклу з урахуванням вище розроблених технічних та технологічних рішень на рис. 4.10.

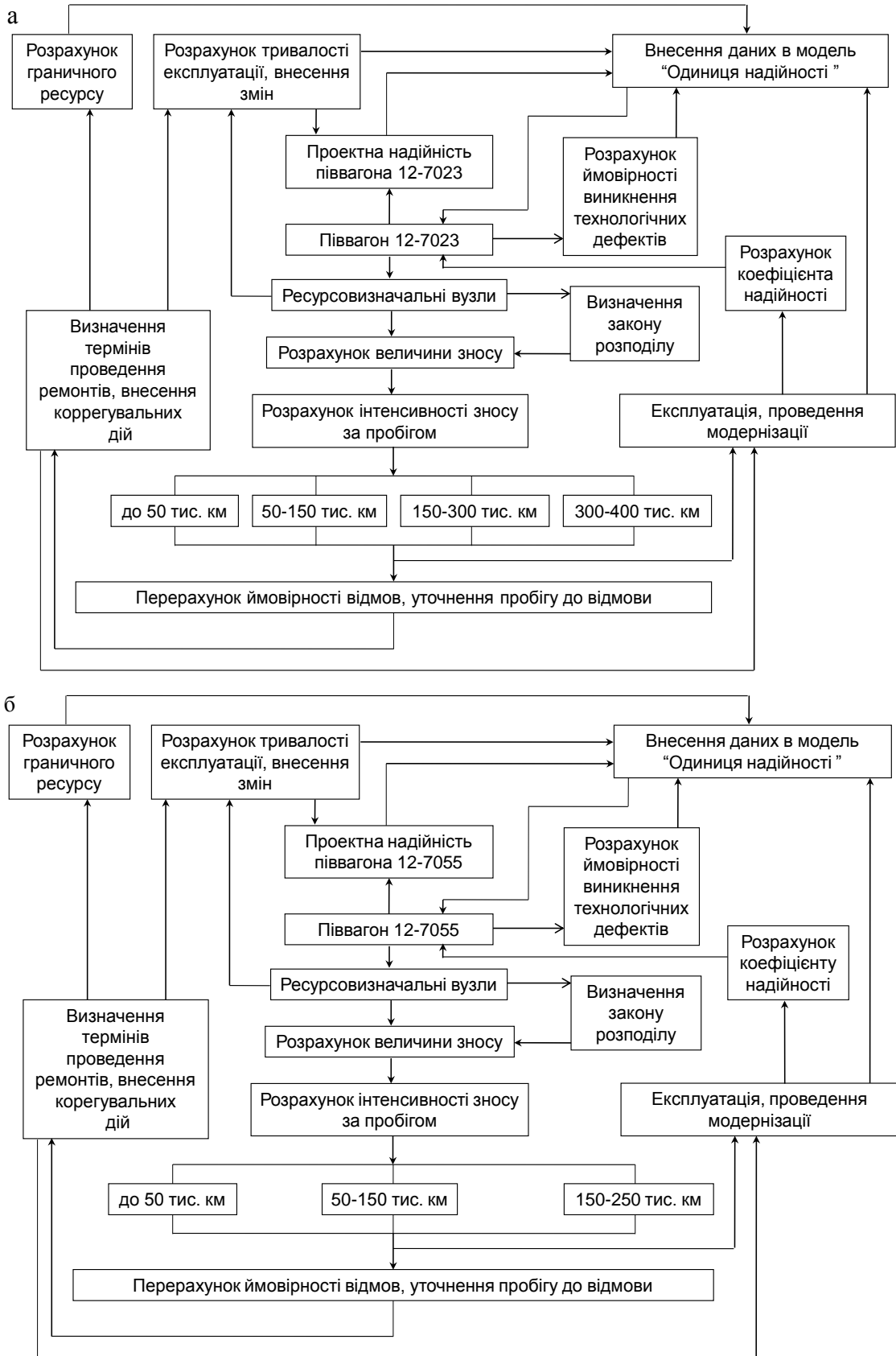


Рисунок 4.10 – Схема формування статистичної індивідуальної моделі вантажного вагона на етапах життєвого циклу із забезпеченням необхідного рівня надійності

Використовуючи структурну модель для піввагона 12-7023 на етапах життєвого циклу (рис. 4.10), при постійному корегуванні всіх

експлуатаційних показників досягається забезпечення міжремонтного пробігу даних моделей піввагонів з імовірністю 95 %. При цьому на будь-якому етапі експлуатації вантажного вагона можуть бути внесені зміни в конструкцію, технологію виготовлення, тобто виконання модернізації з подальшим перерахунком показників надійності та з подальшим корегуванням термінів проведення технічного обслуговування та ремонту, що знов приводить до необхідності перерахунку показників надійності окремих моделей вантажних вагонів.

Також, для піввагонів 12-7023, 12-755 були сформовані структуровані індивідуальні моделі прогнозу показників надійності на основних етапах життєвого циклу для забезпечення необхідного рівня надійності (рис. 4.11).



а – 12-7023, б – 12-7055

Рисунок 4.11 – Структурована індивідуальна модель прогнозу показників надійності на основних етапах життєвого циклу піввагонів

Модель надійності для життєвого циклу вантажного вагона детально включає окремі математичні моделі на етапі проектування, етапі експлуатації з можливістю проведення модернізації окремих вузлів чи деталей до повної утилізації всієї конструкції вагона.

У результаті можна сформулювати модель надійності для життєвого циклу вантажного вагона окремої моделі. Конкретно для моделі піввагона 12-7023 наведемо сформовані індивідуальні показники надійності на основних етапах життєвого циклу:

- на етапі проектування:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 M(m) = N\lambda t \\
 R_{\tau}(z) = (\tau - \int_0^{\tau} \int_0^x F(x-y)d\Phi(y)dx + (M\gamma_3 - M\gamma_2)) \int_0^{\tau} F(\tau-x)d\Phi(x) + M\gamma_1 + \\
 + (M\gamma_2 - M\gamma_1)F(\tau)^{-1} \int_0^{\tau} \bar{F}(x+z)dx; \\
 K(\tau) = R_{\tau}(0); \quad P(\tau) = \frac{\int_0^{\tau} F(x)dx - \int_0^{\tau} \int_0^x F(x-y)d\Phi(y)dx}{\int_0^{\tau} \bar{F}(x)dx} + \\
 + \frac{(M\gamma_3 + M\gamma_2) \int_0^{\tau} F(\tau-x)d\Phi(x) + M\gamma_1 + (M\gamma_2 - M\gamma_1)F(\tau)}{\int_0^{\tau} \bar{F}(x)dx}; \\
 T = \sum_{j=1}^N A_j P(A_j|B).
 \end{array} \right.$$

- на етапі експлуатації для ресурсовизначальних елементів піввагона:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\Delta} = \int_0^{\infty} f(\Delta, F) \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{F - \bar{F}}{2\sigma^2}\right) \cdot dF; \\ f(\Delta) = \frac{\sqrt{\mu}}{V_i t \sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(\Delta - t)^2}{2V_i^2 \mu t}\right]; \\ \text{ReliabilityUnit}(H, E, CM, ACM); \\ E = \{mp_j, ctx_k, ctxScl_s, intervalT_b, interval_l, mrk_n, mdl_c, dev_h\}; \\ \text{interval}T_b \in \text{Interval}T = \{IntervalFrom, IntervalUpTo\}; \\ F(H) = f(interval_l) = \frac{1}{1 + e^{-x}}; \\ K_{en}^t = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n P_i}; \quad K_{en}^p = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}. \end{array} \right.$$

- на етапі модернізації гальмівних колодок:

$$\left\{ \begin{array}{l} -c\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = H - RT \\ \left\{ \begin{array}{l} T(x, y, z)|_{t=0} = f_0(x, y, z) \\ \lambda \nabla T = \frac{d^2 Q}{dS dt} n \\ \lambda \nabla T = f(T - T_0) n \\ d^2 Q = HdVdT \\ d^2 Q = -RTdVdT \end{array} \right. \\ WT \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) + C \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) + MT = U + P_G - H_M T + H_0. \end{array} \right.$$

- на подальшому етапі експлуатації піввагона:

$$\left\{ \begin{aligned}
 \bar{\Delta} &= \int_0^{\infty} f(\Delta, F) \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{F - \bar{F}}{2\sigma^2}\right) \cdot dF; \\
 f &= \frac{\sqrt{\mu}}{V_i t \sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(t - \tau)^2}{2V_i^2 \mu t}\right]; \\
 T &= \sum_{j=1}^N A_j P(A_j | B); \\
 t_{xp} &= \frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^n \bar{t}_i \pm \sum_{i=1}^n k_{ii} \sigma_{ii} + \sum_{i=1}^n t_{pi} P_i(\tau) R_{ii}(z) \pm \sum_{i=1}^n k_{ii} \sigma_{pp} \right) K_i; \\
 R(z) &= \frac{\int_0^{\tau} \prod_{i=1}^N \left[ P_i(x+z) + \int_0^x P_i(x+z-y) dH_i(y) \right] dx}{\tau + T_m + \sum_{i=1}^N t_i H_i(\tau)}; \\
 K &= \tau \left[ \tau + T_m + \sum_{i=1}^N H_i(\tau) t_i \right]^{-1}; \\
 P(\tau) &= \frac{\int_0^{\tau} F(x) dx - \int_0^{\tau} \int_0^x F(x-y) d\Phi(y) dx}{\int_0^{\tau} \bar{F}(x) dx} + \\
 &+ \frac{(M\gamma_3 + M\gamma_2) \int_0^{\tau} F(\tau-x) d\Phi(x) + M\gamma_1 + (M\gamma_2 - M\gamma_1) F(\tau)}{\int_0^{\tau} \bar{F}(x) dx}; \\
 K_{en}^t &= \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n P_i}; \\
 K_{en}^P &= \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}.
 \end{aligned} \right.$$

Результати наведеної моделі можна представити порівняльною діаграмою (рис. 4.12). Також на діаграмі зображено моделювання показників надійності для ресурсовизначального елемента піввагона – кузова.

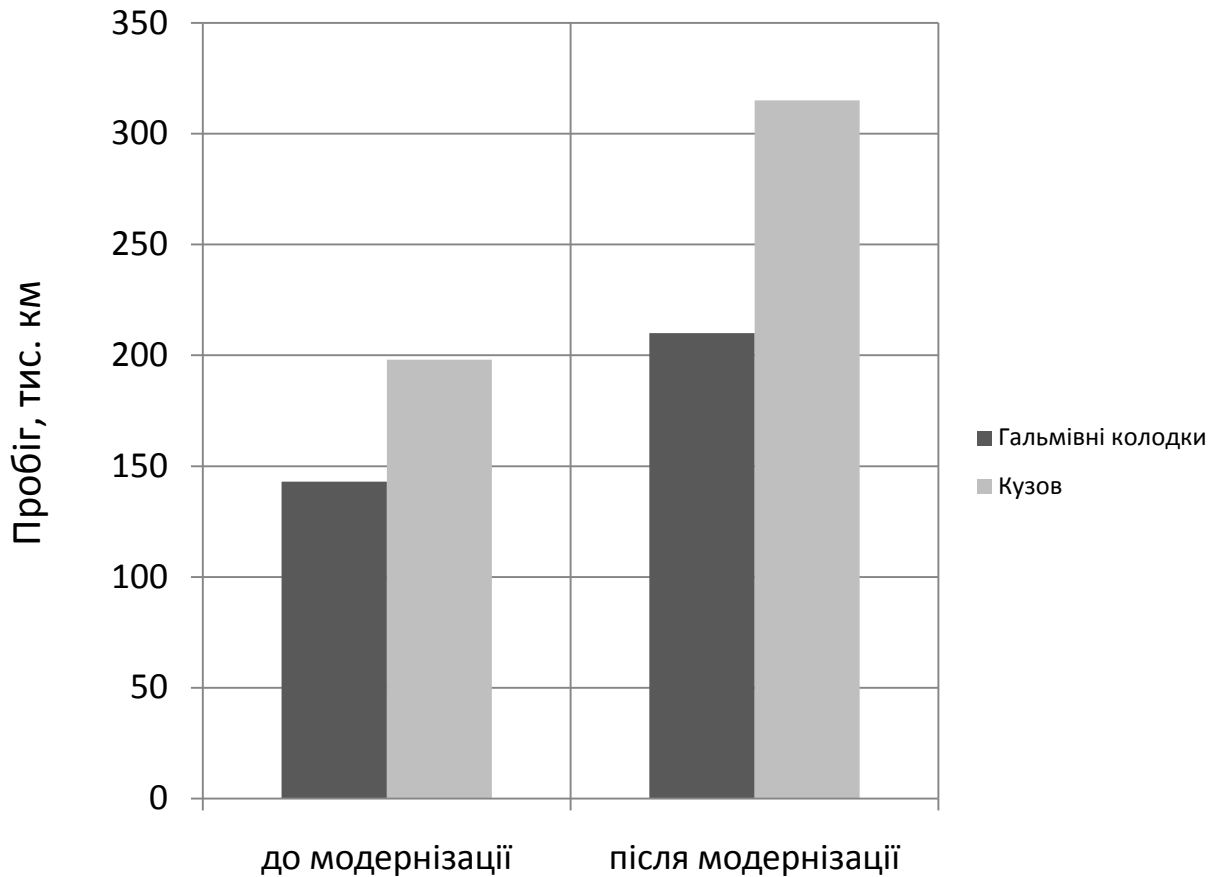


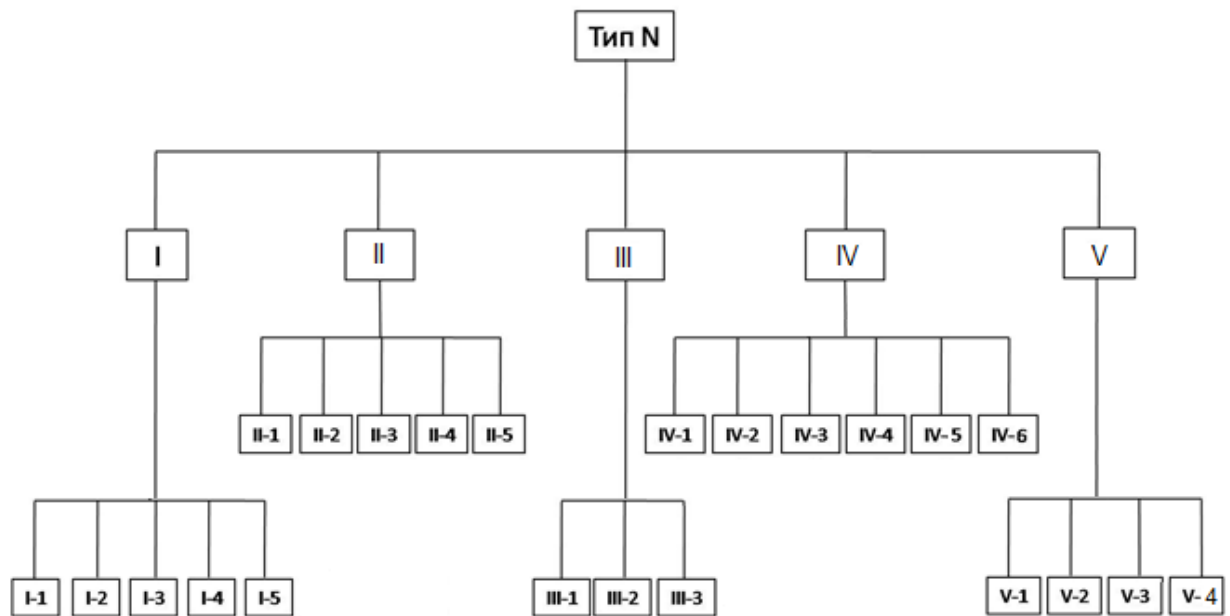
Рисунок 4.12 – Результати моделювання показників надійності піввагона 12-7023 на етапах життєвого циклу

Використовуючи дану модель, при пробігу 147 тис. км було запропоновано замінити гальмівні колодки на нові з виконанням розрахунків, що запропоновані в роботі. Крім того, на пробігу 193 тис. км внесено зміни до технологічного процесу виготовлення кузова як ресурсовизначального вузла. У результаті досягнуто подовження міжремонтного ресурсу до ДР до 350 тис. км пробігу, що є підтвердженням новизни й життєздатності розроблених моделей, які включені до структурованої індивідуальної моделі прогнозу показників надійності на основних етапах життєвого циклу піввагона.

Для встановлення впливу конструктивних особливостей вагона на його надійність (ймовірність безвідмовної роботи) побудуємо загальну модель вагона з позиції структурних складових.

Тобто залежно від кількості конструктивних структурних вузлів відповідно буде і складатись загальна модель вагона за конструктивними особливостями.

Тоді для побудови структурної схеми за елементами вагона загальної моделі включимо структурні елементи вузлів вагона (рис. 4.13).



I – візки; II – гальмівне обладнання; III – ударно-тягові пристрої; IV – кузов; V – рама

Рисунок 4.13 – Структурна схема вагона моделі N

З рис. 4.13 можна бачити, що в кожного вузла вагона є окрема кількість структурних елементів, які й будуть впливати на надійність вагона в цілому.

Побудуємо структурну схему на прикладі піввагона моделі 12-7023 (рис. 4.14), що дозволить встановити вплив конструктивних особливостей на надійність вагона



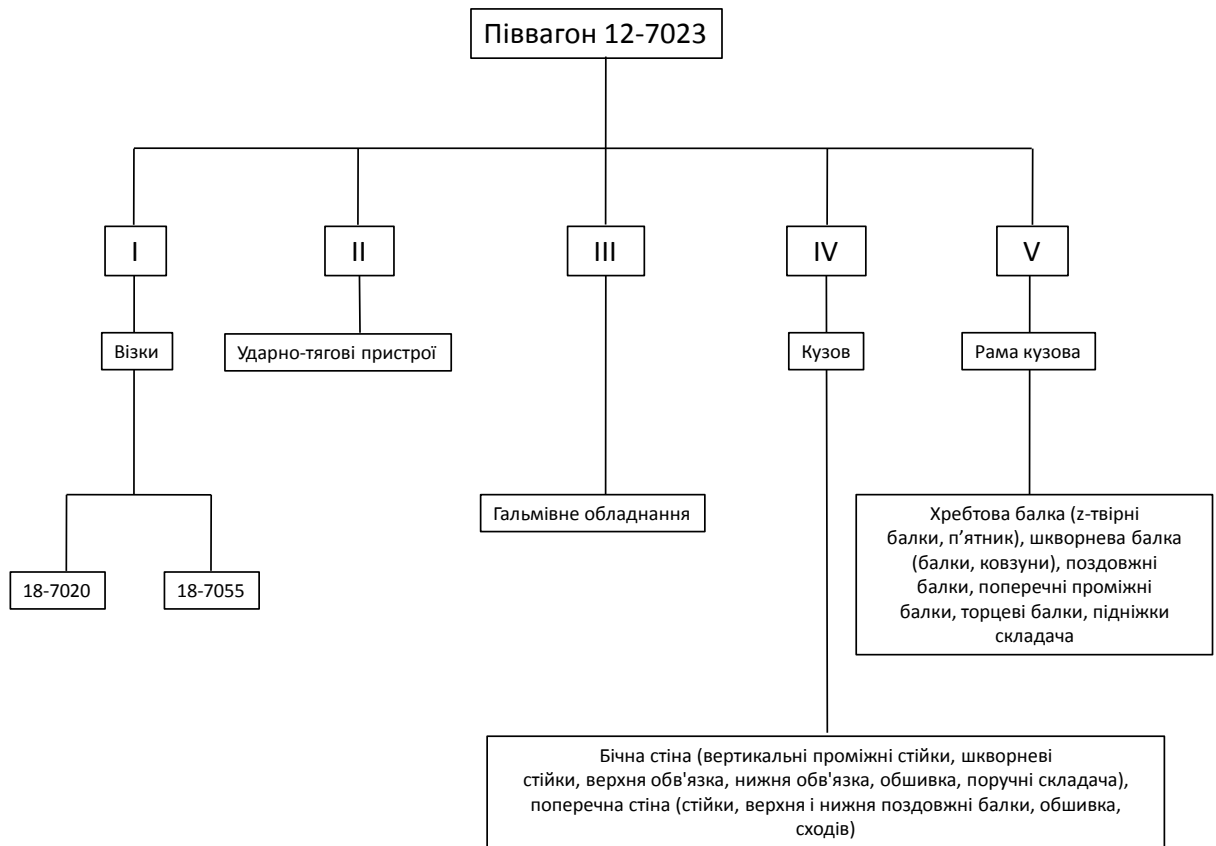


Рисунок 4.14 – Структурна схема піввагона моделі 12-7023

Кожен вузол піввагона має свою структуру. Візок моделі 18-7023 – механічна система, що складається з шістнадцяти послідовно з'єднаних елементів: надресорної балки, шкворня, державки мертвої точки, двох ковзунів, двох ресорних комплектів, двох бічних рам, чотирьох букс, двох колісних пар, гальмової важільної передачі. Візок – система, що яка складається зі змішано з'єднаних елементів, тобто паралельно і послідовно з'єднані елементи. Відповідно вагон має вірогідність безвідмовної роботи, на яку впливає вірогідність безвідмовної роботи кожного елемента.

Як приклад на рис. 4.15 зображено структурну схему візка 18-100, що була розроблена.

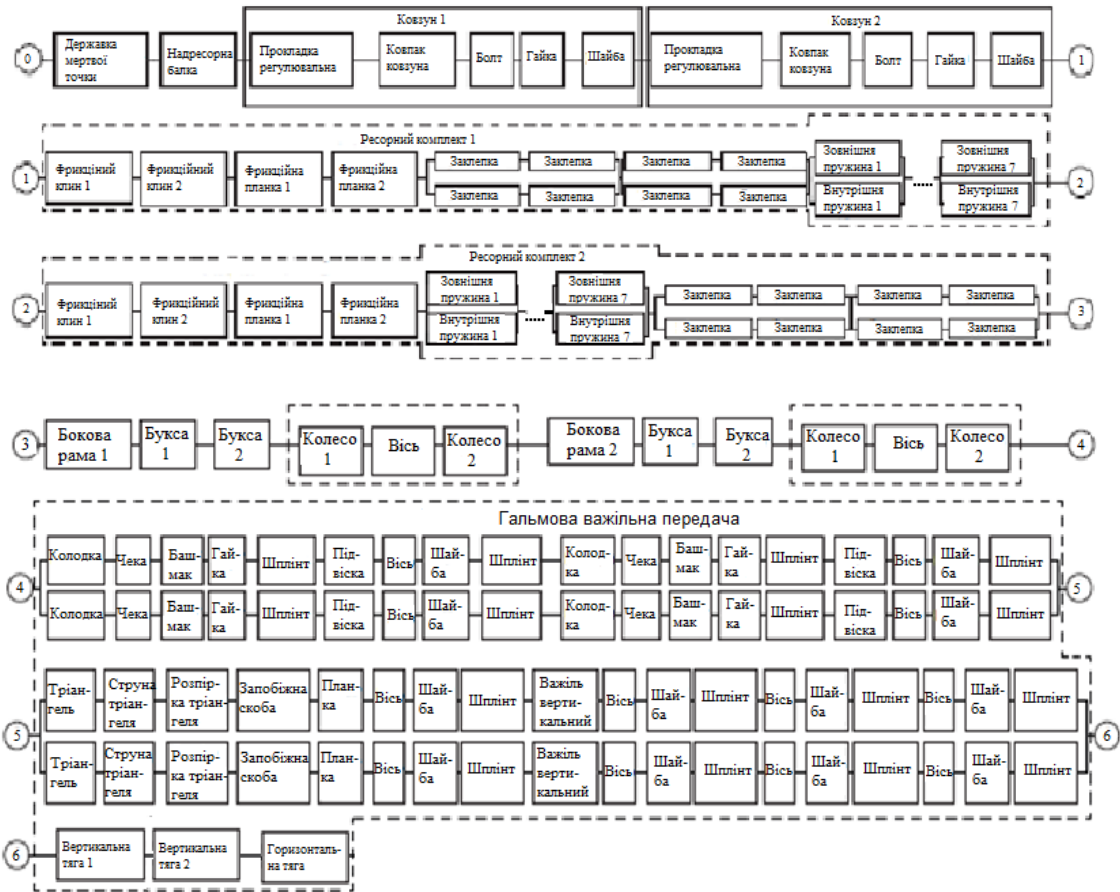


Рисунок 4.15 – Структурна схема візка вантажного вагона моделі 18-100

Складовою частиною візка 18-100 є букса. Букса – це система, що складається з декілька з’єднаних елементів: корпус букси, лабіринтне кільце, підшипник задній, підшипник передній, упорне кільце, кріпильна кришка, болти, шайби, оглядова кришка, гумова прокладка, торцева шайба. Структурна схема вагонної букси наведена на рис. 4.16.

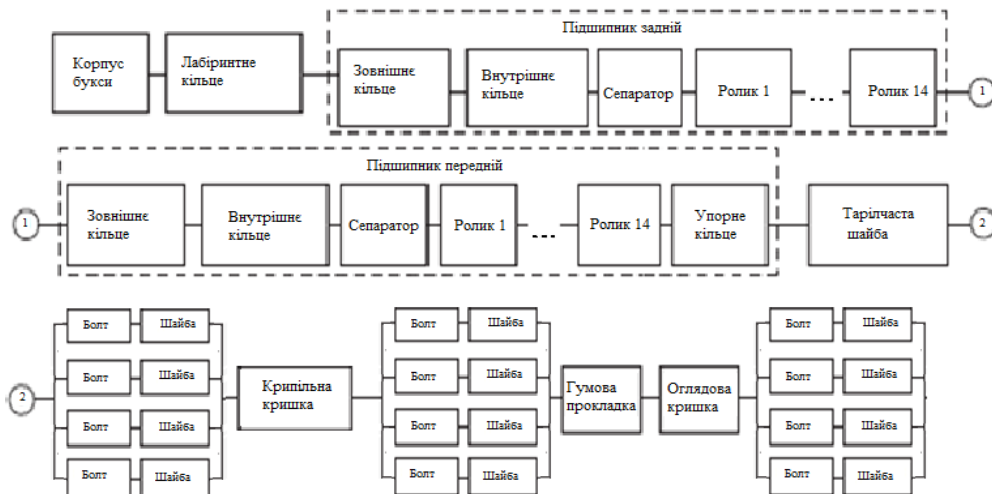


Рисунок 4.16 – Структурна схема вагонної серійної букси

Для встановлення впливу конструктивних особливостей елементів вузлів наведемо приклади залежностей ймовірності безвідмовної роботи від напрацювання піввагонів моделі 12-7023.

Наприклад, для структурного елемента I – візка (див. рис. 4.15), до якого входить декілька елементів, наведемо на рис. 4.16 розподіл ймовірності безвідмовної роботи від напрацювання з певними дефектами, де цифри 101, 102, 105, 108, 109 позначають код несправності згідно з відповідним класифікатором несправностей вагона.

Бачимо, що виникнення відмов чи дефектів у візках піввагона 12-7023 (рис. 4.17) призводить до необхідності проведення передчасних ремонтів, ніж через 4 роки, тобто потрібно звернути увагу на дані відмови й виконати певні технічні дії.

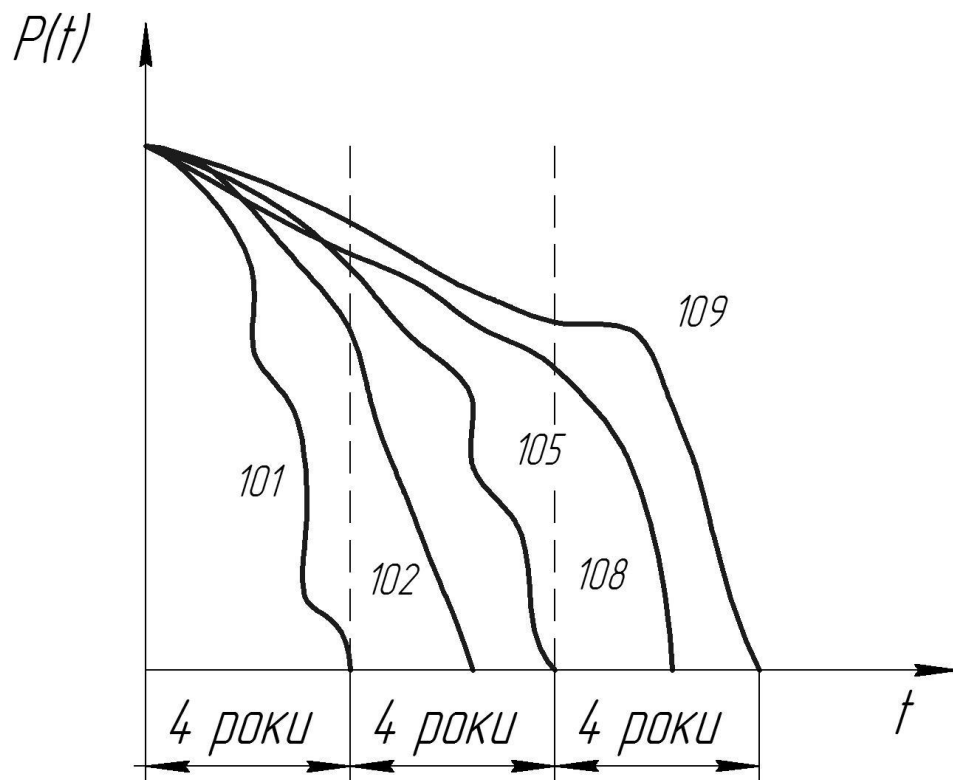


Рисунок 4.17 – Розподіл ймовірності безвідмовної роботи від напрацювання з певними дефектами візків піввагона моделі 12-7023

Розподіл ймовірності безвідмовної роботи структурного елемента візка піввагона моделі 12-7023 залежно від напрацювання наведений на рис. 4.18.

Бачимо, що елементи візка I-2...I-6 не можуть працювати до регламентного ремонтного циклу, тобто їх міжремонтний ресурс менше встановленого (4 роки). Тому на ці елементи необхідно звернути увагу й провести модернізацію для підвищення їх міжремонтного ресурсу з метою вкладання в структуру проведення ремонтів, що відповідно буде мати вплив на сумарну вартість експлуатації вагона і в кінцевому випадку – на остаточну вартість вагона протягом усього життєвого циклу.

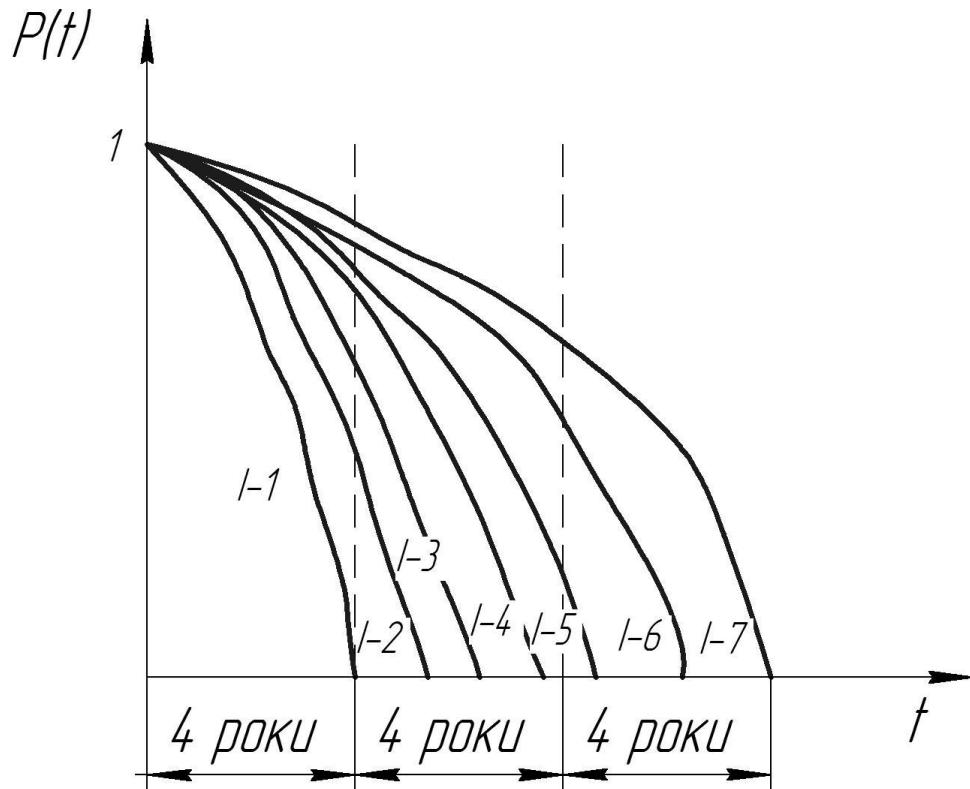
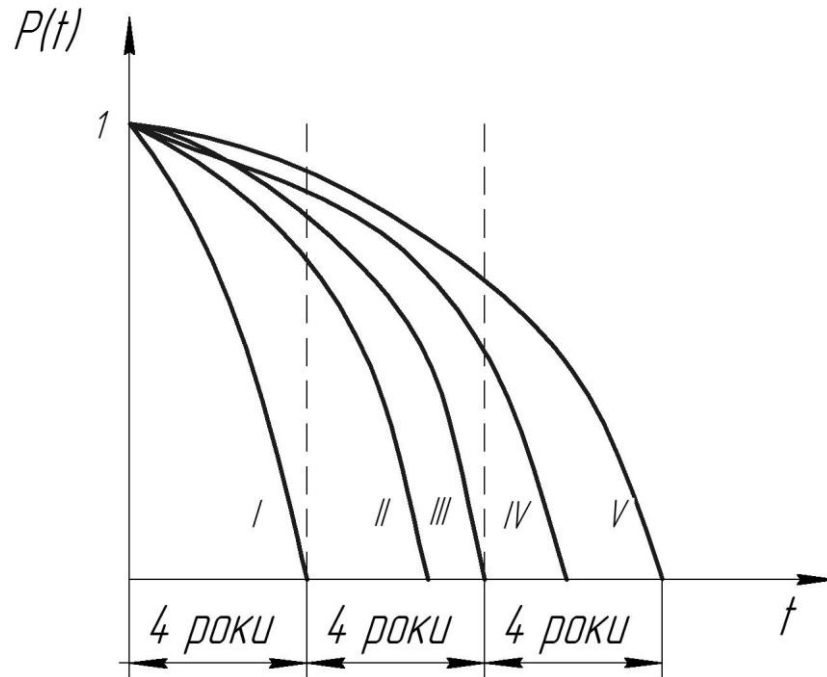


Рисунок 4.18 – Розподіл ймовірності безвідмовної роботи структурного елемента візка піввагона 12-7023 залежно від напрацювання

На рис. 4.18 для кожного структурного вузла піввагона 12-7023 приведено залежності ймовірності безвідмовної роботи від напрацювання.

Як для окремих елементів вузлів, так і для вузлів вагона в цілому (рис. 4.19) характерна картина нестачі міжремонтного ресурсу. Так, ударно-тягові пристрої та кузови вагонів потребують передчасного ремонту, аніж через 4 роки, тобто ці вузли необхідно модернізувати. Стосовно кузовів вагонів можливе застосування антикорозійних покриттів з подальшим більш

якісним фарбуванням, що призведе до зниження корозійних пошкоджень і, як наслідок, до підвищення ймовірності безвідмовної роботи вагона в цілому.



I – візок; II – ударно-тягові пристрої; III – гальмівна система; IV – кузов; V – рама

Рисунок 4.19 – Залежності ймовірності безвідмовної роботи структурних вузлів піввагона 12-7023 від напрацювання

Показники експлуатаційної надійності піввагонів моделі 12-7020 на візках моделей 18-7020 та 18-7055 можна оцінити за допомогою розрахунку експериментальних даних, що були отримані під час їх підконтрольної експлуатації.

У таблиці 4.7 наведені нормативні [84, 87, 187] та розрахункові [149, 45, 2116, 217, 218] коефіцієнти відмов уніфікованих складових частин і елементів стосовно конструкції піввагона моделі 12-7023. При цьому вказані дані про експлуатацію після чотирьох та восьми років підконтрольної експлуатації піввагонів 12-7023 як на візках моделей 18-7020, так і на візках 18-7055 [7].

Таблиця 4.7 – Коефіцієнти (частки) відмов уніфікованих складових частин  $\overline{\Delta\varpi}_i$  та елементів  $\overline{\Delta\varpi}_{ji}$  піввагона 12-7023

№ пор.	Найменування розрахункової частини та елемента	Нормативні дані		Розрахункові величини			
				На візках 18-7020		На візках 18-7055	
		$\overline{\Delta\varpi}_i$ (1/10 <sup>5</sup> км)	$\overline{\Delta\varpi}_i$ (1/10 <sup>5</sup> км)	4 р. (1/10 <sup>5</sup> км)	8 р. (1/10 <sup>5</sup> км)	4р. (1/10 <sup>5</sup> км)	8р. (1/10 <sup>5</sup> км)
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>1-0</b>	<b>Візок</b>	<b>0,45</b>	-	<b>0,1900</b>	<b>0,2550</b>	<b>0,2310</b>	<b>0,3860</b>
1-1	Колісна пара	-	0,6400	0,3200	0,5210	0,4600	0,6010
1-2	Букса	-	0,3500	0,0080	0,0120	0,0460	0,0820
1-3	Бокова рама	-	0,0010	0,0005	0,0008	0,0008	0,0009
1-4	Надресорна балка	-	0,0012	0,0008	0,0009	0,0011	0,0012
1-5	Ресорний комплект	-	0,0073	0,0070	0,0071	0,0064	0,0070
<b>2-0</b>	<b>Гальмове обладнання</b>	<b>0,10</b>	-	<b>0,0110</b>	<b>0,0120</b>	<b>0,0140</b>	<b>0,0180</b>
2-1	Тріангель	-	0,0500	0,0460	0,0480	0,0410	0,0480
2-2	Башмак-підвіска	-	0,0900	0,0600	0,0730	0,0580	0,0729
2-3	Важільна передача	-	0,0400	0,0230	0,0340	0,0230	0,0340
2-4	Гальмові пристрої	-	0,1300	0,0700	0,0820	0,0700	0,0820
2-5	Грубопровід, рукава, арматура	-	0,6400	0,09	0,219	0,091	0,222
<b>3-0</b>	<b>Ударно-тягові пристрої</b>	<b>0,08</b>	-	<b>0,0162</b>	<b>0,0231</b>	<b>0,0160</b>	<b>0,0230</b>
3-1	Корпус автозчепу в зборі	-	0,7500	0,4200	0,5100	0,4200	0,5130
3-2	Тяговий хомут та клин	-	0,0200	0,0140	0,0150	0,0136	0,0149
3-3	Поглиналильний апарат	-	0,2300	0,1200	0,1800	0,1200	0,1800
<b>4-0</b>	<b>Кузов</b>	<b>0,36</b>	-	<b>0,0800</b>	<b>0,2008</b>	<b>0,0820</b>	<b>0,2000</b>
4-1	Стійки шкворневі	-	0,0200	0,0100	0,0140	0,0100	0,0141
4-2	Стійки кутові	-	0,1000	0,2300	0,3300	0,2300	0,3290
4-3	Стійки проміжні	-	0,0300	0,0200	0,0260	0,0210	0,0260
4-4	Двері торцеві	-	0,5000	0,3800	0,4800	0,3760	0,4800
4-5	Люки розвантажувальні	-	0,2300	0,1500	0,2200	0,1500	0,2186
4-6	Верхня обв'язка та інші пристрої	-	0,1200	0,0900	0,1100	0,0890	0,1120
<b>5-0</b>	<b>Рама</b>	<b>0,01</b>	-	<b>0,0040</b>	<b>0,0070</b>	<b>0,0040</b>	<b>0,0680</b>
5-1	Балка хребтова в зборі	-	0,010	0,0028	0,003	0,0030	0,0030
5-2	Балки шкворневі	-	0,600	0,0500	0,056	0,050	0,0590
5-3	П'ятники і підп'ятники	-	0,1300	0,1110	0,118	0,1170	0,1250
5-4	Брус лобовий та поперечні балки	-	0,2500	0,095	0,125	0,094	0,1250

На підставі отриманих експериментальних даних було побудовано матриці, яка складається з п'яти рядків (по кількості основних вузлів вагона). Кожний рядок матриці містить ймовірності безвідмовної роботи окремих елементів вузлів вагона. Покажемо на прикладі піввагона 12-7023, яким чином буде змінюватись матриця протягом експлуатації.

Для піввагона 12-7023 після 4 років експлуатації матриця буде мати такий вигляд:

$$\begin{bmatrix} 0,9984 & 0,9979 & 0,9985 & 0,9967 & 0,9987 \\ 0,9999 & 0,9974 & 0,9989 & 0,9964 & 0,9983 \\ 0,9987 & 0,9978 & 0,9984 & 0,9968 & 0,9981 \\ 0,9981 & 0,9979 & 0,9988 & 0,9967 & 0,9982 \\ 0,9984 & 0,9989 & 0,9983 & 0,9968 & 0,0000 \\ 0,9983 & 0,0000 & 0,9982 & 0,0000 & 0,0000 \\ 0,9988 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \end{bmatrix}$$

Значення в матриці отримані при середньостатистичній обробці різних елементів піввагонів 12-7023, використовуючи правила і теореми теорії ймовірностей. Розкид значень був у межах  $\pm 7\%$ .

Ймовірність безвідмовної роботи нового піввагона 12-7023 буде дорівнювати:

$$P = 0,9964.$$

Для піввагона 12-7023 після 8 років експлуатації матриця буде мати такий вигляд:

$$\begin{bmatrix} 0,9872 & 0,9912 & 0,9902 & 0,9912 & 0,9948 \\ 0,9843 & 0,9923 & 0,9901 & 0,9922 & 0,9954 \\ 0,9857 & 0,9931 & 0,9899 & 0,9918 & 0,9957 \\ 0,9868 & 0,9934 & 0,9892 & 0,9923 & 0,9959 \\ 0,9875 & 0,9939 & 0,9887 & 0,9921 & 0,0000 \\ 0,9874 & 0,0000 & 0,9894 & 0,0000 & 0,0000 \\ 0,9848 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \end{bmatrix}$$

Наведені значення отримані аналогічно як і в попередній матриці.

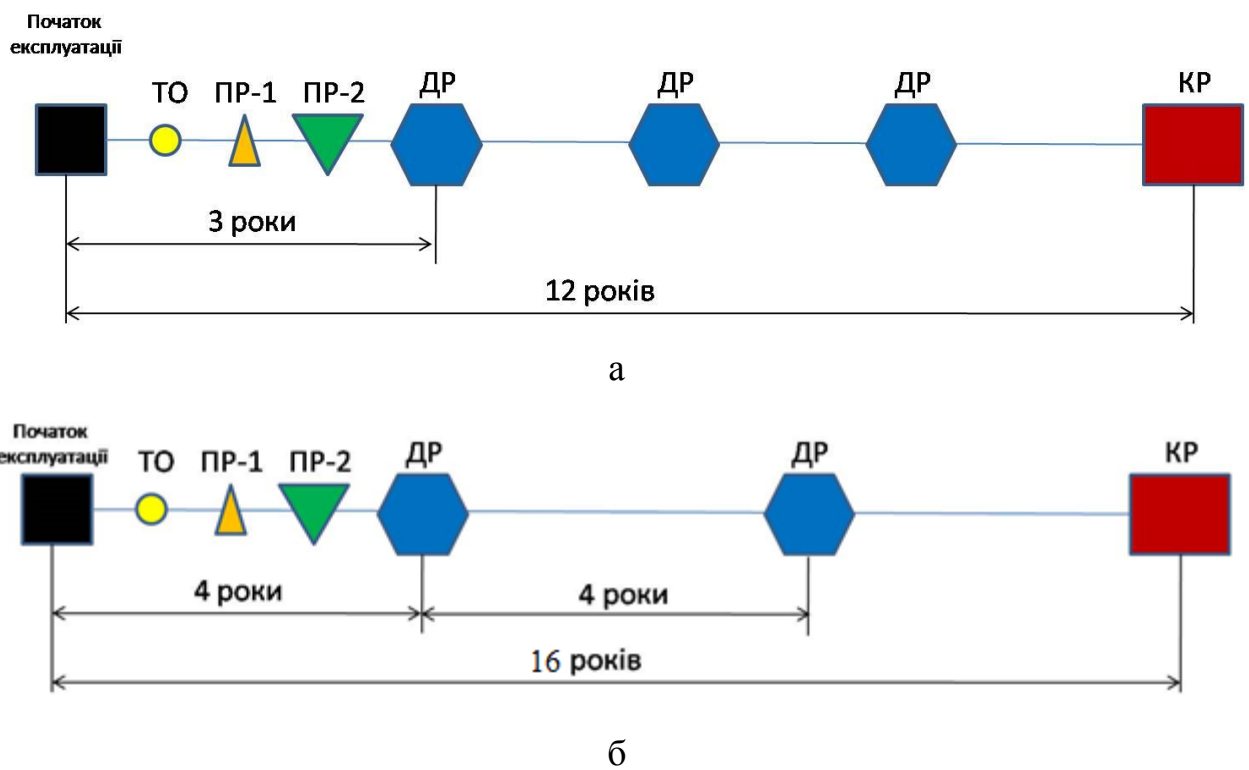
Ймовірність безвідмовної роботи піввагона 12-7023 після 8 років експлуатації буде дорівнювати:

$$P = 0,9843.$$

Як бачимо, значно впливають на зниження загальної ймовірності безвідмовної роботи піввагона 12-7023 деталі візка (перший стовпчик), тобто використання візків 18-7055 менш доцільне порівняно з візками 18-7020 (у даному випадку  $P = 0,967$ ).

Використовуючи наведені дані матриці для ресурсовизначальних елементів вузлів вагона, а конкретно дані кожного стовпця, можна підтримувати рівень надійності вагона на необхідному рівні, змінюючи чи модернізуючи окремі ресурсовизначальні складові відповідного вузла, тим самим досягти підвищення рівня безпеки руху поїздів. Тобто використання візків 18-7020 на піввагонах 12-7023 є більш доцільним і виправданим.

Підсумовуючи вищенаведене, структура ремонтів для піввагона 12-7023 з візками 18-7055 та 18-7020 буде мати такий вигляд (рис. 4.20).



а – 18-7055; б – 18-7020

Рисунок 4.20 – Структура ремонтів піввагона 12-7023 з візками

З наведених структур можна зробити висновок про меншу кількість технічних впливів (ремонтів) протягом життєвого циклу піввагона 12-7023 з візками 18-7020 порівняно з використанням візків 18-7055, тобто за техніко-



економічним критерієм доцільним є експлуатація піввагона 12-7023 з візками 18-7020.

Використання цієї методики дозволяє оптимізувати кількість ремонтів протягом життєвого циклу вагона відповідно до конструктивних особливостей і з урахуванням ймовірності безвідмовної роботи ресурсовизначального елемента вузла вагона.

#### **4.2 Створення системи дослідження показників надійності вантажних вагонів з урахуванням поточного технічного стану на етапах життєвого циклу**

Дослідженням у галузі розробки інтелектуальних систем присвячено безліч робіт таких авторів, як: Л. А. Заде, Дж. Кліру, Е. А. Мамдані, М. Сугено, Т. Тера, А. Кофман, Д. О. Поспелов, П. І. Ларичев, О. М. Аверкин, О. М. Борисов, І. З. Батиршін, А. П. Єремєєв, Р. А. Алієв, Л. С. Берштейн, С. М. Ковальов, В. І. Васильєв, І. Г. Сидоркин, В. Д. Соловйова, В. І. Глова, І. В. Анікіна та ін.

У процесі вирішення різних проблем, пов'язаних з надійністю рухомого складу залізниць і вантажних вагонів зокрема, використовується значна кількість джерел невизначеності інформації. Практично в кожному випадку є можливість розділити їх на дві категорії: недостатній рівень знання предметної сфери і недостатньо повна інформація про конкретну ситуацію.

У теорії предметної сфери [193, 199, 253] (тобто у наших знаннях про цю сферу) можуть бути використані концепції, що не мають чіткого формулювання, чи мало вивчені явища, а інформація є неповною. Наприклад, у процесі визначення можливих несправностей вантажних вагонів існують різні свідчення за непрямими ознаками, які можуть указувати на поломку різних вузлів, їх сполучень або деталей.

Внаслідок наявності невизначеності знань правила впливу часто не призводять до отримання адекватних результатів, навіть у найпростіших випадках. Не маючи повного знання, не можливо з упевненістю передбачити, який ефект отримаємо від здійснення тієї чи іншої дії. Навіть маючи достатньо повну теорію предметної сфери [32], дослідник може прийти до думки, що більш ефективно використовувати евристичні, ніж точні методи для прогнозування надійності вантажних вагонів.

Використання моделей подання нечітких знань актуально для формалізації знань, які описують якісні характеристики (наприклад, великий, сильний, дуже сильний, високий тощо) об'єктів предметної сфери, які інтерпретуються неоднозначно, але містять важливу інформацію [112, 198, 272, 276, 289].

У певному випадку можна обчислити ймовірність [120]:

$$P(d_i | e), \quad (4.15)$$

де  $d_i$  –  $i$ -та категорія відмов, а  $e$  – є всіма необхідними додатковими ознаками або фундаментальними знаннями, що використовує тільки ймовірності:

$$P(d_i | S_j), \quad (4.16)$$

де  $S_j$  є  $j$ -м спостереженням (симптомом або свідченням).

На основі правила Баєса [111, 256, 270, 287] виконуються такі обчислення у випадку, коли доступні всі значення  $P(d_i | S_j)$  і існує правдоподібність припущення про взаємну незалежність симптомів. Про це вказано у зазначеній літературі.

У системі досліджень надійності необхідно застосувати підхід, який полягає в застосуванні правил впливу.

Через  $P(h)$  позначимо суб'єктивне тлумачення, тобто те, що складено на основі висновків дослідника. Значення ймовірності  $P(h)$ , що гіпотеза  $h$  справедлива, тобто значення ймовірності в справедливості гіпотези  $h$  показує ступінь впевненості дослідника.

На користь цієї гіпотези додамо нову ознаку  $e$  і отримаємо [111, 185, 256, 270, 287]:

$$P(h|e) > P(h). \quad (4.17)$$

Ступінь довіри (відносна міра) дослідника збільшиться до справедливості гіпотези  $h$ , а математично виразиться таким відношенням:

$$МД(h, e) = \frac{P(h|e) - P(h)}{1 - P(h)}, \quad (4.18)$$

де  $МД$  – відносна міра довіри.

У разі свідчення ознаки  $e$  проти гіпотези  $h$ , тобто  $P(h|e) < P(h)$ , відбудеться збільшення міри недовіри  $МНД$  дослідника до справедливості такої гіпотези. Тоді міру недовіри  $МНД$  можна описати таким відношенням:

$$МНД(h, e) = \frac{P(h) - P(h|e)}{P(h)}. \quad (4.19)$$

У роботі [137, 211] здійснено визначення коефіцієнта впевненості в гіпотезі, який чисельно оцінює комбінацію рівня довіри чи недовіри до неї і обчислюється як різниця між мірою довіри і недовіри:

$$KB(h, e_1 \wedge e_2) = МД(h, e_2) - МНД(h, e_1), \quad (4.20)$$

де  $e_2$  – є ознакою, яка свідчить на користь гіпотези  $h$ , а  $e_1$  – навпаки, свідчить проти гіпотези  $h$ .

Отримане значення  $KB$  зовсім не є еквівалентним умовній ймовірності за умови  $e_1 \wedge e_2$  для існуючої гіпотези  $h$ , яка визначається з правила Баєса:

$$P(h | e_1 \wedge e_2) = \frac{P(e_1 \wedge e_2 | h)P(h)}{P(e_1 \wedge e_2)}. \quad (4.21)$$

У різних випадках можливе таке обернене співвідношення між коефіцієнтами впевненості гіпотез:

$$KB(h_1, e) < KB(h_2, e). \quad (4.22)$$

Підсумовуючи вищевикладене, вважаємо, що в системі досліджень надійності вантажних вагонів на основі знань про зв'язок симптомів (ознак) несправностей і самої несправності відповідного вантажного вагона, що формуються спеціалістами вагонних депо, як ремонтних, так і експлуатаційних, можливо отримати підсумковий коефіцієнт впевненості при використанні таких співвідношень:

$$KB[h:e] = MD[h:e] - MND[h:e], \quad (4.23)$$

де  $KB[h : e]$  – впевненість у гіпотезі  $h$  з урахуванням ознаки  $e$ ;

$MD[h : e]$  – міра довіри до гіпотези  $h$  при заданій ознаці  $e$ ;

$MND[h : e]$  – міра недовіри  $h$  при ознаці  $e$ .

$$MD[h : e_1, e_2] = MD[h : e_1] + MD[h : e_2](1 - MD[h : e_1]). \quad (4.24)$$

Тобто на основі описаної методики можна побудувати систему досліджень надійності вантажних вагонів (СДНВВ). Така система повинна

містити базу даних відмов вагонів (БДВ) та базу знань відмов (гіпотез) або окремих свідчень (симптомів, причин) про можливе настання відмов (БЗВ) та їх наслідків (відповідний ступінь тяжкості).

Групу змінних (відмов і свідчень), що пов'язані між собою, зручніше зберігати разом у вигляді кортежу. Рядки таблиці БДВ є кортежем фіксованої довжини, наповнення яких виконується за встановленням факту виникнення відмов вагона відповідного типу й моделі, тобто з подальшим встановленням зв'язку між свідченням (симптомом) і відмовою (гіпотезою) при певному пробігу вагона.

Робочу пам'ять можна задати таким чином [145]:

$$WM = \langle WME_i, PE \rangle, \quad (4.25)$$

де  $WME_i$  – множина елементів робочої пам'яті БДВ;

$PE$  – операції (додавання, видалення, модифікація і пошук) над елементами в робочій пам'яті БДВ.

Елементи робочої пам'яті БДВ можна представити у вигляді кортежу:

$$WME = \langle NE, IDE, ATE, TPE, VLE \rangle, \quad (4.26)$$

де  $NE$  – назва елементів БДВ;

$IDE$  – ідентифікатор елементів БДВ;

$ATE$  – атрибут елементів БДВ;

$TPE$  – тип атрибута елементів БДВ;

$VLE$  – значення атрибута елементів БДВ (кодоване значення атрибута елемента, що перебуває у відповідному кортежі).

Значення кожного атрибута повинне зберігатися в безперервних ділянках БДВ, відповідно всі операції в кортежі будуть виконуватись дуже ефективно.

БЗВ в СДНВВ [145] повинна використовуватись для зберігання довгострокових даних, що описують відповідну розглянуту сферу (не поточних даних), і правил, які описують раціональні перетворення даних цієї сфери.

Для наповнення БЗВ повинна бути передбачена енциклопедія, що пояснює всі існуючі терміни з використанням словникових статей з посиланнями на інші терміни. Крім цього, потрібно вибудувати ієрархію понять, яка являє собою глобальну схему для аналізу структури знань. У процесі вибудовування структури знань необхідним етапом є визначення термінології, списку основних понять, а також встановлення їх атрибутів, відносин між поняттями, структури вхідної та вихідної інформації, стратегії прийняття рішень, обмеження стратегій тощо.

Для визначення відносин між поняттями варто використати процедурний спосіб, а для визначення відносин між складовими понять (що визначають структуру понять) – декларативний. Наявність двох моделей передбачає існування в моделях представлення знань одночасно обох компонентів, наприклад семантичної мережі та виробничої системи [6, 109, 265, 266].

Процес набуття знань – найбільш складний етап розробки СДНВВ, оскільки на цьому етапі необхідно вирішувати не тільки технічні й спеціальні питання, а так само розглядати психологічні, лінгвістичні та гносеологічні аспекти проблеми. У загальному випадку процес набуття знань можна розділити на етапи, що пов'язані з:

- визначенням необхідності модифікації (розширення) знань;
- витягом (отриманням) нових знань;
- перетворенням нових знань у форму подання СДНВВ;
- модифікацією знань.

Перспективою при наповненні СДНВВ знаннями про предметну сферу є моделювання процесу навчання мислячої істоти. Це можна зробити за такою схемою.

Фактичні дані з предметної сфери (які містять висновки експертів про відповідні зв'язки відмов вагонів, причин і наслідків) надходять на вхід СДНВВ і там відповідним чином інтерпретуються. Це завдання може виконуватись, наприклад, індуктивною програмою. Вона і буде здійснювати отримання глибинних знань із прикладів ситуацій та аналізу сценаріїв і завантажувати їх у БЗВ СДНВВ. Для успішного вирішення цієї проблеми необхідно спроектувати інтегровану БЗВ, що містить як знання про предметну сферу потенційної СДНВВ, так і метазнання, і, що особливо важливо, знання про мови, які будуть використовуватися на етапі аналізу вхідних текстів для вилучення прикладних знань. Таку систему можна назвати системою формування (набуття) знань [78].

Існують також способи отримання знань.

Розглянемо спеціальні типи взаємодії між інженером із знань і експертом-фахівцем [1, 29, 37, 78, 114]:

- режим протокольного аналізу;
- режим інтерв'ювання;
- режим ігрової імітації професійної діяльності.

Режим протокольного аналізу включає фіксацію «думок вголос», здійснену експертом у процесі пошуку шляхів вирішення проблеми й у ході здійснення подальшого аналізу отриманої інформації.

Режим інтерв'ю виражається активним діалогом між інженером зі знань і експертом, головною метою якого є спрямування експерта у правильному напрямку.

У режимі ігрової імітації завдання експерта полягає у відтворенні ситуацій, схожих на ті, у яких задіяна основна частина його професійної діяльності. Завдання інженера зі знань – за допомогою спостереження за діями експерта сформулювати будь-які міркування про експертні знання. Заключним етапом реалізації цього режиму стане уточнення таких міркувань експертом у режимі інтерв'ю.

Усі ці способи мають свої позитивні й негативні сторони. При аналізі протоколів інженеру зі знань буває складно відокремити важливі, ключові поняття від тих, які згадуються й висловлюються експертом випадково, за асоціацією. Міркування можуть опускати важливі етапи ланцюжка висновків, тому що експерт може вважати це для себе цілком очевидним [249, 252, 254]. Таким чином, етап інтерв'ю є необхідним при будь-якій схемі.

Розбиття на ступені здійснюється на підставі найбільш важливих понять предметної сфери, названих експертом (керуючись виключно своєю думкою) і зазначених між ними відносин структуризації. Ця інформація фіксується і використовується згодом як базова. Метою такої стратегії є створення ієрархії понять предметної сфери, а також виділення в поняттях груп, які тісно пов'язані між собою, – кластерів.

Використання стратегії репертуарної решітки дозволяє виявити характерні властивості понять з відокремленням одних понять від інших. Методика полягає в тому, що експерту надають трійку понять і пропонують визначити ознаки, які є спільними для кожних двох понять і які відокремлюють їх від третього. У зв'язку з тим що кожне з понять увійде в кілька трійок, стає можливим уточнити обсяги і сформулювати комплекси понять, за ознаками яких буде проводитися їх ідентифікація в БЗВ СДНВВ.

Для стратегії підтвердження подібності характерно встановлення належності кожної пари понять до деякого відношення подібності (толерантності), яке здійснюється експертом. Для цього йому задаються досить прості питання в певній послідовності. Їх головною метою є уточнення того розуміння подібності, яке вкладає експерт в твердження про схожість двох понять предметної сфери.

Процес взаємодії інженера зі знань (аналітика) з експертом-фахівцем складається з трьох основних етапів:

- підготовчий етап. На цьому етапі необхідно досягти належного рівня зацікавленості експерта й аналітика в результатах своїх спільних зусиль;



- встановлення лінгвістичного аналізу. Виробляється словникова основа БЗВ СДНВВ, визначається рівень деталізації і взаємозв'язку понять;
- гносеологічний етап. З'ясовуються закономірності, притаманні предметній сфері умови для достовірності та істинності тверджень, а також структурування за рахунок уведення відносин. Це основний етап взаємодії.

Формування БЗВ СДНВВ необхідно представити алгоритмом, що пов'язаний:

- із заповненням таблиць БЗВ;
- витягом (отриманням) знань із статистичних даних з відмов вагонів;
- організацією експертного опитування;
- навчанням БЗВ.

Для заповнення таблиць БЗВ СДНВВ експерт визначає основні поняття, що описують сферу використання конкретного вагона і можливого взаємозв'язку несправностей і відмов: окремі ознаки і їх групи; комплекси ознак для постановки гіпотез з можливих відмов; тяжкість наслідків і їх групи.

На наступному етапі експерт визначає свідчення (симптоми) і відмови (гіпотези): змінні ознак симптомів – вхідні; змінні гіпотез – вихідні. Для оцінки таких значень використовується єдина якісна шкала: Н – низький; НС – нижче середнього; С – середній; ВС – вище середнього; В – високий. Відповідні симптоми і гіпотези відмов вагонів становлять нечітку множину, задану за допомогою відповідних функцій належності [77, 237, 272, 288, 289]. Функції належності симптомів і гіпотез відмов вагонів можна подати у вигляді симетричних трикутних функцій, які описуються двома параметрами [77, 78]:

$$(b, c),$$

де  $b$  – центр симптомів і гіпотез можливих відмов вагонів. У табл. 4.8 наведено числові інтервали центрів симптомів і гіпотез БЗВ СДНВВ

відповідно до їх оцінки значень за вербально-числовою шкалою Харрінгтона [137, 280]. Другий параметр  $c$  задається в числовому інтервалі  $[0,0; 1,0]$ .

Таблиця 4.8 – Числові інтервали центрів симптомів і гіпотез БЗВ СДНВВ відповідно до їх оцінки значень за вербально-числовою шкалою Харрінгтона

№	Найменування множини	Числовий інтервал центру симптомів і гіпотез БЗВ СДНВВ
1	Низький	$[0,0; 0,2]$
2	Нижче середнього	$[0,2; 0,37]$
3	Середній	$[0,37; 0,63]$
4	Вище середнього	$[0,63; 0,8]$
5	Високий	$[0,8; 1,0]$

Для отримання (вилучення) знань із статистичних даних з відмов вагонів необхідно побудувати моделі, що описують близькість різних, одночасно спостережуваних категоріальних характеристик, які можуть бути подані у вигляді простих правил. У цьому випадку такими характеристиками є гіпотези (відмови), що спостерігаються у досліджуваних вагонах, або їх свідчення(симптоми). Для реалізації такого підходу використовуються алгоритми побудови асоціативних правил, зокрема алгоритм Argiogi [25, 278, 280, 282].

У даній БЗВ СДНВВ помилки в експертній інформації ведуть до виникнення суперечностей як у складанні комплексів свідчень (симптомів) для гіпотез (відмов), так і в експертній оцінці прояву свідчень (симптомів) при відповідній наявності гіпотез (відмов). Перевірка БЗВ призначена для пошуку й виключення суперечностей. Для цього необхідно зіставляти інформацію, що отримується від експерта, з отриманою раніше і перевіряти її на несуперечливість. У завдання пошуку і виключення суперечностей входить виявлення таких правил [58, 65, 71]:

- конфліктні правила (дві різні гіпотези (відмови) мають схожі комплекси свідчень (симптомів));
- надлишкові правила (однакові комплекси свідчень (симптомів) присутні у схожих гіпотез (відмов)).

Кожен комплекс ознак для відмови (гіпотези) вагона являє собою дескриптивну множину, кожному елементу якої поставлено у відповідність шляхом експертної оцінки сили прояву свідчення (симптому) за наявності гіпотези (відмови). Для кількісного визначення ступеня подібності двох комплексів свідчень (симптомів) застосовується бінарний коефіцієнт [128], значення якого перебуває в діапазоні від 0 до 1. При 0 – схожість відсутня, при 1 – прояв повної схожості.

Виходячи з наведеного, БДВ СДНВВ складається з двох множин – симптомів (свідчень) і відмов (гіпотез), а БЗВ складається з безлічі пар елементів відповідних множин із зазначенням у явному вигляді міри довіри або недовіри.

Для СДНВВ, з огляду на класифікаційні ознаки [77, 78, 145] і виходячи з теорії множин [184], пропонується модель даних «одиниця надійності»:

$$ReliabilityUnit \langle H, E, CM, ACM \rangle, \quad (4.27)$$

де  $H = \{df_m\}$  – множина гіпотез про виникнення відмови (несправності)  $df_i$ ;

$$E = \{sym_p_j, ctx_k, ctxScl_s, intervalT_b, interval_v, mrk_n, mdl_c, dev_h\}$$

– множина свідчень (симптомів) з відмов (несправностей) вагонів;

$CM \langle prob_i \rangle$  – множина мір довіри;

$ACM \langle aprob_p \rangle$  – множина мір недовіри;

$symp_j$  – елемент з множини симптомів, що фіксується оглядачем вагонів під час експлуатації або майстром депо під час виконання будь-якого виду ремонту;

$ctx_k$  – елемент множини контекстів надійності (усі існуючі параметри);

$ctxScl_s$  – елемент множини шкали контекста (усі можливі гіпотези або висновки);

$intervalT_b \in IntervalT$  – елемент множини «інтервалу пробігу вагона»  $IntervalT$ , що складається з двох елементів;  
 $IntervalT = [IntervalFrom, IntervalUpTo]$

$IntervalFrom$  – пробіг вагона «починаючи з відповідної величини»;

$IntervalUp To$  – пробіг вагона «до відповідної величини»;

$interval_v$  – значення пробігу вагона для вказаного елемента множини  $IntervalT$ , для якого визначена 95 % ймовірність виникнення відповідної відмови (несправності);

$mrk_n$  – елемент множини типів вагонів, за якими існують знання в СДНВВ;

$mdl_c$  – елемент множини моделей;

$dev_h$  – елемент множини модернізованих деталей, вузлів чи обладнання, що встановлено на вагон.

На підставі наведеної моделі базуються алгоритми визначення одиниці надійності вагона для пошуку множини ймовірних відмов (несправностей) із визначенням значень даних ймовірностей.

Виходячи зі складу наведеної моделі (4.27), слід відзначити, що функція належності задана експертами за знаннями детерміновано. Однак підсумкова ймовірність виникнення відмови (несправності) для кожного конкретного випадку за співвідношенням (4.24) буде своя, виходячи з конкретних задач, що вирішуються дослідником на відповідному етапі.

При остаточному визначенні рішення [77, 78, 145] в СДНВВ, що призведе до мінімізації кількості питань досліднику, цей функціонал буде визначатись таким виразом:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n KB_{ij} : e_j \rightarrow \max_{n \rightarrow 0}, \quad (4.28)$$

де  $n$  – кількість питань, що задаються досліднику для обчислення підсумкової міри довіри для кожної з гіпотез  $H_i$ , які пов'язані зі свідченнями (симптомами)  $e_j$ ;

$e_j$  –  $j$ -те свідчення, що пов'язане з  $i$ -ю гіпотезою, на основі якого формулюється питання, що задається досліднику при вивченні надійності вагона.

Сутність мінімізації зазначеного функціонала (кількості питань) полягає у виборі на кожному кроці з безлічі неперифікованих дослідником надійності вагона свідчень (симптомів) такого, у якого підсумкова міра довіри буде максимальною:

$$e_i : e_i = \sup_{CM} MD_{k} : e_{i-1}, e_i \quad k \in \{N_i\}, \quad (4.29)$$

де  $h_k$  –  $k$ -та гіпотеза, що має невалідовану відповідь на  $i$ -му кроці взаємодії з дослідником вивчення надійності вагона;

$MD_{k} : e_{i-1}, e_i$  – міра довіри гіпотези  $h_k$  за умови безлічі свідчень (симптомів), що валідовані на кроках 1, ...,  $i-1$ , а також за умови позитивної відповіді для свідчення (симптома)  $e_i$ .

$N_i$  – кількість невалідованих свідчень (симптомів), для яких виконується умова:

$$MND_{k} : e_i \geq 0 \vee MD_{k} : e_i > 0. \quad (4.30)$$

Насправді, при виконанні мінімізації на основі виразів (4.15), (4.14) стратегія СДНВВ реалізує гарантоване знаходження гіпотези з максимальною ймовірністю за мінімальну кількість кроків, конкретне значення яких залежить тільки від відповідей дослідника при вивченні надійності вагонів.

У такій ситуації в СДНВВ існує два варіанти реалізації алгоритму опитування дослідника при вивченні надійності вагонів – «жадібний» і «помірний».

При розгляді «жадібного» алгоритму СДНВВ здійснює перерахунок множини  $h_k$  на кожному кроці й пошук свідчення  $e_i$  на підставі співвідношення (4.24). У цьому випадку відбувається більш швидко підтвердження гіпотези  $h_k$ .

При роботі СДНВВ у режимі «помірного» алгоритму проводиться розрахунок множини  $h_k$  на нульовому кроці, коли дослідник при вивченні надійності вагонів за допомогою програмного інтерфейсу зможе сформулювати елемент множини  $E$  з (4.27).

Як згадувалося вище, для формування знань СДНВВ існує два джерела інформації для БЗВ:

- оброблені дані, що зібрані в результаті опитування експертів;
- дані про фактичні відмови (несправності), що виникали під час експлуатації вантажних вагонів, експертних знань щодо яких не накопичено.

Якщо перше джерело даних формується з використанням стандартного статистичного апарату, що дозволяє досягти відповідного рівня достовірності, то для фрагментарних даних за маловивченими моделями потрібен інший підхід для визначення відповідності відмови(несправності) зазначеним ознакам, а також визначення ймовірності виникнення заданої відмови (несправності) за наявності відповідного свідчення (симптому) на відповідному пробігу (напрацюванні) вагона.

Вихідні дані про фактичні відмови (несправності) не можуть однозначно переноситися в БЗВ СДНВВ без попередньої обробки, через те що всі параметри з множини  $E$  є дискретними величинами, за винятком  $interval_v$ .

Для параметра  $interval_v$ , необхідно здійснити підбір функції ймовірності і шукати її 1...5 % квантиль. Виходячи з фізичного змісту ймовірності відмови як функції пробігу вагона, висунута гіпотеза про  $S$ -твірний закон функції ймовірності, який перераховується кожного разу при додаванні нової інформації про задані відмови (несправності) на відповідному пробігу (напрацюванні) вагона.

Для перетворення статистичних даних в елемент БЗВ СДНВВ пропонується розрахункова функція ймовірності відмови залежно від пробігу (напрацювання) вагона, запропонована І. В. Анікіною [77] у такому вигляді:

$$F(H) = f(interval_v) = \frac{1}{1 + e^{-x}}. \quad (4.31)$$

При отриманні розрахункового значення квантиля 5 % на кожній ітерації результуючі дані можуть бути занесені в БЗВ СДНВВ [218, 256, 285].

Для прикладу покажемо, яким чином повинні бути зібрані статистичні дані щодо відмов структурних елементів, деталей, вузлів чи вагона в цілому. На основі зібраних даних щодо відмов (несправностей) побудовано залежності ймовірностей відмов колісних пар універсального піввагона від пробігу (рис. 4.21).

На рис. 4.21 виділена зона ймовірності відмов колісних пар універсального піввагона для квантиля 1...5 %, що відповідає пробігу 125...160 тис. км.

Наостанок зауважимо, що перетворення статистики про відмови різних структурних елементів, деталей чи вузлів вагонів у елемент БЗВ в СДНВВ проводиться відповідно до алгоритму, який зображений на рис. 4.22.

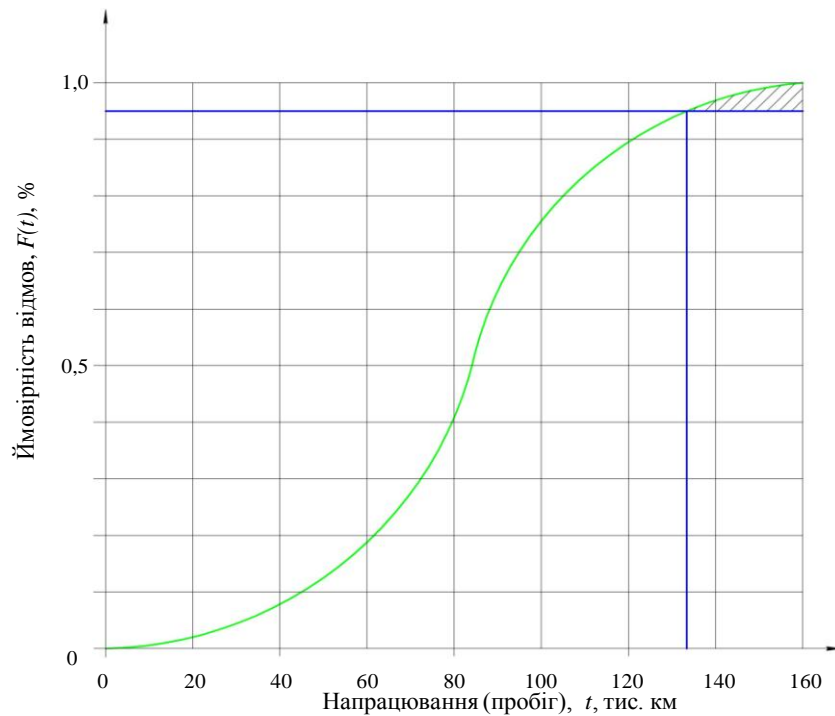


Рисунок 4.21 – Ймовірність відмов колісних пар універсального піввагона залежно від пробігу



Рисунок 4.22 – Алгоритм формування чи уточнення БЗВ в СДНВВ на основі даних, що надходять про фактичні відмови (несправності) вагонів і їх свідчення (симптоми)



Цей алгоритм формування чи уточнення БЗВ в СДНВВ на основі даних, що надходять про фактичні відмови (несправності) вагонів і їх свідчення (симптоми) (рис. 4.22) може бути реалізовано в будь-якій готовій програмній оболонці або з використанням мов програмування C++ або PYTHON.

Для перерахунку регресійної залежності функції ймовірності відмови вагона від пробігу необхідна її наявність (залежності) [245, 268, 273].

У демоверсії (у найпростішому вигляді), тобто маючи загальну інформацію про вантажні вагони (причини відмов, зносів тощо), робота системи дослідження показників надійності вантажних вагонів має такий вигляд (рис. 4.23).

The image shows a vertical stack of colored boxes representing a diagnostic interface. At the top is a green box with a back arrow icon and the text 'НАЗАД'. Below it is a light blue box containing input data: 'ВВЕДЕНІ ДАНІ:', 'ТИП ВАГОНА - піввагон', 'МОДЕЛЬ - 12-7023', and 'ПРОБІГ - після ДР 70 тис.км'. The next box is a darker blue box with the text 'ПИТАННЯ - підвищений знос гребенів колісних пар'. This is followed by a grey box with the heading 'ПРИЧИНА' and two lines of text: 'Найімовірніше (від 40% до 80%) Вихід з ладу п'ятникового вузла' and 'Найімовірніше (від 30% до 50%) Вихід з ладу ковзунів'. The final box is a dark grey box with the heading 'ВИСНОВОК' and two lines of red text: 'Необхідно провести ретельний огляд' and 'Замінити деталі'.

Рисунок 4.23 – Демонстрація роботи системи дослідження показників надійності вантажних вагонів

### 4.3 Висновки до розділу 4

Загалом по розділу можна зробити такі висновки:

1. На основі Басівського методу було зроблено поєднання двох моделей: за процесами механічного зносу складових частин вантажних вагонів і за втомним руйнуванням складових матеріалів. При цьому апостеріорну ймовірність запропоновано визначати за заданою апріорною ймовірністю відмов з використанням моделі зміни фізико-механічних характеристик і функції правдоподібності, що враховує додаткові значення відмов. Далі уточнено значення напрацювання (пробігу) вантажного вагона до відмови.

2. Сформовано індивідуальні структурна схема моделі вантажного вагона на етапах життєвого циклу. При цьому перед уведенням в експлуатацію вагона в єдину інформаційну базу вноситься інформація про вагон (дата і рік побудови, завод-виробник, тип, модель, реєстраційний номер, комплектація з відповідними обліковими номерами та ін.). У процесі експлуатації вагонів підприємствами з обслуговування і ремонту вноситься інформація про всі відмови, про заміну деталей і вузлів на відповідному пробігу. У результаті сформована база дозволяє виконати розрахунки і сформулювати показники надійності як окремих деталей і вузлів, так і вагона в цілому. Ця інформація дозволяє прийняти більш зважене рішення порівняно з існуючими методиками, де пропонується приймати рішення за обмеженою кількістю досліджуваних об'єктів. Використання зазначеної методики дозволяє оптимізувати кількість ремонтів протягом життєвого циклу вагона відповідно до конструктивних особливостей і з урахуванням ймовірності безвідмовної роботи ресурсовизначального елемента вузла вагона.

3. Запропоновано та побудовано систему досліджень показників надійності вантажних вагонів. У системі досліджень надійності вантажних вагонів на основі знань про зв'язок ознак несправностей і самої несправності відповідного вантажного вагона, що формуються спеціалістами ремонтних і

експлуатаційних вагонних депо, отримано підсумковий коефіцієнт впевненості гіпотез при заданих відношеннях апіорних ймовірностей справедливості гіпотез з певними ознаками несправностей вантажних вагонів. Побудована система дозволяє підтримувати й забезпечувати необхідний рівень надійності вантажних вагонів на різних етапах життєвого циклу.

## РОЗДІЛ 5

### РЕЗУЛЬТАТИ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ

#### **5.1 Оцінка експлуатаційних характеристик нових і модернізованих вантажних вагонів**

Процес створення нової техніки, як правило, супроводжується виконанням комплексу теоретичних і експериментальних досліджень створюваного зразка або виробу з визначення його функціональних характеристик. Розробників і користувачів цікавлять передусім експлуатаційні якості, оскільки саме вони визначають основні властивості виробу в експлуатації. Тому не тільки викликає інтерес, а має особливу актуальність науково-прикладна проблема з оцінки експлуатаційних характеристик нової і модернізованої техніки. А для залізничної техніки, від якої залежить не тільки безпека руху, але й життя та здоров'я людей, оцінка показників у експлуатації має особливо важливе значення.

Розглянемо основні методологічні підходи до оцінки експлуатаційних характеристик на прикладі несамохідного рухомого складу, а саме залізничних вантажних вагонів.

Парк вантажних вагонів України потребує поповнення вагонами нового покоління з осьовими навантаженнями до 25 тонн. Виробництво таких вагонів освоєно в Україні на провідних підприємствах, таких як ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» (КВБЗ), ПАТ «Азовмаш», ПАТ «Дніпровагонмаш» (ДВМ) тощо. Розроблено багато моделей вантажних вагонів і їх модифікацій, які вимагають підтвердження як заявлених техніко-економічних характеристик, так і показників безвідмовної роботи протягом міжремонтного терміну або пробігу чи напрацювання.

Оскільки вагон належить до обслуговуваних, ремонтваних, відновлюваних об'єктів, що втрачає в експлуатації свій технічний ресурс, то під час аналізу безвідмовності його можна розглядати як складну механічну систему, що складається з  $n$  елементів. Будемо вважати, що всі елементи системи з'єднані послідовно, при цьому кожен з елементів включає  $m$  послідовно з'єднаних деталей. Відмова кожної розрахункової частини призведе до відмови вагона. Таким чином, вагон є системою без резервування.

Як розрахункову частину вагона доцільно розглядати його окремі функціональні елементи та вузли: кузов, візок, гальмове обладнання, ударно-тяговий пристрій тощо. З урахуванням взаємної незалежності відмов розрахункових частин і окремих деталей (елементів) ймовірність безвідмовної роботи вагона згідно з відповідним пробігом (напрацюванням)  $T$  визначається за формулою [108, 136, 150, 285]:

$$P_g(T) = \prod_1^n P_i(T) = \prod_1^n \prod_1^m P_{ij}(T), \quad (5.1)$$

де  $P_i(T)$  – ймовірність безвідмовної роботи за пробіг  $T$  на  $i$ -й розрахунковій частині;

$P_{ij}(T)$  – ймовірність безвідмовної роботи за пробіг  $T$   $j$ -ї деталі (елемента)  $i$ -ї розрахункової частини.

Для спрощення введемо припущення про незалежність різних видів відмов, тоді сумарна ймовірність безвідмовної роботи елемента (деталі) визначається як добуток окремих ймовірностей [108, 136, 150, 285]:

$$P_{ij}(T) = \prod_1^k P_{ij}^f(T), \quad (5.2)$$

Де  $k$  – кількість видів відмов, що враховуються;

$P_{ij}^f$  – ймовірність відмови виду  $f$  для конкретного елемента (деталі).

Як зазначалось раніше, відмова вагона призводить до порушення його працездатності. Оцінку показників надійності вагона можна надати за результатами випробувань на підставі статистичного обліку за кількістю виявлених несправностей. За умовами й місцем проведення робіт випробування вагонів можна розділити на такі типи [108, 136, 150]:

- лабораторні;
- стендові;
- полігонні;
- натурні;
- випробування з використанням фізичних (натурних) моделей;
- експлуатаційні.

Для визначення та оцінки дійсних експлуатаційних показників надійності вагонів і їх вузлів при роботі в реальних умовах передбачені експлуатаційні випробування, що наведені на рис. 5.1.

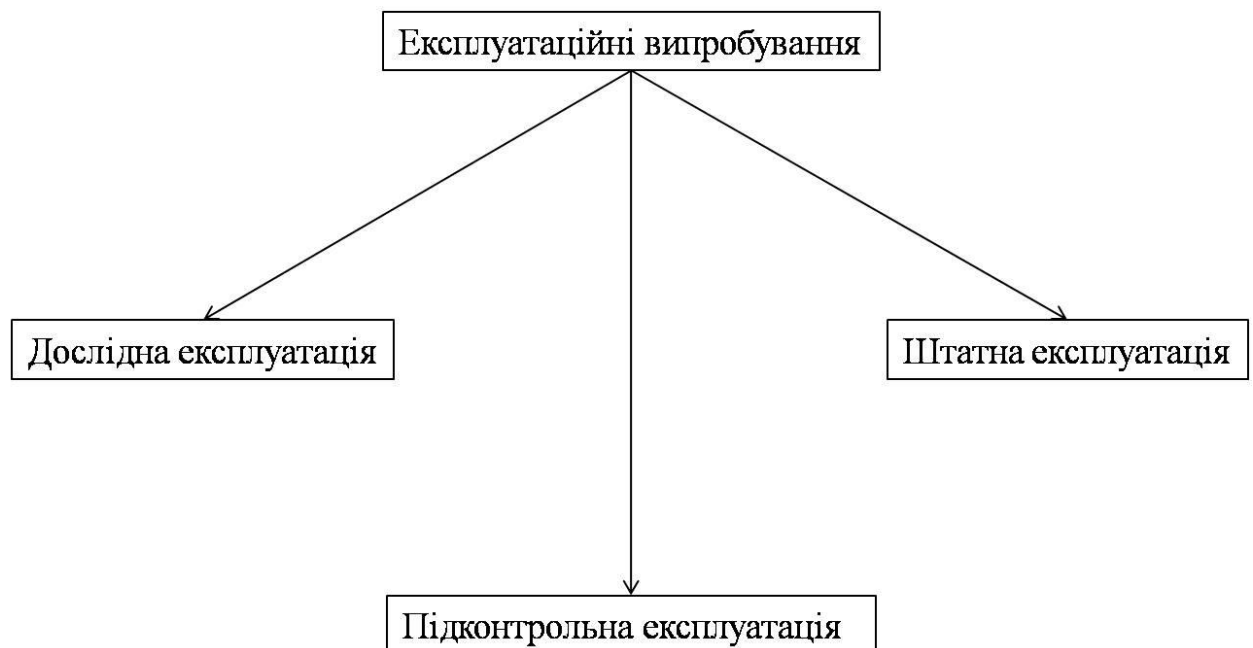


Рисунок 5.1 – Види експлуатаційних випробувань вагона

Дослідна експлуатація вагонів виконується спеціалізованими науково-дослідними лабораторіями. При цьому здійснюється регулярний контроль і облік напрацювання в різних умовах, обсягів виконаних транспортних, вантажно-розвантажувальних робіт, реєстрація та аналіз відмов, несправностей, а також надається перелік заходів щодо їх усунення.

Підконтрольна експлуатація вагонів проводиться із залученням фахівців науково-дослідних лабораторій з метою підвищення достовірності отриманої інформації. При цьому враховуються загальні умови функціонування вагона й контролюється його стан з документальним оформленням необхідних поточних параметрів і відхилень у них [108, 136, 150].

Під час штатної експлуатації вагонів дані надходять від користувачів. При такій експлуатації можливі відхилення від правил використання та обслуговування, при цьому фахівці-дослідники для постійного спостереження не залучаються.

Основними видами експлуатаційних випробувань, яким піддаються зразки деталей, вузлів і вагони в цілому, є дослідна й підконтрольна експлуатація [108, 136]. На цьому етапі вирішуються такі основні завдання:

- виявлення закономірностей виникнення відмов залежно від пробігу (напрацювання);
- визначення коефіцієнтів готовності для використання в умовах експлуатації;
- визначення (уточнення) критеріїв граничного стану деталей та вузлів і їх ресурсу;
- розрахунок дійсної потреби в запасних частинах, а також витрат на експлуатацію;
- встановлення ремонтпридатності складових структурних елементів вагона;
- виявлення типових пошкоджень, різних видів відмов, відносної частки кожного виду в загальній їх кількості;

- статистична оцінка вартості ремонтів і витрат на підтримку в працездатному стані від початку експлуатації вагона і до закінчення гарантійного періоду, до вичерпання заявленого ресурсу та до списання;
- підтверджується відповідність експлуатаційним умовам і поставленим вимогам;
- визначається ресурс між плановими видами ремонту;
- накопичуються і систематизуються отримані дані про надійність вагонів.

У період підконтрольної експлуатації проводяться періодичні огляди (огляди вагонів підконтрольної групи з метою виявлення прихованих відмов та відмов внаслідок зношування) і позапланові огляди (огляди з метою підтвердження факту відмови).

Проведення контролю технічних характеристик вагона здійснюється в умовах вагонного депо або пункту поточного ремонту, полігона обертання вагонів, де здійснюють піднімання вагонів, викочування й розбирання візків, обстеження колісних пар і буксових вузлів. Позапланові огляди й контроль параметрів несправностей вагонів і візків проводяться на місці виявлення несправності (у пункті технічного обслуговування) або у вагонному депо.

Виявлені в процесі підконтрольної експлуатації відмови розрізняються за характером. Як зазначалося раніше, характер відмов вагонів при цьому може бути розділений на конструктивний, технологічний (виробничий) та експлуатаційний.

Метою підконтрольної експлуатації також є підтвердження безпеки вагона в період його експлуатації [17, 45, 239]:

- від побудови до першого деповського ремонту;
- між деповськими ремонтами;
- від побудови до капітального ремонту.

Завданнями підконтрольної експлуатації вагона є [108, 136, 150]:



- визначення показників безвідмовності вагона (усереднений параметр потоку відмов і гамма-відсоткове напрацювання на відмову) і порівняння отриманих показників із середньомережевими значеннями;

- визначення напрацювання вагона (пробігу або терміну служби) від побудови до планового ремонту або між плановими ремонтами, що забезпечують встановлені показники безвідмовності вагона.

У процесі огляду й контролю технічних параметрів [221-223]:

- виявляють наявність механічних та корозійних пошкоджень на вагоні;
- перевіряють наявність усіх елементів конструкції;
- роблять виміри зазорів і зносів;
- перевіряють параметри гальмівної системи і автозчеплення.

Тривалість підконтрольної експлуатації, наприклад піввагона нового покоління, завершиться при досягненні пробігу 500 тис. км після побудови або після 4 років експлуатації. Періодичність проведення планових оглядів і контролю параметрів вагона становить [221-223, 246, 247]:

- перший – після досягнення пробігу 50-70 тис. км після побудови або через рік експлуатації;

- другий – після досягнення пробігу 140-160 тис. км після побудови або два роки після проведення першого огляду;

- третій – після досягнення пробігу 250-270 тис. км після побудови або через три роки експлуатації;

- четвертий і далі – щорічно до досягнення пробігу 500 тис. км або терміну експлуатації 4 роки (до першого планового ремонту).

Контролю підлягають технічні параметри вагонів, наведені в додатку Б, табл. Б.1 та Б.2 [35, 54, 55].

Контрольовані параметри вагонів, наведені в табл. Б.1 та Б.2, для системи дослідження надійності вантажних вагонів будуть свідченнями (симптомами), які будуть фіксуватися протягом випробувань або під час експлуатації. Крім того, БЗВ буде постійно поповнюватися новими

свідченнями чи симптомами окремих відмов (несправностей) вагонів різних типів та моделей при відповідному пробігу (напрацюванні).

Умовою завершення випробувань вагона є отримання повного обсягу необхідних достовірних даних. Дострокове припинення підконтрольної експлуатації відбувається з таких причин [108, 150]:

- виявлення в процесі експлуатації або при проведенні періодичного огляду небезпечної відмови технологічного (виробничого) або конструкційного характеру;

- двічі за термін підконтрольної експлуатації виявлене перевищення усередненого параметра потоку відмов вагона і/або його вузлів, одержаного за наслідками періодичного огляду, понад середньомережеве значення для вагона даного типу;

- виявлення за результатами періодичного огляду в будь-якого вагона підконтрольної групи гамма-відсоткового напрацювання (терміну служби і/або пробігу), що менше, ніж термін служби і/або пробіг вагона згідно з ТУ.

Після закінчення підконтрольної експлуатації складаються рекомендації щодо впровадження в серійне виробництво вагона відповідного типу і моделі, які розглядаються на засіданні Міжвідомчої приймальної комісії.

## **5.2 Планування експерименту з визначення показників надійності вантажних вагонів**

Вагомість результатів експлуатаційних випробувань багато в чому залежить від коректно розробленої методики випробувань, у якій мають бути відображені й обґрунтовані мета випробувань, способи підготовки вагонів і структурних елементів до випробувань; режими силових навантажень; порядок проведення випробувань; методи обробки результатів випробувань і

апаратура, що застосовується для автоматизованої обробки дослідних даних за заздальгідь розробленими спеціальними методиками [108, 136, 150].

Складання програми і методики випробувань [221–223] передусе проведенню експлуатаційних випробувань вагонів, і одним з основних пунктів є визначення їх кількості, порядку проведення і закінчення випробувань, тобто розробка плану експлуатаційних випробувань. Далі наведено методику виконання аналізу отриманих результатів за допомогою точкових та інтервальних оцінок показників надійності вантажних вагонів.

Найбільш часто контроль надійності проводиться при приймальних і попередніх випробуваннях дослідних зразків, а також при періодичних випробуваннях вагонів в умовах сталого виробництва.

Випробування дозволяють [108, 136, 150]:

- вивчити причини та закономірності виникнення відмов;
- виявити конструктивні, технологічні й експлуатаційні фактори, що впливають на надійність;
- виявити найменш надійні елементи;
- розробити заходи та рекомендації щодо підвищення надійності;
- розрахувати тривалість і обсяг технічного обслуговування, кількість запасних частин.

Випробування надійності вагонів, як правило, проводяться в лабораторних (стендових) і експлуатаційних умовах. Випробуванням надійності в лабораторних умовах зазвичай піддаються деталі й вузли, а також вагони в цілому [241]. Ці випробування найчастіше виконують на заводах-виробниках або в організаціях-розробниках виробів; вони можуть бути як визначальними, так і контрольними. При лабораторних випробуваннях можна імітувати вплив зовнішнього середовища на вагон, насамперед умов експлуатації (наприклад, вплив нерівностей колії на вагон, ударні навантаження тощо).

Лабораторні випробування можуть проходити при тих самих впливах (температура, вологість, вібрація тощо) і режимах роботи, які зазвичай мають місце при експлуатації вагонів.

Випробування надійності в умовах експлуатації полягають в зборі та обробці інформації про поведінку вагонів під час їх дослідної і (або) промислової експлуатації спільно із серійними вагонами. Ці випробування зазвичай є визначальними.

Експлуатаційні й лабораторні випробування доповнюють один одного. Так, перевагами експлуатаційних випробувань на надійність, порівняно з лабораторними, є [108, 136, 150]:

- врахування впливів зовнішнього середовища, наприклад температури, вібрації, кваліфікації персоналу тощо;

- низька вартість випробувань, оскільки їх проведення не потребує додаткових витрат на обладнання, що імітує умови експлуатації, і на його обслуговування;

- наявність великої кількості однотипних зразків випробовуваних деталей і вузлів (колісних пар, гальмівних колодок, ресорного підвішування тощо), часто наявних на одному вагоні, що дозволяє в порівняно короткі терміни отримати статистично достовірну інформацію.

Недоліками експлуатаційних випробувань порівняно з лабораторними є [108, 136, 150]:

- неможливість проводити активний експеримент, змінюючи за бажанням експериментатора параметри зовнішнього середовища (внаслідок чого ці випробування часто називають спостереженнями або підконтрольною експлуатацією);

- нижча достовірність інформації;

- менша оперативність інформації, оскільки почати її отримання можна тільки після виготовлення деталей та вузлів і після встановлення їх на вагон.

Вихідною інформацією для статистичного дослідження, на підставі якого повинні бути зроблені висновки про показники надійності, служать

результати спостережень. Однак ці результати можуть бути різними для одних і тих самих систем залежно від того, яким чином вони були отримані. Наприклад, можна поставити на дослідження одну відновлювану систему й випробовувати її до  $n$ -ї відмови, реєструючи напрацювання між відмовами. Результатами випробувань у цьому випадку будуть напрацювання  $t_1, \dots, t_n$ . Можна поставити  $d$  таких самих систем, але випробовувати їх, не відновлюючи технічний стан, поки не відмовлять  $n$  систем ( $n < d$ ). У цьому випадку результатами спостережень будуть також напрацювання  $t_1, \dots, t_n$ , проте оцінки для визначення характеристики випадкової величини за результатами випробувань матимуть інший вигляд.

Тому перед початком випробувань необхідно розробити правило, згідно з яким слід проводити випробування, тобто провести планування випробувань. Вибір плану випробувань має здійснюватися відповідно до цілей поставлених випробувань.

Проведення випробувань на надійність (особливо лабораторних) пов'язане зі значними фінансовими витратами, тому планування випробувань повинно містити визначення обсягу вибірки [241] і критеріїв завершення випробувань, виходячи із заданої точності й достовірності їх результатів. Формування вибірки відбувається таким чином, щоб результати її випробувань могли бути поширені на сукупність систем або засобів [2].

Методи планування розміру вибірки базуються на припущенні, що до закінчення спостереження буде можливо підтвердити або спростувати наявність передбачуваних відмінностей між досліджуваними групами. Шанс виявлення статистично значущих відмінностей залежить від розміру вибірки й величини істинної відмінності порівнюваних показників. Якщо в дослідження включено невелику кількість вагонів і при цьому не виявлено ефект, то постає питання, з чим це пов'язано – з недостатністю даних чи дійсно відсутня різниця. З іншого боку, невиправдане збільшення розміру вибірки є неефективним з позиції фінансових, трудових і організаційних витрат [2].

Випробування слід проводити для тих самих умов експлуатації, при яких в технічній документації встановлені показники надійності для вагонів.

Під час випробувань проводиться технічне обслуговування, періодичні комісійні огляди, вимір або замір параметрів, що визначають відмови вагонів.

Крім розрахункових і експериментальних методів оцінки показників надійності вагонів наявні й розрахунково-експериментальні методи. Їх застосовують, якщо з технічних, економічних і організаційних причин неможливо або недоцільно використовувати експериментальні методи, наприклад для систем, які не можна випробовувати в повному обсязі (наприклад, встановлення ресурсу вагона).

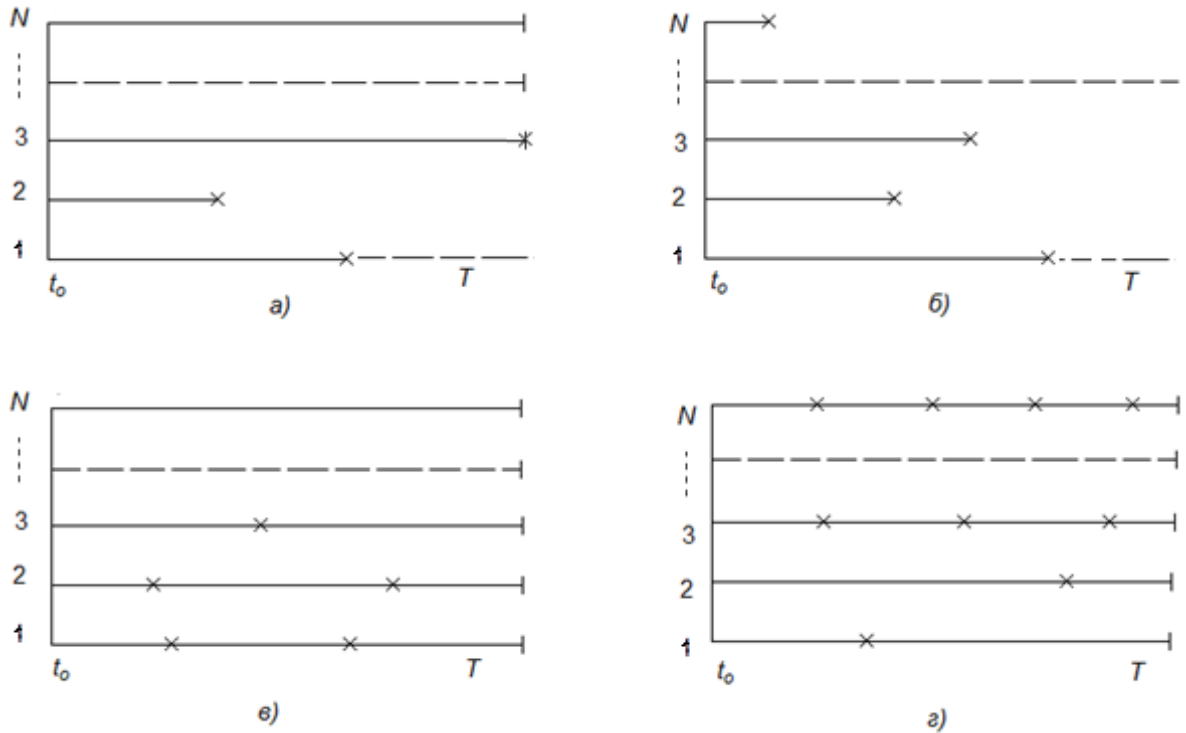
Випробування проводять за певною програмою-методикою випробувань, що є їх організаційно-методичною основою. Програма-методика встановлює план випробувань, методи обробки даних, правила прийняття рішень.

План випробувань на надійність встановлює кількість об'єктів випробувань, порядок проведення випробувань (з відновленням працездатного стану об'єкта після відмови, заміною об'єкта, що відмовив, або без відновлення і заміни) і критерії їх припинення [146].

При формуванні планів визначальних випробувань найменування плану прийнято позначати трьома буквами (цифрами) [146]; перша з них позначає число випробовуваних систем, друга – наявність  $R$  або відсутність  $U$  відновлень на час випробувань у разі відмови, третя – критерій припинення випробувань. Наведемо приклади планів випробувань.

План  $[NUr]$  передбачає одночасне випробування  $N$  об'єктів. При цьому об'єкти, що відмовили, не замінюються і не відновлюються. Випробування припиняють, коли число систем, що відмовили, досягає значення  $r$ . У прикладі плану (рис. 5.2, а) знаком множення позначено наявність відмови,  $r$ -й – відповідає відмова 3-го об'єкта. Якщо  $r = N$ , то тоді план випробувань

набирає вигляду  $[NUN]$ , тобто випробування припиняють після відмов усіх систем.



а –  $[NUr]$ ; б –  $[NUT]$ ; в –  $[NRT]$ ;

г –  $[NRr]$

Рисунок 5.2 – Плани випробувань

План  $[NUr]$  зазвичай застосовують для визначення середнього напрацювання на відмову й середнього напрацювання до відмови в разі експоненціального розподілу, а план  $[NUN]$  – у разі нормального розподілу. Випробування за планом  $[NUN]$  вимагають значного часу й кількості випробовуваних систем, але дають можливість повністю визначити емпіричну функцію розподілу [108, 136, 150].

Планом  $[NUT]$  передбачається одночасне випробування  $N$  систем (рис. 5.2, б). Ці системи після відмови не відновлюються. Випробування припиняють після закінчення напрацювання кожної системи, що відмовила. Цей план зазвичай застосовують для визначення ймовірності безвідмовної роботи системи за час  $T$  [108, 136, 150].

Випробування, проведені за планами  $[NUr]$  і  $[NUT]$ , дозволяють сформувавши емпіричну функцію розподілу тільки для деякого інтервалу часу, що потребує порівняно менше інформації, але дає можливість швидше закінчити випробування [108, 136, 150].

$[NRT]$  являє собою план випробувань, згідно з яким одночасно починають випробування  $N$  об'єктів (рис. 5.2, в); під час випробувань об'єкти, що відмовили, замінюються новими, випробування припиняють після закінчення часу випробувань або напрацювання  $T$  для кожної з  $N$  позицій (під позицією слід розуміти певне місце на стенді або об'єкті, стосовно якого напрацювання обчислюється незалежно від того, чи відбулися на цій позиції заміни або відновлення) [108, 136, 150].

На рис. 5.2, г наведено схему плану  $[NRr]$  – системи, відмови яких сталися під час випробувань, відновлюють або замінюють новими [146], а випробування припиняють, коли сумарна за всіма позиціями кількість відмов систем досягає  $r$ .

Завданням формування планування є визначення мінімального об'єму спостережень – вибір кількості випробовуваних об'єктів  $N$ , а також мінімальної кількості відмов  $r$  для планів  $[NUr]$  і  $[NRr]$  або мінімальної тривалості спостережень  $T$  для планів  $[NUT]$  і  $[NRT]$  [108, 136, 150].

Прийняття рішень має здійснюватися за певними правилами, які з математичної позиції є характеристичними функціями від результатів і планів контролю.

Результатами визначальних випробувань повинні бути точкові та інтервальні оцінки показників надійності [190, 279].

Точкова оцінка – це число, яке обчислюється на основі спостережень [108, 150]. Нехай є результати  $k$  спостережень  $t_1, t_2, \dots, t_k$  (де  $t_i$  – час напрацювання  $i$ -го об'єкта (вагона) до відмови) над деякою випадковою величиною  $T$  (наприклад, час безвідмовної роботи) з функцією розподілу  $F(t, \vartheta)$ , причому параметр  $\vartheta$  цього розподілу невідомий. Необхідно знайти таку



функцію  $\hat{\vartheta} = g(t_1, t_2, \dots, t_k)$  результатів спостережень  $t_1, t_2, \dots, t_k$ , яку можна було б розглядати як оцінку параметра  $\vartheta$ . При такому виборі функції  $g$  кожній сукупності  $(t_1, t_2, \dots, t_k)$  буде відповідати точка  $\hat{\vartheta}$  на числовій осі, яку називають точковою оцінкою параметра  $\vartheta$ .

Точкова оцінка  $\hat{\vartheta}$ , що є функцією результатів спостережень, також є випадковою величиною зі своїми власними законами розподілу і залежить від закону розподілу випадкової величини  $T$ , обсягу спостережень  $k$  і виду функції  $g$ . Для одного й того самого невідомого параметра  $\vartheta$  зазвичай можна прийняти кілька функцій  $g$ , які можуть слугувати оцінкою [49, 60]. Вибір вимог до таких оцінок (спроможності, ефективності) і методів знаходження оцінки (максимальної правдоподібності, моментів, квантилів тощо) описаний в книгах з теорії ймовірностей і математичної статистики [39, 57, 258, 259, 268].

Статистичні визначення показників надійності вагонів, розглянуті в першому розділі, є їх точковими оцінками. При цьому оцінка середнього напрацювання до відмови [108, 136, 150]:

$$\hat{\tau} = \sum_{i=1}^N \frac{t_i}{N}, \quad (5.3)$$

відповідає плану  $[NUN]$ , оскільки тут розглядаються кінцеві (без перерв у випробуваннях) напрацювання до відмови кожної з випробовуваних систем (елементів) вагона. Таке співвідношення спостерігається при будь-яких законах розподілу напрацювання до відмови вантажного вагона.

Дисперсія середнього напрацювання вагона до відмови для плану  $[NUN]$  визначатиметься за формулою [108, 136, 1508]

$$\hat{D} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (t_i - \hat{\tau})^2 \cdot E(N-1)}, \quad (5.4)$$

де  $E(N - 1)$  – визначається таблично [39].

У випадку розподілу за Вейбуллом–Гнеденком ( $N > 15$ ) для випробувань за планом  $[NUN]$  точкові оцінки параметрів середнього напрацювання вагона до відмови визначаються за такими формулами [108, 136, 150]:

$$\hat{a} = \left( \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N t_i^{\hat{b}} \right)^{\frac{1}{\hat{b}}}; \quad (5.5)$$

$$\left( \frac{N}{\hat{b}} + \sum_{i=1}^N \ln t_i \right) \cdot \sum_{i=1}^N t_i^{\hat{b}} - N \cdot \sum_{i=1}^N t_i^{\hat{b}} \cdot \ln t_i = 0. \quad (5.6)$$

У випадку DN-розподілу для випробувань за планом  $[NUN]$  точкові оцінки параметрів середнього напрацювання вагона до відмови будуть визначатись такими формулами [108, 136, 150]:

$$\hat{a} = N \cdot \left( \sum_{i=1}^N t_i \right)^{-1}; \quad (5.7)$$

$$\hat{v} = \left( \frac{\hat{S}}{\hat{D}} - 1 \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (5.8)$$

$$\hat{S} = \frac{1}{\hat{a}}; \quad (5.9)$$

$$\hat{D} = N \left( \sum_{i=1}^N \frac{1}{t_i} \right)^{-1}. \quad (5.10)$$

Для обчислення точкових оцінок показників надійності вагонів існують такі формули [108, 136, 150]:

- для нормального закону розподілу:

$$\hat{f}(t) = \frac{\exp\left[-\frac{(t-\hat{\tau})^2}{2\hat{D}^2}\right]}{\hat{D}\sqrt{2\pi} \cdot \Phi^*\left(\frac{\hat{\tau}}{\hat{D}}\right)}; \quad (5.11)$$

$$\hat{T}_1 = \hat{\tau} + \frac{\hat{D}}{\sqrt{2\pi} \cdot \Phi^*\left(\frac{\hat{\tau}}{\hat{D}}\right)} \times \exp\left(-\frac{\hat{\tau}^2}{2\hat{D}^2}\right); \quad (5.12)$$

$$\hat{P}(t) = \frac{1}{\Phi^*\left(\frac{\hat{\tau}}{\hat{D}}\right)} \cdot \left[1 - \Phi^*\left(\frac{t-\hat{\tau}}{\hat{D}}\right)\right]; \quad (5.13)$$

- для розподілу за законом Вейбулла–Гнеденка [108, 136, 150]:

$$\hat{f}(t) = \frac{\hat{b}}{a} \left(\frac{t}{\hat{a}}\right)^{\hat{b}-1} \exp\left(-\frac{t}{\hat{a}}\right)^{\hat{b}}; \quad (5.14)$$

$$\hat{T}_1 = \hat{a} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\hat{b}}\right); \quad (5.15)$$

$$\hat{P}(t) = \exp\left(-\frac{t}{\hat{a}}\right)^{\hat{b}}; \quad (5.16)$$

- для DN-розподілу [96, 121, 128]:

$$\hat{f}(t) = \frac{1}{\hat{\nu}t\sqrt{2\pi\hat{a}t}} \cdot \exp\left[-\frac{(-\hat{a}t)^2}{2\hat{\nu}^2\hat{a}t}\right]; \quad (5.17)$$

$$\hat{T}_1 = \frac{1}{\hat{a}}; \quad (5.18)$$

$$\hat{P}(t) = 1 - \Phi^*\left(\frac{\hat{a}t-1}{\hat{\nu}\sqrt{\hat{a}t}}\right) - e^{\frac{2}{\hat{\nu}^2}} \cdot \Phi^*\left(-\frac{\hat{a}t+1}{\hat{\nu}\sqrt{\hat{a}t}}\right). \quad (5.19)$$

Обчислення точкових оцінок параметрів розподілу Вейбулла–Гнеденка виконується за допомогою методу послідовних наближень у такій послідовності [108, 136, 150]:

- обчислюється коефіцієнт  $A$ :

$$A = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \ln t_i; \quad (5.20)$$

- далі обчислюється початкове наближення  $\hat{b}_0$  за формулою

$$\hat{b}_0 = \frac{N+1}{\left(A - \ln t_1\right) \cdot \left(0,23N + 3,71\right)}; \quad (5.21)$$

- потім обчислюється  $k$ -те наближення параметра  $\hat{b}_k$  ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ) за формулою

$$\hat{b}_k = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N t_i^{\hat{b}_{k-1}} \cdot \ln t_i}{\sum_{i=1}^N t_i^{\hat{b}_{k-1}}} - A \right\}^{-1}; \quad (5.22)$$

- наступним етапом є перевірка умови досягнення заданої точності обчислень:

$$\left| \frac{\hat{b}_k - \hat{b}_{k-1}}{\hat{b}_{k-1}} \right| \leq \varepsilon. \quad (5.23)$$

Якщо вищезазначена умова (5.23) виконується, можна вважати, що

$$\hat{b} = \hat{b}_k;$$

а у випадку невиконання умови необхідно обчислити  $(k + 1) - \varepsilon$  наближення за формулою (5.22).

У кінці обчислюється оцінка параметра  $\hat{a}$  за формулою

$$\hat{a} = \left( \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N t_i^{\hat{b}} \right)^{\frac{1}{\hat{b}}}. \quad (5.24)$$

Для експоненціального розподілу при всіх інших планах випробувань, крім плану [NUN], точкова оцінка середнього напрацювання до відмови [108, 136, 150]:

$$\hat{\tau} = \frac{S}{n_{\Sigma}}, \quad (5.25)$$

де  $n_{\Sigma}$  – сумарна кількість відмов усіх елементів(систем) вагона за час випробування;

$S$  – сумарне напрацювання всіх елементів(систем) вагона за час випробувань.

Наприклад, для плану  $[NR\hat{T}]$  сумарне напрацювання буде визначатися за формулою [108, 136, 150]

$$S = \sum_{i=1}^l t_i + \mathbf{N} - l\hat{T}, \quad (5.26)$$

де  $l$  – кількість елементів(систем), що відмовили в інтервалі  $(0, \hat{T})$ ;

$t_i$  – напрацювання до відмови  $l$ -го елемента(системи) з тих, що відмовили.

Для плану випробувань  $[NUr]$  сумарне напрацювання буде визначатися за формулою [108, 136, 150]

$$S = \sum_{i=1}^r t_i + \mathbf{N} - r\hat{t}_r. \quad (5.27)$$

Для плану  $[NR\hat{T}]$  і найпростішого потоку, у якого час між відмовами підпорядковується експоненціальному закону розподілу, оцінка середнього напрацювання до відмови  $\hat{t}$  збігається з оцінкою середнього напрацювання на відмову  $\hat{\vartheta}$  [108, 136, 150]:

$$\hat{t} = \hat{\vartheta} = \frac{S}{n_{\Sigma}} = \frac{N\hat{T}}{n_{\Sigma}}. \quad (5.28)$$

Оцінка інтенсивності відмов  $\hat{\lambda}$  при експоненціальному законі розподілу може бути визначена через оцінку середнього напрацювання до відмови [108, 136, 150]:

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{\hat{t}}. \quad (5.29)$$

Для плану  $[NUN]$  оцінку інтенсивності відмов можна визначити за формулою [108, 136, 150]

$$\hat{\lambda} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N t_i}. \quad (5.30)$$

Оцінка параметра  $\hat{\omega}$  найпростішого потоку збігається з оцінкою інтенсивності відмов  $\hat{\lambda}$ . Наприклад, для плану  $[NRT\hat{T}]$  така оцінка визначатиметься за формулою [108, 136, 150, 283]

$$\hat{\omega} = \hat{\lambda} = \frac{n_{\Sigma}}{N\hat{T}}. \quad (5.31)$$

Оцінка середнього часу відновлення, відповідно до виразу (5.3), також відповідає плану  $[NUN]$ . Оцінки ймовірності відмови  $\hat{Q}(t_1)$  і ймовірності безвідмовної роботи  $\hat{P}(t_1)$  до моменту  $t_1$  відповідно визначаються за співвідношеннями [108, 136, 150]

$$\hat{Q}(t_1) = \frac{N(t_1)}{N}; \quad (5.32)$$

$$\hat{P}(t_1) = P(t_1), \quad (5.33)$$

і можуть бути знайдені за обмежений інтервал часу  $t_1 = \hat{T}$ , що відповідає плану випробувань  $[NUT\hat{T}]$ .

Точкова оцінка невідомого (оцінюваного) параметра розподілу (фактично – наближене значення параметра) є випадковою величиною. Якщо відомо її розподіл (або хоча б дисперсія), то можна вказати межі, у яких з

досить великою ймовірністю буде лежати невідоме значення параметра. Для розгляду точності оцінки вводиться поняття довірчого інтервалу.

Розглянемо результати  $k$  спостережень  $t_1, t_2, \dots, t_k$  над випадковою величиною  $T$  з функцією розподілу  $F(t, \vartheta)$ , коли параметр  $\vartheta$  невідомий. Необхідно знайти таку функцію  $\mathcal{G}_n = g_n(t_1, t_2, \dots, t_k)$  результатів спостережень, щоб інтервал  $(\mathcal{G}_n, \infty)$  покривав невідомий параметр  $\vartheta$  із заданою ймовірністю  $\gamma_1$  [108, 136, 150]:

$$P\{\vartheta > \mathcal{G}_n\} = \gamma_1. \quad (5.34)$$

Величину  $\mathcal{G}_n$  називають нижньою довірчою границею параметра  $\vartheta$  для односторонньої довірчої ймовірності  $\gamma_1$ .

Для заданої ймовірності  $\gamma_2$  за тією самою сукупністю спостережень може бути знайдена така функція  $\mathcal{G}_{ep} = g_{ep}(t_1, t_2, \dots, t_k)$ , у якої інтервал  $(0, \mathcal{G}_{ep})$  буде покривати параметр  $\vartheta$  з ймовірністю  $\gamma_2$  [108, 136, 150]:

$$P\{\vartheta < \mathcal{G}_{ep}\} = \gamma_2. \quad (5.35)$$

Величина  $\mathcal{G}_{ep}$  буде верхньою довірчою границею параметра  $\vartheta$  для односторонньої довірчої ймовірності  $\gamma_2$ .

Нижня й верхня довірчі границі утворюють довірчий інтервал, який з ймовірністю  $\gamma$  покриває на числовій осі невідоме значення параметра  $\vartheta$ . При  $\gamma_1 > 0,5$  та  $\gamma_2 > 0,5$  (довірчі ймовірності  $\gamma_1$  та  $\gamma_2$  зазвичай вибираються не менше 0,8) відповідно до виразів (5.34) та (5.35) можна записати таке [108, 136, 150]:

$$P\{\mathcal{G}_n < \vartheta < \mathcal{G}_{ep}\} = 1 - P\{\vartheta < \mathcal{G}_n\} - P\{\vartheta > \mathcal{G}_{ep}\} = 1 - \gamma_1 - \gamma_2 = \gamma, \quad (5.36)$$

де  $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 - 1$ .



Звичайно приймають, що  $\gamma_1 = \gamma_2$ , тоді  $\gamma = 2\gamma_1 - 1$ .

Значення довірчого інтервалу тим менше, чим більше число  $k$  спостережень (наприклад, чим більша кількість відмов при випробуваннях) і чим менше значення довірчої ймовірності  $\gamma$ .

Визначення меж довірчого інтервалу полягає в такому. Оскільки оцінка  $\hat{\vartheta}$  невідомого параметра  $\vartheta$  є випадковою величиною, то далі визначається закон її розподілу, потім інтервал  $(\vartheta_H, \vartheta_{BP})$ , у який випадкова величина  $\hat{\vartheta}$  потрапляє з ймовірністю  $\gamma$ .

Наближений спосіб побудови довірчих інтервалів середнього напрацювання до відмови для плану  $[NUN]$  при довільному розподілі ґрунтується на тому, що при кількості випробовуваних виробів  $N > 15 \dots 20$  середнє арифметичне приблизно має розподіл за нормальним законом з математичним сподіванням  $\tau$ , а невідоме значення дисперсії замінюється її точковою оцінкою в такому вигляді [108, 136, 150]:

$$\hat{D} = \frac{\sum_{i=1}^N (\tau_i - \hat{\tau})^2}{N-1}. \quad (5.37)$$

Визначення довірчого інтервалу показників надійності при експоненціальному законі розподілу напрацювання між відмовами й різних планах випробувань ґрунтується на відомих виразах математичної статистики [39, 290].

Припустимо, що проводяться випробування одного відновлюваного вагона до настання  $r$ -ї відмови, що відповідає плану  $[NRr]$ . При цьому сумарне напрацювання до відмови визначатиметься за формулою [108, 136, 150]

$$S = \sum_{i=1}^r t_i,$$

де  $t_i$  – напрацювання між  $(i-1)$ -ю і  $i$ -ю відмовами.

Тоді величина  $z = \frac{2S}{\bar{t}}$  буде мати  $\chi^2$ -розподіл з двома ступенями свободи, щільність якого визначатиметься за формулою [108, 136, 150]

$$f(z) = \frac{1}{2\Gamma(r)} z^{(r-1)} e^{-\frac{z}{2}}, \quad (5.38)$$

де  $\Gamma(r) = \Gamma(r-1)$  – гамма функція.

У додатку Б, табл. Б.3 наведені довірчі інтервали  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  інтенсивності відмов при експоненціальному розподілі й різних планах випробувань.

Якщо виконати дослідження за наведеною методикою, то можна раціонально сформувати план експлуатаційних випробувань механічних систем, зокрема вантажних вагонів, і визначити точкові та інтервальні оцінки під час аналізу результатів випробувань. Крім того, такі дослідження надають можливість більш точно визначити показники надійності вантажних вагонів.

### 5.3 Результати експлуатаційних випробувань вантажних вагонів

ВАТ «Крюківський вагонобудівний завод» освоїв випуск для УЗ піввагонів нового покоління моделі 12-7023 на візках моделі 18-7020. Ці піввагони принципово відрізняються від піввагонів існуючого парку.

Експлуатаційні випробування 50 таких піввагонів проведені на дослідному маршруті № 2 Кривий Ріг–Ужгород–Кошице, на якому виконуються перевезення залізничної сировини на металургійний комбінат

у Словаччину [149, 161, 162]. Метою випробувань було визначення інтенсивності експлуатаційних зносів і показників надійності зазначених вантажних вагонів [97, 165, 171, 215, 217, 218].

Експлуатаційна робота маршруту включала:

- навантаження на криворізьких рудниках через навантажувальні бункери або екскаваторами;
- на маршруті Кривий Ріг–Ужгород рух вагонів відбувався в завантаженому стані;
- розвантаження на Кошицькому комбінаті відбувалось за допомогою роторного вагоноперекидача;
- рух вагонів у зворотному напрямку відбувався в порожньому стані.

Маршрут пролягав Придніпровською, Одеською, Південно-Західною та Львівською залізницями і містив складний за планом і профілем колії Карпатський перевал. Довжина одного рейсу складала 2 700 км. Коефіцієнт порожнього пробігу – 0,5. За експертними оцінками, завантаженість вагонів маршруту в 1,2...1,5 рази перевищує середню загальномережеву завантаженість на магістральних дорогах колії шириною 1520 мм. Усі поїздки маршруту супроводжувалися бригадами досвідчених оглядачів вагонів і, у разі потреби, – співробітниками випробувальної лабораторії вагонів ДНУЗТ. Періодично в рейсовий маршрут додавалася вагон-лабораторія для вимірювань необхідних динамічних параметрів під час руху. Діяла система інформації про виявлені під час перевезення відмови вагонів і система контролю їх усунення.

Зі складу маршруту випадковим чином було виділено 10 піввагонів для повного обміру ходових частин і п'ятникових вузлів з метою контролю зносів. Обміри проводилися в середньому через кожні 12,5 тис. км пробігу під час планових комісійних оглядів після прибуття порожнього маршруту для чергового завантаження. Одночасно виконувався огляд технічного стану всіх піввагонів маршруту і, у разі потреби, додаткові контрольні вимірювання. Більшість обмірів виконувалися без відчеплення вагонів, а при

проведенні кожного четвертого огляду (через кожні 45 тис. км пробігу) обирались 10 піввагонів, що направлялися на вагоноремонтне підприємство, де виконувалося піднімання і викатка візків для здійснення обмірів.

Крім цього, у період випробувань маршрутний поїзд тричі розтягувався в зчепленому стані на прямій станційній колії й закріплювався башмаками. Після цього вимірювалися зазори в контурах зчеплення кожної пари автозчепів (між ударною поверхнею малого зуба одного автозчепу і ударною стінкою зіва – сусіднього). Мета цих вимірів – визначити інтенсивність експлуатаційних зносів корпусів автозчепів.

Обробка масивів вимірювань зносів (або розмірів зношеної деталі) виконувалася за два етапи:

- первинний – визначалися параметри нормального закону розподілу (математичне сподівання, середньоквадратичне відхилення, статистичний мінімум/максимум) масиву однотипних вимірювань (наприклад, товщини гребеня 80-ти коліс виділених піввагонів) при кожному огляді;

- заключний – результати первинної обробки вимірюваного параметра за всіма проведеними оглядами описувалися функцією найкращого наближення (експоненціальною або лінійною) залежно від експлуатаційного пробігу вагона. Потім будувалися графіки зі статистичними прогнозом очікуваного зносу до подвоєного ( порівняно з тим, що спостерігався) значення пробігу вантажних вагонів.

Розглянемо знос гребенів коліс. Як відомо [18, 43, 42, 142, 171, 216, 217, 219], ще в 90-х роках минулого століття на залізницях колії шириною 1520 мм відбулася якісна зміна характеру зносів ободів коліс. До цього періоду знос гребенів після кожного обточування колісних пар починався з інтенсивності  $\sim 0,25 \text{ мм} / 10^4 \text{ км}$ , а з наростанням пробігу інтенсивність поступово зменшувалася. Після зміни характеру зносів і дотепер спостерігається багаторазове зростання зазначеної інтенсивності до значень  $1 \dots 1,5 \text{ мм} / 10^4 \text{ км}$ . Одночасно відбулося не менш істотне зменшення інтенсивності прокату по колу кочення коліс, яким раніше визначався ресурс

колісної пари до наступної переточки. При таких експлуатаційних зносах, які часто характеризують як «їзда на гребенях», ресурс колісної пари між обточуваннями коліс (виготовлених за старою технологією і обточених за ГОСТ 9036 профілем) знизився до 70...100 тис. км пробігу вагона.

У зв'язку з цим було вжито заходів щодо зменшення інтенсивності зносу гребенів. В умовах Укрзалізниці (де змащування рейок застосовується епізодично, а на трасі маршруту – тільки на Карпатському перевалі) було передбачено:

- застосування модернізованих візків;
- глибоку термообробку ободів коліс заводом-виготовлювачем з доведенням твердості до 320...350 НВ;
- обточування за зносостійким профілем кочення.

Ці технології були застосовані до всіх колісних пар маршрутних вагонів. Обточування коліс виконувалось за профілем ІТМ-73 (у нормативному документі [150] профіль віднесений до ремонтних).

Аналізуючи результати первинної статистичної обробки товщини гребенів (табл. 5.1), виявлено, що інтенсивність зносу явно знижується зі збільшенням пробігу маршрутних вагонів. Так, у початкові 19 тис. км пробігу (від 2,7 до 21,6 тис. км) зниження склало  $\Delta M = 0,88$  мм, а в останні 19 тис. км (від 160 до 179 тис. км) –  $\Delta M = 0,21$  мм.

Помітне також зростання середньоквадратичних відхилень – при початковому пробігу  $\sigma \approx 0,4$  мм, а після 110 тис. км  $\sigma \approx 1$  мм, що свідчить про появу нерівномірної товщини гребеня за колом колеса. У зв'язку з цим графік залежності товщини гребеня від пробігу вагона (рис. 5.3) побудовано у формі експоненціальної регресії, що дозволяє взяти до уваги змінну інтенсивність процесу зносу.

Графічна залежність побудована із статистичним прогнозом до 350 тис. км пробігу вагона. Лініями і маркерами позначені:

- $MOS_{греб}$  – математичне сподівання товщини зношеного гребеня при різних пробігах вагона. Формула експоненти – над графіком. Жирні маркери

позначають дослідні значення, отримані після первинної обробки масиву вимірювань (див. табл. 5.1);

-  $СТС.МІНС_{грб}$  – статистично мінімальна товщина гребеня, яка може спостерігатися при замірах гребенів у групи колісних пар з такими пробігами. Відповідні маркери світлі.

Таблиця 5.1 – Первинний етап статистичної обробки вимірів товщини гребенів

Пробіг вагона, тис. км	Математичне сподівання, мм	Середньоквадратичне відхилення, мм	Статистичний мінімум, мм
2,7	32,7387	0,38	31,7887
21,6	31,8612	0,4042	30,8507
27	31,575	0,3912	30,597
37,8	31,2713	0,3639	30,36155
72,9	29,9525	0,6928	28,2205
81	29,6988	0,7049	27,93655
94	29,4738	0,6429	27,86655
102	29,2987	0,7462	27,4332
110	29,2037	1,0316	26,6247
140	28,9325	0,959	26,535
160	28,475	1,0635	25,81625
179	28,262	1,025	25,509

Прогнозний пробіг вагонів до граничного зносу 50 % колісних пар становить:

$$S_{50\%} = 285,3 \text{ тис. км.}$$

Теоретичне значення прогнозного початку граничного зносу гребенів колісних пар становить:

$$S_{поч} = 168,5 \text{ тис. км.}$$

Розрахункове значення інтенсивності зносу гребенів визначимо як похідну від експоненціальної кривої за формулою

$$\omega = \frac{dS_{прб}}{dx} = -k \cdot 32,3183 \cdot 0,0009 \cdot \exp(-0,0009 x),$$

де  $k$  – коефіцієнт розмірності ( $k = 10$ ).

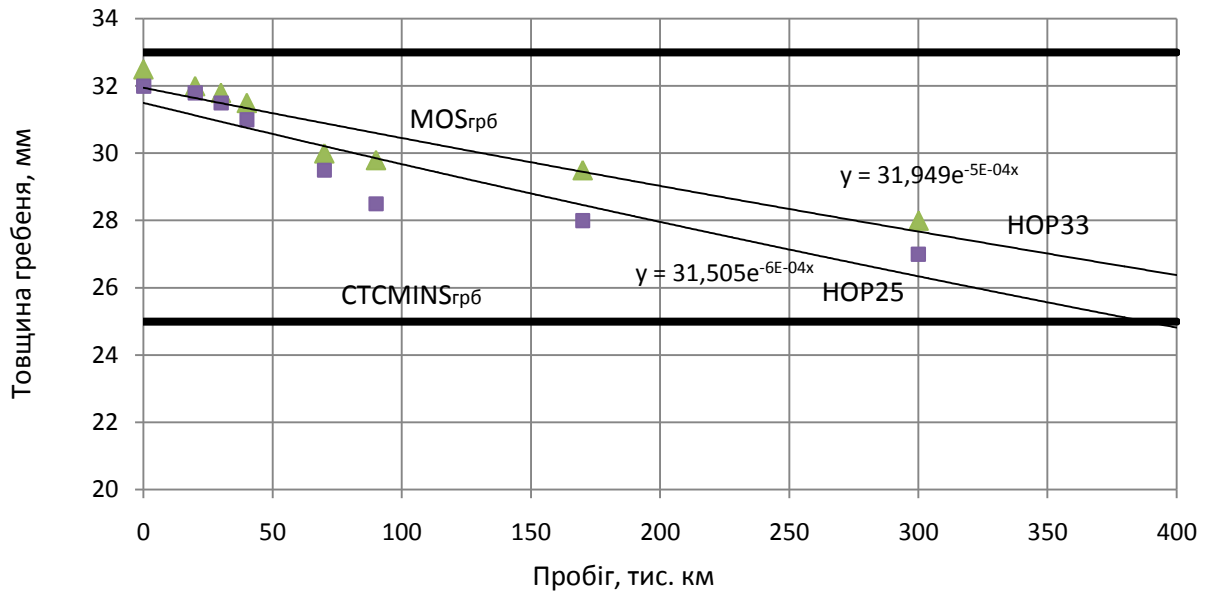


Рисунок 5.3 – Залежність товщини гребенів коліс від пробігу вагона

Пробіг вагона за маршрутом підставляється в тисячах кілометрів.

Графік інтенсивності зносу гребенів дослідних колісних пар показано на рис. 5.4.

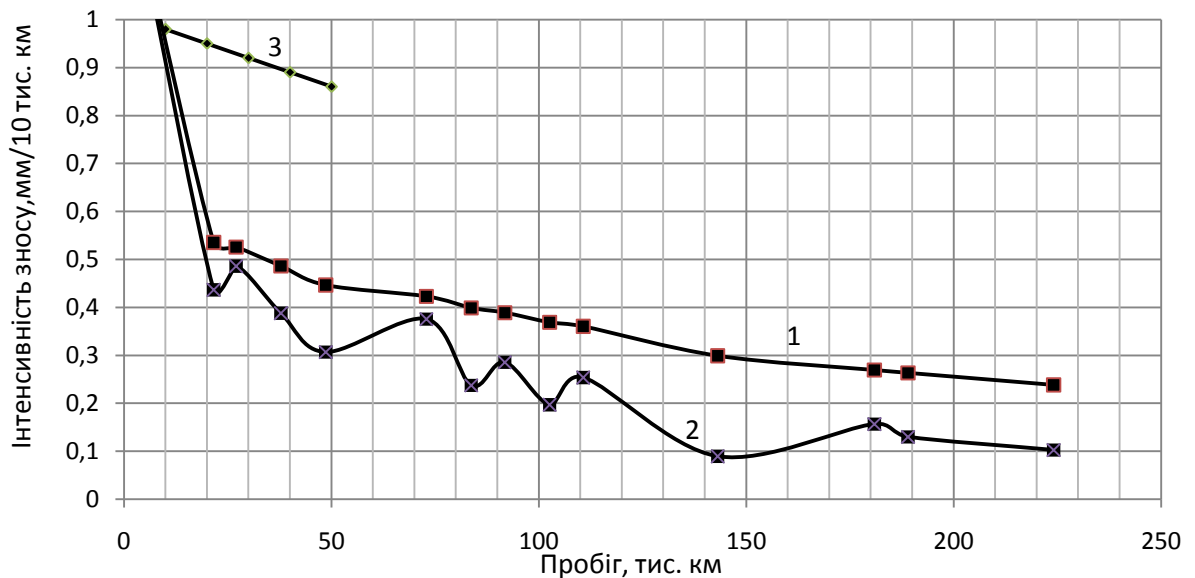


Рисунок 5.4 – Залежність інтенсивності зносу гребенів коліс від пробігу вагона

На графіку (рис. 5.4) показана інтенсивність зносу гребенів:

- 1 – колісних пар піввагонів дослідного маршруту № 2 (візки мод. 18-7020, ободи коліс термооброблені на глибину зносу, профіль кочення ИТМ-73). При цьому наведена середня інтенсивність зносу гребенів з початку випробувань. Так, при пробігу 224 тис. км з початку випробувань відбулося зниження інтенсивності зносу до  $0,238 \text{ мм} / 10^4 \text{ км}$ ;

- 2 – колісних пар піввагонів дослідного маршруту № 2 (візки мод. 18-7020, ободи коліс термооброблені на глибину зносу, профіль кочення ИТМ-73). У цьому випадку наведено середню поточну інтенсивність зносу гребенів, де на останньому етапі спостерігається зниження інтенсивності зносу до  $0,102 \text{ мм} / 10^4 \text{ км}$  пробігу;

- 3 – колісні пари піввагонів-еталонів дослідного маршруту № 1 (візки мод 18-100, профіль кочення ГОСТ 9036 без глибокої термообробки ободів). При цьому інтенсивність зносу гребенів при пробігу до 50 тис.км склала від 0,98 до  $0,86 \text{ мм} / 10^4 \text{ км}$ .

Отже, вжиті заходи привели до зниження інтенсивності зносу гребеня колеса в 3,3 разу, що приблизно забезпечує заданий ресурс до першого деповського ремонту вагонів (300 тис. км). Однак, прокат коліс залишився незначним. Середнє абсолютне його значення після 180 тис. км пробігу склало  $\sim 1,5 \text{ мм}$ , тобто інтенсивність прокату коліс  $\rho \approx 0,083 \text{ мм} / 10^4 \text{ км}$ . Тобто якісний характер зносів коліс «їзда на гребенях» зберігся.

Зауважимо також, що профіль ИТМ-73 близький до конформного. При його широкому впровадженні виникає небезпека підвищення пошкоджуваності рейок [217].

Розглянемо зазори в з'єднаннях букс з боковинами. Вертикальне навантаження від бічної рами візка на буксовий вузол передається через два виступи полубукси (адаптер), рознесені щодо її середини. Це дозволяє виключити перевантаження роликів касетного підшипника. Тому в центрі буксового прорізу є вертикальний зазор  $z$ , показаний на рис. 5.5. Внаслідок зносу опорних поверхонь бічної рами і полубукси відбувається зменшення цього зазору, але його мінімальне значення унормовано:  $z \geq 1 \text{ мм}$ .



Нормовані також значення сумарних поздовжніх щелепних зазорів:

$$5 \leq x_1 + x_2 \leq 20 \text{ мм.}$$

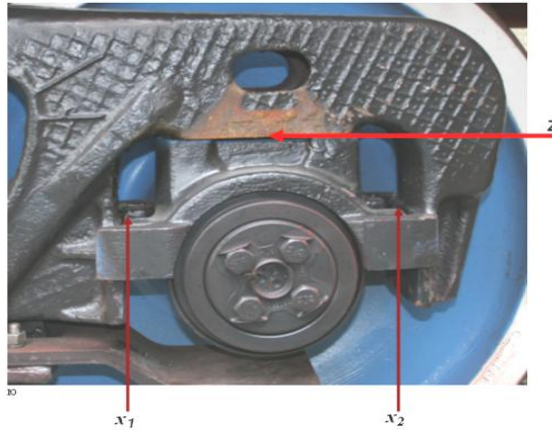


Рисунок 5.5 – Місця вимірювання зазорів у зчленуванні букси з бічною рамою

Статистична обробка виміряних у процесі експлуатаційних випробувань зазорів виконана за викладеною раніше методикою. Прикінцеві графіки зі статистичним прогнозом показані на рис. 5.6.

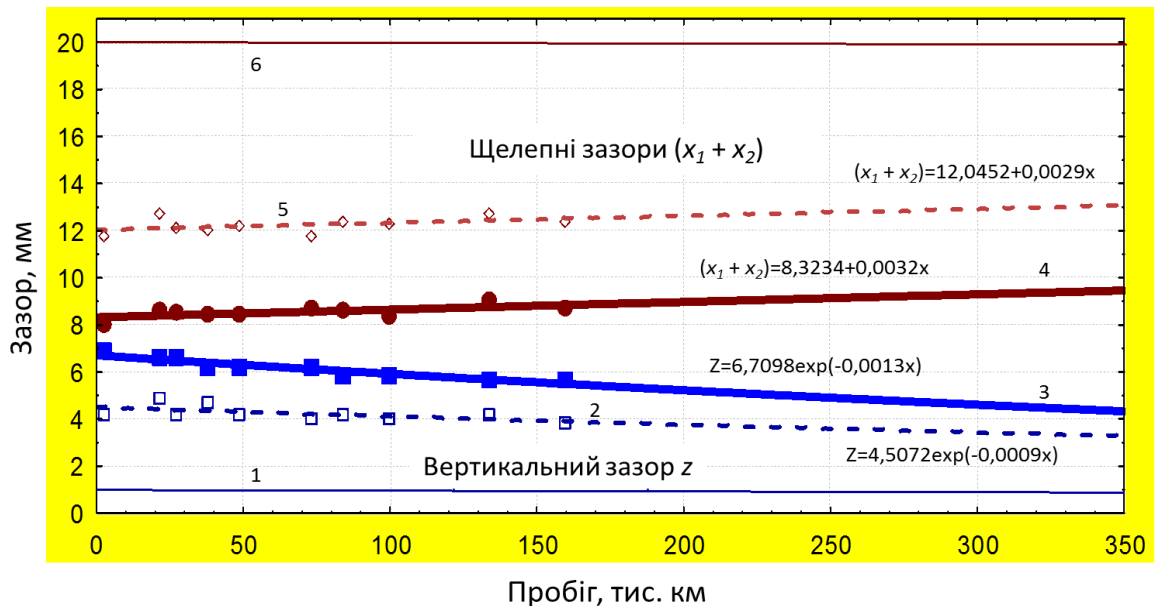


Рисунок 5.6 –Графіки зміни зазорів при експлуатаційних випробуваннях: 1 – нормативний мінімум вертикального зазору ( $z = 1$  мм); 2 – статистичний мінімум вертикального зазору  $z$ ; 3 – математичне сподівання вертикального зазору  $z$ ; 4 – математичне сподівання щелепного зазору ( $x_1 +$

$x_2$ ); 5 – статистичний максимум щелепного зазору ( $x_1 + x_2$ ); 6 – нормативний максимум щелепного зазору ( $x_1 + x_2$ ) = 20 мм

З наведених графічних залежностей видно, що при такій інтенсивності зносу перетин ліній з відповідними прямими нормативних обмежень відбудеться при пробігу вагона набагато більшому, ніж закладено в прогнозі [54]. Середня інтенсивність зносу, що призводить до зменшення вертикального зазору, становить  $\Delta_z \approx 0,075$  мм /  $10^4$  км, а до збільшення щелепного зазору  $-\Delta_x \approx 0,032$  мм /  $10^4$  км. Якщо вважати, що така інтенсивність збережеться при подальшому пробігу, то розрахункове досягнення нормативу за вертикальним зазором відбудеться після пробігу вагона  $\sim 850$  тис. км, а за щелепним зазором –  $>3$  млн км. Це означає, що відновлення вертикального зазору необхідне при капітальному ремонті вагона, а щелепний зазор не підлягає відновленню взагалі (тому що після 2 млн км пробігу вагон передбачається списувати).

Таким чином, щелепний зазор ( $x_1 + x_2$ ) у піввагонах моделі 12-7023 на візках моделі 18-7020 належить до безремонтних параметрів. Вертикальний зазор  $z$ , у разі збільшення початкового значення до 8 мм, підлягатиме ремонтному відновленню тільки після пробігу 1 млн км (під час капітального ремонту вагона).

За 40 років експлуатаційних випробувань вагонів на старотипових візках мод. 18-100 було кілька випадків відчеплень у непланові ремонти за збільшеним щелепним зазором після пробігу нових вагонів менше 150 тис. км. Істотного зниження інтенсивності зміни зазорів у з'єднаннях букс з боковинами візків мод. 18-7020 досягнуто як за рахунок зносостійкості деталей, так і завдяки введенню в подовжню площину візка пружних елементів – уретанових накладок на клини гасника коливань [163, 164].

Далі розглянемо можливе заниження клинів щодо надресорної балки. Робота фрикційних клинів існуючих візків супроводжується частими мікросхопленнями сталевих поверхонь тертя і їх інтенсивним зносом. У міру

зношування відбувається завищення клинів щодо надресорної балки з ослабленням функції гасіння коливань, особливо в разі руху вагона в порожньому стані.

Ці недоліки усуваються у випробовуваних візках шляхом постановки спочатку занижених клинів (КЛ) на  $\Delta_z \approx 10$  мм (рис. 5.7). Клин виготовлений аналогічно до запропонованого фірмою «А. Стакі» (США) з високоміцного загартованого чавуну з уретановою накладкою на похилій поверхні, що контактує з надресорною балкою (НБ).

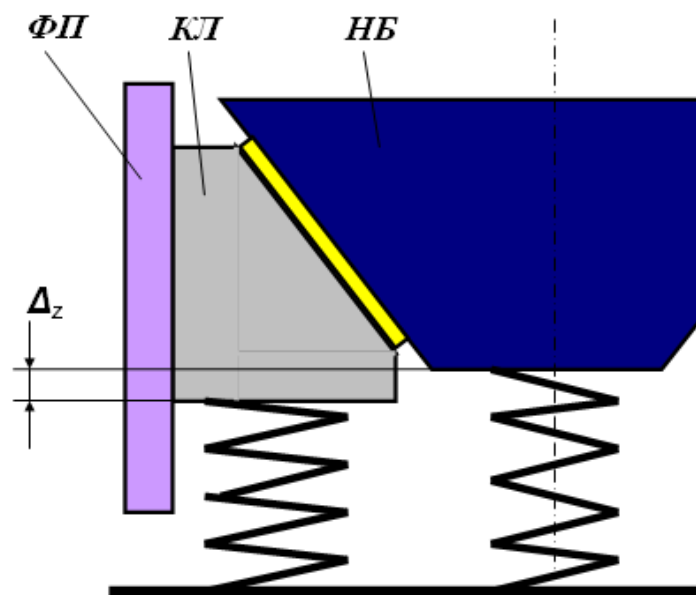


Рисунок 5.7 – Схема розташування фрикційного клина у візку мод. 18-7020

Експлуатаційний знос поверхонь тертя клина й фрикційної планки (ФП), а також стоншення (релаксація) уретанової накладки сприяють поступовому зменшенню заниження  $\Delta_z$ . Вимірювання величини заниження лівого і правого клинів виконувалися у порожніх вагонів пристроєм 007.243 [149], який застосовується і для вимірювань завищення клинів типових візків.

Результуючі графіки усередненого завищення клинів зі статистичними прогнозом наведено на рис. 5.8.

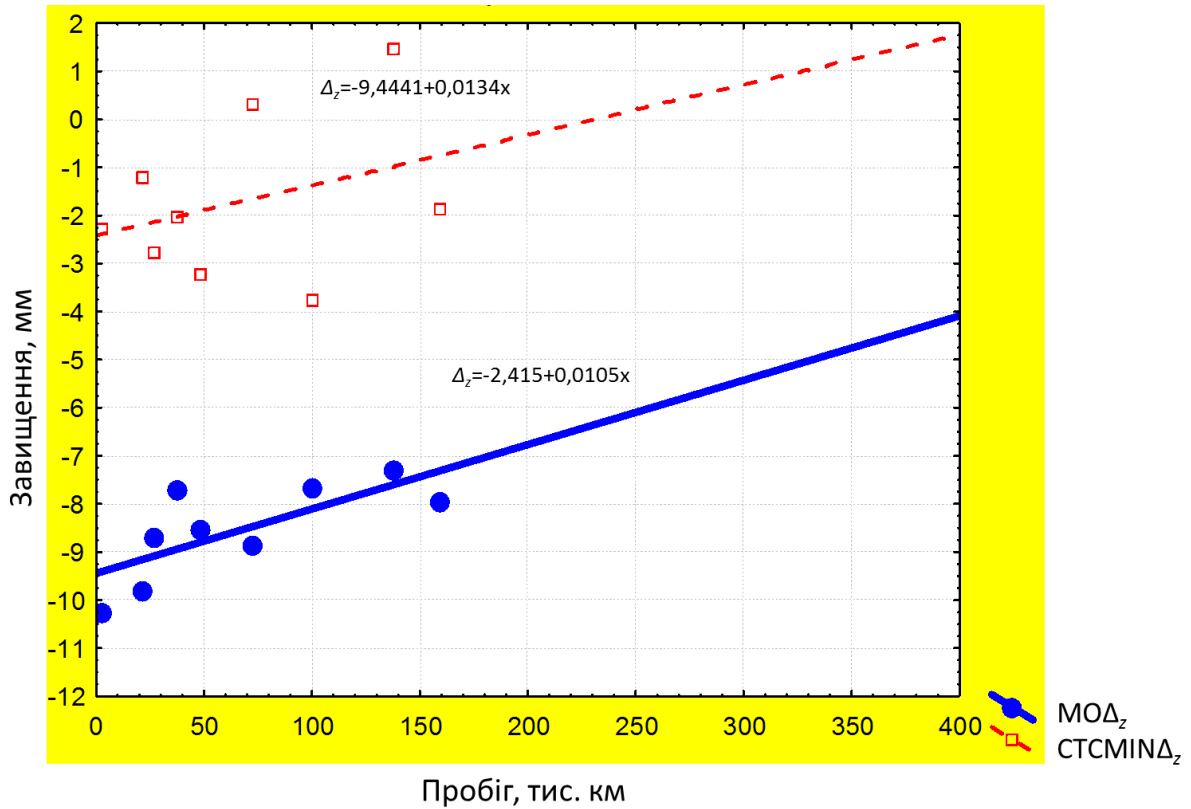


Рисунок 5.8 – Графіки усередненого завищення клинів

Як і раніше, жирною лінією показано математичне сподівання усередненого завищення (у від'ємній півплощині, тобто заниження) лівого і правого клинів одного ресорного комплекту. Пунктирна крива являє собою статистичний максимум завищення. Прогноз виконаний за лінійною регресією, хоча для перших вимірювань (пробіг  $\leq 100$  тис. км), що нанесені маркерами, ближче підходила логарифмічна крива, але прогностні значення за цією кривою відрізнялися від даних подальших оглядів  $> 10\%$ . Розкид отриманих при оглядах статистичних мінімумів (світлі маркери) пов'язаний з неточністю вимірювального пристрою типу «коромисло».

Граничного нормативного значення завищення клинів для випробовуваного візка мод. 18-7020 поки не встановлено (для серійної мод. 18-100 допускається завищення 4 мм). Оцінимо прогностні пробіги, при яких завищення клинів стане нульовим, тобто  $\Delta_z = 0$ :

- після 740 тис. км очікується нульове завищення у половини вагонів (інтенсивність  $\frac{d\Delta_z}{ds} = 0,00134 \text{ мм} / 10^4 \text{ км}$ );

- після 238 тис. км очікується поява перших випадків нульового завищення клинів (інтенсивність  $\left| \frac{d\Delta_z}{ds} \right|_m = 0,00105 \text{ мм} / 10^4 \text{ км}$ ).

Зауважимо, що перший випадок виміряного нульового заниження спостерігався вже при замірах після 179 тис. км пробігу маршруту.

Також розглянемо знос деталей зчленування візків з кузовом. На візках моделі 18-7020 вагонів дослідного маршруту № 2 встановлені ковзуни пружно-коткового типу (рис. 5.9), аналогічні до розроблених фірмою «А.Стакі» (США). Вони постійно притиснуті робочими ковпаками до відповідних ковзунів кузова. Ковпаки ковзунів візка виготовлені з високоміцного термообробленого чавуну, а нижні пластини відповідних ковзунів кузова – із зносостійкої сталі.



Рисунок 5.9 – Пружно-котковий ковзун візка

Узагальнений параметр експлуатаційних зносів ковзуна являє собою відстань  $h$  від верху коробки ковзуна візка до нижньої пластини відповідного ковзуна кузова при порожньому вагоні (виступ ковпака), що вимірювався під час комісійних оглядів зазначеного маршрутного поїзда.

Результативний графік залежності виступу ковпаків від пробігу вагонів наведено на рис. 5.10, на якому статистичний прогноз зроблено до пробігу 400 тис. км, щоб показати перетин обох експоненціальних кривих з мінімальним нормативним значенням виступу  $h_{min} = 14$  мм. Точка перетину кривої математичного сподівання відповідає пробігу 365 тис. км. Відповідно, при зазначеному пробігу вагонів очікується зменшення виступу ковпака до нормативного мінімуму у 50 % ковзунів.

Початковий пробіг, при якому можлива поява мінімального виступу ковпака, дорівнює 120 тис. км. Цей прогноз підтвердився проведеними вимірами (табл. 5.2).

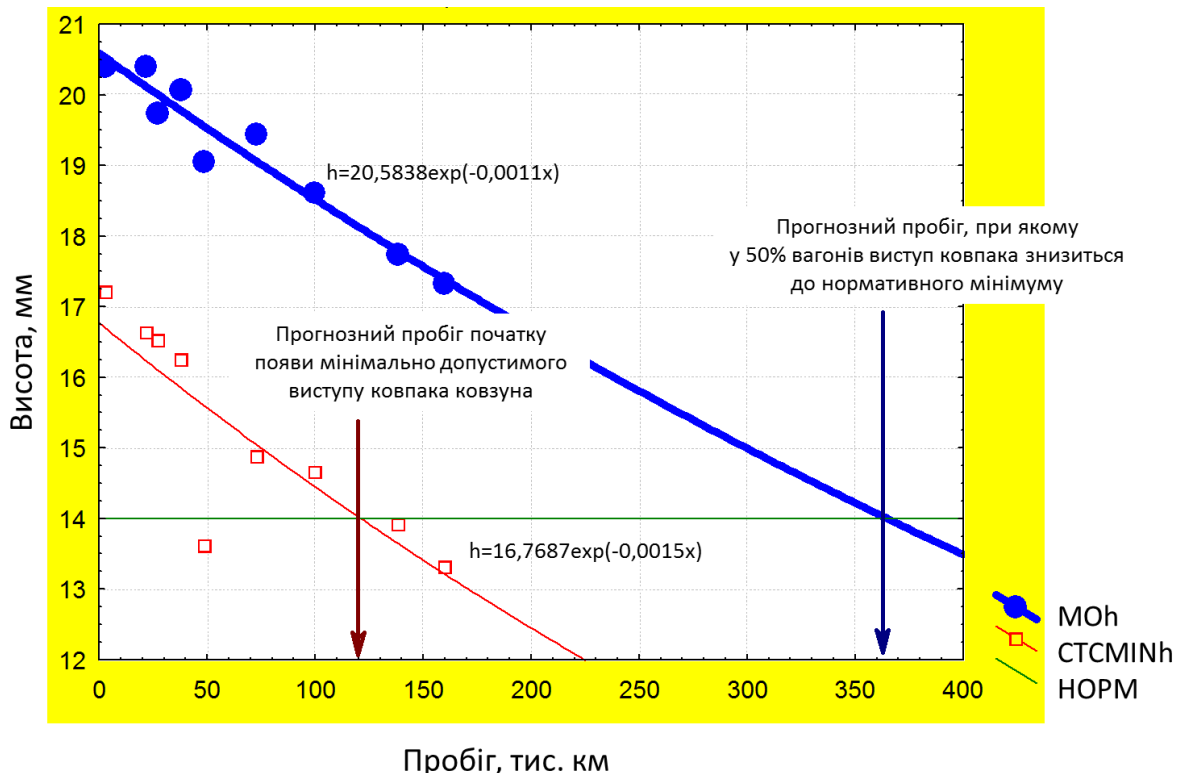


Рисунок 5.10 – Графічні залежності висоти виступу ковпака від пробігу вантажного вагона

Таблиця 5.2 – Мінімальний виступ ковпака ковзунів візків

Пробіг вагонів, тис. км	Мінімальний виступ ковзуна $h$ , мм	
	прогнозний	вимірний
99,9		15
120	14	
137,7		14
151,3		13

Прогнозний графік підтверджує, що більше ніж половина вагонів витрачають ресурс 300 тис. км (до першого деповського ремонту) з допустимим виступом ковпаків. Перетин лінії МО з прямою нормативного мінімуму відповідає пробігу 360 тис. км. Але необхідність заміни уретанових блоків у ковзунах візків може виникнути вже після пробігу вагона понад 140 тис. км.

Проведений аналіз експлуатаційних зносів п'ятників і підп'ятників [178] показав, що за подовжнім напрямком відносно вагона діаметри  $D_x$  як підп'ятника, так і п'ятника змінюються інтенсивніше, ніж  $D_y$  – поперек вагона (відбувається овалізація) (рис. 5.11).

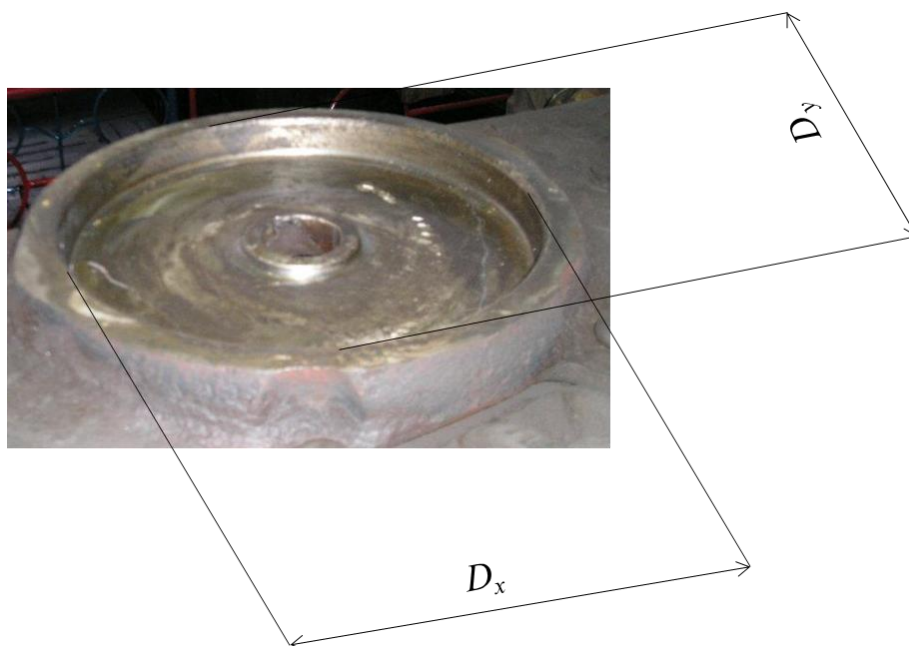


Рисунок 5.11 – Місця виміру діаметрів підп'ятника

Необхідність ремонту деталей п'ятникових вузлів буде визначатися зносом діаметрів  $D_x$ . Графічні зміни зазначених діаметрів від пробігу вагонів наведені на рис. 5.12.

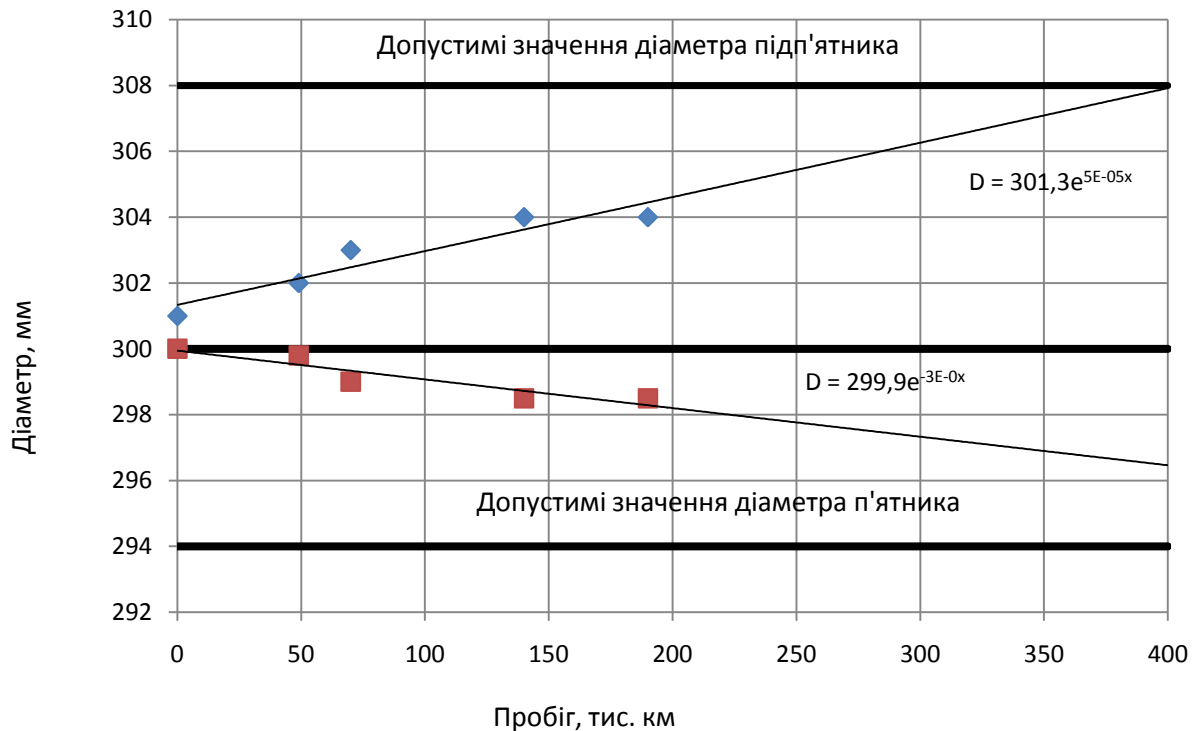


Рисунок 5.12 – Графічні залежності діаметра підп'ятників (верхні лінії) і діаметра п'ятників (нижні лінії) від пробігу вагона

На графічній залежності (рис. 5.12) горизонтальною лінією  $D_x = 300$  мм проведено розділення на дві області: у верхній наведені лінії математичного сподівання і статистичного максимуму діаметра підп'ятників візків, а в нижній – лінії математичного сподівання й статистичного мінімуму діаметра п'ятників кузовів. Основні характеристики зносів наведені в табл. 5.3.



Таблиця 5.3 – Узагальнені дані про зноси п'ятникових вузлів

Величини	Середня інтенсивність зносу, мм/10 <sup>4</sup> км	Вимірювання після 137,7 тис. км, мм	Нормативні граничні значення, мм	Прогнозні пробіги, тис. км	
				за статистично максимальним / мінімальним значенням	за математичним сподіванням
Діаметр під'ятника	0,308	305,4	308	170	240
Діаметр п'ятника	0,076	298	294	252	745

З графічних залежностей і даних таблиці випливає, що знос під'ятника відбувається значно інтенсивніше, ніж знос п'ятників. Це підтверджується і результатами обмірів після пробігу вагонів понад 137,7 тис. км. Найбільший вимірний діаметр під'ятника становив 305,4 мм, тобто величина зносу дорівнює 5,4 мм, або 1,8 %. Тоді як найменший вимірний діаметр п'ятників становив 298 мм, тобто знос становить 2 мм, або 0,67 %.

Перетин пунктирних ліній із статистично максимальними / мінімальними значеннями з нормативними значеннями діаметрів, що прогнозують появу перших ознак граничного зносу, наявний при експлуатаційному пробігу вагона:

- за під'ятниками – 170 тис. км;
- за п'ятниками – 252 тис. км.

Лінія математичного сподівання (суцільна) діаметра під'ятників перетинається з нормативною також у межах пробігу 240 тис. км, тоді як за

діаметром п'ятників теоретично перетин може відбутися при пробігу 745 тис. км.

Достовірність прогнозу зносів п'ятникових вузлів нижче, ніж попередніх параметрів, через обмежену кількість обмірів (маркери на графіку), що пов'язано з частотою викочування візків. Порівняно із старотиповими візками мод. 18-100, інтенсивність зносу підп'ятників знижена вдвічі. Проте зносостійкість підп'ятників варто підвищити, щоб гарантовано забезпечити ресурс 300 тис. км – до першого деповського ремонту [145, 157, 166, 207].

Розглянемо результати зносу контурів зачеплення автозчепів (рис. 5.13, а). Експлуатаційний знос автозчепів відбувається як в процесі з'єднань і ривків при маневрах, так і під час руху поїзда, коли дві зчеплені головки роблять вертикальні переміщення одна відносно іншої. Такі переміщення виникають під час перехідних режимів руху при зниженні поздовжньої сили в інтервалі  $\pm 50$  кН.

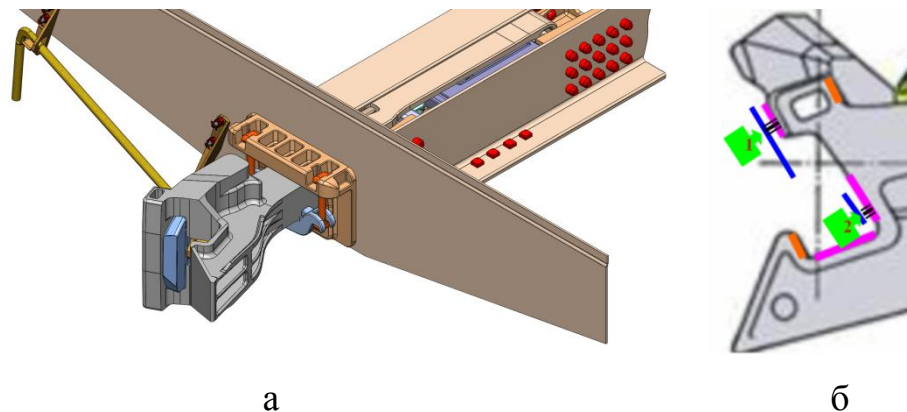


Рисунок 5.13 – Загальний вигляд автозчепного пристрою (а) та поверхні зносу корпусу зачеплення автозчепу (вигляд зверху) (б)

Залежно від напрямку сили – розтягувальні або стискальні, зношуються або тягові поверхні (на рис. 5.13, б, позначені червоним кольором), або ударні поверхні (на рис. 5.13, б – лілові). Виконати виміри зносів кожної поверхні автозчепу можливо шаблонами після розведення вагонів.

Інтегральну ж оцінку зносу контуру зачеплення можна отримати після вимірювання зазорів у контурі двох зчеплених і попередньо розтягнутих автозчепів. Місця вимірювання цих зазорів умовно позначені на рис. 5.13, б: 1 – біля ударної поверхні малого зуба; 2 – біля ударної поверхні зіва одного з автозчепів (положення поверхонь сусіднього автозчепу позначено синіми лініями).

Вимірювання зазорів у контурах зчеплених автозчепів попередньо розтягнутого поїзда проводилося тричі після пробігу 2,7;109,1;159,3 тис. км. Результати першого обміру виявилися завищеними й були виключені з розгляду. Результати обробки двох наступних обмірів наведені в табл. 5.4.

Граничний зазор у міжвагонному з'єднанні ненормований. За експертними оцінками, він може допускатися в межах 30 мм. Оскільки початковий зазор у контурі зачеплення дорівнює 10 мм, то на знос залишається

$$\Delta = 20 \text{ мм.}$$

Прогнозний пробіг вагона, після якого сумарний знос контуру автозчепу становитиме 20 мм, для випробовуваних вантажних вагонів прогнозується за формулою на рівні:

$$S_c = k \frac{\Delta}{\varepsilon} = 1,18 \text{ млн км,}$$

де  $k$  – коефіцієнт розмірності,  $k = 0,01$ .

Таким чином, наплавлення зношених поверхонь автозчепу буде необхідно проводити після 1 млн км пробігу, тобто при капітальному ремонті вагона.

Таблиця 5.4 – Статистична обробка результатів замірів зазорів у зчепленні автозчепів вагонів

Оброблені масиви вимірювань	Пробіг вагона, тис. км	Кількість вимірювань	Математичне сподівання, мм	Середньо квадратичне відхилення, мм
Зазор у міжвагонному з'єднанні при другому обмірі	89,1	94	7,8206	2,2967
Зазор у міжвагонному з'єднанні при третьому обмірі	159,3	96	10,2292	1,6143
Збільшення зазору між двома обмірами			2,4086	1,9555
Зростання пробігу, тис. км	70,2			
Інтенсивність зносу в з'єднанні, мм/10 тис. км			0,343	0,279
Інтенсивність зносу поверхонь корпусу автозчепу, мм/10 тис. км пробігу			0,17	0,139
Статистичний максимум інтенсивності зносу, мм/10 тис. км пробігу			0,52	

Наведений статистичний прогноз показав, що середня інтенсивність зносу (за математичним сподіванням) забезпечує ресурсний пробіг вагона 300 тис. км – до першого деповського ремонту. Однак існує прогнозна ймовірність дострокових відчеплень вантажних вагонів:

- за зносом гребеня колісної пари – після 168,5 тис. км пробігу;
- за виступом ковпака ковзуна візка– після 120 тис. км пробігу;
- щодо граничного розміру діаметра підп'ятника – після 170 тис. км пробігу.

Також були проведені випробування композиційних гальмівних колодок американського виробництва з метою їх адаптації для роботи в умовах залізниць України [10, 12, 14, 44, 163, 168, 177].

Експериментальні дослідження гальмових колодок «Кобра Тредгард» порівняно з колодками ВАТ «Трибо» показали, що існує сприятливий вплив колодки на поверхню кочення, а недоліком є виникнення тріщин на межі «металева вставка – фрикційний матеріал», підвищений знос колодки. За результатами експериментальних випробувань рекомендовано кампанії «RFPC» продовжити роботи з удосконалення конструкції колодки в напрямку зменшення тріщиноутворення, а ВАТ «Трибо» – спрямувати дослідження на поліпшення впливу гальмівних колодок на поверхню кочення коліс. Також у ТОВ «Випробувальна лабораторія фрикційних виробів «Євротест» було проведено випробування з визначення як ефективності гальмування, так і температури поверхні кочення колеса на динамометричному стенді. Температура фіксувалася в процесі випробувань за програмою норм безпеки, а гальмування виконувалися зі швидкістю 61,111,144, 140, 160 км/год при натисканні 10 і 20 кН. Максимальні температури досягалися при гальмуванні з максимальними швидкостями й максимальними натисканнями. Гальмівна чавунна колодка порівнювалася з композиційною гальмівною колодкою 2ТР-37-01. З графіка (рис. 5.14) видно, що практично на всіх інтервалах гальмувань при різних швидкостях і натисканнях 10 і 20 кН вищий нагрів колеса спостерігається з композиційною колодкою 2ТР-37-01.

Застосування колодки 2ТР-37-01 дозволяє забезпечити щадний вплив на зону контакту «колодка – колесо», оскільки робочі температури колеса при гальмуванні нижчі, ніж при використанні будь-яких композиційних колодок [10, 12, 44, 141].

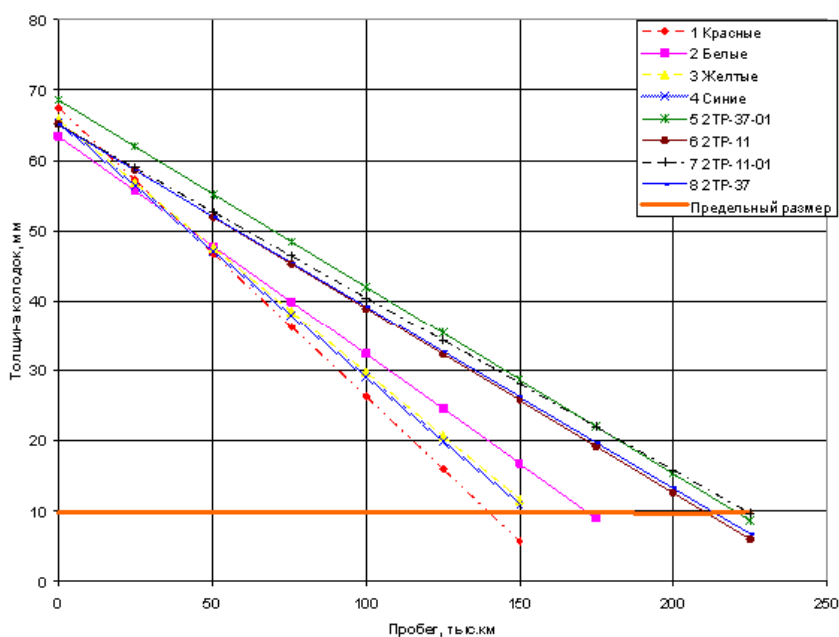
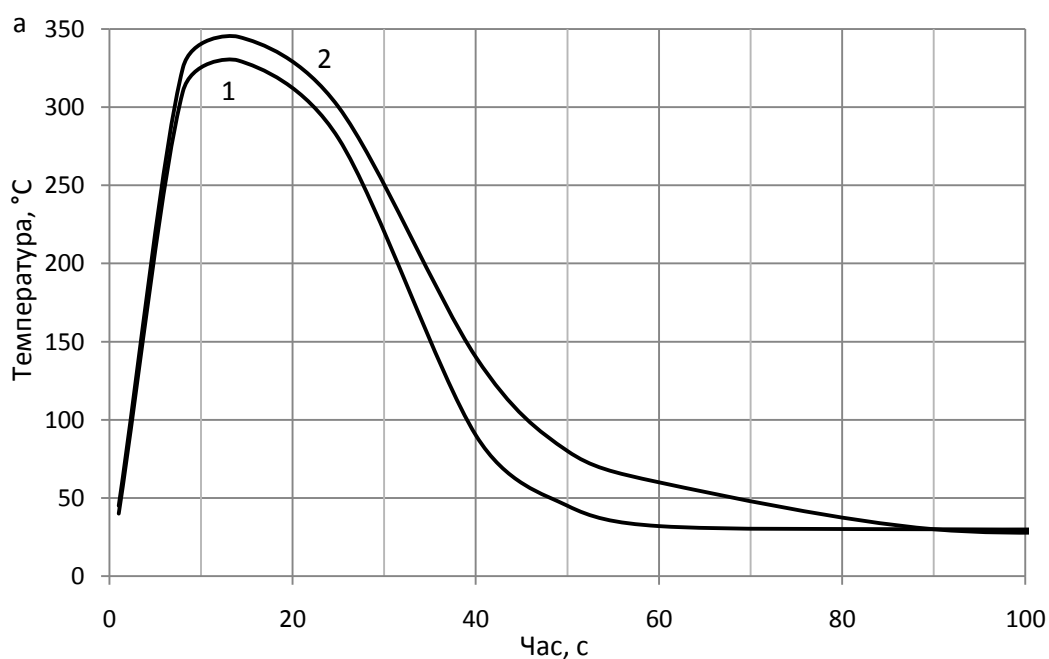


Рисунок 5.14 –Знос гальмівних колодок залежно від пробігу вагона



1 – чавунні; 2 – композиційні (2ТР-37-01)

Рисунок 5.15 – Залежності температури поверхні кочення колеса (а) та гальмівних колодок (б) на динамометричному стенді (швидкість 120 км/год, натискання 20 кН)

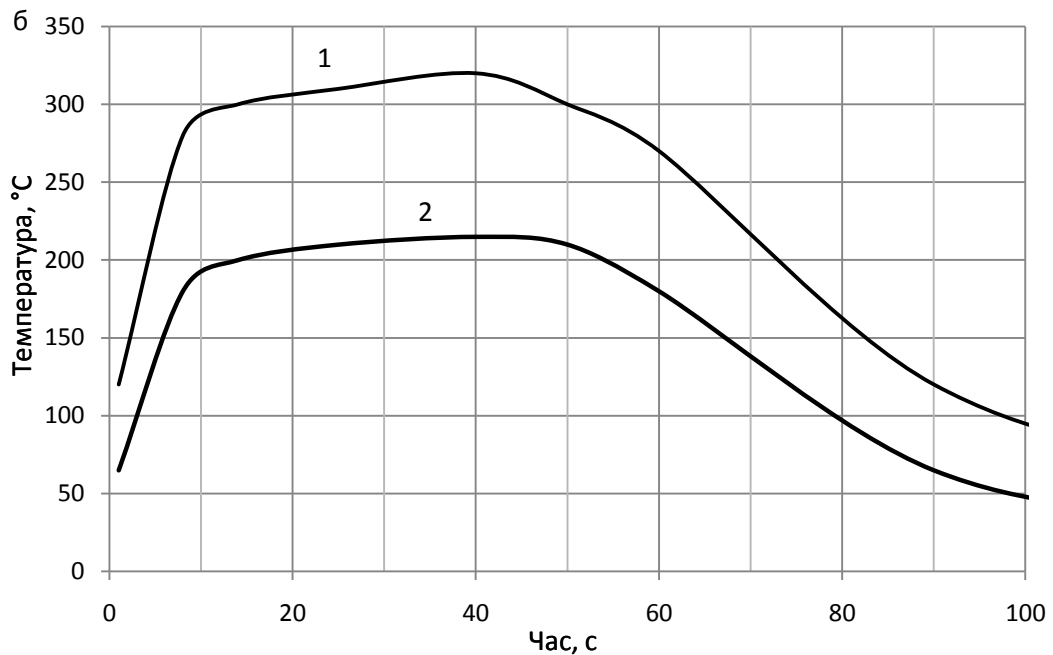


Рисунок 5.15 – Закінчення

Далі наведемо результати щодо адекватності розроблених математичних моделей, залежностей та виразів.

Так, удосконалена математична модель теплового балансу (3.82), використовуючи яку на основі МКЕ було розраховане теплове поле взаємодії гальмівних колодок з колесом, є адекватною, оскільки різниця значень температур, що отримана при теоретичному розрахунку та під час проведення експериментальних досліджень (рис. 5.15), становить 3,2...14,5 %. Тобто можна стверджувати, що удосконалена модель є адекватною, оскільки похибка не перевищує 15 %.

Порівняння отриманих значень щільності розподілу відмов структурних елементів вантажних вагонів на основі виразу (2.28) та результати експериментальних досліджень підтверджують адекватність удосконаленої моделі. Так, абсолютна похибка значень щільності розподілу відмов вантажних вагонів становить:

- 8...12% – для колісних пар (рис. 5.4, А.6);
- 6...13% – для візків та ресорного підвішування (рис. 5.6, 5.8, А.2, А.5);

- 2...11% – для конструкції кузовів (рис. А.3).

Найбільше за модулем значення неузгодженості параметрів запропонованої моделі і оригіналу ( $\Delta u$ ) повинно бути не більше 15 % і відповідно дорівнює:

- для моделі (2.14) – 7,4%;
- для моделі (2.15) – 10,7 %;
- для моделі (2.16) – 11,3 %.

У моделях (3.99), (3.114), (3.120) та (3.121) середнє значення неузгодженості з існуючими моделями становить 12,5 %.

У моделях (3.89), (3.91), (3.92) під час розрахунків закладена похибка в межах 5 %.

#### **5.4 Аналіз результатів порівняльних експлуатаційних випробувань залізничних коліс (середньоміцних та високоміцних) вантажних вагонів та різних методів виготовлення (литих та суцільнокатаних)**

Як зазначалось раніше, повністю усунути зношування в зоні контакту «колесо-рейка» неможливо, проте знизити його інтенсивність можна шляхом вдосконалення профілю поверхні кочення колеса, оптимізації співвідношення твердості колеса і рейки, підвищення міцності й твердості колеса.

Вирішуючи цю проблему, у ВАТ «Інтерпайп НТЗ» спільно з Інститутом чорної металургії НАН України було виготовлено високоміцні колеса (типу КП-Т) зі сталі марки Т підвищеної твердості [181, 200, 243] на заміну серійних середньоміцних коліс (типу КП-2) зі сталі марки 2. Основними характеристиками сталі марки Т є міцність  $\sigma_B > 1100$  МПа і твердість 320...360 НВ проти  $\sigma_B < 1000$  МПа і 260...300 НВ сталі марки 2 [66]. Це дозволило підвищити ресурс вагонних коліс типу КП-Т за критерієм зносотривкості на 30-40 % порівняно з колесами типу КП-2 [66].



Укрзалізницею було закуплено і введено в експлуатацію декілька тисяч високоміцних коліс. Співробітниками науково-дослідної лабораторії «Вагони» ДНУЗТ проведений аналіз наявності дефектів на поверхні кочення суцільнокатаних коліс у кількості 5 500 штук, які надійшли в ремонт за 9 місяців 2009 р. по всій мережі доріг Укрзалізниці. Статистичні дані показують (рис. 5.16), що переважна кількість експлуатаційних пошкоджень належить до повзунів та вищербин (рис. 5.17, а, б), хоча до недавнього часу найбільшу кількість складали прокат і зношування гребеня.

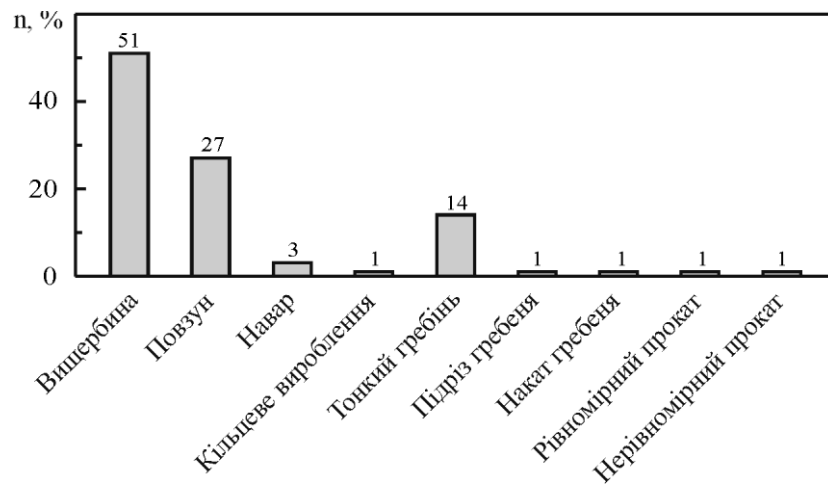


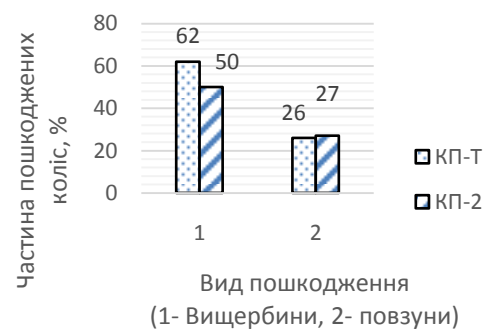
Рисунок 5.16 – Відносна кількість ( $n$ ) дефектів різного типу в колесах, які надійшли в ремонт за 9 місяців 2009 року в депо Укрзалізниці



а



б



в

а – вищербини, б – повзуни, в – порівняння кількості (%) коліс КП-Т ( ) і КП-2 ( ) з цими пошкодженнями

Рисунок 5.17 – Пошкодження на поверхні кочення коліс в експлуатації

Вищербини зумовлені тріщиноутворенням внаслідок контактної втоми металу, а повзуни – його локальною течією. Цьому сприяє проковзування в зоні контакту колесо-рейка (особливо після гальмування на сортувальних гірках), де суттєво (до 900 °С [286]) підвищується локальна температура. Для рейки вона розподіляється вздовж шляху гальмування, а для колеса теплове навантаження концентрується в зоні контакту. Повзуни спричиняють ударні навантаження, що інтенсифікує тріщиноутворення.

Порівняння пошкоджуваності коліс випуску 2005-2008 рр. залежно від марки сталі показало (рис. 5.17, в), що в колесах КПТ повзунів і, особливо, вищербин значно більше, ніж у колесах КП2. У той же час треба відзначити, що дефектів у вигляді повзунів і вищербин не зафіксовано при випробуванні вагонів з колесами КПТ по замкнутому маршруту Роковата–Ужгород–Кошице, де заборонено спускати вагони з гірок, що підтверджує формування цих пошкоджень передусім за впливу температурно-силових факторів під час гальмування.

Аналіз кількості та форми повзунів виявив (рис. 5.18), що вони різняться також за глибиною залягання: у колесах КП2 їх більше глибиною 0,6...1,2 мм, а в колесах КПТ, коли їх глибина 1,4...2,4 мм.

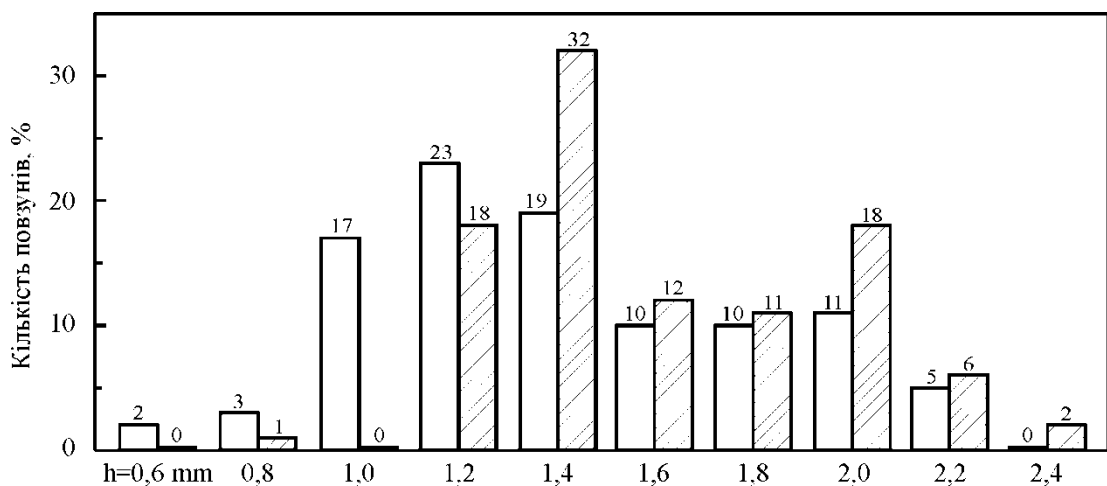


Рисунок 5.18 – Розподіл повзунів різної глибини ( $h$ ) в колесах КП-2 (□) і КП-Т (▨)

Таким чином, аналіз [140, 160] показує, що високоміцним колесам в експлуатації більш притаманне повзуни та вищербини, ніж зношення гребенів.

Надійність і якість залізничних коліс є одним з основних факторів забезпечення безпеки руху. Відмови, пов'язані з технологій виробництва коліс є головним чином наслідком порушення технології виготовлення і контролю, а відмови, що виникають в експлуатації (повзуни, навари, вищербини, термічні тріщини та ін.) є наслідком зносу і термомеханічних пошкоджень поверхні кочення. Термін служби коліс залежить, головним чином, від стану інфраструктури та умов експлуатації.

Повний ресурс нового колеса  $\varnothing 957 \pm 7$  мм яке схильне тільки рівномірному круговому зносу, який утворюється на поверхні кочення, в результаті якого утворюється прокат, становить загалом 1 560 000 км. [139]. На практиці дійсний ресурс залізничного колеса значно нижче, і це головним чином пов'язано з наявністю різних дефектів поверхні кочення, що потребує відновлення профілю поверхні кочення. Так, наприклад, при наявності підрізу гребеня знімається шар металу при обточуванні колеса майже в два рази перевищує величину підрізу. Крім того, шар металу, що зрізається, знижує зносостійкість поверхні кочення за рахунок зниження твердості металу колеса.

Аналіз пошкоджуваності коліс на залізницях СНД в різних джерелах відрізняється за характером і процентному розподілу дефектів. Так в роботі [153] зазначено, що основними дефектами коліс є тонкий гребінь (58%) і повзун (11%), а в роботі [208] - вищербини (66%) і повзун (38%). Немає точних даних і по пошкоджуваності залізничних коліс на залізницях США, умови експлуатації яких багато в чому схожі з нашими. В одних джерелах основна причина виходу з ладу коліс - прокат ободів коліс і вищербини [272], а в інших - знос гребеня (27%) і наволочення металу (19%) [259]. Аналіз пошкоджуваності коліс показує, що дані за характером і процентному розподілу дефектів поверхні кочення коліс значно відрізняються. Це можна

пояснити відмінностями полігонів експлуатації, станом рухомого складу, сезонністю проведення досліджень і, можливо, способом виробництва коліс.

Вартість сталі і легуючих елементів необхідних для виробництва коліс показує тенденцію постійного зростання. Особливо на вартість виробництва залізничних коліс впливає вартість енергоносіїв, яка за останні кілька років збільшилася в кілька разів. Висновок комітету по колесах Асоціації європейської залізничної промисловості (UNIFE) свідчить, що у виробників коліс немає іншого виходу, як досить швидко підвищувати ціни.

Вітчизняні виробники залізничних коліс прагнуть при незмінній якості знизити їх вартість, розглядаючи одним з можливих варіантів зміни самої технології виробництва коліс.

У світовій промисловості виробництва залізничних коліс знайшли застосування два різні способи їх виготовлення: обробки деталей тиском (штампування, штампування і прокатка) і литтям. Найбільшого поширення набула технологія виробництва суцільнокатаних залізничних коліс методом штампування і прокатки в колесопркатному стані. Тут формуються основні частини колеса: диск, обід, маточина.

Виробництво катаних коліс вимагає складного обладнання, що збільшує їх вартість. Відомо, що більш дешевим способом є виробництво литих коліс. В США щорічно випускається близько 1 млн. коліс, головним чином для вантажних вагонів [134]. На залізницях США до 75% залізничних коліс отримують методом лиття. Литі колеса виробляються виплавою колісної сталі в електродугових печах і її розливанням в графітові форми. Отримана заготовка піддається термічній і механічній обробці. Крім того, для підвищення міцності ободу таких коліс застосовують відцентровий вилівок, а для збільшення зносостійкості поверхні кочення в метал ободу вводять легуючі елементи.

Для визначення ефективності експлуатації литих залізничних коліс на залізницях колії 1520 мм була проведена підконтрольна експлуатація литих коліс [147, 167]. На ВАТ «Дарницький вагоноремонтний завод» у 2005 році

під час капітального ремонту литими колесами (200 колісних пар) були обладнані вантажні вагони на візках 18-100 як з зазором, так і з постійним контактом у ковзунах (візки без модернізації та модернізовані за технологією «А. Стакі»), профіль поверхні кочення литих коліс був застосований двох видів: ДІТ-УЗ і ІТМ-73. Експлуатаційні випробування піввагонів з литими колесами проведені на дослідному маршруті № 3 Кривий Ріг-Ужгород-Кошице.

Колеса американського виробництва по конструкції дещо відрізнялися від вимог інструкції по колісним парам, чинним на залізницях колії 1520 мм. Для наочності різниці профілів литих і суцільнокатаних профілів на рис.5.19 вироблено їх накладення, де штрихованої зона відноситься до перетину литого колеса.

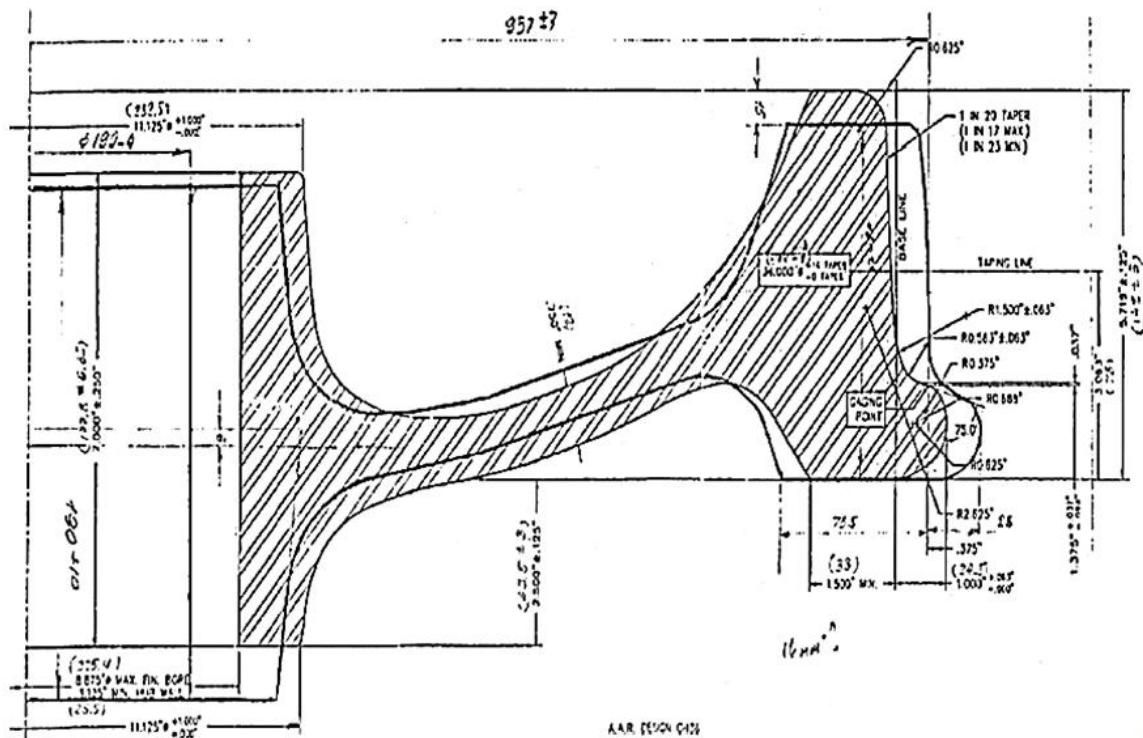


Рисунок 5.19 - Порівняння поперечних перерізів коліс литих (заштрихована зона) і суцільнокатаних (контур)

Перед формуванням колісних пар відповідно до чинних нормативних документів все литі колеса були переточені: у маточини оброблені торці і внутрішній діаметр маточини; у обода – ширина, гребінь і поверхня кочення.

Прогнозування ресурсу в залежності від зносу товщини гребеня представлено на рис. 5.19. Визначено межі довірчих інтервалів (Гдов), які дозволяють визначити величину пробігу, при якому може відбутися перша відмова через досягнення мінімально-допустимого розміру контрольованого параметра (товщини гребеня).

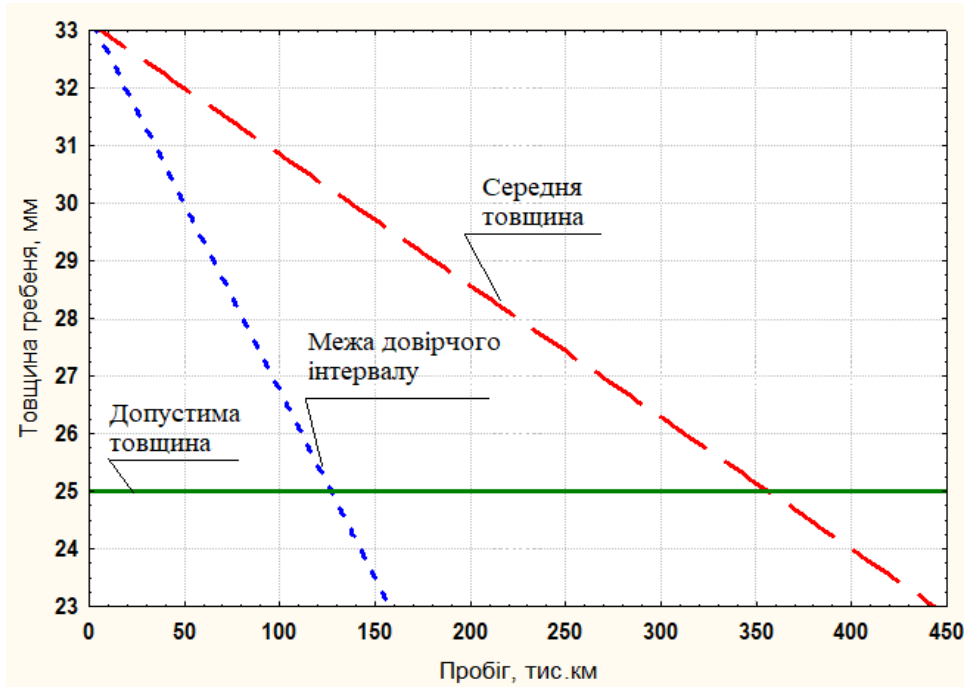


Рисунок 5.20 – Залежність товщини гребеня від пробігу

Прогнозування ресурсу литого колеса в залежності від зносу товщини обода надано на рис. 5.21

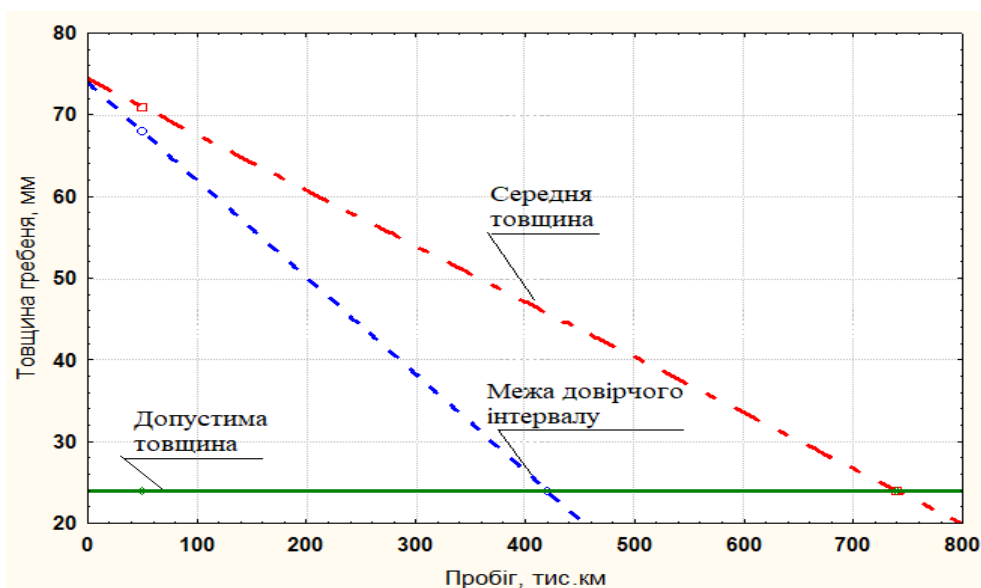


Рисунок 5.21 – Залежність товщини обода від пробігу

За результатами підконтрольної експлуатації встановлено, що при початковому значенні товщини обода 75 мм середній ресурс по товщині обода складе 739 тис. км, а пробіг до першої відмови можливий через 418 тис. км.

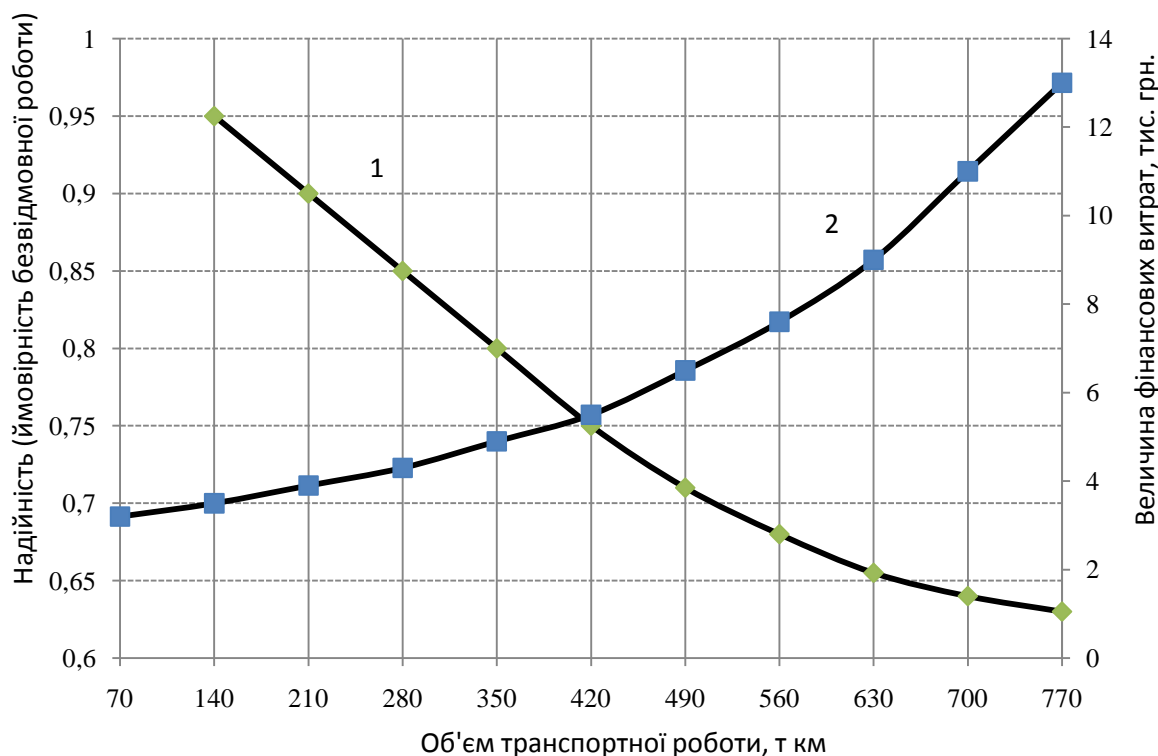
Міжремонтний період через зношування гребеня у суцільнокатані колеса складе в середньому 360 тис. км, а перша відмова може відбутися через 132 тис. км.

В процесі підконтрольної експлуатації встановлено процентне співвідношення дефектів, у тому числі найбільше поширені отримали такі дефекти як: тонкі гребені (55,6%), повзуни (18,5%), вищербини (11,1%).

### **5.5 Техніко-економічна оцінка життєвого циклу вантажного вагона з урахуванням запропонованих технічних та технологічних рішень**

На останньому етапі дослідження наведемо техніко-економічне обґрунтування запропонованих технічних та технологічних рішень, що впливають на показники надійності вантажних вагонів.

На фоні підвищення виконуваної роботи вантажними вагонами і за відсутності підвищення тарифних ставок на перевезення необхідно знайти співвідношення оптимального рівня фінансових витрат і рівня забезпечення надійності вантажних вагонів з максимально можливим виконанням транспортної роботи. При цьому врахуємо відчеплення вантажних вагонів, що призвели до проведення передчасних ремонтів. Для цього побудуємо залежності фінансових витрат і надійності вантажних піввагонів 12-7023 від виконуваної транспортної роботи (рис. 5.22).



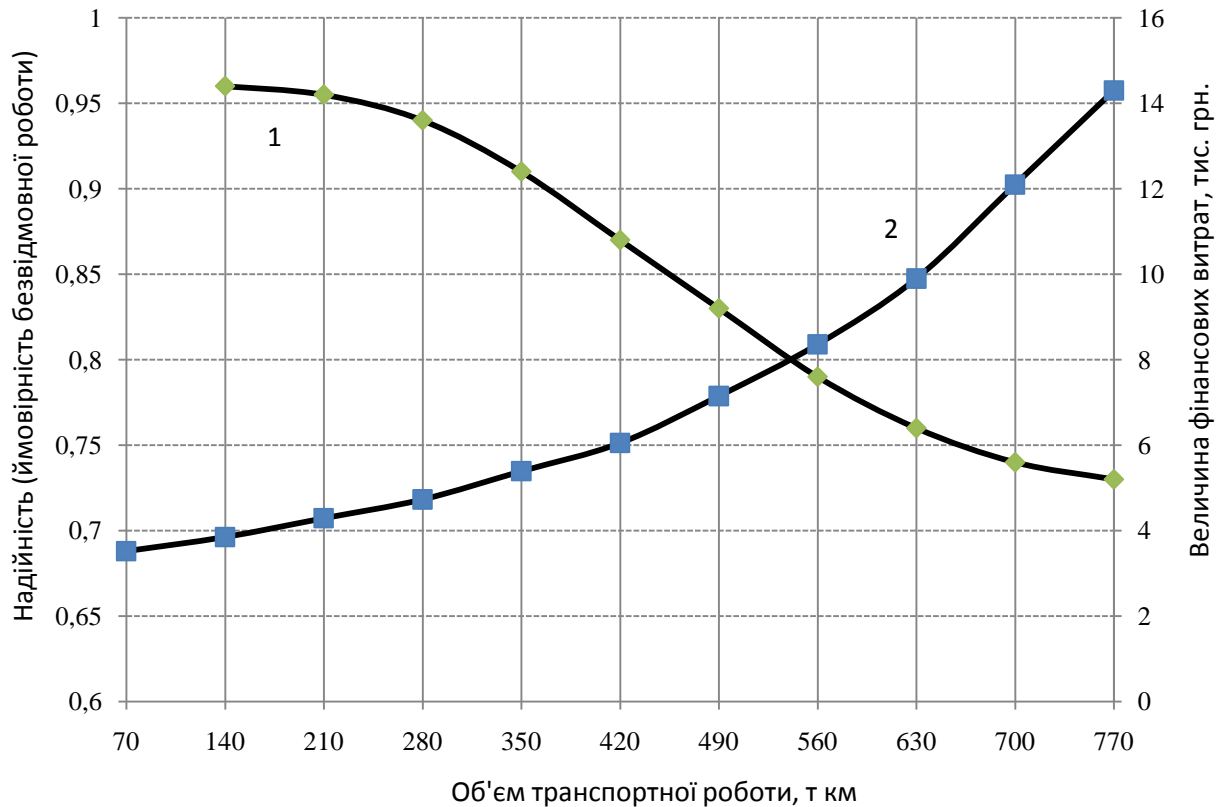
1 – надійність; 2– фінансові витрати

Рисунок 5.22 – Залежності фінансових витрат і надійності піввагонів 12-7023 від виконуваної транспортної роботи

Як бачимо із залежності, існує оптимальна зона фінансових витрат і надійності вантажних вагонів при виконанні транспортної роботи на рівні 350...490 т·км.

На основі наведеної моделі для піввагона 12-7023 (див. рис. 4.3, 4.4) з урахуванням запропонованих технічних і технологічних рішень забезпечення надійності для відповідного об'єму виконуваної роботи визначимо величину фінансових витрат, що припадають на питому вагу транспортної роботи та на утримання вагонів з високою надійністю (5.24).





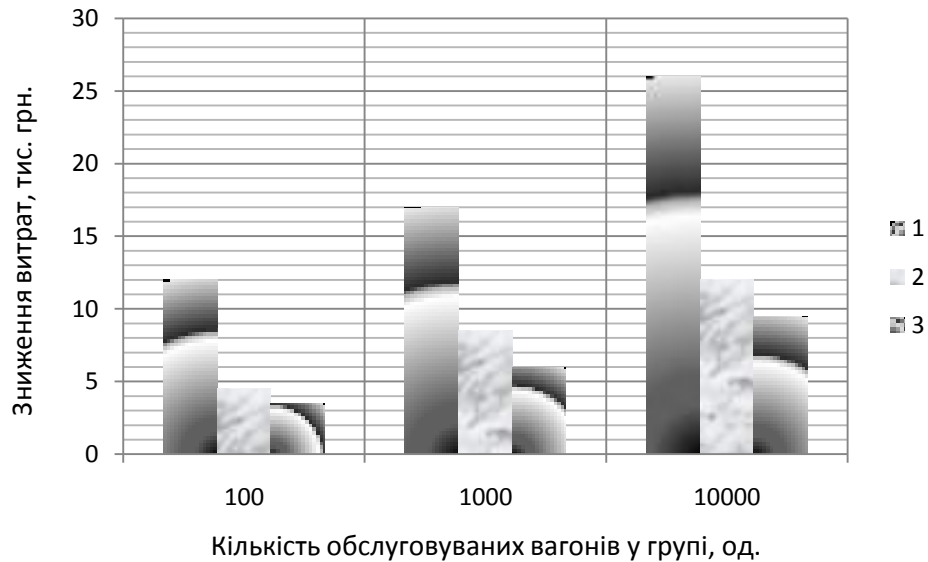
1 – надійність; 2 – фінансові витрати

Рисунок 5.24 – Залежності фінансових витрат і надійності піввагонів 12-7023 від виконуваної транспортної роботи з урахуванням запропонованих технічних і технологічних рішень

Як бачимо з рис. 5.24, фінансові витрати збільшились, але величина транспортної роботи підвищилась до рівня 490...560 т·км із забезпеченням вищого рівня надійності піввагонів 12-7023.

Під час теоретичних досліджень показників надійності вантажних вагонів на основі отриманої аналітичної залежності граничного ресурсу структурних елементів вагона з урахуванням проведення технічних дій (технічного обслуговування, поточного, деповського, капітального ремонтів) та інноваційних конструктивних та технологічних рішень у процесі технічного утримання та ремонту вагонів можна досягти збільшення міжремонтних пробігів вагонів із забезпеченням необхідного рівня безпеки

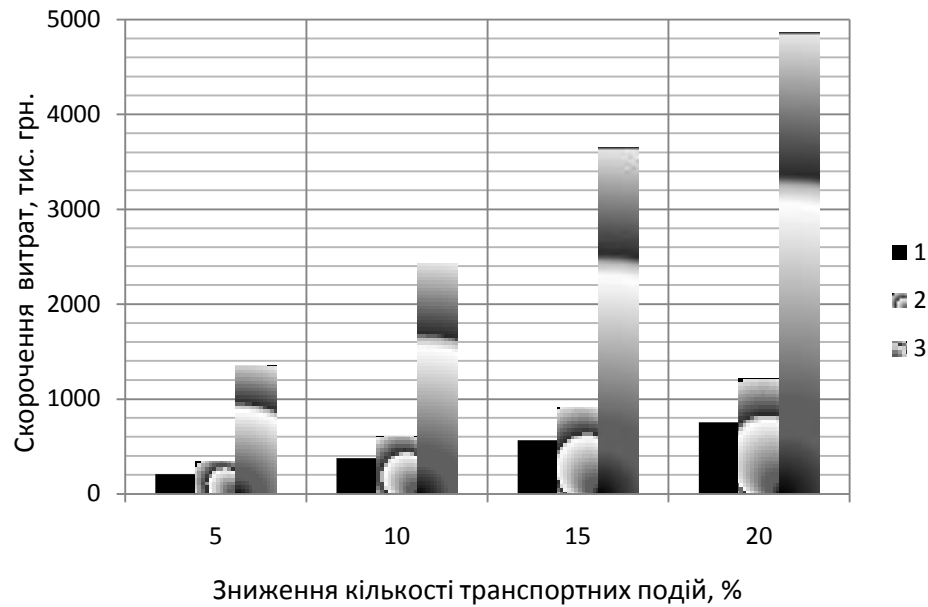
руху та зменшити експлуатаційні витрати [155, 170, 177]. Результати зі скорочення експлуатаційних витрат, що припадають на один вантажний вагон у процесі технічного утримання та ремонту вантажних вагонів при відповідній кількості їх у групі, наведені на рис. 5.25.



1 – при збільшенні міжремонтного пробігу; 2 – при використанні інноваційних деталей; 3 – при використанні інноваційних технологічних рішень

Рисунок 5.25 – Скорочення експлуатаційних витрат, що припадають на один вантажний вагон в процесі технічного утримання та ремонту вантажних вагонів при відповідній кількості їх у групі

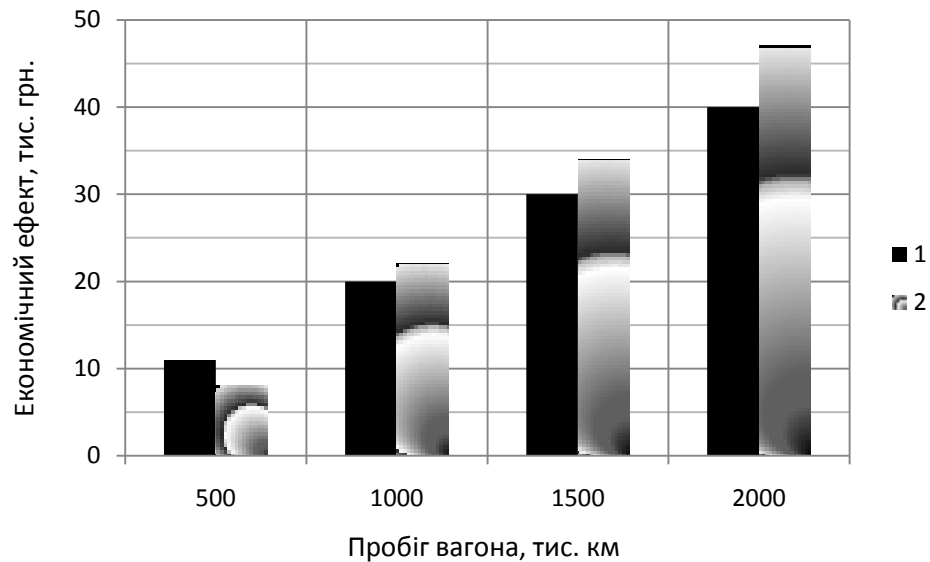
Використовуючи введене поняття та математичний опис коефіцієнта функціональної надійності вантажних вагонів, у процесі експлуатації можна визначити період безпечної експлуатації та прогнозувати відповідні економічні показники, що характеризують експлуатаційні та ремонтні витрати. Тобто на основі цього показника можна керувати безпекою руху, знижувати можливість виникнення небезпечних ситуацій на залізничному транспорті та контролювати якість усього перевізного процесу [289]. Скорочення витрат при зниженні кількості транспортних подій на залізничному транспорті для деяких варіантів наведено на рис. 5.26.



1 – на експлуатацію вагонів; 2 – на ремонт вагонів; 3 – на інфраструктуру залізниці

Рисунок 5.26 – Скорочення витрат при зниженні кількості транспортних подій на залізничному транспорті

На основі розробленої методології досліджень надійності вантажних вагонів з використанням знань про зв'язок ознак несправностей і самої несправності відповідного вантажного вагона, що формуються за даними ремонтних і експлуатаційних вагонних депо, можна прогнозувати показники надійності з виявленням технічного стану вагона для запобігання раптовим відмовам. Тим самим, знаючи величини зносу деталей та з'єднань вантажних вагонів, можна спрогнозувати економічний ефект при їх відповідному пробігу, що досягається за рахунок вчасних технічних дій у системі технічного обслуговування та ремонту, а результати зобразити у вигляді діаграми (рис. 5.27).



1 – технічне обслуговування; 2 – ремонт

Рисунок 5.27 – Економічний ефект при відповідному пробігу вантажного вагона у випадку впровадження системи досліджень надійності

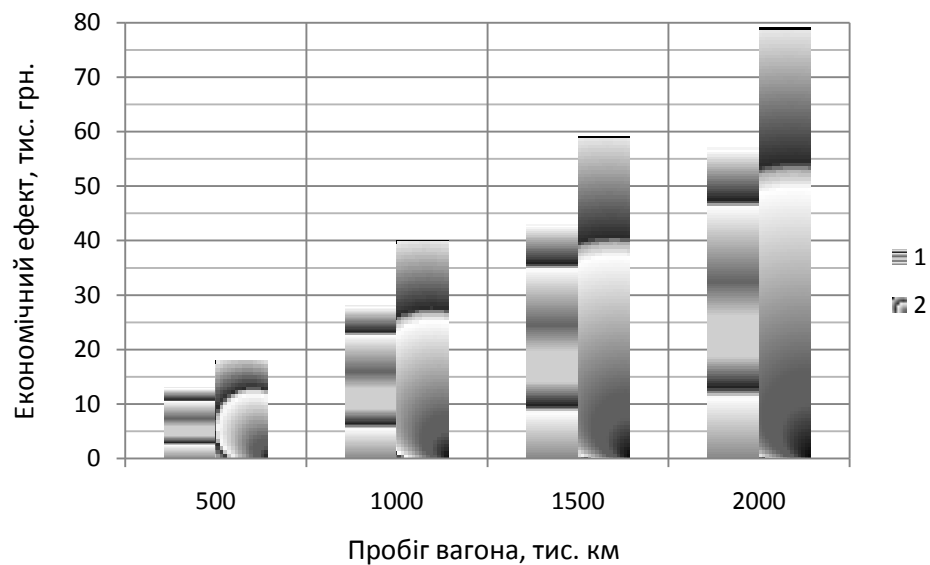
Результати теоретичного моделювання теплового балансу взаємодіючих елементів гальмівної системи вантажного вагона дозволили оптимізувати склад гальмівних колодок, що при експлуатації надали можливість отримати економічний ефект від впровадження нових колодок у вагонному господарстві Укрзалізниці на рівні 1,8...3,5 тис. грн на 1 млн пробігу.

Застосовуючи метод визначення відмов і оцінки технологічної надійності вагона, можна досягти підвищення ресурсу складових елементів вагона із запобіганням виникненню дефектів з урахуванням особливостей технологічного процесу виготовлення, а економічний ефект при експлуатації може скласти від 12 до 30 тис. грн на один вантажний вагон.

При використанні методології визначення показників надійності вантажних вагонів, що включає методи визначення показників на основних етапах життєвого циклу вантажного вагона, які базуються на аналізі та синтезі теоретико-експериментальних даних про технічний стан та основні показники надійності вагона як механічної багатоелементної системи,

техніко-економічна ефективність при застосуванні цієї методології досягається за рахунок зниження експлуатаційних витрат, що припадають на ремонт при виникненні раптових відмов елементів вагона, а їх скорочення складає 4...12 тис. грн на один вантажний вагон.

При підвищенні міжремонтного ресурсу вантажних вагонів із визначенням параметрів експлуатаційної надійності вантажних вагонів, таких як: коефіцієнт готовності, ймовірності безвідмовної роботи та виконання задачі відбувається зниження фінансових витрат, що припадають на експлуатацію (рис. 5.28).



1 – криті вагони; 2 – універсальні піввагони

Рисунок 5.28 – Економічний ефект при підвищенні міжремонтного ресурсу

Підсумовуючи результати роботи, покажемо, як зміниться надійність вантажного вагона на етапах життєвого циклу.

На етапі проектування при існуючій системі забезпечення надійності вантажних вагонів і при запропонованих підходах, на прикладі гальмівних колодок універсальних піввагонів (група піввагонів з 50 одиниць) покажемо графічно середню величину граничного ресурсу і фінансових витрат на їх утримання (табл. 5.6).

Таблиця 5.6 – Порівняння систем забезпечення надійності вантажних вагонів (на прикладі гальмівних колодок універсальних піввагонів (група піввагонів з 50 одиниць)) на етапі життєвого циклу

Показник	Існуюча система надійності	Розроблена система дослідження	Відносний приріст, %
Ресурс, тис. км	150	220	31,82
Фінансові витрати, тис. грн	320	400	20
Питома витрата, грн/км	2,13	1,82	-14,5

Порахувавши збільшення середнього граничного ресурсу гальмівних колодок піввагонів на етапі проєктування, можна порахувати економію фінансових витрат при застосуванні пропонованої системи утримання:

$$E_{\pi} = (220000 - 150000)(2,13 - 1,82) = 21700 \text{ грн.}$$

На етапі експлуатації життєвого циклу вантажного вагона також покажемо різницю фінансових витрат при існуючій системі забезпечення надійності вантажних вагонів і при запропонованій системі, на прикладі універсального піввагона (середні значення групи піввагонів з 50 одиниць) з проведенням капітального ремонту. Результати наведемо в табл. 5.7.

Таблиця 5.7– Порівняння систем забезпечення надійності вантажних вагонів (на прикладі універсального піввагона (середні значення групи піввагонів з 50 одиниць)) на етапі життєвого циклу – експлуатація

Показник	Існуюча система надійності	Розроблена система дослідження	Відносний приріст, %
Ресурс, тис. км	800	950	15,8
Структура ремонту, фінансові витрати, тис. грн	6ДР+1КР, 282	7ДР+1КР 308	8,4
Питома витрата, грн/км	0,3525	0,3242	-8,03

Порахувавши збільшення середнього ресурсу до КР піввагона на етапі життєвого циклу- експлуатація, можна порахувати економію фінансових витрат при застосуванні пропонованої системи утримування технічного обслуговування та ремонту:

$$E_e = (950000 - 800000)(0,3525 - 0,3242) = 4245 \text{ грн.}$$

Тоді для групи піввагонів з 50 одиниць економія фінансових витрат на життєвому циклі порівняно з існуючою системою і пропонованою становить:

$$E_e = 4245 \cdot 50 + 21700 = 233950 \text{ грн.}$$

Обґрунтування економічної ефективності запропонованих рішень базується на концепції вартості життєвого циклу вагона та визначається для піввагона 12-132.

Визначення вартості життєвого циклу виробу ґрунтується на розумінні життєвого циклу як сукупності взаємопов'язаних процесів послідовної зміни стану виробу від дослідження до припинення його експлуатації та утилізації.

При цьому елемент вартості життєвого циклу виробу розуміється як фінансовий еквівалент витрат, пов'язаних з певним процесом життєвого циклу виробу, сукупність поточних вартостей яких формує вартість життєвого циклу виробу [84, 85].

Тобто вартість життєвого циклу виробу (міжнародне позначення – Life Cycle Cost або LCC) – це поточна вартість сукупності витрат, пов'язаних із життєвим циклом виробу.

Таким чином, методично визначення вартості життєвого циклу виробу ґрунтується на дисконтуванні прогнозних величин елементів життєвого циклу за період, що дорівнює тривалості життєвого циклу. При цьому дисконтування – це процес визначення поточної вартості грошового потоку. А під поточною вартістю грошового потоку розуміється грошова сума, інвестування якої у встановлений, як правило поточний, момент часу з визначеною нормою доходу на інвестований капітал забезпечить накопичення еквівалентної грошовому потоку за часом та величиною суми грошей [64].

Життєвий цикл виробу включає три етапи. Перший етап передбачає дослідження та формування вихідних вимог до виробу, науково-дослідні, дослідно-конструкторські та проєктні роботи з розробки виробу та його випробування тощо. Другий етап являє собою експлуатацію виробу замовником. Третій етап – це вилучення виробу з експлуатації та його утилізація. Витрати першого етапу життєвого циклу можуть виробником цілком відноситись до ціни виробу. Тому з позиції замовника елементами життєвого циклу є витрати другого та третього етапів життєвого циклу [64].

Елементи життєвого циклу виробу в галузі машинобудування включають такі складові [64]:

- ціна придбання виробу;
- супутні капітальні витрати, що необхідні для введення виробу в експлуатацію;
- витрати, пов'язані з плановим видами ремонту та модернізації



виробу;

- витрати, пов'язані з відновленням працездатності виробу у випадку відмови;
- поточні витрати на утримання виробу в технічно справному стані;
- поточні витрати, пов'язані з експлуатацією виробу;
- витрати на ліквідацію (утилізацію) виробу, зменшені на очікувані доходи від ліквідації (утилізації) (можуть мати від'ємну величину).

Процес дисконтування елементів життєвого циклу виробу вимагає встановлення ставки дисконту. Ставка дисконту – це норма доходу на капітал, що використовується для дисконтування. Ставка дисконту визначається замовником виробу як мінімальна прийнятна норма доходу на капітал, що інвестується в придбання виробу.

Елементи життєвого циклу можуть бути визначені в прогнозних або базисних цінах (рівень цін фіксується на певний момент часу, як правило поточний). При використанні прогнозних цін дисконтування здійснюється за номінальною ставкою дисконту, яка містить інфляційну складову. При використанні базисних цін, дисконтування здійснюється за реальною ставкою дисконту, з якої вилучена інфляційна складова [64].

Якщо замовником не визначена ставка дисконту, номінальна ставка дисконту може бути визначена як [6]:

- середня норма доходу на капітал у сфері економічної діяльності, у якій діє замовник;
- середня ставка процентів по довгострокових депозитах у національній валюті (за даними Національного банку України), збільшена на премії за відмінність у рівні ліквідності та рівні ризику інвестування у придбання виробу та названий депозит;
- іншим обґрунтованим способом.

Реальна та номінальна ставки дисконту пов'язані відомою залежністю [31]:

$$R_p = \frac{R_n - i}{1 + i}, \quad (5.39)$$

де  $R_p$  – реальна ставка дисконту, частка;

$R_n$  – номінальна ставка дисконту, частка;

$i$  – темп інфляції, частка.

При визначенні LCC для порівняння виробів використовуються, як правило, однакові умови щодо рівня цін та ставки дисконту. Відмінність в названих умовах потребує додаткового обґрунтування. Обґрунтуванням різної величини ставки дисконту при порівняння виробів може бути різниця в рівні ризикованості інвестицій у придбання названих виробів, спричинена різницею в показниках надійності виробів як технічних систем або іншими причинами.

Вартість життєвого циклу визначається як сума поточних вартостей елементів життєвого циклу виробу. У загальному випадку вартість життєвого циклу виробу визначається за формулою [64]:

$$LCC = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1 + R)^{t_i}}, \quad (5.40)$$

де  $LCC$  – вартість життєвого циклу виробу, грн;

$C_i$  –  $i$ -й елемент життєвого циклу виробу;

$t_i$  – тривалість періоду часу від моменту, на який здійснюється дисконтування (як правило, поточний момент часу), до моменту виникнення  $i$ -го елемент життєвого циклу виробу, років;

$R$  – ставка дисконту (річна норма доходу), частка;

$n$  – кількість елементів життєвого циклу виробу.

Якщо поточний момент часу, на який здійснюється дисконтування, збігається з моментом придбання виробу, а поточні витрати, пов'язані з

експлуатацією виробу, та поточні витрати на утримання виробу в технічно справному стані, постійні в часі, формула (5.40) набуває вигляду [64]:

$$LCC = \left[ C_{\text{цін}} + \frac{C_{\text{суп}}}{(+R)^{t_{\text{суп}}}} + \sum_j \frac{C_{\text{рем.пл.}j}}{(+R)^{t_j}} + \sum_j \frac{C_{\text{рем.відм.}j}}{(+R)^{t_j}} + \right. \\ \left. + C_{\text{екс}} + C_{\text{утр}} \cdot \frac{1 - (+R)^{-T}}{R} + \frac{C_{\text{лік}}}{(+R)^T} \right], \quad (5.41)$$

де  $C_{\text{цін}}$  – ціна придбання виробу, грн;

$C_{\text{суп}}$  – супутні капітальні витрати, що необхідні для введення виробу в експлуатацію, грн;

$C_{\text{рем.пл.}j}$  – витрати, пов'язані з плановим видами ремонту та модернізації виробу, грн;

$C_{\text{рем.відм.}j}$  – витрати, пов'язані з відновленням працездатності виробу у випадку відмови, грн;

$t_j$  – період часу до відповідного ремонту, років;

$C_{\text{екс}}$  – середні річні поточні витрати, пов'язані з експлуатацією виробу, грн/рік;

$C_{\text{утр}}$  – середні річні поточні витрати на утримання виробу в технічно справному стані (технічне обслуговування, поточні ремонти тощо), грн/рік;

$C_{\text{лік}}$  – витрати на ліквідацію виробу, зменшені на очікувані доходи від ліквідації, грн;

$T$  – тривалість життєвого циклу виробу, років.

Критерієм відбору є найменша величина вартості життєвого циклу виробу за умови її визначення для однакового періоду дисконтування, в однаковому рівні цін, як правило, за умови рівності ставки дисконту та забезпечення порівнянності за продуктивністю виробів, що розглядаються. Якщо не забезпечується порівнянність за названими умовами, порівняння за

показником LCC не забезпечує відбору найбільш ефективного варіанта [64].

Якщо тривалість життєвого циклу виробів, що розглядаються, є різною, порівнянності за періодом дисконтування можна досягти порівнянням поточної вартості життєвих циклів, що повторюються у періоді часу, який дорівнює найменшому спільному кратному тривалості життєвих циклів виробів, що розглядаються. Тобто застосовується формула [64]

$$LCC_{кр.k} = LCC_k \cdot \frac{1 - (+R)^{T_{НСК}}}{1 - (+R)^k}, \quad (5.42)$$

де  $LCC_{кр.k}$  – спільна вартість життєвих циклів  $k$ -го виробу за період, що дорівнює найменшому спільному кратному тривалості життєвих циклів виробів, які порівнюються, грн;

$LCC_k$  – вартість одного життєвого циклу  $k$ -го виробу, грн;

$T_k$  – тривалість життєвого циклу  $k$ -го виробу, років;

$T_{НСК}$  – найменше спільне кратне тривалості життєвих циклів виробів, які порівнюються, років.

Оскільки економічний ефект запропонованих заходів визначається різницею у вартостях життєвого циклу, елементами життєвого циклу піввагона є витрати на його придбання, проведення ремонтів та утилізацію. Інші витрати, пов'язані з життєвим циклом піввагона, при розрахунку вартості життєвого циклу не враховуються, оскільки можуть вважатись однаковими за варіантами і на різницю у вартостях життєвих циклів не впливають.

Тривалістю життєвого циклу піввагона без використання запропонованих заходів є його нормативний термін служби – 22 роки. При цьому тривалість ремонтного циклу по капітальному ремонту досягає 11 років. За рахунок запропонованих заходів очікується підвищення тривалості

ремонтного циклу піввагона за капітальним ремонтом до 13 років, а загального терміну служби – до 26 років [81].

Ціна нового піввагона становить 830 тис. грн без ПДВ. Середня вартість деповського ремонту досягає 27 тис. грн, а капітального ремонту – 52,5 тис. грн. Вартість ліквідації піввагона визначається виходячи з його маси тари (22 т), та середньої ціни брухту чорних металів (4,5 тис. грн без ПДВ) [62, 197].

Ставка дисконту визначається з використанням моделі оцінки капітальних активів ( $\beta$ -метод) [30, 31, 127] як вартість капіталу, інвестованого у сферу економічної діяльності «Транспорт».

Коефіцієнт ризикованості  $\beta$  визначається як відношення коваріації дохідності інвестиційного активу, що досліджується, та дохідності ринку капіталу.

Як вимірник дохідності інвестицій використовується рентабельність власного капіталу великих та середніх підприємств по Україні в цілому (вимірник дохідності ринку капіталу) та сфери економічної діяльності «Транспорт» (вимірник дохідності інвестиційного активу). Відомості щодо чистого прибутку та власного капіталу наведені в табл. 5.8 [76].

Таблиця 5.8 – Визначення рентабельності власного капіталу

Рік	Чистий фінансовий результат, млн грн		Середній власний капітал, млн грн		Власний капітал на кінець періоду, млн грн		Рентабельність власного капіталу, %	
	по Україні	транспорт	по Україні	транспорт	по Україні	транспорт	по Україні	транспорт
2016	13324,4	6622,533	1790507	727082,3	1806908,5	729340,6	0,74	0,91
2015	-373516	-17847,8	1627381	438080,6	1774104,6	724823,9	-22,95	-4,07
2014	-590067	-22591,6	1715516	165346,2	1480658	151337,3	-34,4	-13,66
2013	-22839,7	-1423,4	1917658	176269,8	1950374,9	179355,1	-1,18	-0,81
2012	35067,3	3127,7	1745612	179525,3	1904940,2	173184,5	2,01	1,74
2011	67797,9	2839,8	1506498	180235,4	1586284,7	185866	4,5	1,58
2010	13906,1	1348,7	1348125	169027,3	1426711,6	174604,7	1,03	0,8
2009	-37131,1	4889,5	1201571	155846,4	1269537,7	163449,8	-3,09	3,14
2008	-41025,1	234,5	1081690	139033,1	1133603,7	148242,9	-3,79	0,17
2007	–	–	–	–	1029775,5	129823,2	–	–

За даними табл. 5.8 визначено коваріацію рентабельностей (55,7) та дисперсію дохідності ринку (155,4). Таким чином, коефіцієнт бета для інвестицій у сферу економічної діяльності «Транспорт» досягає:

$$\beta = \frac{55,7}{155,4} = 0,358.$$

Як базова ставка використовується норма доходу на інвестиції з мінімальним ризиком – процентна ставка по довгострокових депозитах суб'єктів господарювання на березень 2017 року [182] – 17,2 %.

Дохідність фондового ринку на поточний момент часу визначається як середня дохідність фондового індексу UX (індекс українських акцій) за один рік (10.03.2016 по 10.03.2017). Величина індексу на початок періоду становила 676,87, на кінець періоду – 941,18. Норма доходу за рік становить:

$$R_m = \frac{941,18 - 676,87}{676,87} \cdot 100 = 39,05\%$$

Таким чином, номінальна ставка дисконту до оподаткування становить:

$$R = R_b + \beta \cdot (R_m - R_b) = 17,2 + 0,358 \cdot (39,05 - 17,2) = 25,0\%$$

При прогнозуванні витрат використана концепція базисних цін, тому для дисконтування застосовується реальна ставка дисконту. Прогнозний темп інфляції досягає 8,1 % [242]. Таким чином, реальна ставка дисконту, що застосовується для визначення вартості життєвого циклу, дорівнює:

$$\frac{25,0 - 8,1}{1 + 0,081} = 15,6\%$$

Визначення поточної вартості витрат виконано в табл. 5.9.

Таблиця 5.9 – Визначення вартості життєвого циклу піввагона

Час від початку, років	Фактор поточної вартості	Без застосування заходів		Застосування заходів	
		витрати	поточна вартість	витрати	поточна вартість
0	1	830	830	830	830
1	0,86505		0		0
2	0,74831		0		0
3	0,64733	27	17,5	27	17,5
4	0,55998		0		0
5	0,48441	27	13,1	27	13,1
6	0,41904		0		0
7	0,36249	27	9,8	27	9,8
8	0,31357		0		0
9	0,27126	27	7,3	27	7,3
10	0,23465		0		0
11	0,20298	52,5	10,7	27	5,5
12	0,17559		0		0
13	0,15190		0	52,5	8
14	0,13140	27	3,5		0
15	0,11367		0		0
16	0,09833	27	2,7	27	2,7
17	0,08506		0		0
18	0,07358	27	2	27	2
19	0,06365		0		0
20	0,05506	27	1,5	27	1,5
21	0,04763		0		0
22	0,04120	-99	-4,1	27	1,1
23	0,03564	–	–		0
24	0,03083	–	–	27	0,8
25	0,02667	–	–		0
26	0,02307	–	–	-99	-2,3
Разом	–	999,5	894	1053,5	897

Тривалість життєвого циклу піввагона за варіантами, що розглядаються, відрізняється, що вимагає застосування коригування, яке визначається за формулою (5.42). Таким чином вартість життєвого циклу піввагона становить:

без використання запропонованих заходів:

$$LCC_k \cdot \frac{1 - (+R)^{n_{СК}}}{1 - (+R)^k} = 894 \cdot \frac{1 - (+0,156)^{86}}{1 - (+0,156)^2} = 894 \cdot 1,0430 = 932,4 \text{ тис. грн.};$$

за умови використання запропонованих заходів:

$$LCC_k \cdot \frac{1 - (+R)^{T_{жск}}}{1 - (+R)^k} = 897 \cdot \frac{1 - (+0,156)^{386}}{1 - (+0,156)^{36}} = 897 \cdot 1,0236 = 918,2 \text{ тис. грн.}$$

Таким чином, за рахунок використання запропонованих заходів можна досягти зменшення вартості життєвого циклу піввагона на 14,2 тис. грн  $(32,4 - 918,2 = 14,2)$ .

## 5.6 Висновки до розділу 5

1. Запропоновано методологічні підходи до оцінки експлуатаційних характеристик нових і модернізованих вантажних вагонів, розроблено плани випробувань надійності вантажних вагонів, наведено результати експлуатаційних досліджень надійності нових і модернізованих вантажних вагонів.

2. Експлуатаційні дослідження підтвердили правильність теоретичних основ застосування розробленого математичного апарату для визначення та прогнозування показників надійності вантажних вагонів. Розвиток наукових основ забезпечення надійності вантажних вагонів на етапах життєвого циклу надає можливість перебудувати послідовність та кількість технічних дій у існуючій планово-запобіжній системі з урахуванням технічного стану структурних елементів вантажного вагона. Для досліджуваних моделей вантажних вагонів було сформовано структуру проведення деповських та капітальних ремонтів, яка відрізняється від існуючої.

3. Результати стендових випробувань гальмівних композиційних колодок показали їх здатність до зменшення величини нагріву колеса при гальмуванні, а також адекватність розробленої теплової моделі для взаємодіючих елементів «колодка – колесо» до результатів експериментальних досліджень, при цьому похибка не перевищувала 15 %.

4. Результати експлуатаційних досліджень дозволяють наповнити базу знань системи дослідження показників надійності вантажних вагонів, що



призначена для постійного моніторингу їх технічного стану і забезпечення необхідного рівня безпеки руху поїздів.

5. Експлуатаційні дослідження дозволили обґрунтувати необхідність вибору колісних сталей залізничних коліс типу КП-2 і КП-Т як за опірністю зношуванню, так і за опірністю утворенню дефектів (повзунів і вищербин) на поверхні кочення коліс з подальшою зміною відповідних нормативно-технічних документів на колісну продукцію.

6. За рахунок використання запропонованих заходів можна досягти зменшення вартості життєвого циклу піввагона на 14,2 тис. грн. Робочий парк піввагонів на залізницях України становить 83 302 одиниці, тоді загальний економічний ефект від застосування запропонованих заходів у експлуатації лише піввагонів на залізничному транспорті України становитиме 1 183 млн грн.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконаних досліджень у дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-прикладна проблема із поліпшення надійності вантажних вагонів та безпеки руху за рахунок формування системи досліджень їх надійності на етапах життєвого циклу. Розроблено наукові основи формування системи дослідження надійності вантажних вагонів на різних етапах життєвого циклу, що на практиці дозволяє значно зменшити експлуатаційні витрати за рахунок подовження терміну корисної експлуатації з урахуванням корегування системи технічного обслуговування та ремонту. Загалом по роботі можна зробити такі висновки:

1. Аналіз стану безпеки руху у вагонному господарстві залізниць України та відмов вантажних вагонів показав, що в результаті відчеплень вагонів у поточний ремонт через несправності вузлів вагонне господарство зазнало збитків на рівні 4 503 грн/тис. км, що припадають на один вагон. Рівень збитків є досить значним, і чим більше відбувається відчеплень через незабезпечення гарантованого пробігу вантажних вагонів, тим більше вагонне господарство вкладає коштів у їх життєвий цикл. Особливо актуальним на сьогодні є забезпечення надійності вантажних вагонів на всіх етапах життєвого циклу, оскільки використовуваний парк рухомого складу є морально та фізично застарілим, що потребує інших підходів до повноти проведення і якості технічного обслуговування та ремонтів. Також це стосується й нових вантажних вагонів, які нещодавно виготовлені й для яких встановлено гарантований пробіг до ремонту. Однак ці терміни практично не дотримуються на експлуатованому парку вантажних вагонів. Тому й для нових вантажних вагонів, які тільки виготовляються, необхідно розробити заходи із забезпечення надійності на всіх етапах їх життєвого циклу.

2. На основі існуючої теорії надійності набула подальшого розвитку методологія визначення показників надійності вантажних вагонів, що містить методи визначення показників на всіх етапах життєвого циклу вагона, які

базуються на аналізі та синтезі теоретико-експериментальних даних про технічний стан, та основні показники надійності вагона як механічної багатоелементної системи. Удосконалено математичну модель прогнозування величини зношування деталей вантажних вагонів, що враховує закони розподілу випадкових величин і дозволяє враховувати показники надійності всіх основних комплектуючих елементів протягом життєвого циклу.

3. Для прогнозування напрацювання окремих деталей та вузлів або вагона в цілому протягом життєвого циклу набула подальшого розвитку математична модель технічного стану вантажного вагона, на основі якої розроблено послідовність визначення показників надійності вагонів для прогнозування кількісних показників надійності деталей та вузлів або вагона в цілому.

4. У результаті виконання теоретичних досліджень взаємодії елементів гальмівної системи вантажного вагона удосконалено математичну модель теплового балансу, використовуючи яку на етапі життєвого циклу – проєктування, можна підбирати колодки з необхідними фізико-хімічними, механічними та триботехнічними властивостями для забезпечення ефективної роботи гальмівної системи та забезпечення необхідного рівня надійності в процесі експлуатації вантажних вагонів.

5. Під час виконання технічних дій (технічного обслуговування та ремонту) та впровадження інноваційних конструктивних та технологічних рішень у процесі технічного утримання та ремонту вагонів протягом життєвого циклу вперше отримано залежність граничного ресурсу структурних елементів вагона, що дозволяє максимально наблизити дані прогнозування до результатів експлуатації та сформувати найбільш технічно обґрунтовану систему технічного обслуговування та ремонту вагонів із зменшенням експлуатаційних витрат. Для визначення періоду безпечної експлуатації вагонів та прогнозування відповідних економічних показників, що характеризують експлуатаційні та ремонтні витрати, отримано поняття та

вираз коефіцієнт функціональної надійності вантажних вагонів на етапі експлуатації життєвого циклу.

6. Для визначення надійності вантажних вагонів на етапі життєвого циклу – виготовлення комплектуючих та вузлів, удосконалено метод визначення відмов і оцінки надійності вагона, що передбачає можливість прогнозування відмов у експлуатації з урахуванням особливостей технологічного процесу виготовлення складових елементів вагона з метою запобігання виникненню дефектів.

7. У результаті досліджень надійності вантажних вагонів на етапі життєвого циклу – експлуатація, набув подальшого розвитку метод визначення термінів проведення регламентних видів технічного обслуговування, поточного, деповського та капітального ремонтів вантажних вагонів, за допомогою якого встановлюються параметри експлуатаційної надійності вантажних вагонів: коефіцієнт готовності, ймовірності безвідмовної роботи та виконання завдання.

8. Виконано обґрунтування правомірності застосування Байєсової моделі для розрахунків показників надійності вантажного вагона на етапах життєвого циклу. Використання адаптованої Байєсової моделі за наведеною методикою дозволяє оцінити показники надійності на етапах життєвого циклу, удосконалити міжремонтний термін та кількість ремонтів протягом життєвого циклу моделі вагона, при цьому забезпечується урахування їх конструктивних особливостей.

9. Сформовано структурну схему вантажного вагона. При цьому перед введенням його в експлуатацію в єдину інформаційну базу вноситься інформація про вагон (дата і рік побудови, завод-виробник, тип, модель, реєстраційний номер, комплектація з відповідними обліковими номерами та ін.). У процесі експлуатації вагонів підприємствами з обслуговування і ремонту вноситься інформація про всі їх відмови, про заміну деталей і вузлів на відповідному пробігу. У результаті сформована база дозволяє виконати розрахунки і сформувані показники надійності як окремих деталей і вузлів,

так і вагона в цілому. Ця інформація використовується для прийняття більш зваженого рішення з приводу його надійності порівняно з існуючими методиками, де пропонується приймати рішення за обмеженою кількістю досліджуваних об'єктів.

10. Для формування системи дослідження надійності вантажних вагонів протягом життєвого циклу удосконалено математичну модель зміни технічного стану ресурсовизначальних елементів вагона, що дозволяє визначити показники надійності окремих деталей та вузлів або вагона в цілому з урахуванням як відмов вантажних вагонів, так і зміни фізико-механічних характеристик ресурсовизначальних елементів. Запропоновано нова структура ремонту піввагона моделі 12-7023, яка побудована на основі розробленої системи надійності, показала таке: структура ремонту піввагона моделі 12-7023 була змінена з 12 ДР + 1КР, а стала 6 ДР + 1КР; в існуючому варіанті за життєвий цикл піввагон моделі 12-7023 має 13 технічних впливів ремонтного характеру, а в запропонованому варіанті – 7 таких впливів, тобто, в ремонтному простоті піввагон моделі 12-7023 буде знаходитись менше часу.

11. Для встановлення експлуатаційних характеристик нових і модернізованих вантажних вагонів було удосконалено метод їх оцінки, що містить контрольовані параметри для системи дослідження надійності вантажних вагонів як свідчення (симптоми), які визначаються протягом випробувань та під час експлуатації і дають можливість більш точно визначити показники надійності вантажних вагонів за комплексними ознаками.

12. У результаті виконаних експериментальних досліджень розроблено методи визначення надійності нових і модернізованих вантажних вагонів з використанням апарату нечіткої логіки. Це дозволяє в системі досліджень надійності вантажних вагонів на основі знань про зв'язок ознак несправностей і самої несправності відповідного вантажного вагона, що формуються за даними ремонтних і експлуатаційних вагонних депо, отримати підсумковий коефіцієнт впевненості гіпотез при заданих

відношеннях апріорних ймовірностей справедливості гіпотез з певними ознаками несправностей вантажних вагонів.

13. Техніко-економічне обґрунтування запропонованих технічних та технологічних рішень забезпечення надійності показало, що можна досягти зменшення вартості життєвого циклу піввагона на 14,2 тис. грн. Оскільки робочий парк піввагонів на залізницях України становить 83 302 одиниці, то загальний економічний ефект від застосування запропонованих рішень становить 1 183 млн грн.

## БІБЛІОГРАФІЯ

- 1 Аверкин А. Л., Клещев А. С. Работа с экспертами и формализация качественных описаний. *Представление знаний в человеко-машинных и робототехнических системах*. Москва : ВИНТИ, 1984. С. 252–281.
- 2 Аверченков В. И., Ерохин В. В. Системы организационного управления: учебное пособие. 3-е изд., стереотип. Москва : ФЛИНТА, 2011. 208 с.
- 3 Агапов М. М. Совершенствование системы ремонта и повышение работоспособности оборудования подвижного состава метрополитена в условиях эксплуатации : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07. Москва, 1992. 23 с.
- 4 Александровская Л. Н., Афанасьев А. П., Лисов А. А. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем: учебное пособие. Москва : Логос, 2001. 208 с.
- 5 Андрейко І. М., Кулик В. В. Температурна залежність механічних характеристик колісних сталей. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. 2011. 47, № 1. С. 113–115.
- 6 Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н. Интеллектуальные информационные системы : учеб. для вузов. Москва : Финансы и статистика, 2006. 423 с.
- 7 Аникеев-Науменко Л. О., Лебедева Л. В. Анализ использования инновационных грузовых вагонов в современных условиях. *Transport Business in Russia*. 2017. № 5. С. 109–110.
- 8 Арнольд П. В., Михайловский Г. А., Селиверстов В. Н. Техническая термодинамика и теплопередача. Москва : Высшая шк., 1979. 444 с.
- 9 Асадченко В. Р. Автоматические тормоза подвижного состава : учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. Москва : Маршрут, 2006. 392 с.
- 10 Бабаев А. М., Мурадян Л. А., О тормозных колодках дорог Украины. *Вагоны и вагонное хозяйство*. 2010. № 4. С. 5–8.
- 11 Бабаев А. М., Кнышук О. С., Исопенко И. В., Мурадян Л. А. Дисковые тормоза грузовых вагонов. *Вагонный парк*. 2011. № 12. С. 44–48.
- 12 Бабаев А. М., Мурадян Л. А., Винокурова С. В. Совершенствование тормозных колодок железных дорог Украины. *Безопасность движения поездов*. Материалы X-й научно-практической конференции. Москва, 2009. С. VII–16.
- 13 Бабаев А. М., Мурадян Л. А., Книшук О. С., Исопенко И. В., Дисковые тормоза грузовых вагонов. *Вагонный парк*. № 12. 2011. С. 8–13.

- 14 Бабаев А. М., Мурадян Л. А., Винокурова С. В. О тормозных колодках дорог Украины. *Вагоны и вагонное хозяйство*. 2010. № 4. С. 43–44.
- 15 Бабаев А. М., Мурадян Л. А., Сороколет А. В., Винокурова С. В. Эксплуатационные испытания тормозных накладок дискового тормоза. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 72-ї Міжнародної науково-практ. конф. Днепропетровск, 2012. С.60–61.
- 16 Бабаев А. М., Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю. Удосконалення вузла передачі стоянкового гальма вантажного вагона. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2013. Вип. 139. С. 11–16.
- 17 Бабаев А. М., Мурадян Л. А., Сороколет А. В. Исследование эксплуатационных свойств накладок для дисковых тормозов пассажирских вагонов производства ПАО "Трибо". *Залізничний транспорт України*. 2013. № 3/4. С. 22–30.
- 18 Бабаченко А. И., Мямлин С. В., Мурадян Л. А., Кныш А. В., Кононенко А. А. Эксплуатационные свойства железнодорожных колес, изготовленных различными способами производства. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 75-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2015. С. 79–81.
- 19 Байбакова Е. Н. Тепловое состояние дискового тормоза высокоскоростного подвижного состава : автореф. дис. ... канд. техн. наук. 05.22.07. Ленинград : ЛИИЖТ, 1986. 22 с.
- 20 Балтер М. А. Упрочнение деталей машин. Москва : Машиностроение, 1978. 182 с.
- 21 Банас К. М., Уебб Р. Лазерная обработка материалов. *Труды инженеров ин-та по электронике и радиотехнике*. 1982. Т. 70, № 6. С. 35–45.
- 22 Барановський Д. М. Визначення залишкового ресурсу трибо систем. *Проблеми трибології (Problems of Tribology)*. 2009. № 4. С. 127–129.
- 23 Барановський Д. М. Самоорганізація структур в процесі дисипації. *Восточно-Европейский журн. передовых технологий*. 2009. № 8 (39). С. 28–30.
- 24 Бармин И. В., Юсупов Р. М., Прохорович В. Е. Концепция управления состоянием сложных технических комплексов за пределами плановых сроков эксплуатации. *Информационные технологии*. 2000. № 5. С.7–12.
- 25 Башмаков А. И., Башмаков И. А. Интеллектуальные информационные технологии : учеб. пособие. Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 304 с.



- 26 Беляев Ю. К. Статистические методы обработки результатов испытаний на надежность. Москва : Знание, 1982. 384 с.
- 27 Беренштейн М. Г., Кузьмич Л. Д., Сапожников С. А. Ускорение испытаний нового подвижного состава. *Железнодорожный транспорт*. 1974. № 4. С. 61–65.
- 28 Берри Г., Барбер Д. Распределение тепла, выделяемого при трении, – путь к изучению природы контактных явлений при скольжении. *Труды американского общества инженеров-механиков. Сер.: «Проблемы трения и смазки»*. 1984. № 3. С. 83–96.
- 29 Бешелев С. Д., Гурвич Ф. Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. Москва : Статистика, 1974. 159 с.
- 30 Бланк И. А. Основы инвестиционного менеджмента. Киев : Эльга-Н, 2001. 512 с.
- 31 Бланк І. О. Гуляєва Н. М., Дрига С. Г., Ященко І. В. Інвестиційний менеджмент : опор. конспект лекцій. Київ : Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2009. 114 с.
- 32 Богданофф Дж., Козин Ф. Вероятностные методы модели накопления повреждений. Москва : Мир, 1989. 344 с.
- 33 Боднар Є. Б. Підвищення експлуатаційної надійності локомотивів шляхом впровадження раціональної системи утримування : дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Українська держ. акад. залізн. трансп. Харків, 2004. 19 с.
- 34 Боднаръ Б. Е. Теоретические основы, опыт создания систем испытания и диагностирования тепловозов с гидродинамической передачей: дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.07 / Днепропетр. гос. техн. ун-т ж.-д. трансп. Днепропетровск, 1997. 366 с.
- 35 Болотин М. М., Воротников В. Г. Отказы и срок службы грузового вагона. *Мир транспорта*. 2012. № 2. С. 152–161.
- 36 Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. Москва : Машиностроение, 1984. 312 с.
- 37 Бонохова А. О. Исследование данных опросов экспертов для заполнения базы знаний информационной экспертной системы вида распространения оперативной рекламы. *Инженерный вестн. Дона*. 2012. № 2. С. 45–52.
- 38 Босов А. А., Лоза П. А. Теоретические основы рационального содержания подвижного состава железных дорог : монография. Днепропетровск : Дриант, 2015. 252 с.
- 39 Бочаров П. П., Печинкин А. В. Теория вероятностей. Математическая статистика. Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2005. 296 с.
- 40 Бочкарев Н. А. Разработка технологических методов, комплексов и средств, обеспечивающих живучесть железнодорожного транспорта : автореферат дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.22. Москва, 2010. 63 с.

- 41 Бруякин В. К., Мурадян Л. А., Мищенко А. А. Исследование эксплуатационных свойств надежности опытных вагонов в замкнутых маршрутах УЗ. *Проблемы та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 73-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2013. С. 52.
- 42 Бруякин В. К., Мурадян Л. А., Мищенко А. А. К вопросу опытных эксплуатационных испытаний безасбестовых тормозных колодок. *Проблемы та перспективи розвитку залізничного транспорту* : Матеріали 67-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2007. С. 54–55.
- 43 Бруякин В. К., Мурадян Л. А., Мищенко А. А. Исследование показателей надежности в эксплуатации новой вагонной техники. *Проблемы механики залізничного транспорту: Безпека руху, динаміка, міцність рухомого складу, енергозбереження*. Матеріали XIII Міжнародної конф. Дніпропетровськ, 2012. С. 93.
- 44 Бруякин В. К., Бабаев А. М., Мурадян Л. А., Мищенко А. А. Дослідження зносу гальмових колодок різних виробників в експлуатації. *Проблемы та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 70-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2010. С. 70–71.
- 45 Бубнов В. М., Мурадян Л. А., Манкевич М. П., Шапошник В. Ю. Особливості технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів з підвищеними показниками надійності. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2016. Вип. 160. С. 11–17.
- 46 Буйносов А. П. Оценка применяемых материалов бандажей колесных пар и рельсов. *Тяжелое машиностроение*. 2000. № 11. С. 16–20.
- 47 Буйносов А. П., Кузьмин К. А. Обработка бандажей составом НИОД. *Локомотив*. 1996. № 3. С. 25–26.
- 48 Буйносов А. П., Худояров Д. Л. Влияние упрочнения на ресурс бандажей колесных пар. *Транспорт Урала*. 2010. № 1 (24). С. 63–68.
- 49 Булинский А. В., Ширяев А. Н. Теория случайных процессов. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 408 с.
- 50 Буше Н. А., Копытко В. В. Совместимость трущихся поверхностей. Москва : Наука, 1981. 127 с.
- 51 Вагоны. Основы конструирования и экспертизы технических решений : учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / А. П. Азовский и др. под ред. В. Н. Котуранова. Москва : Маршрут, 2005. 490 с.
- 52 Ван-Желен В. Физическая теория надежности : монография. Симферополь : Крым, 1998. 318 с.

- 53 Васильев А. В. Оценка нагруженности и прогнозирование остаточного ресурса вагонов-транспортёров : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07. Санкт-Петербург, 2005. 142 с.
- 54 Васильев Б. В. Прогнозирование надёжности и эффективности радиоэлектронных устройств. Москва : Сов. радио, 1970. 336 с.
- 55 Васильев Н. Г. Оптимизация технологии восстановления деталей подвижного состава : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.07 / ОмГАПС. Омск, 1995. 345 с.
- 56 Вентцель Е. С. Теория вероятностей : учеб. пособие для вузов. 5-е изд., стер. Москва : Высш. шк., 1998. 576 с.
- 57 Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения : учеб. пособие для вузов. 2-е изд., стер. Москва : Высш. шк., 2000. 383 с.
- 58 Вигак В. М. Оптимальное управление нестационарными тепловыми режимами. Киев : Наук. думка, 1979. 359 с.
- 59 Воинов К. Н. Надёжность вагонов. Москва : МИИТ, 1982. 110 с.
- 60 Волков Е. А. Численные методы. Москва : Наука, 1982. 254 с.
- 61 Воротилкин А. В. Методология повышения достоверности средств неразрушающего контроля, разработка и внедрение вибродиагностических комплексов нового поколения : исключение влияния человеческого фактора на результаты диагностики : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.22 / Моск. гос. авиац. ин-т. Москва, 2010. 61 с.
- 62 Всеукраинский торговый центр в интернете. URL: <http://prom.ua/> (дата звернення 26.04.2014)
- 63 Гладкий П. В., Переплетчиков Е. Ф., Рябцев И. А. Плазменная наплавка. Київ : Екотехнологія, 2007. 292 с.
- 64 Гненний О. М. До питання оцінки та застосування вартості життєвого циклу продукції машинобудування. *Збірник наукових праць Дніпропетровського нац. ун-ту залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна "Проблеми економіки транспорту"*. 2016. Вип. 12. С. 7–13.
- 65 Горбатов В. А. Фундаментальные основы дискретной математики. Москва : Наука, 2000. 234 с.
- 66 ГОСТ 10791-2011. Колеса цельнокатаные. Технические условия. Москва : Стандартиформ, 2011. 28 с.
- 67 ГОСТ 27.002-1989. Надёжность в технике. Термины и определения. [Дата введения 2000-07-01]. Москва : ИПК Издательство стандартов, 2002. 54 с.
- 68 ГОСТ 27.002-89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения: Утв.: Постановление Госстандарта СССР 15.11.89 N 3375. Москва : Транспорт, 1990. 32 с.

- 69 ГОСТ 27.410-87. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность. Москва : Изд-во стандартов, 1988. 94 с.
- 70 Грибов В. М., Козарук В. В. Основы теории надежности авиационной техники : конспект лекций. Киев : КМУГА, 1994. 268 с.
- 71 Гурин Л. С., Дымарский Я. С., Меркулов А. Д. Задачи и методы оптимального распределения ресурсов. Москва : Сов. радио, 1968. 198 с.
- 72 Гурский Е. П. Оценка эксплуатационной надежности грузовых вагонов и выбор протяженности гарантийного участка. *Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого*. 2009. № 2. С. 21–26.
- 73 Гушин А. Н., Радченко И. А. Экспертные системы : учебное пособие. Санкт-Петербург : Балт. гос. техн. ун-т. 2007. 402 с.
- 74 Далецкий С. В. Проектирование систем технического обслуживания и ремонта ВС ГА. Москва : МАИ, 2001. 245 с.
- 75 Демьянов В.Ф., Малоземов В.Н. Введение в минимакс. Москва : Наука, 1972. 368 с.
- 76 Державна служба статистики України : офіційний веб-сайт. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення 15.06.2016)
- 77 Джарратано Дж., Райли Г. Экспертные системы. Принципы разработки и программирование. Москва : Вильямс, 2007. 1152 с.
- 78 Джексон П. Введение в экспертные системы. 3-е изд., пер. с англ. Москва : Изд. дом «Вильямс», 2001. 984 с.
- 79 Джордж Фрэнк Основы кибернетики. Москва : Радио и связь, 2016. 272 с.
- 80 Дли М. И. Локально-аппроксимационные модели сложных объектов. Москва : Наука, 1999. 112 с.
- 81 Довідник основних показників роботи залізниць України (2003-2013 роки) / Вид. офіц. Київ : Мін-во трансп. та зв'язку України, Укрзалізниця, 2014. 42 с .
- 82 ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. [Чинний від 1996-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 1995. 92 с.
- 83 ДСТУ 3433-96. Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення. [Чинний від 01.01.1999]. Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 1998. 41 с.
- 84 ДСТУ 7598:2014 Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). [Чинний від 2015-07-01]. Вид. офіц. Київ : Мін-во трансп. та зв'язку України, 1995. 167 с.

- 85 ДСТУ ISO 14040:2004 Екологічне керування. Оцінювання життєвого циклу. Принципи та структура (ISO 14040:1997, IDT). [Чинний від 2004-07-01]. Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 2004. 53 с.
- 86 Дьяченко С. С., Рабухин В. Б. Надежность колесных тракторов. Минск : Ураджай, 1987. 106 с.
- 87 Единая программа и методика организации и проведения подконтрольной эксплуатации новых моделей грузовых вагонов и их составных частей : протокол 65-го заседания Совета по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества. Таллин, 2016. 58 с.
- 88 Елфимов В. А. Исследование путей дальнейшего повышения эксплуатационной надежности железнодорожного транспорта : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.22. Москва, 2011. 178 с.
- 89 Жаров И. А. Методика расчёта приповерхностных температур системы «колодка-колесо» в режиме экстренного торможения. *Трение и износ*. 2003. № 4. С. 383–390.
- 90 Жаров И. А., Воронин И. Н., Курцев С. Б. Приближённый расчёт поверхностных температур системы «колодка-колесо-рельс». *Трение и износ*. 2003. № 2 (24). С. 144–152.
- 91 Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. Москва : Мир, 1976. 165 с.
- 92 Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. Москва : Мир, 1986. 318 с.
- 93 Зенкевич О., Чанг И. Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред. Москва : Недра, 1974. 305 с.
- 94 Змитрович А. И. Интеллектуальные информационные системы. Минск : НТООО "ТетраСистемс", 1997. 367 с.
- 95 Иванова В. С. Синергетика. Прочность и разрушение металлических материалов. Москва : Наука, 1992. 160 с.
- 96 Ивченко Г. И., Ивченко Г. И., Медведев Ю. И. Введение в математическую статистику : учебник. Москва : Изд-во ЛКИ, 2010. 600 с.
- 97 Испытания перспективных тормозных колодок на железных дорогах Украины / [Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Винстрот Бернд Уве, Муковоз С. П.]. *Локомотив-Информ*. 2015. № 7–8. С. 20–22.
- 98 Капіца М. І. Розвиток наукових основ удосконалення систем утримування тягового рухомого складу : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.07 / Дніпропетровський нац. ун-т залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. 349 с.

- 99 Карзов Г. П., Марголин Б. З., Швецова В. А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. Санкт-Петербург : Политехника, 1998. 391 с.
- 100 Кельрих М. Б., Беспалов Г. А. Вибрационные испытания вагонов. *Тезисы Всесоюзной конференции по вибрационной технике*. Кутаиси (ноябрь 1981). Тбилиси 1981. С. 11.
- 101 Ким В. А., Коротаев Д. Н., Соловьев В. В. Термодинамика упрочняющих технологий. *Вестник АМГУ*. 1999. Вып. 6. С. 32–36.
- 102 Кобяков Д. М. Методы повышения эксплуатационной надежности грузового подвижного состава : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.22. Москва, 2012. 172с.
- 103 Коллакот Р. Диагностика повреждений : пер. с англ. Москва : Мир, 1989. 512 с.
- 104 Контактно-втомна пошкоджувальність поверхні кочення залізничних коліс типу КП-2 і КП-Т / О. П. Осташ, І. М. Андрейко, В. В. Кулик та ін. *Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*. 2011. Вип. 39. С. 118-122 с.
- 105 Корж В. М. Газотермічна обробка матеріалів : навч. посіб. Київ : Екотехнологія, 2005. 196 с.
- 106 Корнилов С. Н. Формирование и развитие системы ремонта железнодорожного состава промышленных предприятий на основе логистических принципов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.01. Москва, 2006. 55с.
- 107 Костецкий Б. И. Структурно-энергетические основы управления трением и износом в машинах. Киев : Знание, 1990. 31 с.
- 108 Костецкий Б. И., Стрельников В. П., Тацкий В. Г. Марковская модель износа и прогнозирования долговечности изнашиваемых деталей. *Проблемы трения и изнашивания*. Киев : Техника, 1976. С. 10–15.
- 109 Кофман А., Алуха Х. Хил. Введение теории нечетких множеств: управление предприятием. Минск : Высшая шк., 1992. 223 с.
- 110 Краснова М.Н. Обоснование выбора недоминируемого варианта обеспечения работоспособности изделий с учетом технологической наследственности : автореферат дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08. Москва, 2010. 63 с.
- 111 Красношеков П. С, Петров А. А. Принципы построения моделей. Москва : Изд-во МГУ, 1983. 242 с.
- 112 Круглов В. В., Дли М. И., Голунов Р. Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. Москва : 2001. 644 с.
- 113 Лапшин В.Ф. Прогнозирование прочности и долговечности вагонов для перевозки коррозионно-активных грузов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.07. Екатеринбург, 2003. 48с.

- 114 Ларичев О. И. Объективные модели и субъективные решения. Москва : Наука, 1987. 185 с.
- 115 Лахтин Ю. М., Арзамасов Б. Н. Химико-термическая обработка металлов. Москва : Металлургия, 1985. 254 с.
- 116 Лашенко Г. И. Современные технологии сварочного производства. Киев : Екотехнологія, 2012. – 720 с.
- 117 Лесун А. Ф. Методология диагностики ходовых частей локомотивов в движении с определением остаточного ресурса : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.22. Нижний Новгород, 2010. 340с.
- 118 Литвак Б. Г. Управленческие решения. Москва : Изд-во «ЭКМОС», 1998. 215 с.
- 119 Лукичева Л. И., Егорычев Д. Н. Управленческие решения. Москва : Омега Л, 2009. 383 с.
- 120 Мартинов І. Е. Розвиток методів розрахунку та випробувань буксових підшипникових вузлів вантажних вагонів з урахуванням особливостей їх експлуатації : автореф. дис ... д-ра техн. наук : 05.22.07. Харків, 2009. 40 с.
- 121 Мартынов А. А., Долгополов Г. А. Основы теории надёжности и диагностики. Новосибирск : Новосиб. гос. акад. вод. трансп., 1999. 107 с.
- 122 Маслієв В. Г. Наукові основи вибору конструкторсько-технологічних параметрів пристроїв для зменшення зносу бандажів коліс локомотивів : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.07. Харків, 2002. 439с.
- 123 Международный стандарт ISO 8402. Качество. Словарь. Москва : Изд-во стандартов, 1988. 16 с.
- 124 Межидов Ф. А. Оценка остаточного срока службы грузового вагона с учётом его технического состояния : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07. Москва, 2016. 162с.
- 125 Меламедов И. М. Физические основы надёжности. (Введение в физику отказов). Л. : Энергия, 1970. 152 с.
- 126 Мельничук В. О., Мямлін С. В., Ісопенко І. В., Мямлін В. В. Удосконалення системи технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів. *Збірник наукових праць ДонІЗТ*. Донецьк : 2010. № 22. С. 101-108.
- 127 Методы экономической оценки инвестиционных проектов на транспорте : учеб.-метод. пособие / сост. Ю. Ф. Кулаев. Киев : Транспорт Украины, 2001. 182 с.
- 128 Мостеллер Ф., Тьюки Дж. Анализ данных и регрессия : пер. с англ. Москва : Финансы и статистика, 1982. 239 с.
- 129 Мурадян Л. А. Відмови та безвідмовність вагонів як складові експлуатаційної надійності. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Сер. : *Механіко-технологічні системи та комплекси*. Харків : НТУ «ХПІ», 2015. № 52(1161). С. 127–130.

- 130 Мурадян Л. А. Відмови та безвідмовність вагонів як складові експлуатаційної надійності. *Вісник НТУ «ХПІ». Сер. : Механіко-технологічні системи та комплекси*. Харків : НТУ «ХПІ», 2015. № 52(1161). С.127–130.
- 131 Мурадян Л. А. Граничний ресурс вагона в процесі експлуатації. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2016. Вип. 166 . С.17-23.
- 132 Мурадян Л. А. Застосування байєсівського підходу до побудови моделей відмов вантажних вагонів. *Проблеми механіки залізничного транспорту: Безпека руху, динаміка, міцність рухомого складу, енергозбереження*. Матеріали XIV Міжнародної конф. Дніпропетровськ, 2016. С. 84-86.
- 133 Мурадян Л. А. Ймовірно-фізичний підхід для описання та визначення надійності вагонів. *Наука та прогрес транспорту*. 2016. № 5 (64). С.168-177.
- 134 Мурадян Л. А. О ресурсе литых железнодорожных колес компании "Griffin Wheel Company" (США). *Инновации и исследования в транспортном комплексе : материалы III Международной научно-практ. конф. В 2 ч. Часть I*. Курган, 2015. С. 219-222.
- 135 Мурадян Л. А. Описання відмов вагона при технологічному процесі виготовлення структурних елементів. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2016. Вип. 164. С. 62-68.
- 136 Мурадян Л. А. Определение количества объектов для проведения эксплуатационных испытаний вагонной техники. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. Харків. 2013. Вип. 139. С. 83–86.
- 137 Мурадян Л. А. Побудова системи дослідження надійності вантажних вагонів. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2015. № 10. С. 90-95.
- 138 Мурадян Л. А. Построение моделей отказов грузовых вагонов на основе байесовского подхода. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2016. С. 54–60.
- 139 Мурадян Л. А., Анофриев В. Г. Исследование действующих условий эксплуатации и анализ причин сокращения ресурса работы железнодорожных колес. *Вісник Дніпропетровського нац. ун-ту залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*. Дніпропетровськ. 2010. Вип. 34. С. 206–210.
- 140 Мурадян Л. А., Анофрієв В. Г. Дослідження зносостійкості коліс різних марок сталей. *Проблеми механіки залізничного транспорту: Безпека руху, динаміка, міцність рухомого складу, енергозбереження*. Матеріали XIII Міжнародної конференції. Дніпропетровськ, 2012. С. 91-92.
- 141 Мурадян Л. А., Бабаєв А. М., Муковоз С. П. Эксплуатационные испытания всесезонных тормозных колодок пассажирских вагонов. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту : матеріали 74-ї Міжнародної науково-практ. конф.* Дніпропетровськ, 2014. С. 60-61.



- 142 Мурадян Л. А., Бруякин В. К., Мищенко А. А., Дедаева Т. И. К вопросу об износе гребней вагонных колес. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 66-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2006. С. 78.
- 143 Мурадян Л. А., Мищенко А. А., Смирнов А. С. Ротационный вихретоковый тормоз. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : Матеріали 74-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2014. С. 31-32.
- 144 Мурадян Л. А., Подосьонов Д. О. Аналіз пошкоджень вантажних вагонів на ПАТ «Українська залізниця». *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 76-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2016. С. 22-24.
- 145 Мурадян Л. А. Розробка основних елементів для побудови системи дослідження надійності вантажних вагонів. *Збірник наукових праць ДЕТУТ. Сер.: Транспортні системи і технології*. 2016. Вип. 29. С. 28-36.
- 146 Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю. К вопросу о планах испытаний надежности механических систем. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. Харків. 2015. Вип. 157. С.119–127.
- 147 Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю. Исследование литых железнодорожных колес в эксплуатации производства компании “Griffin Wheel Company” (США). *Бюллетень научных работ Брянского филиала МИИТ*. Брянск, 2015. Вып. 7. С. 65-70.
- 148 Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Винокурова С. В. Пути развития, тенденции и перспективы дальнейшего совершенствования тормозной колодки рельсового подвижного состава. *Вагонный парк*. № 5-6. 2015. С. 8–11.
- 149 Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Мищенко А. А. Опытные маршруты ДИИТ-УЗ: «Опытная эксплуатация – научные обоснования – массовое внедрение». *Вагонный парк*. 2016. № 5–6. С. 57–59.
- 150 Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Мищенко А. А. Методологические основы определения эксплуатационных характеристик несамоходного подвижного состава. *Наука та прогрес транспорту*. 2015. № 1 (61). С. 169–179.
- 151 Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Подосенов Д. О. Повышение надежности грузовых вагонов с применением новых технологий изготовления и восстановления рабочих поверхностей. *Збірник наукових праць ДНУЗТ. Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2016. С. 24-31.
- 152 Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Пулария А. Л. Устройства пассивной защиты современного подвижного состава железных дорог. *Вагонный парк*. 2016. № 5-6. С. 8-11.

- 153 Мурадян Л. А., Шатунов А. В. К вопросу о повреждениях цельнокатанных колес в эксплуатации. *Транспортная инфраструктура сибирского района*. Материалы четвертой всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Иркутск, 2013. С. 368–369.
- 154 Мурадян Л. А. Побудова системи технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів. *Залізничний транспорт України*. 2017. № 1. С. 36–40.
- 155 Мурадян Л. А., Подосьонов Д. О. Збільшення міжремонтного ресурсу вантажних вагонів з використанням дискретного розподілення твердості матеріалу. *Вагонний парк*. 2017. № 3–4. С. 62–64.
- 156 Мурадян Л. А., Бабаєв А. М., Сорокалет А. В. Исследование эксплуатационных свойств накладок для дисковых тормозов пассажирских вагонов производства ПАО "Трибо". *Залізничний транспорт України*. 2013. № 3/4. С. 66–68.
- 157 Мурадян Л. А., Подосенов Д. О. Підвищення міжремонтного ресурсу візків вантажних вагонів. Модель геометрії зносу підп'ятника. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. № 1 (65). С. 61–69.
- 158 Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю. Автоматичний ідентифікатор окремих частин транспортного засобу при впровадженні нових концепцій системи технічного обслуговування та ремонту. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2017. № 4(125). С. 44–50.
- 159 Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Подосенов Д. О. Теоретическая зависимость величины износа пары трения "пятник - подпятник" от пробега грузового вагона. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. № 6. С. 79–87.
- 160 Мурадян Л. А., Анофрієв В. Г., Міщенко А. А. Аналіз пошкоджень на поверхні кочення коліс техніки. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту : матеріали 70-ї Міжнародної науково-практ. конф.* Дніпропетровськ, 2010. С. 61–62.
- 161 Мурадян Л. А., Бабаєв А. М., Мищенко А. А. Применения профиля ДИИТ-УЗ в модернизированных тележках грузовых вагонов. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту : матеріали 78-ї Міжнародної науково-практ. конф.* Дніпро, 2018. С. 39–40.
- 162 Мурадян Л. А., Мищенко А. А., Шапошник В. Ю. Опытные маршруты ДИИТ: «Опытная эксплуатация – научные обоснования – массовое внедрение». *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту : матеріали 76-ї Міжнародної науково-практ. конф.* Дніпропетровськ, 2016. С. 34–35.

- 163 Мурадян Л. А., Міщенко А. А., Шапошник В. Ю. Проблеми визначення надійності піввагонів моделі 12-7023-01 на візках 18-7020 за результатами дослідної експлуатації в маршрутах ДІПТ-УЗ. *Проблеми механіки залізничного транспорту: Безпека руху, динаміка, міцність рухомого складу, енергозбереження*. Матеріали XIV Міжнародної конф. Дніпропетровськ. 2016. С. 86–87.
- 164 Мурадян Л. А., Міщенко А. А., Бруякин В. К. Исследование эксплуатационных свойств надежности опытных вагонов в замкнутых маршрутах УЗ. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту*: матеріали 73-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2013. С. 52.
- 165 Мурадян Л. А., Міщенко А. А., Шапошник В. Ю., Бубнов В. М., Тусіков Є. К., Ревякін В. В. Дослідження показників надійності піввагонів моделі 12-1905 на візках 18-1711 в експлуатації. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 77-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпро, 2017. С.41–43.
- 166 Мурадян Л. А., Подосьонов Д. О. Підвищення міжремонтного ресурсу п'ятникового вузла вантажних. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 78-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпро, 2018.С. 40–41.
- 167 Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю. Перспективы эксплуатации литых колес на железных дорогах Украины. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 77-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпро, 2017. С. 280–282.
- 168 Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю. Випробування гальмової колодки 2тр-155 з двома рознесеними чавунними вставками. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 75-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ. 2015. С. 29–30.
- 169 Мурадян Л. А. Індивідуальна модель прогнозу показників надійності вантажних вагонів. *Тези доповідей 78-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»*. Дніпро, 2018. С. 37–38.
- 170 Мямлин С. В., Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю. Определение стратегии технического обслуживания и ремонта вагонной техники. *Транспортная инфраструктура Сибирского района*. Материалы седьмой Всероссийской научно-технической конференции. Иркутск, 2016. С. 369–373.
- 171 Мямлин С. В., Мурадян Л. А., Дузик В. Н. Анализ показателей надежности полувагонов модели 12-7023-01 на тележках 18-7020 в эксплуатации. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 75-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2015. С. 25–26.

- 172 Мямлин С. В. Моделирование динамики рельсовых экипажей. Днепропетровск : Новая идеология, 2002. 240 с.
- 173 Мямлін С. В., Мурадян Л. А., Барановський Д. М. Визначення параметрів експлуатаційної надійності вантажних вагонів у системі технічного обслуговування та ремонту. *Залізничний транспорт України*. 2015. № 4. С. 35–40.
- 174 Мямлін С. В., Мурадян Л. А. Застосування основних законів розподілу випадкових величин для визначення показників надійності вагонів. *Збірник наукових праць ДЕТУТ. Сер.: «Транспортні системи і технології»*. 2015. Вип. 26–27. С. 172–180.
- 175 Мямлін С. В., Мурадян Л. А., Барановський Д. М. Проблема визначення терміну «надійність». Методологія дослідження надійності вантажних вагонів. *Наука та прогрес транспорту*. 2015. № 6 (60). С. 110–117.
- 176 Мямлін С. В., Скалозуб В. В., Мурадян Л. А. Адаптивні Байєсівські моделі оцінювання показників надійності вантажних вагонів на етапах життєвого циклу. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2018. Вип. 182. С. 80–91.
- 177 Мямлін С. В., Мурадян Л. А., Бабаєв А. М., Пуларія А. Л., Шапошник В. Ю. Проблеми існуючої системи технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів в Україні. *Проблеми механіки залізничного транспорту: Безпека руху, динаміка, міцність рухомого складу, енергозбереження*. Матеріали XIV Міжнародної конф. Дніпропетровськ. 2016. С. 89–91.
- 178 Мямлін С. В., Мурадян Л. А., Подосьонов Д. О. Підвищення надійності п'ятникового вузла вантажного вагону. *Залізничний транспорт України*. 2018. № 1. С. 34–41.
- 179 Наговицын В. В. Совершенствование системы ремонта тягового подвижного состава железных дорог с учетом фактического технического состояния : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.07. Москва, 2006. 250 с.
- 180 Надёжность механических систем железнодорожного транспорта. Учебное пособие / под. ред С. И. Киселёва. Москва : МИИТ, 1994. 120 с.
- 181 Научная разработка и производственная реализация технологии микролегирования и термоупрочнения высокоизносостойких железнодорожных цельнокатаных колес / И. Г. Узлов, К. И. Узлов, О. Н. Перков, А. В. Кныш. *Фунд. и прикл. проблемы черной металлургии*. 2004. Вып. 7. С. 231–243.
- 182 Національний банк України. Відсоткові ставки за операціями НБУ. URL : <https://index.minfin.com.ua/ua/banks/nbu/rates/2016-03> (дата звернення 23.10.2017).

- 183 Неисправности авторежимов грузовых вагонов / А. В. Кутишенко, А. М. Бабаев, Л. А. Мурадян, А. Н. Кривошея, В. С. Глушенкова. *Вагонный парк*. 2012. № 1. С. 34–36.
- 184 Нечеткие множества в моделях управления искусственного интеллекта / А. Н. Аверин и др.; под ред. Д. А. Поспелова. Москва : Наука, 1986. 305 с.
- 185 Нечеткие множества в моделях управления искусственного интеллекта / под ред. Д. А. Поспелова. Москва : Наука, 1986. 305 с.
- 186 Норми простою вантажних вагонів при деповському ремонті, технічному обслуговуванні з відчепленням та підготовці до навантаження : затв. наказом Укрзалізниці 14.06.2005, № 164-Ц. 36 с.
- 187 Нормы для расчета и проектирования вагонов, железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). Москва : ГосНИИВ, ВНИИЖТ, 1996. 319 с.
- 188 Основы искусственного интеллекта / Б. В. Костров и др. Москва : «ДЕСС»; «ТехБук», 2007. 191 с.
- 189 Осуга С. Обработка знаний : пер. с япон. Москва : Мир, 1989. 321 с.
- 190 Павлов И. В. Доверительная оценка показателей надежности сложных систем. Москва : Знание, 1979. 412 с.
- 191 Павлов И. В. Статистические методы оценки характеристик надежности и эффективности сложных систем по результатам испытаний. Москва : Сов. радио, 1978. 36 с.
- 192 Першин В. К. Фишбейн Л. А. Моделирование тепловых режимов при фрикционном взаимодействии колеса и тормозной колодки. *Транспорт Урала*. 2005. № 1(4). С. 34–42.
- 193 Питер Джексон. Введение в экспертные системы. 3-е изд. Москва : Диалектика, 2001. 645 с.
- 194 Повышение надежности вагонов совершенствование методов их испытаний контроля и ремонта : сб. науч. тр. Всерос. НИИ ж.-д. трансп. / под ред. В. И. Гамирова и В. П. Ефимова. Москва : Транспорт, 1993. 121 с.
- 195 Положение о системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов, допущенных в обращение на железнодорожные пути общего пользования в международном сообщении : затв. 47 Радою по залізничному транспорту держав-учасників Співдружності, протокол від 22-23 листопада 2007 р., введене в дію наказом Укрзалізниці від 07.12.2007 р. № 573-Ц. 68с
- 196 Порівняльний аналіз причин утворення дефектів на поверхні кочення вуглецевих та підвищеної твердості мікролегованих суцільнокатаних коліс / Узлов І. Г. та ін. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии* : сб. научн. тр. Дніпропетровськ : ІЧМ НАН України, 2011. С. 3–12.

- 197 Порядок та критерії оцінки економічної ефективності проектних (інвестиційних) пропозицій та інвестиційних проектів, затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 18.07.2012 № 684. 6 с.
- 198 Прикладные нечеткие системы / под ред. Т. Тэрано. Москва : Мир, 1993. 368 с.
- 199 Приобретение знаний : пер. с япон. / под ред. С. Осуги, Ю. Саэки. Москва : Мир, 1990. 234 с.
- 200 Про концепцію вибору сталеї для високошвидкісних залізничних коліс / Остап О. П. та ін. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2012. № 6. С. 8–13.
- 201 Проников А. С. Надёжность машин. Москва : Машиностроение, 1978. 197 с.
- 202 Прочность и безотказность подвижного состава железных дорог / под ред. А.Н.Савоськина. Москва: Машиностроение, 1990. 288 с.
- 203 Пшинько А. Н., Руденко Н. Н. Особенности ремонта искусственных транспортных сооружений. *Залізничний транспорт України*. 2001. № 2. С.14–16.
- 204 Реальность и прогнозы искусственного интеллекта : сб. статей : пер. с англ. / под ред. В. Л. Стефанюка. Москва : Мир, 1987. 497 с.
- 205 Ремонт машин / под ред. Тельнова Н. Ф. Москва : Агропромиздат, 2007. 560 с.
- 206 Решетняк Ю. В., Гордійчук О. В., Мурадян Л. А., Бабаєв А. М., Міщенко А. А. Совершенствования пятникового узла грузового вагона. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : Матеріали 71-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2011. С. 82.
- 207 Решетняк Ю. В., Решетняк Д. Ю., Гордійчук О. В., Мурадян Л. А., Бруякин В. К., Бабаєв А. М., Мищенко А. А. Модернизация пятникового узла. *Вагонный парк*. 2011. № 5. С. 7–10.
- 208 Рыжов Э. В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. Киев : Наук. думка, 1984. 272 с.
- 209 Саати Т. Л. Математические методы исследования операций. Москва : Воениздат, 1963. 211 с.
- 210 Саати Т. Л. Об измерении неосязаемого. Подход к относительным измерениям на основе главного собственного вектора матрицы парных сравнений. *Журнал "Cloud Of Science"*. 2015. Т. 2, № 1. С. 5–39.
- 211 Саати Т. Математические модели конфликтных ситуаций. Москва : Сов. радио, 1977. 189 с.
- 212 Саати Т. Принятие решений. Методы анализа иерархий. Москва : Радио и связь, 1993. 188 с.

- 213 Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем. Москва : Радио и Связь, 1991. 164 с.
- 214 Саврухин А. В. Совершенствование конструкций массивных несущих деталей подвижного состава на основе анализа напряженно-деформированного состояния при эксплуатационных и технологических воздействиях : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.07. Москва, 2005. 349 с.
- 215 Савчук О. М., Бруякин В. К., Мурадян Л. А., Мищенко А. А. Эксплуатационные испытания полувагонов нового поколения. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : Матеріали 69-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2009. С. 56–57.
- 216 Савчук О. М., Бруякин В. К., Мурадян Л. А., Мищенко А. А., Коробка Б.А., Можейко Е. Р. Эксплуатационные испытания полувагонов нового поколения. *Вагонный парк*. 2009. № 5/6. С. 30–32.
- 217 Савчук О. М., Бруякин В. К., Мурадян Л. А., Мищенко А. А., Коробка Б.А., Можейко Е. Р. Эксплуатационные испытания полувагонов нового поколения. *Вагонный парк*. 2009. № 7/8. С. 8–11.
- 218 Савчук О. М., Бруякин В. К., Мурадян Л. А., Мищенко А. А., Лутанин С. В., Можейко Е. Р. Надежность полувагонов нового поколения. *Вагонный парк*. 2011. № 9. С. 22–27.
- 219 Савчук О. М., Бруякин В. К., Мурадян Л. А., Мищенко А. А. Дослідження зразків нової техніки. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : Матеріали 68-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2008. С. 75–76.
- 220 Саркисян С. А. Теория прогнозирования и принятия решений. Москва : Высш. шк., 1977. 215 с.
- 221 Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 58830. Літературний твір наукового характеру «Програма та методика експлуатаційних випробувань вантажних напіввагонів моделі 12-7023 на візках моделі 18-7020» / С. В. Мямлін, Л. А. Мурадян, В. Ю. Шапошник, А. А. Міщенко. зареєстр. 26.02.2015. 1 с.
- 222 Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 60176. Літературний твір наукового характеру «Програма и методика експлуатаційних испытаний колес грузовых вагонов» / С. В. Мямлін, Л. А. Мурадян, В. Ю. Шапошник, В. Г. Анофрієв. зареєстр. 17.06.2015. 1 с.
- 223 Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 60178. Літературний твір наукового характеру «Програма та методика дослідження експлуатаційних властивостей боковин візків з використанням пружних елементів, що зменшують не обресорені частини візків вантажних вагонів» / С. В. Мямлін, Л. А. Мурадян, В. Ю. Шапошник, А. А. Міщенко. зареєстр. 17.06.2015. 1 с.

- 224 Сенько В. И. Совершенствование организации технического обслуживания и текущего ремонта грузовых вагонов. Гомель : БелГУТ, 2002. 178 с.
- 225 Сергеев К. А. Теоретические основы и методы построения системы технической подготовки производства вагоноремонтных предприятий : дис. д-ра техн. наук : 05.22.07. Москва, 2005. 372 с.
- 226 Ситаж М. Повышение работоспособности колес железнодорожных экипажей конструкционными, технологическими и эксплуатационными методами : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 1995. 48 с.
- 227 Скиба И. Ф. Механизация ремонта вагонов. Москва : Изд-во и 1-я тип. Трансжелдориздата, 1948. 188 с.
- 228 Скребков А. В. Определение оптимальной структуры ремонтного цикла электровозов в конкретных условиях эксплуатации : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07. Москва, 2004. 18 с.
- 229 Сладковский А. В., Ситаж М., Сладковская О. П. Анализ температурных напряжений в железнодорожных колесах промышленного транспорта. *Проблемы механики горно-металлургического комплекса*. Материалы Международной научно-техн. конф. Днепропетровск : Навчальна книга, 2002. С. 27–28.
- 230 Словарь-справочник по порошковой металлургии / Шведков Е. Л. и др. Киев : Наук. думка, 1982. 269 с.
- 231 Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин / Зозуля В. Д. и др. Киев : Наук. думка, 1979. 257 с.
- 232 Соколов М. М. Диагностирование вагонов. Москва : Транспорт, 1990. 197 с.
- 233 Техническая эксплуатация авиационного оборудования : учебное пособие/под ред. В.Г. Воробьева. Москва: Транспорт, 1990. 296 с.
- 234 Требин В. В. Совершенствование технологии восстановления изнашиваемых деталей подвижного состава : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07. Омск, 1997. 20 с.
- 235 Третьяков А. В. Управление индивидуальным ресурсом вагонов в эксплуатации : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.07. Санкт-Петербург, 2004. 339 с.
- 236 Убейко В. Н. Экспертные системы. Москва : МАИ, 1992. 243 с.
- 237 Уотермен Д. Руководство по экспертным системам : пер. с англ. / под ред. В. Л. Стефанюка. Москва : Мир, 1989. 369 с.
- 238 Устич П. А. Работоспособность и надежность грузового вагона : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.07. Москва, 1992. 43 с.
- 239 Устич П. А. Система ТОР грузовых вагонов. Москва : МИИТ, 1989. 153 с.
- 240 Устич П. А., Карпычев В. А., Овечников М. Н. Надежность вагона : учеб. для вузов. Москва : Маршрут, 2003. 382 с.



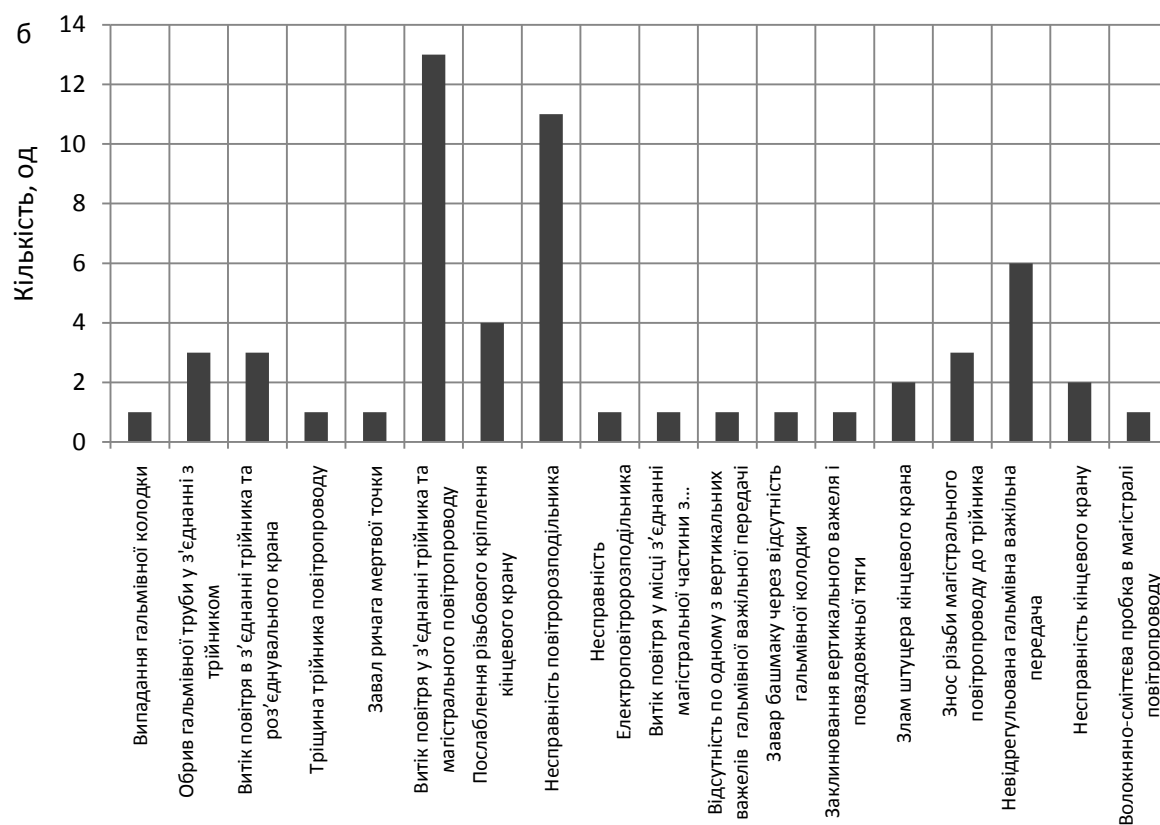
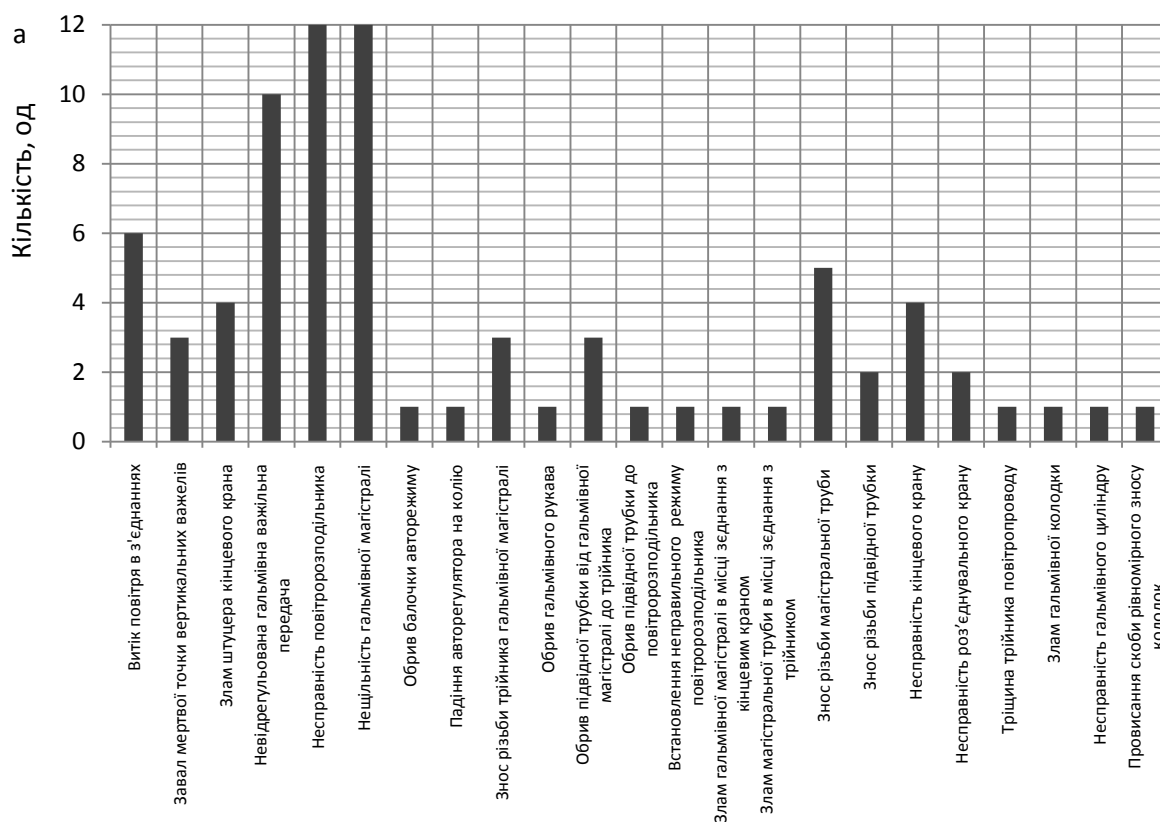
- 241 Устич П. А., Карпычев В. А., Овечников М. Н. Надежность рельсового нетягового подвижного состава. Москва : ИГ Вариант, 1999. 412 с.
- 242 Фокус. Прогноз эконома на 2017. URL: <https://focus.ua/money/357062/>. (дата звернення 20.10.2016)
- 243 Харченко И. Г. Эксплуатационная надежность колесных пар грузовых вагонов. *Вагонный парк*. 2008. № 2. С. 21–22.
- 244 Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. Москва : Атомиздат, 1972. 600 с.
- 245 Хопкрофт Дж. Э., Ульман Дж. Д. Структуры данных и алгоритмы. Москва : Изд. дом "Вильямс", 2000. 301 с.
- 246 ЦВ-0043. Інструкція з технічного обслуговування вагонів в експлуатації : затв. наказом Укрзалізниці від 25.09.2008 р. № 417-Ц. Київ : ДП ПКТБ ЦВ Укрзалізниця. 2008. 144 с.
- 247 ЦВ-0142. Вагони вантажні залізниць України колії 1520 (1524) мм. Настанова з деповського ремонту від 26.12.2013 р. № 468-Ц/од. Київ : Мін-во Інфраструктури України, 2013. 159 с.
- 248 Цельнокатаные железнодорожные колеса. Изготовление, эксплуатация, восстановление, обеспечение надежности / под общ. ред. С. Н. Киселева. Москва : Изд-во «Печать-Сервис-XXI век», 2009. 265 с.
- 249 Частиков А. П., Гаврилова Т. А., Белов Д. Л. Разработка экспертных систем. Среда CLIPS. Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2010. 608 с.
- 250 Шаблон для виміру дефектів залізничних коліс: Пат UA 123075 U Україна : МПК B61F 5/12, B61F 5/14 № 123075; заяв. 24.07.2017; публ. 12.03.2018. Бюл. № 5.
- 251 Шоташвили Я. М. Повышение служебных характеристик литых деталей автосцепки за счет применения объемно-поверхностной закалки низколегированной стали : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01. Москва, 1994. 27 с.
- 252 Экспертные системы. Принципы работы и примеры : пер. с англ. Москва : Радио и связь, 1987. 224 с.
- 253 Эндрю А. Искусственный интеллект : пер. с англ. / под ред. Поспелова Д. А. Москва : Мир, 1985. 402 с.
- 254 Эти Дж., Кумбс М. Экспертные системы: Концепция и примеры : пер. с англ. Москва : Финансы и Статистика, 1986. 191 с.
- 255 Юдин Д. Б. Математические методы управления в условиях неполной информации. Москва : Сов. радио, 1974. 297 с.
- 256 Allingham D. R., King A. R., Mengersen K. L. Bayesian estimation of quantile distributions. *Stat. Comput.* 2009. № 19. С. 189–201.
- 257 Anderson T. W. The statistical analysis of time series. New York, 1971. 704 p.

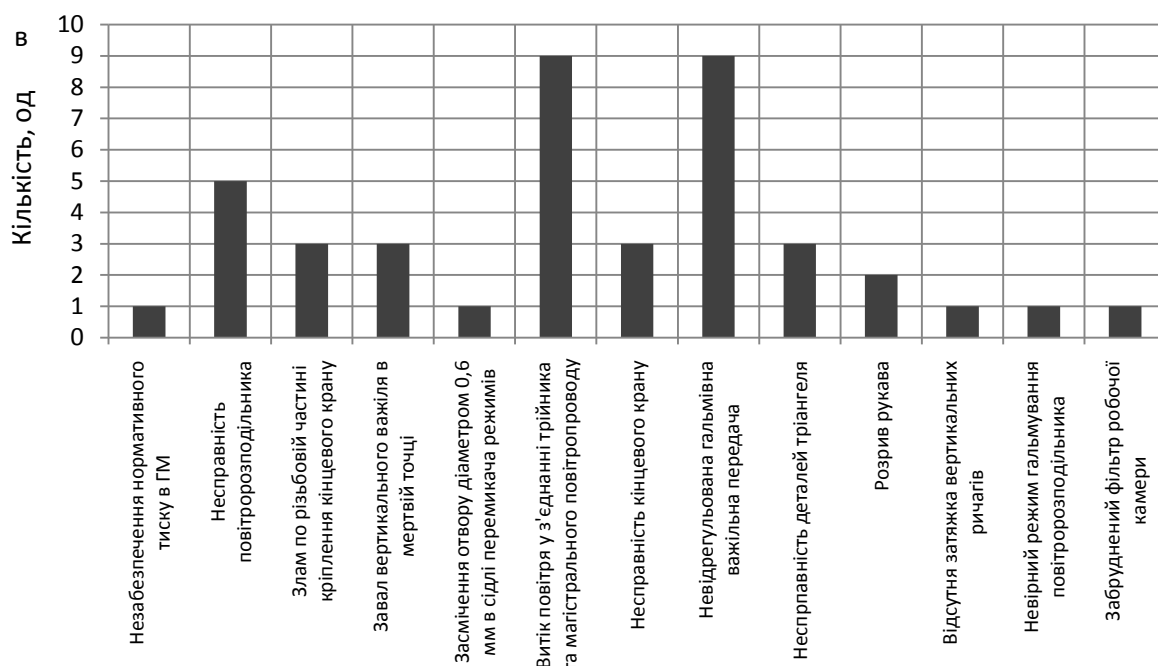
- 258 Balakrishnan N. Multivariate normal distribution and multivariate order statistics induced by ordering linear combinations. *Statistics & Probability Letters*. 1993. № 17. P. 343–350.
- 259 Balakrishnan N., Cramer E., Kamps U., Schenk N. Progressive type II censored order statistics from exponential distributions. *Statistics*. 2001. № 35. P. 537–556.
- 260 Bergtold J. S., Pokharel K. P., Featherstone A. M., Mo L. Computational Statistics. University of Missouri, Columbia, Missouri, June 2018, Volume 33, Issue 2. P. 757–786.
- 261 Betti G., Cheli B., Cambini R. A statistical model for the dynamics between two fuzzy states: theory and an application to poverty analysis. *Metron*. 2004. Vol. 62. P. 391–411.
- 262 Billingsley P. Statistical methods in Markov chains. *Ann. Math. Stat.* 1961. № 32. P. 12.
- 263 Bodnar B., Ochkasov A., Bobyr D. Improving Operation and Maintenance of Locomotives of Ukrainian Railways. *Technologijos ir Menas = Technology and Art*. 2016. № 7. P. 109–114.
- 264 Bugajski S. Fundamentals of fuzzy probability theory. *International Journal of Theoretical Physics*. 1996. 35(11). P. 2229–2244.
- 265 Cheli B., Lemmi A. A ‘Totally’ Fuzzy and Relative Approach to the Multidimensional Analysis of Poverty. *Economic Notes*. 1995. № 24. P. 115–134.
- 266 Chen S. and Hwang C. Fuzzy Multiple Decision Making. Berlin : Springer-Verlag, 1992. 252 p.
- 267 Chen S.-J. Fuzzy Multiple Decision Making. *Methods and Applications*. Berlin : Springer-Verlag, 1992. 540 p.
- 268 Crutchfield J. P., Young, K. Inferring statistical complexity. *Phys Rev. Lett.* 1989. № 63. P. 105–108.
- 269 Determination of the dynamic characteristics of freight wagons with various bogie / Sergey Myamlin, Leonas Povilas Lingaitis, Stasys Dailydka, Gediminas Vaiciunas, Marijonas Bogdevicius, Gintautas Bureika. *Transport*. 2015. Vol. 30, Iss. 1. P. 88–92.
- 270 Drovandi C. C., Pettitt A. N., Faddy M. J. Approximate Bayesian computation using indirect inference. *J. R. Stat. Soc. Ser. C (Appl. Stat.)*. 2011. 60(3). P. 503–524.
- 271 Elliot R. J., Aggoun L., Moore J. B. Hidden Markov Models: Estimation and Control. *Applications of Mathematics*. 1995. Vol. 29. P. 122–133.
- 272 Emmons P. H. Concrete Repair and Maintenance Illustrated: Problem Analysis; Repair Strategy; Techniques. New Jersey. Wiley. Dec 1992. 314 p.
- 273 Engine Diagnosis. Service Training Textbook. C710. Honda Motor Co LTD, Tokyo, 1993. P. 75.

- 274 Evans J. R., Mineka E. Optimization Algorithms for Networks and Graphs. 2nd ed., Marcel Dekker. New York, 1992. 188 p.
- 275 Gass S. Model World: Danger, Beware the User as a Modeler. *Interfaces*. 1990. Vol. 20, No. 3. P. 60-64.
- 276 Gemignani M. C. Liability for malfunction of an expert system. IEEE Conf. Manag. Expert Syst. Program and Proj., Bethesda, Md. Sept. 10-12, 1990: Proc. Los Alamitos (Calif.) etc., 1990. P. 8-15.
- 277 Gudder S. Fuzzy probability theory. *Demonstratio Mathematica*. 1998. № 31(3). P. 235–254.
- 278 Jason S. Bergtold & Krishna P. Pokharel & Allen M. Featherstone & Lijia Mo. On the examination of the reliability of statistical software for estimating regression models with discrete dependent variables. *Computational Statistics*. Springer, 2018. Vol. 33(2), June. P. 757-786.
- 279 Lehmann E. L., Casella G. Theory of point estimation. 2nd ed. New York : Springer, 1998. 242 p.
- 280 Magnus J. R., Neudecker H. Matrix Differential Calculus with Applications in Statistics and Econometrics. New York, Wiley, 1999. 180 p.
- 281 Myamlin S. V., Baranovskiy D. M. The modeling of economic efficiency of products carriage-building plant in conditions of dynamic pricing. *Збірник наукових праць Дніпропетровського нац. ун-ту ім. акад. В. Лазаряна «Проблеми економіки транспорту»*. 2014. № 7. С. 61–66.
- 282 Port S. C. Theoretical probability for applications. New York, Wiley, 1994. Physical Description. XVIII. 894 p.
- 283 Proschan F. Theoretical explanation of observed decreasing failure rate. *Technometrics*. 1963. № 5. P. 375–383.
- 284 Razmkhah M., Ahmadi J., Khatib B. Nonparametric confidence intervals and tolerance limits based on minima and maxima. *Communications in Statistics-Theory and Methods*. 2008. № 37. P. 1525–1542.
- 285 Ross S. M. Stochastic Processes. *Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics*. New York, John Wiley & Sons, Inc, 1996. 336 p.
- 286 Shillor M., Sofonea M., Telega J. J. Models and Analysis of Quasistatic Contact. *Lect. Notes Phys.* 2001. № 655. 31 p.
- 287 Turner, R. E. Sahani, M. Two problems with variational expectation maximisation for time-series models. *Bayesian Time Series Models*. Cambridge University Press. 2011. P. 68-81.
- 288 Willemain T. R. Insights on Modeling from a Dozen Experts. *Operations Research*. 1994. Vol. 42, No. 2. P. 213-222.
- 289 Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965. № 8. P. 338–353.
- 290 Zimmermann H.-J. Fuzzy set theory. *Springer Netherlands*. 2010. Vol. 2, May/June. P. 317-332.

## ДОДАТОК А

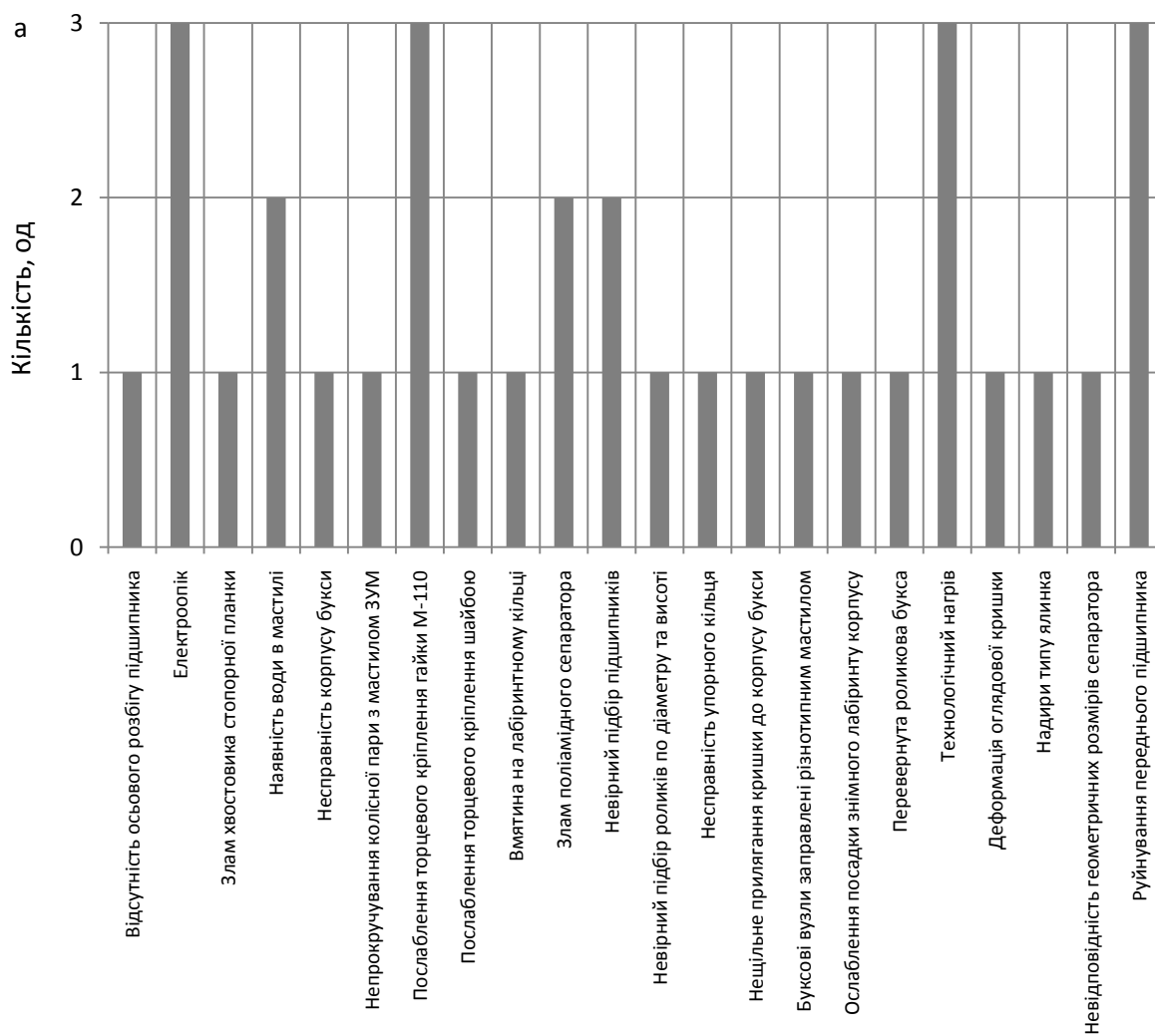
### Розподіл несправностей вагонів

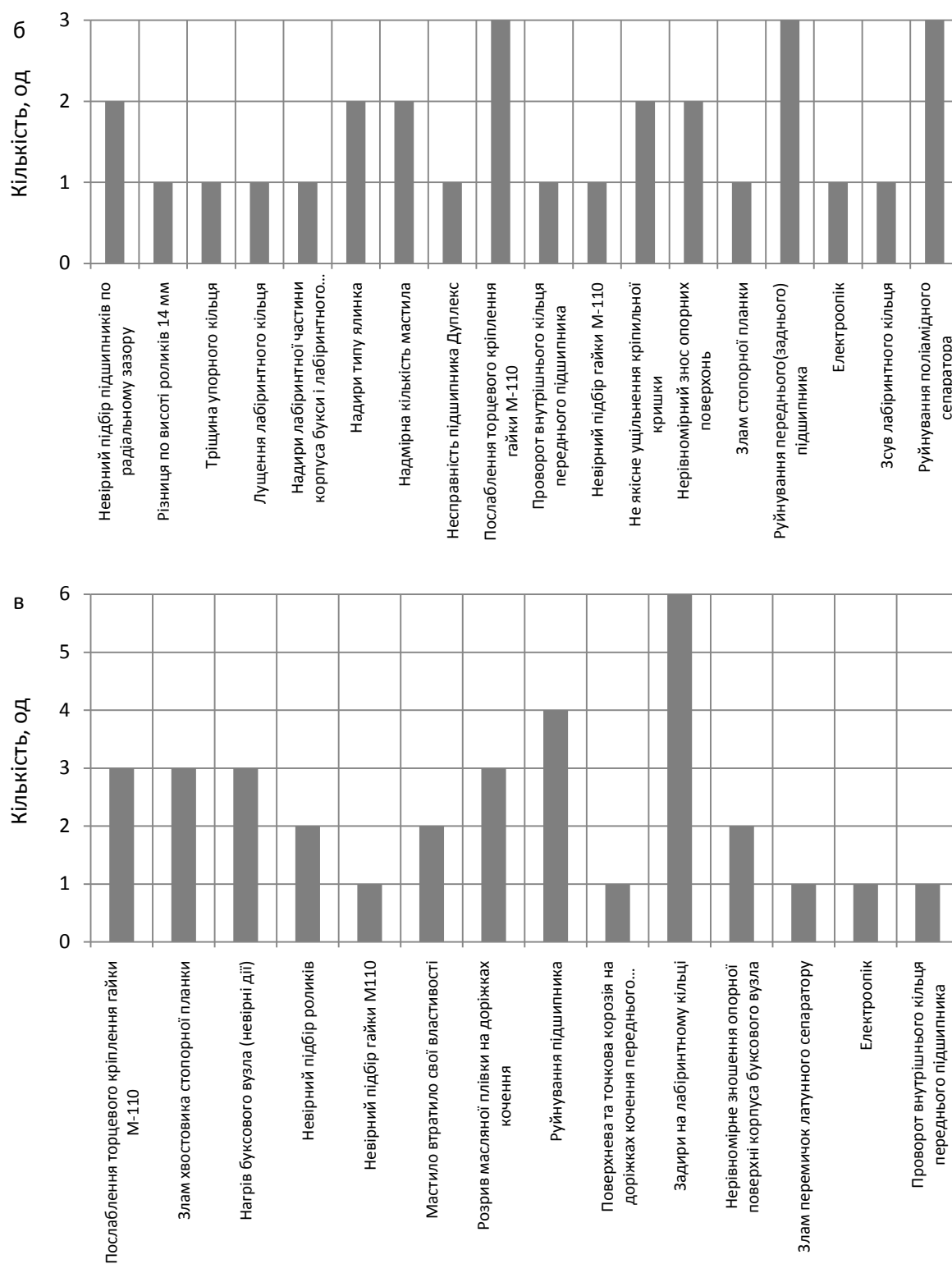




а – 2013 рік; б – 2014 рік; в – 2015 рік

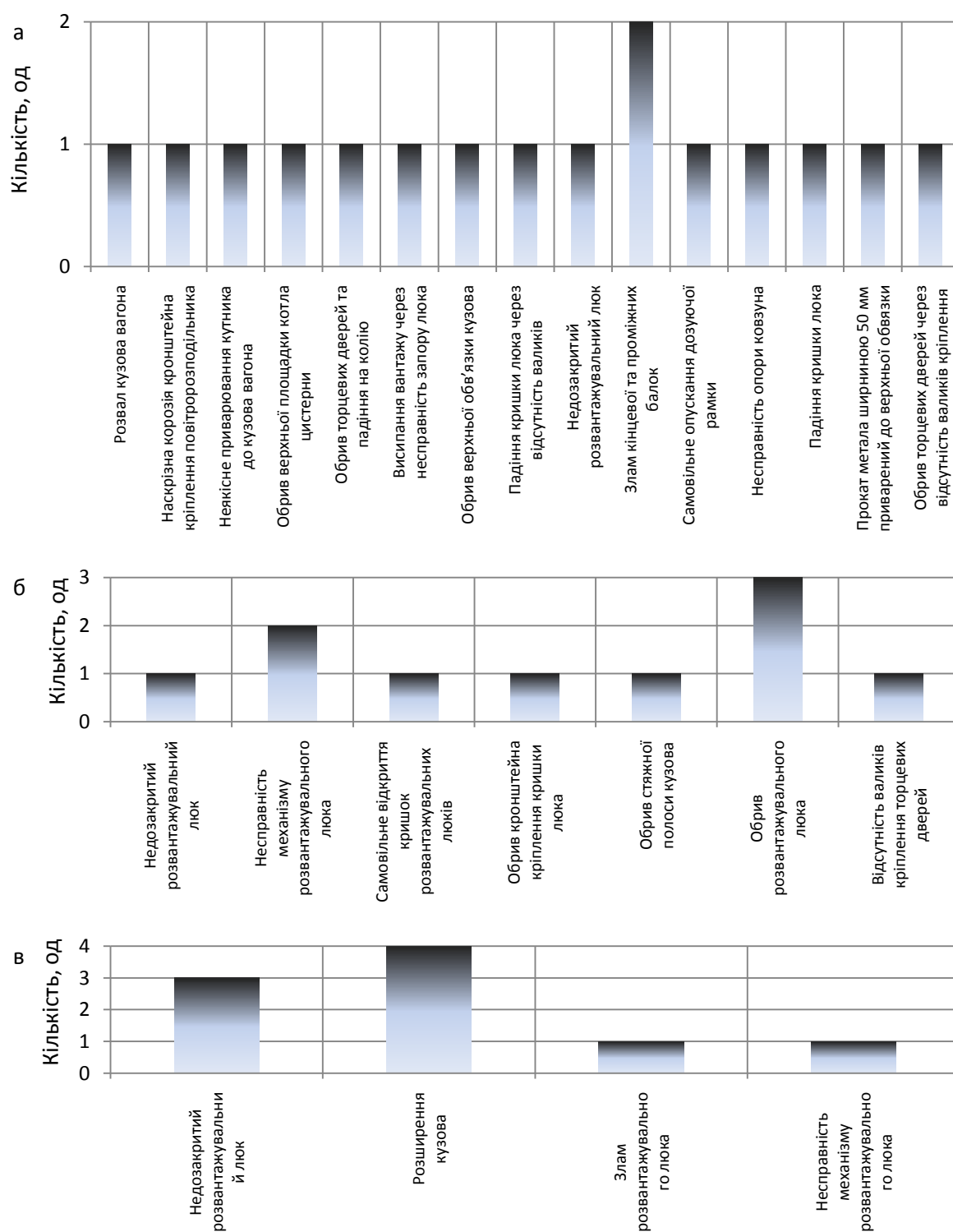
Рисунок А.1 – Розподіл несправностей гальмівної системи вагонів





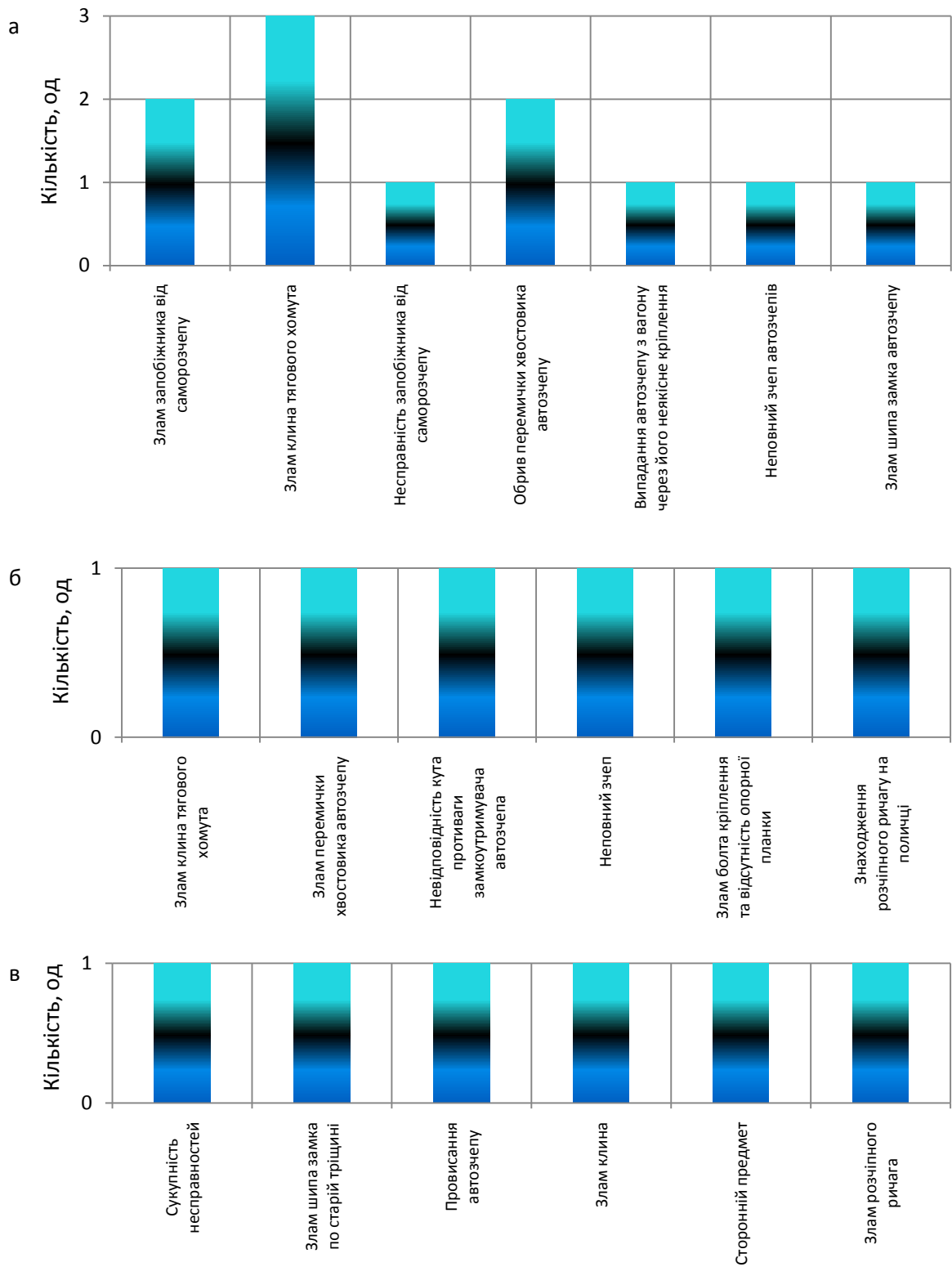
а – 2013 рік; б – 2014 рік; в – 2015 рік

Рисунок А.2 – Розподіл несправностей буксових вузлів вагонів



а – 2013 рік; б – 2014 рік; в – 2015 рік

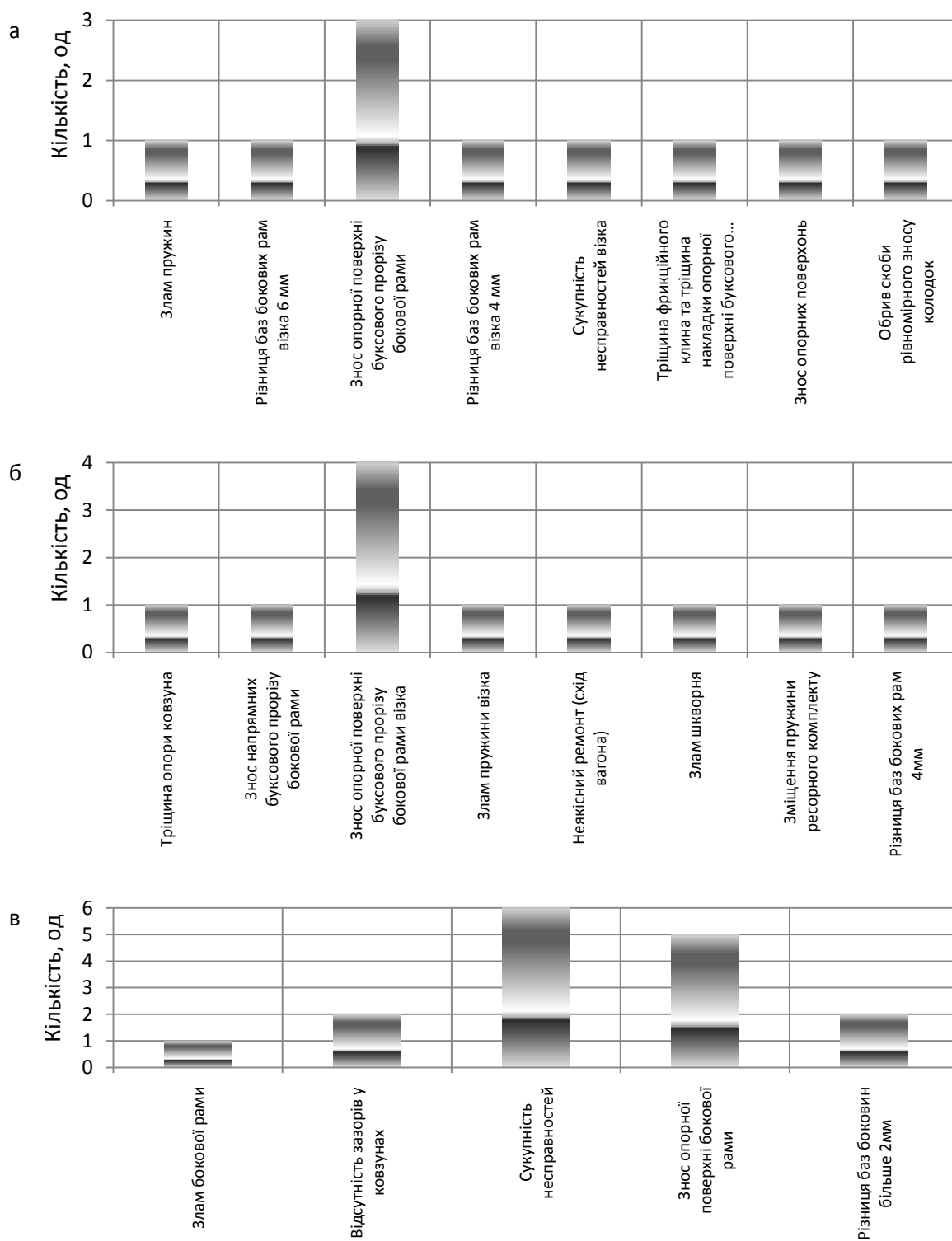
Рисунок А.3 – Розподіл несправностей кузовів вагонів



а – 2013 рік; б – 2014 рік; в – 2015 рік

Рисунок А.4 – Розподіл несправностей автосчепів вагонів





а – 2013 рік; б – 2014 рік; в – 2015 рік

Рисунок А.5 – Розподіл несправностей візків вагонів

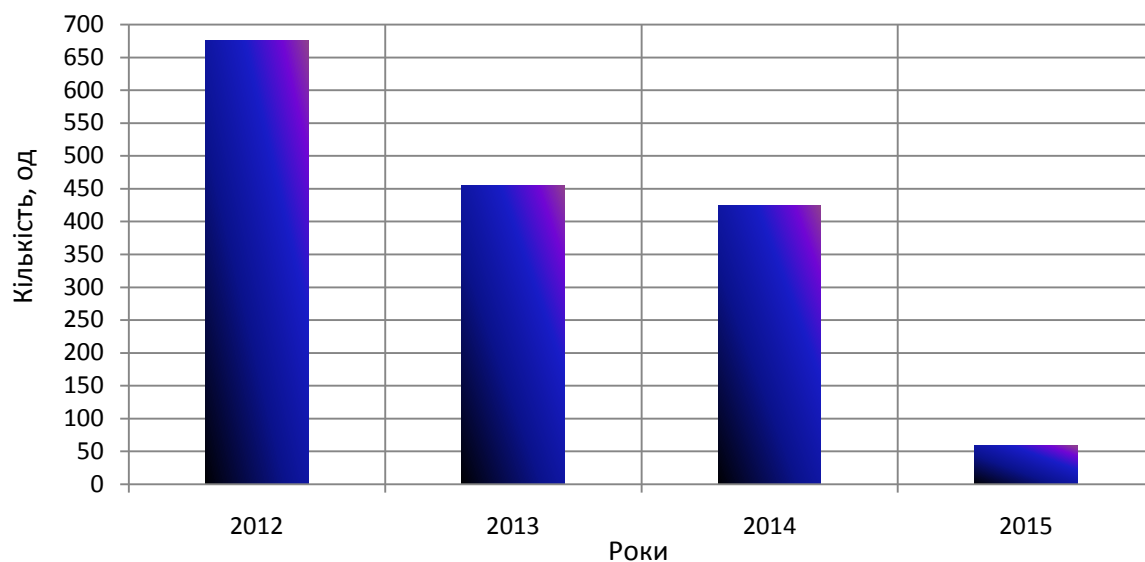


Рисунок А.6 – Загальна кількість тріщин дисків, ободів, гребенів колісних пар вагонів, виявлених в експлуатації, під час ремонту, до та після наплавлення гребенів за 2012-2015 рр.

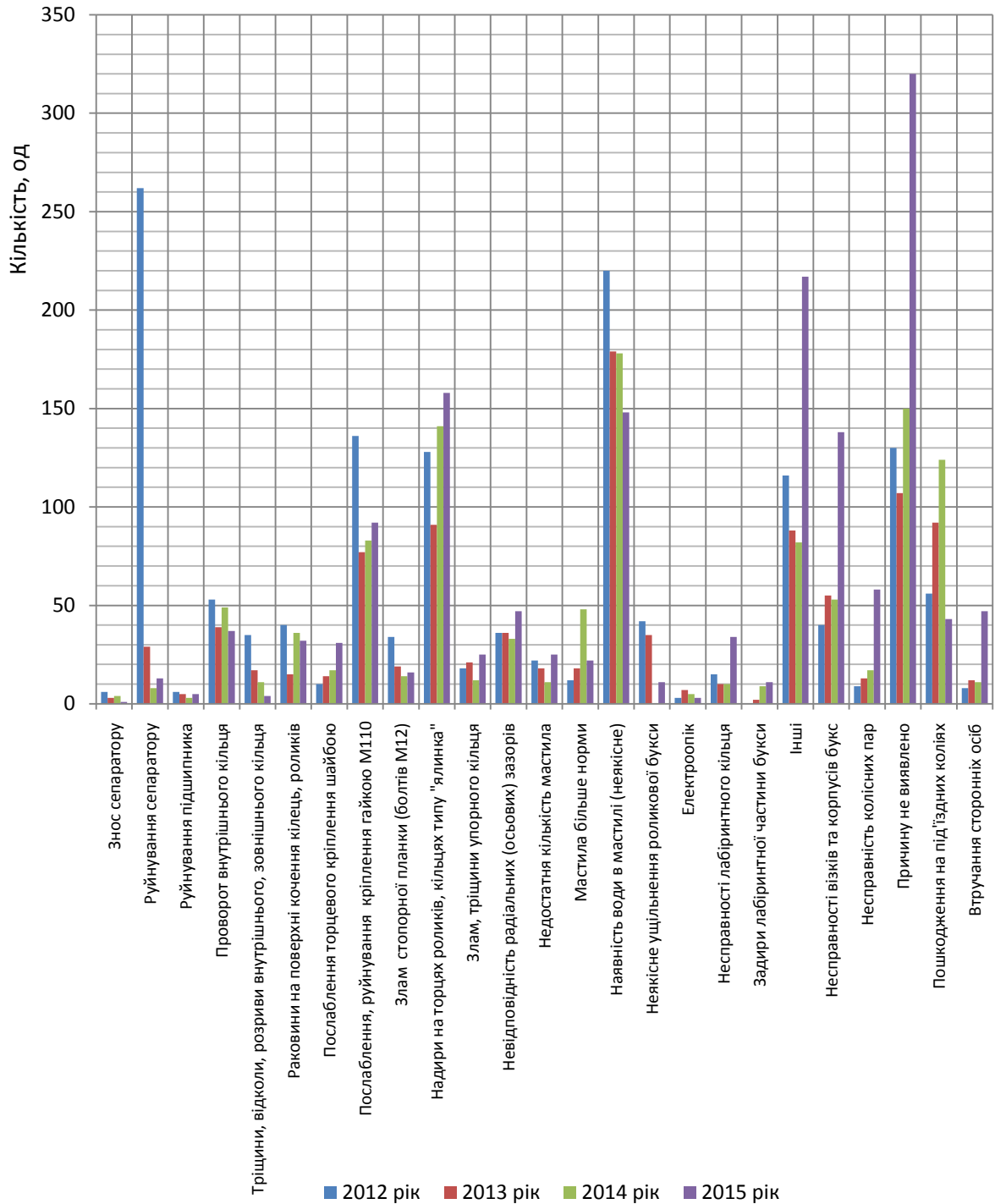


Рисунок А.7 – Загальна кількість відчеплень вагонів через несправності роликових букс на залізницях України, що виявлені приладами контролю колісних пар та за зовнішніми ознаками оглядачами вагонів протягом 2012-2015 рр.

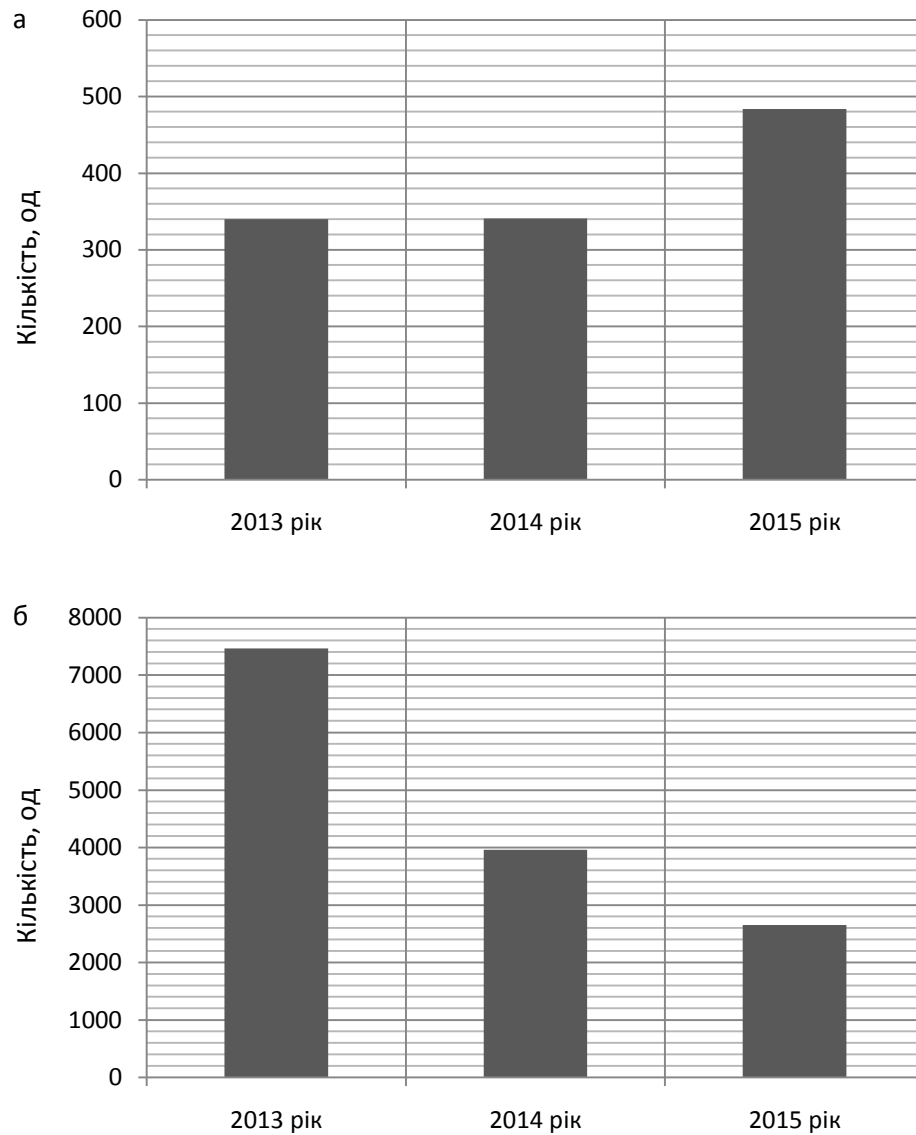


Рисунок А.8 – Розподіл сумарної кількості відчеплень вагонів у поточний ремонт за несправностями буксового вузла (а) та гальмівного обладнання після планового ремонту (б) з вини вагоноремонтних підприємств Укрзалізниці протягом 2013-2015 рр.



Рисунок А.9 – Руйнування підшипника буксового вузла через неякісне виконання ремонту

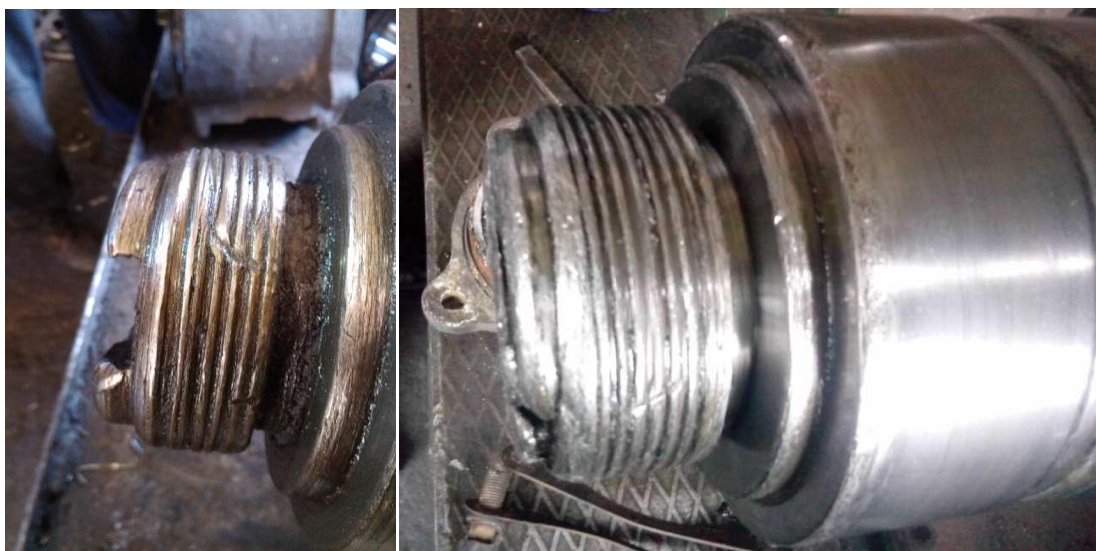


Рисунок А.10 – Пошкодження різі осі колісної пари внаслідок порушення технології підбору гайки М10 за різзю шийки



Рисунок А.11 – Порушення технології торцевого кріплення гайки М110



Рисунок А.12 – Злам плоско-упорного кільця внаслідок порушення технології ремонту



Рисунок А.13 – Злам лабіринтного кільця за всім діаметром на дві частини



Рисунок А.14 – Зрив різі на гайці М110



Рисунок А.15 – Пошкодження стопорної планки буксового вузла



Рисунок А.16 – Пошкодження оглядової кришки буксового вузла



Рисунок А.17 – Злам штуцера кінцевого крану через наявність тріщини старого походження та недостатнє кріплення магістрального повітропроводу

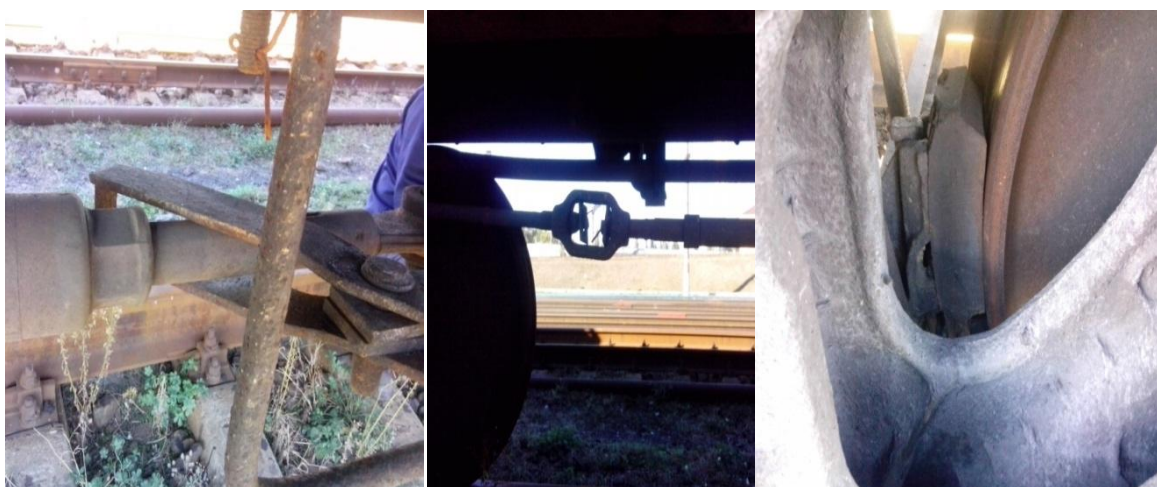


Рисунок А.18 – Неправильно відрегульована гальмівна важільна передача



Рисунок А.19 – Знос різі на ніпелі та в трійнику гальмівної магістралі вагона



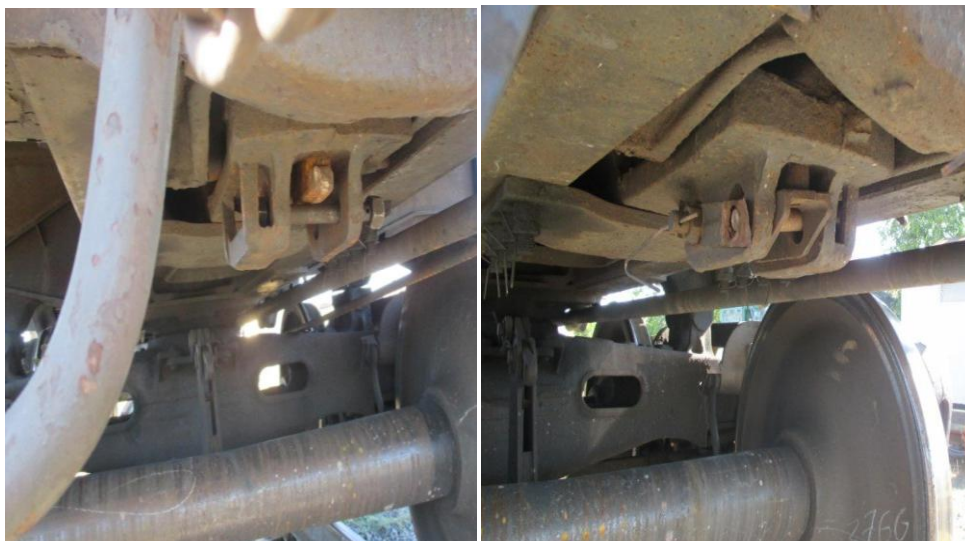


Рисунок А.20 – Випадання клина тягового хому́та автозчепу вагона через відсутність спеціальної підтримуючої планки та зламу кріпильного болта



Рисунок А.21 – Відсутність маятникової підвіски

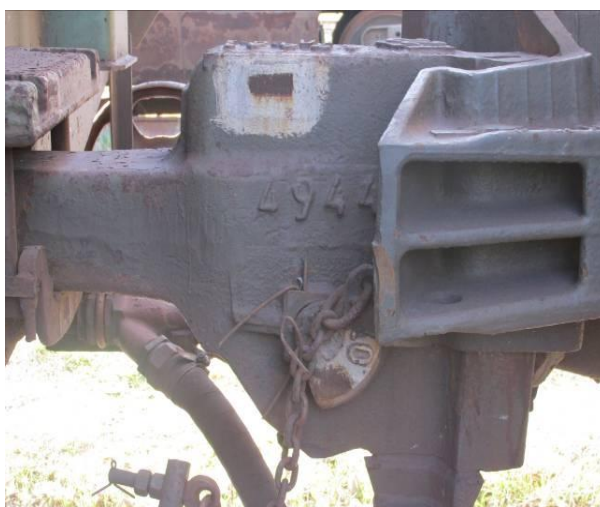


Рисунок А.22 – Нетипове кріплення валика підйомника автозчепу



Рисунок А.23 – Гострий накат гребеня колеса колісної пари



Рисунок А.24 – Вищербини на поверхні кочення колеса колісної пари



Рисунок А.25 – Вищербини та повзуни на поверхні кочення колеса колісної пари



Рисунок А.26 – Невідповідність зазорів у ковзунах



Рисунок А.27 – Відсутність заклепки кріплення п'ятника до рами вагона



Рисунок А.28 – Відсутність 2 болтів кріплення п'ятника до рами вагона



Рисунок А.29 – Відсутність гальмівної колодки



Рисунок А.30 – Злам накладки буксового прорізу



Рисунок А.31 – Тріщина надресорної балки

## ДОДАТОК Б

### Контрольовані параметри вагонів

Таблиця Б.1 – Контрольовані параметри вагонів (на прикладі піввагона нового покоління) під час візуальної перевірки

Вузол вагона	Параметри, що контролюються
1	2
Кузов	<ul style="list-style-type: none"> <li>- стан кузова в цілому і його основних несучих елементів, зокрема на наявність механічних та корозійних пошкоджень, прогинів і деформацій (хребтова, шкворневі, кінцеві й проміжні балки), бічних і торцевих стін (стійок і обшивки), кришок люків, наявність деформацій бічних і торцевих стін від розпірних навантажень, тріщин у листах, балках і зварних з'єднаннях;</li> <li>- стан поручнів і підніжок упорядника, сходів, кронштейнів для кріплення обладнання, обшивки, петель кришок люків і деталей їх кріплення;</li> <li>- стан всього периметра верхньої обшивки і елементів кріплення вантажів всередині кузова (ув'язочних кілець і скоб);</li> <li>- наявність залишків вантажу і місця його скупчення, при цьому визначається необхідність проведення додаткової зачистки.</li> </ul>
Гальмівне обладнання	<p>У відпущеному стані:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- наявність усіх елементів гальмівної системи:               <ul style="list-style-type: none"> <li>а) приладів гальмування і відпускання гальм;</li> <li>б) всіх елементів повітропроводу пневматичної частини гальмівної системи і арматури для з'єднання;</li> <li>в) елементів механічної частини гальмівної системи (тяги, важелі, затягування, осі, втулки, шплінти, запобіжні пристрої);</li> </ul> </li> </ul>

Продовження таблиці Б.1

1	2
	<p>г) виробів кріпильних (болтів, гайок, шайб, стопорних планок шплінтів тощо);</p> <p>- відсутність пошкоджень (тріщин, зламів, відколів, зносів, вм'ятин тощо):</p> <p>а) приладів гальмування і відпускання гальм;</p> <p>б) арматури для з'єднання;</p> <p>в) елементів механічної частини гальма;</p> <p>- наявність зварень гальмових башмаків, підвищених зносів гальмівних колодок і втулок важелів ГРП механічної частини гальма.</p>
Візок	<p>До піднімання кузова:</p> <p>- наявність тріщин литих деталей (бічних рам і надресорна балок);</p> <p>- стан ресорного підвішування (наявність у пружин зламів, відколів, тріщин, слідів змикання витків, наминів, потертостей);</p> <p>- цілісність адаптера і резино-металевої прокладки адаптера;</p> <p>- наявність просідання ковзуна (при появі зазору між зносостійкою пластиною ковзуна і відповідною пластиною на ковзуні кузова);</p> <p>- положення клина щодо надресорної балки по нижній мітці індикатора, яка не повинна бути вище рівня верхньої поверхні надресорної балки;</p> <p>- ослаблення гайок кріплення фрикційних планок;</p> <p>- стан сполучених діагональних стрижнів і їх кріплень на бічній рамі (тріщини, зрушення, деформація);</p>

Кінець таблиці Б.1

1	2
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- закріплення гальмівних башмаків на цапфах триангелів. після піднімання кузова;</li> <li>- наявність зносів на верхній зносостійкій планці ковзуна (за глибиною індикаторів);</li> <li>- наявність тріщин, розшарування тощо, дефектів зносостійкого полімерного вкладиша підплатника;</li> <li>- стан запобіжних тросів триангеля.</li> </ul>
Колісна пара	<ul style="list-style-type: none"> <li>- послаблення болтів торцевого кріплення касетного підшипника на осі колісної пари;</li> <li>- наявність патьоків і викидів мастила в зонах ущільнення і на колесах;</li> <li>- наявність тріщин, сколів і деформацій зовнішніх кілець підшипників і ущільнень (після викочування колісних пар);</li> <li>- наявність тріщин в ободній зоні дисків коліс, а також несправностей на поверхнях кочення;</li> <li>- наявність тріщин і відколів адаптерів.</li> </ul>

Таблиця Б.2 – Контрольовані параметри вагонів (на прикладі піввагона нового покоління) під час перевірки за допомогою вимірювань

Вузол вагона	Параметри, що контролюються
Гальмівне обладнання	<p>У відпущеному стані:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- зазор між упором вилки авторежиму й контактною планкою, який не повинен перевищувати 3 мм;</li> <li>- зазор між колодками та поверхнями кочення коліс повинен становити від 5 мм до 8 мм;</li> <li>- знос гальмівних колодок, вимірювання товщини колодок на відстані 50 мм від торців колодок;</li> <li>- контрольні розміри авторегулятора і його приводу;</li> <li>- зазор між наконечником триангеля і заклепкою (безрізьбовим кріпленням гальмівного башмака на триангель).</li> </ul> <p>У загальмованому стані:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- вихід штока поршня гальмівного циліндра;</li> <li>- відсутність витоків стисненого повітря.</li> </ul>
Колісна пара	<ul style="list-style-type: none"> <li>- прокат (знос обода), товщина обода;</li> <li>- товщина гребеня;</li> <li>- наявність несправностей на поверхнях кочення коліс.</li> </ul>
Автозчепний пристрій	<ul style="list-style-type: none"> <li>- висота горизонтальної осі автозчеплення від рівня головок рейок;</li> <li>- відхилення автозчеплення на центрувальній балочці;</li> <li>- знос контуру зачеплення, а також працездатності механізму зчеплення.</li> </ul>



Кінець таблиці Б.2

1	2
Візок	<p>Після викочування візка, до його розбирання:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- рівень піднесення контактної поверхні демпфера над верхньою частиною ролика ковзуна.</li> </ul> <p>Після викочування візка, після його розбирання:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- висоти пружин ресорного підвішування і ковзунів;</li> <li>- знос отвору під шворінь;</li> <li>- після зняття полімерного вкладиша і оцінки його технічного стану визначається знос опорної поверхні підп'ятника надресорної балки за виміряною глибиною;</li> <li>- наявність зносів між похилими площинами надресорної балки і на поверхні зносостійкої планки;</li> <li>- стан фрикційних клинів, за наявності пошкоджень, тріщин і зносів вертикальної поверхні</li> </ul>

Таблиця Б.3 – Довірчі інтервали  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  інтенсивності відмов

План випробувань	Інтенсивність відмов $\lambda$ і параметр потоку відмов $\omega$ для експоненціального закону розподілу	
	Нижня границя	Верхня границя
[NUN]	$\frac{\tilde{\lambda} \xi_{\frac{1-\beta}{2}}^2(2n_{\Sigma})}{2n_{\Sigma}}$	$\frac{\tilde{\lambda} \xi_{\frac{1-\beta}{2}}^2(2n_{\Sigma})}{2n_{\Sigma}}$
[NUT]	$\frac{\tilde{\lambda} \xi_{\frac{1-\beta}{2}}^2(2n_{\Sigma} + 2)}{2n_{\Sigma}}$	$\frac{\tilde{\lambda} \xi_{\frac{1+\beta}{2}}^2(2n_{\Sigma} + 2)}{2n_{\Sigma}}$
[NUR]	$\frac{\tilde{\lambda} \xi_{\frac{1-\beta}{2}}^2(2n_{\Sigma})}{2(n_{\Sigma} - 1)}$	$\frac{\tilde{\lambda} \xi_{\frac{1+\beta}{2}}^2(2n_{\Sigma})}{2(n_{\Sigma} - 1)}$
[NRT]	$\frac{\tilde{\omega} \xi_{\frac{1-\beta}{2}}^2(2n_{\Sigma})}{2n_{\Sigma}}$	$\frac{\tilde{\omega} \xi_{\frac{1+\beta}{2}}^2(2n_{\Sigma})}{2n_{\Sigma}}$
[NRr]	$\frac{\tilde{\omega} \xi_{\frac{1-\beta}{2}}^2(2n_{\Sigma})}{2(n_{\Sigma} - 1)}$	$\frac{\tilde{\omega} \xi_{\frac{1+\beta}{2}}^2(2n_{\Sigma})}{2(n_{\Sigma} - 1)}$

Примітка:  $\xi_p^2(l)$  – квантиль  $\xi^2$ -розподілу  $P$  з числом ступенів свободи  $l$ ;  $n_{\Sigma}$  – сумарна кількість відмов при випробуваннях.

Колодки «Кобра Тредгард» сині



Колодки «Кобра Тредгард» жовті



Колодки TP-11-01



Колодки 2TP-37-01



Рисунок Б.1 – Стан колодок і поверхні кочення коліс

## ДОДАТОК В

### Список опублікованих праць за темою дисертації

#### Основні праці:

1. Мурадян Л. А., Анофриев В. Г. Исследование действующих условий эксплуатации и анализ причин сокращения ресурса работы железнодорожных колес. *Вісник Дніпропетровського нац. ун-ту залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*. 2010. Вип. 34. С. 206–210.
2. Решетняк Ю. В., Решетняк Д. Ю., Гордійчук О. В., Мурадян Л. А., Бруякін В. К., Бабаев А. М., Міщенко А. А. Модернизация пятникового узла. *Вагонный парк*. 2011. № 5. С. 7–10.
3. Бабаев А. В., Книшук О. С., Исопенко И. В., Мурадян Л. А. Дисковые тормоза грузовых вагонов. *Вагонный парк*. № 12. 2011. С. 8–13.
4. Порівняльний аналіз причин утворення дефектів на поверхні кочення вуглецевих та підвищеної твердості мікролегованих суцільнокатаних коліс / [Узлов І. Г., Узлов К. І., Книш А. В., Хулін А. М., Дементьєва Ж. А., Мямлін С. В., Бруякін В. К., Мурадян Л. А.]. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии* : сб. научн. тр. Дніпропетровськ : ІЧМ НАН України, 2011. С. 3–12.
5. Савчук О. М., Бруякин В. К., Мурадян Л. А., Мищенко А. А., Лутанин С. В., Можейко Е. Р. Надежность полувагонов нового поколения. *Вагонный парк*. 2011. № 9. С. 11–16.
6. Неисправности авторежимов грузовых вагонов / [Кутишенко А. В., Бабаев А. М., Кривошея А. Н., Глешенкова В. С., Мурадян Л. А.]. *Вагонный парк*. 2012. № 2. С. 34–36.
7. On the concept of selection of steels for high-strength railroad wheels / O. P. Ostash, V. H. Anofriev, I. M. Andreiko, L. A. Muradyan, V. V. Kulyk. *Materials Science*. 2013. Vol. 46. Iss. 6. P. 697–703.
8. Мямлін С. В., Скалозуб В. В., Мурадян Л. А. Адаптивні Байєсівські моделі оцінювання показників надійності вантажних вагонів на етапах життєвого циклу. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2018. Вип. 182. С. 80–91.
9. Мурадян Л. А. Определение количества объектов для проведения эксплуатационных испытаний вагонной техники. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2013. Вип. 139. С. 83–86.
10. Мурадян Л. А., Бабаев А. М., Сорокалет А. В. Исследование эксплуатационных свойств накладок для дисковых тормозов пассажирских вагонов производства ПАО "Трибо". *Залізничний транспорт України*. 2013. № 3/4. С. 66–68.
11. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Винокурова С. В. Пути развития, тенденции и перспективы дальнейшего совершенствования тормозной колодки рельсового подвижного состава. *Вагонный парк*. 2015. № 5-6. С. 32–34.

12. Испытания перспективных тормозных колодок на железных дорогах Украины / [Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Винстрот Бернд Уве, Муковоз С. П.]. *Локомотив-Информ*. 2015. № 7-8. С. 20–22.
13. Мямлін С. В., Мурадян Л. А., Барановський Д. М. Проблема визначення терміну «надійність». Методологія побудови та вивчення надійності вантажних вагонів. *Наука та прогрес транспорту*. 2015. № 6 (60). С. 110–117. doi: 10.15802/stp2015/57034.
14. Мямлін С. В., Мурадян Л. А. Застосування основних законів розподілу випадкових величин для визначення показників надійності вагонів. *Збірник наукових праць ДЕТУТ*. Сер.: «Транспортні системи і технології». 2015. Вип. 26–27. С. 172–180.
15. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Мищенко А. А. Методологические основы определения эксплуатационных характеристик несамоходного подвижного состава. *Наука та прогрес транспорту*. 2015. № 1 (61). С. 169–179.
16. Мурадян Л. А. Розробка основних елементів для побудови системи дослідження надійності вантажних вагонів. *Збірник наукових праць ДЕТУТ*. Серія «Транспортні системи і технології». 2015. Вип. 29. С. 29–36.
17. Бубнов В. М., Мурадян Л. А., Манкевич М. П., Шапошник В. Ю. Особливості технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів з підвищеними показниками надійності. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2016. Вип. 160 С. 11–17.
18. Мурадян Л. А. Ймовірно-фізичний підхід для описання та визначення надійності вагонів. *Наука та прогрес транспорту*. 2016. № 5 (64). С. 168–177.
19. Мурадян Л. А. Описання відмов вагона при технологічному процесі виготовлення структурних елементів. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2016. Вип. 164. С. 62–68.
20. Мурадян Л. А. Граничний ресурс вагона в процесі експлуатації. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2016. Вип. 166. С. 17–23.
21. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Подосенов Д. О. Повышение надежности грузовых вагонов с применением новых технологий изготовления и восстановления рабочих поверхностей. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2016. № 11. С. 49–54.
22. Мурадян Л. А., Подосенов Д. О. Підвищення міжремонтного ресурсу візків вантажних вагонів. Модель геометрії зносу підп'ятника. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. № 1 (65). С. 61–69.
23. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Подосенов Д. О. Теоретическая зависимость величины износа пары трения "пятник - подпятник" от пробега грузового вагона. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. № 6. С. 79–87.
24. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю. Автоматичний ідентифікатор окремих частин транспортного засобу при впровадженні нових концепцій системи технічного обслуговування та ремонту. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2017. № 4(125). С. 44–50.

### Додаткові праці:

25. Эксплуатационные испытания полувагонов нового поколения / [Савчук О. М., Бруякин В. К., Мурадян Л. А., Мищенко А. А., Коробка Б. А., Можейко Е. Р.]. *Вагонный парк*. 2009. № 5-6. С. 30–32.
26. Эксплуатационные испытания полувагонов нового поколения / [Савчук О. М., Бруякин В. К., Мищенко А. А., Мурадян Л. А., Коробка Б. А., Можейко Е. Р.]. *Вагонный парк*. 2009. № 7-8. С. 8–11.
27. Бабаев А. М., Мурадян Л. А., Винокурова С. В. О тормозных колодках дорог Украины. *Вагоны и вагонное хозяйство*. 2010. № 4. С. 43–44.
28. Бабаев А. М., Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю. Удосконалення вузла передачі стоянкового гальма вантажного вагона. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2013. Вип. 139. С. 94–97.
29. Мурадян Л. А. Відмови та безвідмовність вагонів як складові експлуатаційної надійності. *Вісник НТУ «ХПІ». Сер.: Механіко-технологічні системи та комплекси*. Харків : НТУ «ХПІ», 2015. № 52(1161). С. 127–130.
30. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю. К вопросу о планах испытаний надежности механических систем. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2015. Вип. 157. С. 119–127.
31. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю. Исследование литых железнодорожных колес в эксплуатации производства компании “Griffin Wheel Company” (США). *Бюллетень научных работ Брянского филиала МИИТ*. Брянск, 2015. Вып. 7. С. 65–70.
32. Мурадян Л. А. О ресурсе литых железнодорожных колес компании "Griffin Wheel Company" (США). *Инновации и исследования в транспортном комплексе: Материалы III Международной научно-практической конференции*. Курган, 2015. Часть I (в двух частях). С. 219–222.
33. Мурадян Л. А. Побудова системи дослідження надійності вантажних вагонів. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2015. № 10. С. 90–95.
34. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Мищенко А. А. Опытные маршруты ДИИТ-УЗ: «Опытная эксплуатация – научные обоснования – массовое внедрение». *Вагонный парк*. 2016. № 5–6. С. 57–59.
35. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Пулария А. Л. Устройства пассивной защиты современного подвижного состава железных дорог. *Вагонный парк*. 2016. № 5-6. С. 8–11.
36. Muradian L. Building models of freight cars refusals involving Bayesian approach. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2016. С. 54–60.
37. Мурадян Л. А., Мямлин С. В., Шапошник В. Ю. Определение стратегии технического обслуживания и ремонта вагонной техники. *Транспортная инфраструктура Сибирского района*. Материалы седьмой Всероссийской научно-технической конференции. Иркутск, 2016. С. 369–373.
38. Мурадян Л. А., Барановский Д. Н. Визначення параметрів експлуатаційної надійності вантажних вагонів у системі технічного обслуговування та ремонту. *Залізничний транспорт України*. 2016. № 1-2- С. 35–40.

39. Мурадян Л. А. Побудова системи технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів. *Залізничний транспорт України*. 2017. № 1. С. 36–40.
40. Мурадян Л. А., Подосьонов Д. О. Збільшення міжремонтного ресурсу вантажних вагонів з використанням дискретного розподілення твердості матеріалу. *Вагонний парк*. 2017. № 3-4. С. 62–64.
41. Мямлін С. В., Мурадян Л. А., Подосьонов Д. О. Підвищення надійності п'ятникового вузла вантажного вагону. *Залізничний транспорт України*. 2018. № 1. С. 34–41.
42. Шаблон для виміру дефектів залізничних коліс: Пат UA 123075 U Україна : МПК B61F 5/12, B61F 5/14 № 123075; заяв. 24.07.2017; публ. 12.03.2018. Бюл. № 5.

### **Наукові праці апробаційного характеру:**

43. Бруякин В. К., Мурадян Л. А., Мищенко А. А., Дедаева Т. И. К вопросу об износе гребней вагонных колес. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 66-ї Міжнародної науково-практ. конф. Днепропетровск, 2006. С. 78.
44. Бруякин В. К., Мурадян Л. А., Мищенко А. А. К вопросу опытных эксплуатационных испытаний безасбестовых тормозных колодок. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 67-ї Міжнародної науково-практ. конф. Днепропетровск, 2007. С. 54–55.
45. Савчук О. М., Бруякин В. К., Мурадян Л. А., Мищенко А. А. Дослідження зразків нової техніки. *Тези доповідей 68-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»*. Дніпропетровськ, 2008. С. 75–76.
46. Мурадян Л. А., Мищенко А. А. Испытания новых образцов вагонной техники в опытных маршрутах. *Проблеми механіки залізничного транспорту: Безпека руху, динаміка, міцність рухомого складу, енергозбереження*. Матеріали XII Міжнародної конф. Днепропетровск, 2008. С. 107.
47. Савчук О. М., Бруякин В. К., Мурадян Л. А., Мищенко А. А. Эксплуатационные испытания полувагонов нового поколения. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 69-ї Міжнародної науково-практ. конф. Днепропетровск, 2009. С. 56–57.
48. Мурадян Л. А., Бабаев А. М., Винокурова С. В. Совершенствование тормозных колодок железных дорог Украины. *Безопасность движения поездов*. Матеріали X науково-практ. конф. Москва, 2009. С. VII-16.
49. Мурадян Л. А., Анофрієв В. Г., Мищенко А. А. Аналіз пошкоджень на поверхні кочення коліс техніки. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 70-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2010. С. 61–62.
50. Бруякин В. К., Бабаев А. М., Мурадян Л. А., Мищенко А. А. Дослідження зносу гальмових колодок різних виробників в експлуатації. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 70-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2010. С. 70–71.

51. Решетняк Ю. В., Гордійчук О. В., Мурадян Л. А., Бабаєв А. М., Міщенко А. А. Совершенствования пятникового узла грузового вагона. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 71-ї Міжнародної науково-практ. конф. Днепропетровск, 2011. С. 82.
52. Анофрієв В. Г., Мурадян Л. А. Дослідження зносостійкості коліс різних марок сталей. *Проблеми механіки залізничного транспорту: Безпека руху, динаміка, міцність рухомого складу, енергозбереження*. Матеріали XIII Міжнародної конф. Дніпропетровськ, 2012. С. 91–92.
53. Бруякин В. К., Мурадян Л. А., Мищенко А. А. Исследование показателей надежности в эксплуатации новой вагонной техники. *Проблеми механіки залізничного транспорту: Безпека руху, динаміка, міцність рухомого складу, енергозбереження*. Матеріали XIII Міжнародної конф. Дніпропетровськ, 2012. С. 93.
54. Бабаєв А. М., Мурадян Л. А., Сороколет А. В., Винокурова С. В. Эксплуатационные испытания тормозных накладок дискового тормоза. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 72-ї Міжнародної науково-практ. конф. Днепропетровск, 2012. С. 60–61.
55. Мурадян Л. А., Шатунов А. В. К вопросу о повреждениях цельнокатаных колес в эксплуатации. *Транспортная инфраструктура сибирского района*. Материалы четвертой всероссийской научно-техн. конф. с международным участием. Иркутск, 2013. С. 368–369.
56. Мурадян Л. А., Міщенко А. А., Бруякин В. К. Исследование эксплуатационных свойств надежности опытных вагонов в замкнутых маршрутах УЗ. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту*: матеріали 73-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2013. С. 52.
57. Бабаєв А. М., Мурадян Л. А., Муковоз С. П. Эксплуатационные испытания всесезонных тормозных колодок пассажирских вагонов. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 74-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2014. С. 60–61.
58. Мямлин С. В., Мурадян Л. А., Дузик В. Н. Анализ показателей надежности полувагонов модели 12-7023-01 на тележках 18-7020 в эксплуатации. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 75-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2015. С. 25–26.
59. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю. Випробування гальмової колодки 2тр-155 з двома рознесеними чавунними вставками. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 75-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2015. С. 29–30.
60. Бабаченко А. И., Мямлин С. В., Мурадян Л. А., Кныш А. В., Кононенко А. А. Эксплуатационные свойства железнодорожных колес, изготовленных различными способами производства. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 75-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2015. С. 79–81.



61. Мямлін С. В., Мурадян Л. А., Бабаєв А. М., Пуларія А. Л., Шапошник В. Ю. Проблеми існуючої системи технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів в Україні. *Проблеми механіки залізничного транспорту: Безпека руху, динаміка, міцність рухомого складу, енергозбереження*. Матеріали XIV Міжнародної конф. Дніпропетровськ. 2016. С. 89–91.
62. Мурадян Л. А., Міщенко А. А., Шапошник В. Ю. Проблеми визначення надійності піввагонів моделі 12-7023-01 на візках 18-7020 за результатами дослідної експлуатації в маршрутах ДПТ-УЗ. *Проблеми механіки залізничного транспорту: Безпека руху, динаміка, міцність рухомого складу, енергозбереження*. Матеріали XIV Міжнародної конф. Дніпропетровськ. 2016. С. 86–87.
63. Мурадян Л. А. Застосування байєсівського підходу до побудови моделей відмов вантажних вагонів. *Проблеми механіки залізничного транспорту: Безпека руху, динаміка, міцність рухомого складу, енергозбереження*. Матеріали XIV Міжнародної конф. Дніпропетровськ, 2016. С. 84–86.
64. Мурадян Л. А., Мищенко А. А., Шапошник В. Ю. Опытные маршруты ДИИТ: «Опытная эксплуатация – научные обоснования – массовое внедрение». *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 76-ї Міжнародної науково-практ. конф.. Дніпропетровськ, 2016. С. 34–35.
65. Мурадян Л. А., Подосьонов Д. О. Аналіз пошкоджень вантажних вагонів на ПАТ «Українська залізниця». *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 76-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2016. С. 22–24.
66. Мурадян Л. А., Міщенко А. А., Шапошник В. Ю., Бубнов В. М., Тусіков Є. К., Ревякін В. В. Дослідження показників надійності піввагонів моделі 12-1905 на візках 18-1711 в експлуатації. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 77-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпро, 2017. С. 41–43.
67. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю. Перспективи експлуатації литих колес на залізничних дорогах України. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 77-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпро, 2017. С. 280–282.
68. Мурадян Л. А. Індивідуальна модель прогнозу показників надійності вантажних вагонів. *Тези доповідей 78-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»*. Дніпро, 2018. С. 37–38.
69. Мурадян Л. А., Бабаєв А. М., Мищенко А. А. Применения профиля ДИИТ-УЗ в модернизированных тележках грузовых вагонов. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : матеріали 78-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпро, 2018. С. 39–40.
70. Мурадян Л. А., Подосьонов Д. О. Підвищення міжремонтного ресурсу п'ятникового вузла вантажних. *Проблеми та перспективи розвитку залі-*

*зничного транспорту* : матеріали 78-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпро, 2018. С. 40–41.

71. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 58830. Літературний твір наукового характеру «Програма та методика експлуатаційних випробувань вантажних напіввагонів моделі 12-7023 на візках моделі 18-7020» / С. В. Мямлін, Л. А. Мурадян, В. Ю. Шапошник, А. А. Міщенко. зареєстр. 26.02.2015. 1 с.
72. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 60176. Літературний твір наукового характеру «Программа и методика эксплуатационных испытаний колес грузовых вагонов» / С. В. Мямлін, Л. А. Мурадян, В. Ю. Шапошник, В. Г. Анофрієв. зареєстр. 17.06.2015. 1 с.
73. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 60178. Літературний твір наукового характеру «Програма та методика дослідження експлуатаційних властивостей боковин візків з використанням пружних елементів, що зменшують не обресорені частини візків вантажних вагонів» / С. В. Мямлін, Л. А. Мурадян, В. Ю. Шапошник, А. А. Міщенко. зареєстр. 17.06.2015. 1 с.

## ДОДАТОК Г

### **АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ**

Україна	
Товариство з обмеженою відповідальністю	
«БІЛОЦЕРКІВСЬКИЙ ЗАВОД	
«ТРІБО»	
Ідентифікаційний код 35046274	
№	161/1-27
« 17 »	01 20 18 р.
09108, Київська область, м. Біла Церква, вул. Леваневського, 95	

**Акт**  
**впровадження результатів досліджень**

ТОВ «БЦЗ «Трібо» прийняло до впровадження в практику використання результатів експериментальних досліджень та рекомендації щодо виготовлення нових композиційних гальмівних колодок, запропоновані д.т.н., проф. Мямліним С. В., к.т.н., доц. Мурадяном Л.А. і містять:

- теплову модель взаємодії гальмівної колодки і колеса, використовуючи яку на етапі проектування можна підбирати колодки з необхідними фізико-механічними, фізико-хімічними та триботехнічними властивостями для забезпечення високого рівня надійності в процесі експлуатації вантажних вагонів;

- результати експлуатаційних випробовувань гальмівних колодок у дослідних маршрутах Укрзалізниці.

Головний інженер  
ТОВ «БЦЗ «Трібо»



О. М. Глевацький

ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО  
КРЮКІВСЬКИЙ ВАГОНБУДІВНИЙ ЗАВОД

вул. І.Приходька, 139, м. Кременчук  
Полтавська обл., Україна, 39621  
Тел.: (0536) 74-14-20, 76-92-22,  
76-97-85, 76-93-31, 76-95-05  
e-mail: kvsz@kvsz.com  
www.kvsz.com



ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
КРЮКОВСКИЙ ВАГОНСТРОИТЕЛЬНЫЙ ЗАВОД

ул. И.Приходько, 139, г. Кременчуг  
Полтавская обл., Украина, 39621  
Телеграфный адрес: Кременчуг, 21 Ось  
Телетайп: 164519 OS. Факс: (0536) 74-36-20

25.10.16, № 50-01-36/1775

На № \_\_\_\_\_

### Акт впровадження результатів досліджень

ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» прийняв до впровадження в практику використання результатів досліджень під час розробки нових та модернізації старих вагонів в процесі проектування та їх виготовлення, що запропоновані д.т.н., проф. Мямліним С.В., к.т.н., доц. Мурадян Л.А. і містять:

- методологію побудови та вивчення надійності вантажного вагону, що охоплює конструкторську, технологічну та експлуатаційну надійність. При цьому науковий експеримент включає моделювання роботи вантажного вагона в різних умовах та експлуатаційних режимах; теорія надійності представлена комбінованою або модифікованою, що охоплює математичні і фізичні основи, а застосування Басової статистики надає можливість описати різні стани вантажного вагона з розбиванням його на основні складові та з відповідною ймовірністю для кожної складової описувати загальну надійність;

- алгоритм та послідовність описання та визначення надійності вагонів для прогнозування її окремих кількісних показників для досліджуваних елементів, деталей та вузлів, або вагона в цілому;

- вираз для конструкторського коефіцієнту експлуатаційної надійності вагонів, що вказує на небезпеку подальшої експлуатації вагонів на залізниці та, на основі якого можна прогнозувати і констатувати значні економічні втрати, екологічні наслідки або загрозу людському життю;

- підхід для описання відмов і оцінки технологічної надійності вагона, що включає вирази для прогнозування таких відмов з урахуванням процесу виготовлення структурних елементів вагона і з неприпустимістю утворення дефектів їх матеріалів;

- модель відмов вантажних вагонів із залученням Басовського підходу, за допомогою якої можна оцінити викинення кожної з відмов деталей чи вузлів окремо, а також вагона в цілому, через внесення змін у формулу для повної ймовірності. При цьому запропоновано використання двох моделей: за відмовами вантажних вагонів і за зміною фізичних характеристик складових матеріалів.

Технічний директор

М.В. Крамаренко



IRIS  
Certification

Система менеджмента предприятия  
СЕРТИФИЦИРОВАНА





**ІНТЕРПАЙП**  
НТЗ

## Акт

### впровадження результатів досліджень

Впродовж 2007-2015 рр. проводились експериментальні дослідження високоміцних коліс (типу КП-Т) зі сталі марки Т підвищеної твердості, призначених для вантажного рухомого складу залізниць і, що виготовлені на ПАТ «Інтерпайп НТЗ». При цьому, слід відзначити, що ПАТ «Інтерпайп НТЗ» прийняло до впровадження в практику використання результатів експериментальних досліджень та рекомендації, які отримані та запропоновані к.т.н., доцентом Мурадянном Л.А. і містять результати експлуатаційних випробовувань високоміцних залізничних коліс на дослідних маршрутах Укрзалізниці у вигляді звітів, що включають значення вимірних величин зносу, розраховані інтенсивності та швидкості зносу, та прогнозовані значення ресурсу вищевказаних залізничних коліс.

Технічний директор  
Дивізіону залізничної продукції  
ПАТ "ІНТЕРПАЙП НТЗ"

15.01.2020



О.В. Рослик



## Акт

### впровадження результатів досліджень

Вагонне депо ст. Батуринська Придніпровської залізниці прийняло до впровадження в практику використання результатів експериментальних досліджень та рекомендації щодо стратегії проведення технічного обслуговування та ремонту вагонів, запропоновані д.т.н., проф. Мямліним С.В., к.т.н., доц. Мурадяном Л.А. і, що містять:

- підхід до побудови системи та визначення оптимальних термінів проведення технічного обслуговування, поточного, деповського та капітального ремонтів вантажних вагонів, в якій дано визначення параметрам експлуатаційної надійності вантажних вагонів: коефіцієнту готовності, ймовірності безвідмовної роботи та виконання задачі;

- оцінку теоретичному граничному ресурсу структурних елементів вагона з урахуванням проведення технічних дій (технічного обслуговування, поточного, деповського, капітального ремонтів) та інноваційних конструктивних та технологічних рішень в процесі ремонту вагона у випадку, коли застосовуються нові матеріали чи технології; що змінюють значення величин зносу, і, відповідно мають прямий вплив на ресурс;

- методологічний підхід до побудови системи дослідження надійності вантажних вагонів. В системі досліджень надійності вантажних вагонів на основі знань про зв'язок ознак несправностей і самої несправності відповідного вантажного вагона, що формуються спеціалістами ремонтних і експлуатаційних вагонних депо, запропоновано використовувати підсумковий коефіцієнт впевненості гіпотез при заданих відношеннях апріорних ймовірностей справедливості гіпотез з певними ознаками несправностей вантажних вагонів;

- методологічні підходи до оцінки експлуатаційних характеристик нових і модернізованих вантажних вагонів, що включають контрольовані параметри для системи дослідження надійності вантажних вагонів у якості свідочств (симптомів), що фіксуються впродовж випробувань або під час експлуатації, та надають можливість більш точно визначити показники надійності вантажних вагонів.

Начальник вагонного депо

12.02.2020



Золотарь Д.В.

**ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО  
"УКРАЇНСЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ"  
РЕГІОНАЛЬНА ФІЛІЯ "ПРИДНІПРОВСЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ"  
Структурний підрозділ "Вагонне депо Нижньодніпровськ Вузол"**  
вул. Молодогвардійська, 1Д м. Дніпропетровськ, 49022, тел. (056) 731 22 22;  
факс 731 21 10 Код ЄДРПОУ 40081237

**Акт**

**впровадження результатів досліджень**

Вагонне депо ст. Нижньодніпровськ-Вузол Придніпровської залізниці прийняло до впровадження в практику використання результатів експериментальних досліджень та рекомендації щодо стратегії проведення технічного обслуговування та ремонту вагонів, запропоновані д.т.н., проф. Мямліним С.В., к.т.н., доц. Мурадян Л.А. і, що містять:

- підхід до побудови системи та визначення оптимальних термінів проведення технічного обслуговування, поточного, деповського та капітального ремонтів вантажних вагонів, в якій дано визначення параметрам експлуатаційної надійності вантажних вагонів: коефіцієнту готовності, ймовірності безвідмовної роботи та виконання задачі;

- оцінку теоретичному граничному ресурсу структурних елементів вагона з урахуванням проведення технічних дій (технічного обслуговування, поточного, деповського, капітального ремонтів) та інноваційних конструктивних та технологічних рішень в процесі ремонту вагона у випадку, коли застосовуються нові матеріали чи технології, що змінюють значення величин зносу, і, відповідно мають прямий вплив на ресурс;

- методологічний підхід до побудови системи дослідження надійності вантажних вагонів. В системі досліджень надійності вантажних вагонів на основі знань про зв'язок ознак несправностей і самої несправності відповідного вантажного вагона, що формуються спеціалістами ремонтних і експлуатаційних вагонних депо, запропоновано використовувати підсумковий коефіцієнт впевненості гіпотез при заданих відношеннях апріорних ймовірностей справедливості гіпотез з певними ознаками несправностей вантажних вагонів;

- методологічні підходи до оцінки експлуатаційних характеристик нових і модернізованих вантажних вагонів, що включають контрольовані параметри для системи дослідження надійності вантажних вагонів у якості свідочств (симптомів), що фіксуються впродовж випробувань або під час експлуатації, та надають можливість більш точно визначити показники надійності вантажних вагонів.

Начальник депо

20.03.2018



С.В. Чопоров



"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Проректор з науково-педагогічної, економічної роботи, перспективного та інноваційного розвитку



професор Радкевич.А.В.

« 18 » лютого 2020 р.

АКТ

про впровадження в навчальний процес результатів досліджень Мурадяна Леонтія Абрамовича за темою дисертаційної роботи "Розвиток наукових основ забезпечення надійності вантажних вагонів на етапах життєвого циклу".

В основі дисертаційної роботи Мурадяна Леонтія Абрамовича лежать результати, отримані їм при виконанні теоретичних досліджень та експлуатаційних випробувань вантажних вагонів. Основні результати полягають в розробці методів оцінки показників надійності вантажних вагонів; побудові математичних моделей для прогнозування кількісних показників надійності досліджуваних елементів, деталей та вузлів, або вагона в цілому, а також моделі розрахунку рівня надійності під час виготовлення його структурних елементів.

Основні результати дисертаційної роботи Мурадяна Л.А. використовуються в лекційному курсі та при проведенні практичних занять з дисциплін "Надійність вагонів та технічна діагностика вагонів", "Технологія ремонту вагонів" на кафедрі "Вагони та вагонне господарство" Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Акт обговорений і схвалений на засіданні кафедри "Вагони та вагонне господарство" (протокол № 5 від 18.02.2020 р.).

Зав. кафедри

"Вагони та вагонне господарство",

С.С. Довганюк