

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

ГРИШЕЧКІНА ТЕТЯНА СЕРГІЇВНА

УДК 629.42-027.45(043.5)

ДИСЕРТАЦІЯ

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ УТРИМАННЯ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ З УРАХУВАННЯМ ЗАЛЕЖНИХ ВІДМОВ ЇХ ЕЛЕМЕНТІВ

Спеціальність 05.22.20 – Експлуатація і ремонт засобів транспорту

Галузь знань 27 – Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

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



Т.С. Гришечкіна

Науковий керівник
Босов Аркадій Аркадійович
доктор технічних наук, професор

Дніпро – 2021

АНОТАЦІЯ

Гришечкіна Т.С. Удосконалення системи утримання технічних об'єктів залізничного транспорту з урахуванням залежних відмов їх елементів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту» – Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2021.

Робота виконана на кафедрі «Прикладна математика» Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню задачі удосконалення існуючої системи утримання технічних об'єктів залізничного транспорту, а саме – врахуванню впливу залежних відмов обладнання.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та основні задачі досліджень, визначено наукову новизну роботи і практичне значення отриманих результатів, показано зв'язок роботи з науковими темами. Подано відомості про апробацію результатів роботи, особистий внесок автора та його публікації.

У **першому** розділі дисертаційної роботи проведено аналіз сучасного стану систем утримання тягового рухомого складу. Визначені їх переваги та недоліки. Виявлено відсутність врахування наслідків залежних відмов основних вузлів локомотивів в будь-якій існуючій системі утримання технічних об'єктів залізничного транспорту. Проведено аналіз транспортних подій у локомотивному господарстві, який виявив, що більша частина аварій виникла саме по причині залежних відмов обладнання.

За результатами першого розділу доведена доцільність врахування залежних відмов елементів технічних систем при побудові раціональної системи утримання.

Основною задачею залізничного транспорту є забезпечення потреби населення в перевезеннях, тобто вирішення задач народного господарства і соціальних потреб. Сучасні реалії вимагають також дбайливого ставлення до використання екологічних ресурсів (води, палива, тощо). Тому постає питання вибору критерію раціональності при удосконаленні систем утримання технічних об'єктів залізничного транспорту.

В ході аналізу було визначено, що використання лише одного критерію не дозволяє отримати бажаного результату. Тому для визначення раціональності системи утримання тягового рухомого складу необхідно обирати набір показників, тобто вирішувати задачу векторної оптимізації.

Таким чином, на основі проведеного аналізу обґрунтований перспективний напрям удосконалення системи утримання локомотивів, яка є раціональною за трьома показниками (витрати коштів, часу, екологічних ресурсів) та враховує залежні відмови основних вузлів локомотиву.

У другому розділі дисертаційної роботи проведено системний аналіз теоретичних основ удосконалення системи утримання локомотивів. Розглянуто основні кількісні характеристики надійності системи та поняття залежної відмови. Проведено моделювання напрацювання до відмови та процесу відновлення. Виведено рекурентне співвідношення, яке описує розповсюдження залежних відмов по технічній системі. На основі цього співвідношення розроблені детермінована та ймовірнісна моделі розповсюдження залежних відмов по технічній системі. Це дозволило враховувати витрати на усунення наслідків залежних відмов у системі утримання технічних об'єктів.

Для оцінки якості виконання системи утримання локомотивного парку запропонована методика, що базується на методах зниження розмірності даних. За допомогою цієї методики з'являється можливість аналізувати стан локомотивного господарства з точки зору безпеки руху та з точки зору якості виконання системи утримання локомотивів.

У **третьому** розділі дисертації запропоновано методикку визначення раціональної системи утримання з використанням математичного апарату векторної оптимізації. У якості критеріїв раціональності обрано, відповідно до результатів аналізу у другому розділу, наступні показники: витрати коштів, витрати часу, витрати екологічних ресурсів. Сформована задача векторної оптимізації за трьома функціями, які детально описані. Сформульовані основні умови для існування розв'язку даної задачі.

У **четвертому** розділі дисертаційної роботи виконано оцінку роботи локомотивного парку методами зниження розмірності даних, що дало змогу позбутися надлишкової дублюючої інформації з великої кількості вихідних показників діяльності локомотивного господарства.

Для оцінки ефективності системи утримання (або оцінки якості виконання) за допомогою методу головних компонент та методу аналізу ієрархій був розроблений єдиний інтегральний показник – індекс виконання системи утримання. Для обґрунтування адекватності запропонованого показника було проведено його апробацію на даних локомотивного парку Придніпровської залізниці. Порівняння отриманих значень індексу та середнього відсотку виконання плану ремонтів показало високу ступінь взаємозалежності цих показників. Для перевірки гіпотези рівності математичних сподівань цих показників було розраховано t-критерій Стьюдента, значення якого засвідчило, що отримане емпіричне значення опинилося в зоні значущих результатів.

Аналіз статистичних даних про аварійність на залізничному транспорті виявив їх перевантаженість абсолютними показниками, які мають тенденцію до зниження, але не дозволяють зробити об'єктивних висновків щодо стану безпеки руху. Тому для оцінки стану безпеки руху у локомотивному господарстві за запропонованою методикою розраховано єдиний інтегральний показник – індекс стану безпеки руху. Це дозволило одночасно розглядати не 33 показники, а лише один, який зі збереженням 85% вихідної інформації, характеризує стан безпеки руху.

У п'ятому розділі дисертації наведено методику та проведено розрахунок вартості життєвого циклу локомотиву з урахуванням залежних відмов його вузлів. Дана методика дозволила визначати середню вартість непланового ремонту, що в свою чергу дозволяє вдосконалити систему утримання. Для обґрунтування даної методики запропоновано показник, який дозволяє проводити оцінку впливу залежних відмов на систему утримання. Проведена апробація роботи методики на даних про відмови основного обладнання електровозів ДЕ1. Це дозволило виявити вузли, відмови яких призводять до значного зростання (до 12 разів) вартості відновлення при виникненні залежних відмов у локомотиві. Для таких вузлів пропонується обслуговування за системою утримання з обстеженням та відновленням у фіксовані моменти наробітку.

Запропоновано удосконалення методики визначення раціональної системи утримання шляхом урахування залежних відмов вузлів локомотиву. За допомогою запропонованої методики прогнозується зменшення вартості життєвого циклу локомотивів за рахунок підвищення їх експлуатаційної надійності та зменшення непланових ремонтів.

Робота виконана у відповідності з планами науково-дослідних робіт у Дніпровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна:

1. НДР «Розвиток математичних методів моделей складних систем» (Номер: 100.17/50.46, Регістраційний номер: 0117U005652),
2. НДР «Удосконалення методів випробування та діагностування обладнання локомотивів» № держреєстрації 0117U002068.

На основі проведених досліджень розроблена програма, яка дозволяє знаходити набори пошкоджень у випадках виникнення залежних відмов у технічній системі, обчислює вартість відновлення. Програмний продукт захищено свідоцтвом про авторське право на твір №82306 від 17.10.2018.

Ключові слова: тяговий рухомий склад, надійність, система утримання, залежні відмови, математичне моделювання, методи зниження розмірності, вартість життєвого циклу.

Список публікацій здобувача

Основні праці:

1. Босов А. А., Гришечкина Т. С., Савченко Л. Н. Математическое моделирование зависимых отказов технического объекта. *Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*. 2009. Вып. 28. С. 129-132.
2. Kapitsa M. I., Hryshechkina T. S. Rational Recovery Model of Depot Processing Equipment at the Industrial Enterprise. *Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*. 2014. Вып. 4 (52). С. 60-66.
3. Лоза П. А., Гришечкина Т. С. Оценка качества выполнения системы содержания парка электроподвижного состава. *Электрификация транспорта*. 2015. № 9. С. 87-93.
4. Гришечкіна Т. С. Побудова математичної моделі раціональної системи утримання технічних об'єктів залізничного транспорту. *Транспортные системы и технологии перевозок*. 2017. Вып. 14. С. 30-35. DOI: 10.15802/tstt2017/123165
5. Bodnar B., Bolzhelarskyi Y., Ochkasov O., Hryshechkina T., Černiauskaite L. Determination of Integrated Indicator for Analysis of the Traffic Safety Condition for Traction Rolling Stock. *Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2018)* : the 12th Intern. Sci. Conf. (April 26–27, 2018, Panevėžys) / Kaunas University of Technology. Panevėžys, 2018. P. 45–54. Retrieved from www.scopus.com
6. Bodnar B., Ochkasov O., Bodnar E., Hryshechkina T., Keršys R. Safety Performance Analysis of the Movement and Operation of Locomotives. *Transport Means 2018* : proc. of the 22nd Intern. Sci. Conf. (Oct. 03–05, 2018,

Trakai, Lithuania). Kaunas, 2018. Pt. II. P. 839–843. Retrieved from www.scopus.com

7. Bodnar B. E., Ochkasov O. B., Bodnar E. B., Hryshechkina T. S., Ocheretnyuk M. V. Simulation of locomotive repair organization by the methods of queue systems theory. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2018. № 5 (77). P. 28–40. DOI: 10.15802/stp2018/147740

8. Bodnar B. E., Hryshechkina T. S., Bodnar E. B. Choosing the System of Locomotive Maintenance in View of the Effect of Dependent Failures. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2018. № 6 (78). P. 47-58.

9. Bodnar B., Ochkasov O., Hryshechkina T., Bodnar E., Skvireckas R. Consideration of Dependent Failures Impact on Selecting the System of Locomotive Maintenance. *Transport Means 2019 : proc. of the 23rd Intern. Sci. Conf. (Oct. 02–04, 2019, Palanga, Lithuania)*. Kaunas, 2019. Pt. III. P. 1103–1107. Access Mode: <https://transportmeans.ktu.edu/wp-content/uploads/sites/307/2018/02/Transport-means-2019-Part-3.pdf> (18.11.19). Retrieved from www.scopus.com

Праці апробаційного характеру:

10. Гришечкина Т. С. Моделирование зависимых отказов в технических системах. *Системный анализ и информационные технологии : материалы*

14-й Междунар. научно-техн. конф. SAIT 2012 (Киев, УНК “ИПСА” НТУУ “КПИ”, 24 апреля 2012 г.). Киев, 2012. С. 48-49.

11. Босов А. А., Гришечкина Т. С. Учет зависимых отказов при усовершенствовании систем содержания технических объектов. *Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта : тезисы докл. 68-й Междунар. научно-практ. конф. (Днепропетровск, ДНУЖТ, 2008 г.)*. Днепропетровск, 2008. С.16.

12. Гришечкина Т. С. Повышение надежности тягового подвижного состава путем усовершенствования контроля отказов элементов. *Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта* : тезисы докл. 69-й Междунар. научно-практ. конф. (Днепропетровск, ДНУЖТ, 21-22 мая 2009 г.). Днепропетровск, 2009. С.71.

13. Гришечкина Т. С. Сравнительный обзор систем содержания локомотивов. *Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта* : тезисы докл. 74-й Междунар. научно-практ. конф. (Днепропетровск, ДНУЖТ, 15-16.05.2014). Днепропетровск, 2014. С. 11-13.

14. Лоза П. А., Гришечкина Т. С. Новый подход к оценке системы содержания локомотивного парка дороги. *Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта* : тезисы докл. 75-й Междунар. научно-практ. конф. (Днепропетровск, ДНУЖТ, 14-15 мая 2015 г.). Днепропетровск, 2015. 510 с.

15. Гришечкина Т. С. Модели зависимых отказов элементов технических систем. *Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта* : тезисы докл. 76-й Междунар. научно-практ. конф. (Днепропетровск, ДНУЖТ, 20.05.2016). Днепропетровск, 2016. С. 13-14.

16. Очкасов О. Б., Гришечкина Т. С., Коренюк Р. О. Оцінка інформативності діагностичних параметрів з використанням методів зниження розмірності. *Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств* : тези 6-ї Міжнар. науково-практ. конф. (Дніпро, ДНУЗТ, 29.11 – 30.11.2017). Дніпро, 2017. С. 111-113.

17. Очкасов О. Б., Гришечкіна Т. С. Вплив показників надійності на вартість життєвого циклу локомотива. *Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств* : тези 7-ї Міжнар. науково-практ. конф. (Дніпро, ДНУЗТ, 30 листопада 2018 р.). Дніпро, 2018. С. 21-123.

18. Боднар Б. Є., Очкасов О. Б., Боднар Є. Б., Гришечкіна Т. С. Оцінка роботи локомотивного парку з використанням методів зменшення розмірності. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* :

тези 79-ї Міжнар. науково-практ. конф. (Дніпро, ДНУЗТ, 16-17 травня 2019 р.). Дніпро, 2019. С. 23-24.

Додаткові праці, які відображають наукові результати дисертації

19. А.с. Твір Комп'ютерна програма «Програмне забезпечення для оцінки впливу залежних відмов на систему утримування технічних об'єктів залізничного транспорту» / Т. С. Гришечкіна (Україна). №82306; опубл. 17.10.2018.

20. Гришечкіна Т. С. Моделирование зависимых отказов элементов сложных технических систем. *Труды Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2016. № 2. С. 13-17.

21. Очкасов О. Б., Гришечкіна Т. С., Очеретнюк М. В. Применение методов теории массового обслуживания при моделировании работы цеха ремонта локомотивов. *21th Conference for Lithuanian Junior Researchers "Science - Future of Lithuania. Transport Engineering and Management"* (Vilnius Gediminas Technical University. May 4, 2018 – May 5, 2018). Vilnius, 2012. P. 40-44.

22. Очкасов А. Б., Гришечкіна Т. С., Очеретнюк М. В. Подходы к моделированию системы технического обслуживания локомотивов. *Актуальні проблеми автоматизації та управління : V Міжнар. науково-практ. інтернет-конф. молодих учених та студентів (Луцьк, Луцький національний технічний університет, 2017)*. Луцьк, 2017. № 5. С. 100-105.

23. Босов А. А., Гришечкіна Т. С., Савченко Л. Н. Влияние зависимых отказов на безопасность технических систем: анализ транспортных происшествий с 2005 по 2008 гг. *Локомотив-информ*. 2010. № 5. С. 46-50.

Abstract

Hryshechkina T.S.Improvement the railway transport technical objects maintenance system, taking into account the dependent failures of their elements. – Manuscript copyright.

Thesis for a candidate of technical sciences degree in specialty 05.22.20 "Operation and repair of transportmeans" – Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, 2021.

The work was performed at the Department of Applied Mathematics of the Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

The thesis is devoted to solving the problem of improving the existing system of maintenance of technical objects of railway transport, namely, to take into account the influence of dependent equipment failures.

The introduction substantiates the relevance of the topic of the dissertation, formulates the purpose and main tasks of the research, determines the scientific novelty of the work and the practical significance of the results obtained, shows the connection of work with scientific themes. Information is given about the testing of the results of work, the personal contribution of the author and his publication.

In the first section of the thesis, an analysis of the current state of traction rolling stock hold systems was carried out. Their advantages and disadvantages are determined. The lack to take into account the consequences of dependent failures of the main components of locomotives in any existing system of maintenance of technical objects of railway transport was detected. The analysis of transport events in the locomotive economy was carried out, which revealed that most of the accidents arose precisely due to the reasons for the equipment failures.

According to the results of the first section the expediency of taking into account the dependent failures of elements of technical systems during construction of a rational system of holding these objects has been proved.

The main task of rail transport is to ensure the needs of the population in transportation, that is, the solution of problems and the national economy and social needs. Modern realities also demand a careful attitude towards the use of ecological resources (water, fuel, etc.). Therefore, the question arises about the choice of rationality criterion when improving the railway transport technical objects maintenance systems.

In the second section of the thesis, a systematic analysis of the theoretical foundations for improving the locomotive retention system was carried out. The main quantitative characteristics of the reliability of the system and the concept of dependent failure are considered. Modeling of failure to work and recovery process was performed. A recurrence ratio is described that describes the distribution of dependent failures on the system. Based on this correlation, the deterministic and probabilistic models of the distribution of dependent failures on the system are developed. This allowed taking into account the costs of eliminating the consequences of dependent failures in the maintenance system of technical objects.

To assess the quality of the maintenance system and other aspects of the work of the locomotive park, a method is proposed based on methods of reducing the dimension of the data. With this technique, it is possible to analyze the state of the locomotive economy on various aspects (in terms of traffic safety, in terms of the quality of the implementation of the system of locomotive hold, in terms of operational safety, etc.).

The third section of the thesis a method for determining a rational maintenance system using the mathematical apparatus of vector optimization. As criteria of rationality, according to the results of the analysis in the second section, the following indicators are selected: costs of expenses, time expenditures, expenses of ecological resources. The problem of vector optimization for three functions, which are described in detail, is formed. The basic conditions for existence of the solution of this problem are formulated.

In the fourth section of the thesis, an estimation of the work of the locomotive park was carried out by methods of reducing the dimension of data, which made it possible to get rid of redundant duplicate information from a large number of output indicators of the activity of the locomotive economy.

In order to evaluate the efficiency of the maintenance system (or performance appraisal quality), using the method of the main components and the hierarchy analysis method, a single integral index, the Index of execution the maintenance system, was developed. To substantiate the adequacy of the proposed

indicator, its testing was carried out on the data of the Prydniprovsk railway locomotive park. Comparison of the obtained values of the index and the average percentage of implementation of the repair plan showed a high degree of interdependence of these indicators. To test the hypothesis of equality of mathematical expectations of these indicators, t-criterion of Student was calculated, the value of which testified that the received empirical value was in the zone of meaningful results.

The fifth section of the thesis presents the methodology and calculates the cost of the life cycle of the technical system (locomotive), taking into account the dependent failures of its equipment. This technique has allowed to determine the average cost of unplanned repair, which in turn allows you to improve the retention system. In order to substantiate this technique, an indicator is proposed that allows assessing the impact of dependent failures on the retention system. Approval of the methodology work is carried out on data on the failure of the main equipment of electric locomotives DE1. This allowed to identify the nodes, failures of which lead to a significant increase (up to 12 times) of the cost of recovery in the event of dependent failures in the locomotive. For such nodes maintenance is provided by the maintenance system with a survey and restoration in fixed moments of work.

Key words: traction rolling stock, reliability, retention system, dependent failures, mathematical modeling, methods of diminishing of dimension, cost of life cycle.

List of published works according to the thesis topic

Main works:

1. Bosov, A.A, Hryshechkina, T. S., Savchenko, L. N. (2009). Mathematical modeling of dependent failures of a technical object. Science and progress of transport. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, (28), 129-132.
2. Kapitza, M.I, Hryshechkina, T. S. (2014). Rational recovery model of depot processing equipment at the industrial enterprise. Science and progress of

- transport. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, (4 (52)), 60-66.
3. P. A. Loza, T. S. Hryshechkina (2015). Assessment of the quality of the performance of the system of the maintenance of the fleet of electric vehicles. *Electrification of transport*, (9), 87-93.
 4. T. S. Hryshechkina (2017). Construction of mathematical model of rational system of maintenance of technical objects of railway transport. *Transport systems and transportation technologies*, (14), 30-35. do: 10.15802 / tstt2017 / 123165
 5. Bodnar, B., Bolzhelarskyi, Y., Ochkasov, O., Hryshechkina, T., & Černiauskaite, L. (2018). Determination of integrated indicator for analysis of the traffic safety condition for traction rolling stock. Paper presented at the 12th International Conference on Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems, *ITELMS 2018*, 45-54. Retrieved from www.scopus.com
 6. Bodnar, B., Ochkasov, O., Bodnar, E., Hryshechkina, T., & Keršys, R. (2018). Safety performance analysis of the movement and operation of locomotives. Paper presented at the *Transport Means - Proceedings of the International Conference*, , 2018-October 839-843. Retrieved from www.scopus.com
 7. Bodnar B. E., Ochkasov O. B., Bodnar E. B., Hryshechkina T. S., Ocheretnyuk M. V. Simulation of locomotive repair organization by the methods of queue systems theory. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2018. № 5 (77). P. 28–40. DOI: 10.15802/stp2018/147740
 8. Bodnar B. E., Hryshechkina T. S., Bodnar E. B. Choosing the System of Locomotive Maintenance in View of the Effect of Dependent Failures. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2018. № 6 (78). P. 47-58.
 9. Bodnar B., Ochkasov O., Hryshechkina T., Bodnar E., Skvireckas R. Consideration of Dependent Failures Impact on Selecting the System of Locomotive Maintenance. *Transport Means 2019* : proc. of the 23rd Intern.

Sci. Conf. (Oct. 02–04, 2019, Palanga, Lithuania). Kaunas, 2019. Pt. III. P. 1103–1107. Access Mode: <https://transportmeans.ktu.edu/wp-content/uploads/sites/307/2018/02/Transport-means-2019-Part-3.pdf> (18.11.19). Retrieved from www.scopus.com

Approbation works:

10. Hryshechkina T.S. (2012) Modeling of dependent failures in technical systems. Abstracts: System Analysis and Information Technologies: Materials of the 14th International Scientific and Technical Conference SAIT 2012, Kiev, / "KPI" NTUU "IPSA". - K .: UNIC "IPSA" NTUU "KPI", 2012. - 443c.
11. Bosov A.A, Hryshechkina T. S. (2008) Accounting of dependent failures with improvement of systems of contents of technical objects. Problems and prospects of development of railway transport: Abstracts 68 International scientific-practical conference. - D .: DIIT, 2008. - 203 pp., P.16.
12. Hryshechkina T. S. Increasing the reliability of traction rolling stock by improving the control of element failure. Problems and prospects of development of railway transport: Abstracts 69 International scientific-practical conference (Dnipropetrovsk, May 21-22, 2009) - D .: DIIT, 2009. - 330 p., P.71.
13. Hryshechkina T. S. Comparative review of locomotive content systems. TESIS REPORTS 74 International Scientific and Practical Conference "Problems and Prospects for the Development of Railway Transport", 15-16.05.2014, - D .: DIIT, 2014 - p. 11-13.
14. Loza P.A., Hryshechkina T.S. A new approach to the estimation of the maintenance system of the locomotive park of the road. Problems and prospects of development of railway transport: Abstracts 75 International scientific-practical conference (Dnipropetrovsk, May 14-15, 2015) - D .: DIIT, 2015. - 510 p.
15. Hryshechkina T. S. Models of dependent failures of elements of technical systems. Abstracts of reports of the 76th International Scientific and Practical

Conference "Problems and Prospects for the Development of Railway Transport", p.13-14, 20.05.2016, - D.: DIIT, 2016. - 414 p.

16. Ochkasov O. B., Hryshechkina T. S., Koreniuk R. O. Estimation of the informativeness of diagnostic parameters using methods of diminishing the dimension. THESIS of the 6th International Scientific and Practical Conference "Prospects for the Interaction of Railways and Industrial Enterprises" (11.29-11.11.2017), p.111-113.
 17. Ochkasov O. B., Hryshechkina T. S. Influence of reliability indices on the cost of a life cycle of a locomotive. Prospects for the interaction of railways and industrial enterprises: Abstracts of the 7th International Scientific and Practical Conference - Dnipro: DNUZT, 2018. p.121-123.
 18. Bodnar B. E., Ochkasov O. B., Bodnar Y. B., Hryshechkina T. S. Estimation of the work of the locomotive park using the methods of diminishing the dimension. TESIS REPORTS 79 International Scientific and Practical Conference "Problems and Prospects for the Development of Railway Transport", 16-17.05.2019, - D.: DIIT, 2019 - p. 23-24.
- Scientific works, which additionally reflect the scientific results of the dissertation:
19. Authentication. The product Computer program "Software for assessing the impact of dependent refusals on the system of maintenance of technical objects of railway transport" / T. S. Hryshechkina (Ukraine). - No. 82306; published 10/17/2018.
 20. T. S. Hryshechkina. Modeling of dependent failures of elements of complex technical systems. Proceedings of the Rostov State University of Railways, №2, 13-17.
 21. Ochkasov O. B., Hryshechkina T. S., Ocheretnyuk MV Application of the methods of the theory of mass service in modeling the work of the repair shop of locomotives. Collections of articles 21th Conference for Lithuanian Junior Researchers "Science - Future of Lithuania. Transport Engineering and Management" Vilnius Gediminas Technical University. May 4, 2018 - May 5, 2018, Vilnius, Lithuania, 2012. P.40-44.

22. Ochkasov A.B, Hryshechkina T.S, Ocheretnyuk M.V. Approaches to simulation of a maintenance system for locomotives. Actual problems of automation and management. V International Scientific and Practical Internet Conference of Young Scientists and Students. Lutsk № 5, 2017. P.100-105.
23. Bosov, A.A, Hryshechkina, T. S., Savchenko, L. N. Influence of dependent failures on safety of technical systems: analysis of traffic accidents from 2005 to 2008 Lokomotiv-inform, 2010, №5. P.46-50.

Зміст

Вступ.....	19
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ УТРИМАННЯ ТЕХНІЧНИХ ОБ’ЄКТІВ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ.....	24
1.1. Дослідження розвитку теорії надійності у системах утримання технічних об’єктів залізничного транспорту	24
1.2. Сучасні системи утримання та технології ремонту тягового рухомого складу	27
1.3. Огляд методик вибору раціональної системи утримування локомотивів.....	35
1.4. Аналіз досліджень залежних відмов технічних об’єктах.....	40
1.5. Аналіз причин транспортних подій у локомотивному господарстві.....	45
1.6. Висновки за розділом 1.....	55
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ УТРИМАННЯ ЛОКОМОТИВІВ.....	57
2.1. Аналіз кількісних характеристик надійності технічних об’єктів.....	57
2.2. Математична модель процесу відновлення та моделювання ремонтного впливу.....	66
2.3. Поняття залежної відмови. Моделі розповсюдження залежних відмов по системі	76
2.3.1. Розповсюдження залежних відмов по технічній системі.	79
2.3.2. Моделі залежних відмов.....	82
2.4. Методика оцінки роботи локомотивного парку.....	89
2.5. Висновки за розділом 2.....	93
РОЗДІЛ 3. ПОБУДОВА РАЦІОНАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УТРИМАННЯ ЛОКОМОТИВІВ	95

	18
3.1. Аналіз впливу системи утримання на витрати коштів та часу.....	95
3.2. Визначення раціональної системи утримання з використанням векторної оптимізації.....	97
3.3. Розв’язок задачі векторної оптимізації при побудові раціональної системи утримання.....	99
3.4. Висновки за розділом 3.....	105
РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА РОБОТИ ЛОКОМОТИВНОГО ПАРКУ МЕТОДАМИ ЗНИЖЕННЯ РОЗМІРНОСТІ.....	106
4.1. Оцінка виконання системи утримання локомотивного парку.....	106
4.2. Оцінка стану безпеки руху локомотивного господарства.....	110
4.3. Висновки за розділом 4.....	122
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ УТРИМАННЯ ЛОКОМОТИВІВ З УРАХУВАННЯМ ЗАЛЕЖНИХ ВІДМОВ ОБЛАДНАННЯ.....	123
5.1. Аналіз нормативних документів щодо розрахунків вартості життєвого циклу об’єктів залізничного транспорту.....	123
5.2. Розрахунок вартості життєвого циклу з урахуванням залежних відмов обладнання.....	132
5.3. Формування раціональної системи утримування локомотивів, яка враховує залежні відмови обладнання.....	137
5.4. Висновки до 5 розділу.....	143
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	144
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	146
ДОДАТОК А.....	155
ДОДАТОК Б.....	160

Вступ

Актуальність теми.

Сучасний стан тягового рухомого складу залізниць України характеризується значним наднормативним зносом, що вимагає впровадження нових заходів підтримання його в працездатному стані і подовження терміну експлуатації.

В даний час технічне обслуговування і ремонт локомотивів здійснюються по системі планово-попереджувальних ремонтів (ППР). Однак її суттєвим недоліком є відсутність обліку змін технічного стану і надійності, які виникають в наслідок дії умов експлуатації. Це є однією з причин підвищеної пошкоджуваності локомотивів в експлуатації, що в свою чергу приводить до зменшення їх кількості у перевізному процесі.

При розрахунку міжремонтних періодів при ППР в якості одного з критеріїв використовується вартість відновлення того чи іншого вузла локомотива, при цьому не враховано можливий вплив відмов взаємопов'язаних вузлів на вартість відновлення.

Відсутність врахування залежних відмов є однією з причин невірної оцінки міжремонтних періодів, перевищення фактичних витрат на ремонт над плановими витратами, зниження надійності локомотивів в експлуатації.

Одним з основних шляхів збільшення часу роботи локомотивів між відповідними видами ремонтів є подальше удосконалення планування постановки локомотивів у ремонт з урахуванням їх технічного стану. У зв'язку з цим задача удосконалення системи утримання локомотивів з урахуванням їх технічного стану є важливою і актуальною.

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

Робота виконана у відповідності з планами науково-дослідних робіт у Дніпровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна:

1. НДР «Розвиток математичних методів моделей складних систем» (Номер: 100.17/50.46, Реєстраційний номер: 0117U005652),
2. НДР «Удосконалення методів випробування та діагностування обладнання локомотивів» № держреєстрації 0117U002068.

Мета і задачі дослідження.

Метою даної роботи є підвищення експлуатаційної надійності локомотивів шляхом удосконалення системи їх утримання з урахуванням залежних відмов їх елементів.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі задачі:

- розглянути вплив залежних відмов на надійність локомотивів;
- виконати огляд методик вибору раціональних систем утримання тягового рухомого складу;
- розробити математичну модель залежних відмов в технічній системі;
- удосконалити методику побудови раціональної системи утримування локомотивів з урахуванням залежних відмов їх елементів;
- провести оцінку якості виконання системи утримання локомотивного парку;
- провести оцінку стану безпеки руху у локомотивному господарстві;
- провести розрахунок середньої вартості непланового ремонту локомотива з урахуванням ймовірності виникнення залежних відмов;
- розробити раціональну систему ремонту для електрообладнання електровозів ДЕ1 з урахуванням залежних відмов їх елементів.

Об'єктом дослідження є процес утримання локомотивів.

Предметом дослідження є система утримання локомотивів.

Методи дослідження. У роботі використані наступні методи:

- при розробці математичної моделі розповсюдження залежних відмов по технічній системі застосовані методи теорії множин, а саме рекурентні співвідношення на множинах;
- при обробці статистичних даних застосовані методи математичної статистики, теорії надійності і теорії ймовірностей;

–при розробці раціональної системи утримування локомотивів використовувались методи векторної оптимізації;

–при розробці методів оцінки роботи локомотивів застосовувались методи зниження розмірності даних, а саме, метод головних компонент та метод аналізу ієрархій.

Достовірність і обґрунтованість отриманих у дисертації наукових положень і результатів обумовлені використанням сучасних методів математичного моделювання і теорії надійності, коректних допущень, узгодженістю результатів математичного моделювання і експериментальних даних.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розв'язанні актуального наукового завдання підвищення надійності локомотивів в експлуатації за рахунок удосконалення їх системи утримання шляхом врахування залежних відмов їх елементів. Зокрема у дисертації отримано наступні наукові результати:

– вперше розроблено математичну модель залежних відмов в технічній системі, яка дозволяє визначати загальні набори пошкоджень та вартості відновлень при виникненні залежних відмов вузлів локомотиву;

– удосконалено підхід до визначення раціональної системи утримання локомотивів шляхом врахування витрат коштів, часу та екологічних ресурсів, що дозволяє враховувати обмеження по ресурсним можливостям ремонтних баз;

– удосконалено методику оцінки роботи локомотивного парку, яка дає можливість визначати якість виконання системи утримання та стан безпеки руху у локомотивному господарстві;

– дістало подальший розвиток застосування методів зниження розмірності даних, зокрема методу головних компонент та методу аналізу ієрархій для визначення показників оцінки роботи локомотивного парку, що, на відміну від існуючих методів, дозволяє враховувати великі набори

абсолютних статистичних показників при створенні єдиного інтегрального показника для оцінки, при цьому зберігається 85-90% вихідної інформації.

Практичне значення одержаних результатів у роботі складає методика вибору раціональної системи утримання локомотивів за показниками витрат коштів, часу та екологічних ресурсів. Також до практичного значення відноситься методика оцінки якості роботи локомотивного парку. Проведена оцінка якості виконання системи утримання локомотивів Придніпровської залізниці. Проведена оцінка стану безпеки руху локомотивів Укрзалізниці. Проведено розрахунок вартості життєвого циклу локомотиву (на прикладі електровоза ДЕ1) з урахуванням залежних відмов обладнання, який дозволив виявити вузли, відмови яких призводять до багатократного зростання вартості відновлення. Запропоновано підхід до удосконалення системи утримування для вузлів локомотивів з урахуванням залежних відмов їх елементів.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення, розробки та результати досліджень, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. Мету та постановку завдання, обговорення та аналіз результатів досліджень здійснено разом із науковим керівником.

Роботи [4, 10, 12, 13, 15] опубліковані одноосібно. У працях, які опубліковані у співавторстві, внесок здобувача такий:

– запропоновано детерміновану та ймовірнісну моделі поширення залежних відмов по системі [1, 11];

– запропоновано методику визначення раціональної системи утримання локомотивів [2, 7];

– запропоновано методику оцінювання роботи локомотивного парку за допомогою методів зниження розмірності даних [3, 5, 6, 14, 16–18];

– удосконалено методику визначення вартості позапланового ремонту з урахуванням залежних відмов, запропоновано коефіцієнт оцінки впливу залежних відмов вузла на систему утримання локомотива [8, 9].

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та були схвалені на 68-й, 69-й, 74-й, 75-й, 76-й та 79-й міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпро, ДНУЗТ, 2008, 2009, 2014, 2015, 2016, 2019 рр.); 14-й Міжнародній науково-практичній конференції SAIT (Київ, ННК «ІПСА» НТУУ «КПІ», 24.04.2012), 6-й та 7-й міжнародних науково-практичних конференціях «Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств» (Дніпро, 2017, 2018 рр.).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 9 статей у наукових фахових журналах (з них 3 публікації у виданнях, які входять до міжнародної бази Scopus), 9 тез у збірниках доповідей міжнародних конференцій, а також 5 додаткових праць: 4 статті, одне свідоцтво авторського права на комп'ютерну програму.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг роботи становить 164 сторінки, з яких основного тексту – 149 сторінок, у основному тексті роботи міститься: 46 рисунків та 17 таблиць, список літератури з 114 джерел викладено на 9 сторінках; 2 додатки розміщено на 15 сторінках.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ УТРИМАННЯ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

1.1. Дослідження розвитку теорії надійності у системах утримання технічних об'єктів залізничного транспорту

Задача підвищення надійності техніки, а, отже, і її працездатності, не втрачає своєї актуальності у дослідників, як в нашій країні, так і за кордоном.

Теорія надійності завжди приділяла основну увагу аналізу систем. На рівні елементів теоретичні методи зводилися в основному до задач планування випробувань і обробки експериментальних даних. Сучасні системи все більше ускладнюються – глобальні транспортні системи, телекомунікаційні та комп'ютерні мережі.

Від сучасного фахівця з надійності потрібно не написання загальнотеоретичних робіт, а вирішення конкретних завдань, участь в «живих проектах». Найчастіше ці задачі досить специфічні. Але розв'язання цих задач спирається на загальнометодологічну і математичну базу сучасної теорії надійності [1].

Як основоположників теорії надійності необхідно відзначити: Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляєва, А.Д. Соловйова, И.Н. Коваленко, А.М. Половко, І.А. Ушакова, В.С. Корольока. Б.А. Козлова, А.Л.Райкіна, Е.В. Дзіркала, І.Б. Герцбаха.

Із зарубіжних досліджень в області надійності відзначимо: В. Феллера, Д. Кокса, В. Сміта, Р. Барлоу, Ф. Прошана, К. Уонга, Ш.Х. Сандлера, Х. Горді, Г. Сінгха і інші.

Теорія надійності почала свій розвиток в кінці 50-х років двадцятого століття. Підсумком багаторічних досліджень московської школи надійності стала монографія «Математичні методи в теорії надійності», написана Б.В.Гнеденко, Ю.К.Беляєвим і А.Д.Соловйовим [2]. У ній систематично

викладено основи теорії надійності: визначені основні поняття, розглянуті різні плани оцінки характеристик надійності за результатами випробувань, показані методи перевірки гіпотез, розглянута теорія резервування без відновлення і з відновленням. Крім того, в монографії викладені статистичні методи контролю якості та надійності масової продукції.

У той же період було видано монографію «Математична теорія надійності» американських математиків Барлоу Р. і Прошана Ф., яка незабаром була перекладена [3, 4]. У даній роботі основна увага приділена дослідженню так званих «старіючих» систем. Вивчаються старіючі елементи і системи і для них розробляється по можливості адекватна математична теорія. Розглянуто велику кількість імовірнісних моделей, що мають важливе практичне значення. Отримані авторами результати можуть бути використані в таких областях техніки як радіоелектроніка, автоматика, машинобудування, приладобудування і т.д. Також дана монографія цікава тим, що в ній широко висвітлені оптимальні задачі теорії надійності: завдання оптимальних термінів профілактичних робіт, оптимальне резервування. Однак дана книга не стосується статистичних задач теорії надійності.

Також необхідно відзначити другу ґрунтовну наукову роботу цих авторів – «Статистична теорія надійності та випробування на безвідмовність» [5]. Книга присвячена дослідженню характеристик надійності в разі розподілів часу роботи до відмови з монотонними функціями інтенсивності. Викладено результати теоретичних досліджень, а також приклади застосування цих результатів до практичних завдань надійності (завдання оптимального резервування і забезпечення запасними елементами, завдання оптимальних профілактичних робіт і т.п.).

Багаторічні дослідження в області теорії надійності були об'єднані у праці «Довідник з розрахунку надійності» [6] Б.Козлова і І.Ушакова, який був вперше виданий в 1966 році, та витримав кілька перевидань [7, 8] і перекладів. У цій настільній книзі інженерів-розробників розглянуті питання розрахунку надійності на різних етапах розробки і експлуатації технічних

систем, показані рішення задач оптимального проектування структур і моделювання процесів функціонування систем з урахуванням ресурсних і економічних обмежень.

Практичні проблеми надійності та моделі профілактики детально розглянуті в книзі І.Б. Герцбаха «Моделі профілактики: Теоретичні основи планування профілактичних робіт» [9].

Аналізу складних систем з деградацією якості функціонування за рахунок «часткових відмов» присвячено багато наукових праць, з яких відмітимо роботи І.А. Ушакова [10, 11] і Е.В. Дзіркала [12].

Що ж стосується класичних праць в області надійності залізничної техніки, відзначимо роботи таких вчених як І.П. Ісаєв, С.В. Альохін, А.І. Беляєв, Б.Б. Бунін, Іванов В.П., В.Г. Галкін, В.А. Четвергов, А.В. Горський, А.А. Воробйов, Е.С. Павлович, Н.А. Малоземов.

І.П. Ісаєв вивчав шляхи розвитку надійності рухомого складу. Він вніс значний вклад в розробку методів і моделей підвищення надійності електрорухомого складу [14, 15]. Його послідовники в цьому напрямку, Горський А.В. і Воробйов А.А., розглянули фізичні процеси виникнення раптових і поступових відмов електричного і механічного обладнання. Також ними були розглянуті показники надійності рухомого складу і методи їх розрахунку. Описана система збору інформації про надійність в експлуатації, пристосована до автоматизованої обробки в АСУТ. Розглянуто методи випробувань на надійність обладнання. Вказані основні напрямки підвищення надійності електрорухомого складу.

С.В. Альохін також розглядав питання надійності рухомого складу. Однак він спеціалізувався на задачах механіки. В [16] він вивчав завдання визначення та умов роботи «слабких ланок» механічних систем, а також способи підвищення надійності систем в експлуатації. Крім того, в [16] він описав вибір оптимального способу підвищення надійності рухомого складу.

Основні положення теорії та фактори, що впливають на надійність тягового рухомого складу залізниць розглянуті Галкіним В.Г., Парамзіним

В.П. і Четверговим В.А. в [17]. Тут же розглянута система кількісних показників надійності, методи їх визначення та аналізу. Вказані основні шляхи підвищення надійності локомотивів, оптимізації системи їх ремонту та технічного обслуговування.

Підвищення надійності екіпажної частини тепловозів детально розглянуто А.И. Беляєвим, Б.Б Буніним і С.М. Голубятниковим у [18], де вперше описані результати експериментальних досліджень, поїзних випробувань і дослідної експлуатації екіпажної частини тепловозів 2ТЭ10Л, М62, 2ТЭ116, ТЭМ2, ТЭП60, ТЭП70 і надані практичні рекомендації щодо вдосконалення екіпажної частини тепловоза, що забезпечують підвищення надійності і динамічних якостей локомотивів.

Серед сучасних розробок в області надійності залізничної техніки необхідно відмітити праці Босова А.А., Боднаря Б.Є, Капіци М.І., Мурадяна Л.А., Фалендиша А. П, Тартаковського Є. Д. [19-27].

1.2. Сучасні системи утримання та технології ремонту тягового рухомого складу

Сучасна теорія організації ремонту та обслуговування технічних засобів вирізняє наступні системи утримання:

1. Система обслуговування і ремонту за відмовою
2. Планово попереджувальна система
3. Система ремонту по фактичному стану
4. Комбінована система обслуговування і ремонту

При обслуговуванні і ремонту за відмовою експлуатація локомотиву відбувається до моменту виникнення відмови. Дана система на сьогодні застосовується для допоміжного обладнання, коли заміна обладнання дешевша ніж розходи на його ремонт. Але повинна виконуватися умова наявності резерву даного обладнання. Тобто при використанні цієї системи утримання необхідно для кожного вузла локомотива проводити оцінку можливих збитків при його відмові та наявність резерву.

Планово попереджувальна система (ППР) передбачає проведення технічних оглядів та ремонтів ТРС через задані проміжки часу або пробіги. Вона склалася до широкого розвитку теорії, методів і засобів технічної діагностики. Система ППР передбачає суворе дотримання регламентованих періодичностей технічних обслуговувань, планових ремонтів і складу оглядових, відновлювальних операцій та має профілактичний характер.

Багато праць присвячено її корегуванню та вдосконаленню [28, 29].

Два підходи до визначення ремонтних періодів описані у [29]. Перший полягає в розробці оптимальної системи ремонту, виходячи з оптимальних періодів окремих деталей (поелементний підхід). Другий заснований на коригуванні існуючої системи ремонту, не змінюючи структуру ремонтного циклу, використовуючи емпіричні залежності показників ефективності системи ремонту від її параметрів (в основному від міжремонтних пробігів).

Серед переваг планово попереджувальної системи виділяють забезпечення високого рівня надійності обладнання та простоту організації праці ремонтних підрозділів. Основний її недолік – це великі фінансові витрати для підтримання заданого рівня надійності, які виникають за рахунок обов'язкового проведення великої кількості регламентних робіт без фактичної необхідності. Також нормативний перелік регламентних робіт не враховує технічний стан кожного конкретного локомотиву. Тому після профілактичного розбирання вузлів та механізмів можливі виникнення порушення їх приробітку, що призводить до зниження надійності. Для скорочення розходів на обслуговування та ремонт в рамках даної системи утримання транспортні кампанії збільшують міжремонтні періоди. Це в свою чергу призводить до збільшення розходів на усунення наслідків відмов.

Також у [30] відмічається, що напрацювання на відмову вузлів різного типу неоднакове, тому кожному даному виду ТО і ТР відповідає свій ряд вузлів, які «лімітують» періодичність цих ТО і ТР. Лімітуючі вузли – це вузли, технічний стан яких найбільшою мірою надає вплив на інтегральний

показник, що характеризує експлуатаційну надійність тягового рухомого складу (ТРС), величину питомих експлуатаційних витрат локомотивного господарства, безпеку руху, пропускну спроможність залізниць і, в кінцевому рахунку, собівартість перевезень. Для інших вузлів терміни постановки на дане ТО (або ТР) є передчасними, і їх ресурс при ППР недовикористовується.

Досить складно врахувати всі фактори, які визначають технічний стан обладнання. Багато з них носять випадковий характер, по-різному проявляючись у конкретних умовах експлуатації при різних кліматичних і навантажувальних режимах. Внаслідок цього ресурс однойменних елементів, величиною якого обмежені міжремонтні пробіги, істотно відрізняється у локомотивів, приписаних до різних депо. Тому виникають такі ситуації, коли в одних депо локомотиви ставляться на плановий ремонт з великим запасом ресурсу деяких агрегатів, а в інших – ресурс тих же самих агрегатів виявляється вичерпаним задовго до настання планових термінів постановки локомотива на ремонт, що супроводжується збільшенням числа непланових ремонтів.

Все це свідчить про те, що існуючі методи визначення періодичності та обсягів планово-попереджувальних ремонтів потребують подальшого вдосконалення в напрямку більш ретельного обліку фактичного технічного стану обладнання локомотивів. У задачі технічного обслуговування і ремонту локомотивів повинно входити не тільки відновлення вузлів і агрегатів, які відмовили, а й максимальне запобігання відмовам.

В даний час існує безліч діагностичного обладнання, що дозволяє визначати стан і ступінь зношеності вузлів і деталей дизеля без розбирання. Єдиним недоліком такого обладнання є його висока вартість. Якщо дану вартість внести в суму витрат на всі види оглядів і ремонтів тепловозів при розрахунку ремонтості в теорії надійності, показники ремонтості зміняться в кращу сторону.

Система ремонту за фактичним станом вимагає проведення технічних оглядів та ремонтів лише тоді, коли цього вимагає технічний стан вузла

локомотива. Для успішної роботи даної системи утримання ТРС необхідно широке впровадження засобів діагностування та моніторингу технічного стану локомотиву. Перевагою даної системи утримання є виключення планових ремонтних впливів, що попереджують виникнення відмов. Це призводить до скорочення вартості життєвого циклу ТРС. Недоліком даної системи є відсутність можливості точно оцінювати технічний стан всіх без виключення вузлів локомотиву. Також складністю при застосуванні системи ремонту за фактичним станом є вибір оптимального критерію планування ремонту локомотива. Ця задача виникає внаслідок того, що для кожного вузла або групи вузлів міжремонтний пробіг визначається окремо. При цьому міжремонтний пробіг локомотиву повинен бути таким, щоб час експлуатації локомотиву між ремонтами був більшим, ніж час мінімального пробігу локомотиву з потягом. Також час знаходження локомотиву в очікуванні ремонту і ремонті повинен бути меншим ніж час знаходження в експлуатації. Крім того, для успішного впровадження даної системи необхідно застосування сучасних інформаційних систем підтримки технічного огляду та ремонту.

У [31] також наголошується, що важливим напрямком підвищення дієвості системи ремонту і скорочення відповідних витрат є адаптація термінів і обсягу ремонтних робіт до індивідуального технічного стану кожної одиниці рухомого складу. Цей стан має контролюватися, перш за все, за допомогою діагностичних засобів. При цьому однією з найважливіших завдань є оптимізація ремонтного циклу локомотивів по лімітуючим вузлів.

Комбінована система обслуговування і ремонту об'єднує використання декількох підходів до вибору міжремонтних періодів. До комбінованих систем відносяться системи:

1. Планово попереджувальна та по відмові;
2. Планово попереджувальна та за фактичним станом;
3. По технічному стану та по відмові;
4. І т.д.

Розглянемо перелік нормативних документів, які регулюють технічне обслуговування і ремонт ТРС Укрзалізниці.

Сучасне технічне обслуговування і ремонт (ТОіР) тягового рухомого складу регламентується наступними нормативними документами [32, 33, 34, 35]:

- Правила безпеки при експлуатації електровозів, тепловозів та моторвагонного рухомого складу;
- Про затвердження та введення в дію Положення про порядок подачі в ремонт і видачі з ремонту рухомого складу;
- ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення;
- ДСТУ 3004-95 Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними.

З останніх робіт з ТОіР рухомого складу виділимо праці В.Т. Данковцева і Б.В. Бикова.

Данковцев В.Т. в [36] викладає основні принципи і відомості по організації технічного обслуговування і ремонту локомотивів, описує експлуатаційні фактори, що впливають на ефективність роботи і надійність вузлів локомотивів; а також заходи, що знижують їх негативний вплив. Докладно розглядаються спеціалізовані та типові технологічні процеси ремонту і відновлення основних деталей і вузлів локомотивів.

Биков Б.В. в [37] розглядає питання технічного обслуговування і ремонту вагонів з урахуванням особливостей їх експлуатації, шляхи збільшення міжремонтних термінів на основі діагностування; наведені відомості про обладнання, яке застосовується при ремонті вагонів, заходи з техніки безпеки при технічному обслуговуванні та ремонті вагонів.

Діагностуванню основних деталей і вузлів рухомого складу залізничного транспорту присвячені праці Бервінова В.І та Криворудченко В.Ф. [38, 39]. В [38] розглянуто основні принципи та методи технічного діагностування локомотивів, теорія вибору діагностичних параметрів і методи прогнозування залишкового ресурсу. В [39] викладено

фізичні основи методів неруйнівного контролю технічного стану деталей рухомого складу, що застосовуються на підприємствах з виробництва та ремонту вагонів і локомотивів; наведені технічні характеристики, пристрій, принцип дії засобів технічного діагностування.

Технологія ремонту та моделювання системи технічного обслуговування і ремонту електровозів викладено в [40-47]. Розглянуто проблему підвищення ефективності експлуатації планово попереджувальної системи технічного обслуговування і ремонту локомотивів з використанням теорії економіко-математичного моделювання. В процесі моделювання системи враховані основні чинники, що характеризують виробництво і впливають на ефективність роботи локомотивного господарства.

Технології ремонту технічних об'єктів залізничного транспорту присвячені праці таких авторів як Е. Д. Тартаковський, Капіца М.І., Дубинець Л. В., Боднарь Б.Є, Фалендиш А. П., Осяев А. Т.

Організаційно-технічні аспекти організації системи технічного обслуговування і ремонту локомотивів розглядаються у [48]. Автори пропонують для підвищення надійності технічних засобів рухомого складу вести роботу за такими напрямками:

- перегляд системи ремонту і керівництв по ремонту локомотивів;
- впровадження полігонній технології експлуатації і ремонту локомотивів;
- оптимізація ремонтного комплексу заводів і депо;
- оптимізація структури та ефективності Дирекції з ремонту тягового рухомого складу;
- технологічне оснащення ремонтних депо;
- перегляд заводських інструкцій з ремонту;
- підвищення експлуатаційної надійності рухомого складу;
- організація заводського ремонту на базі інноваційних технологій.

Стратегічною метою оптимізації системи планово-попереджувального ремонту локомотивів з урахуванням їх фактичного стану є безперебійне

виконання обсягу перевезень пасажирів і вантажів при забезпеченні безпеки руху поїздів і підвищення ефективності роботи залізничного транспорту в сучасних і перспективних умовах експлуатації.

Для виконання зазначеної стратегічної мети у [48] пропонується вирішити такі задачі:

- впровадження нової системи технічного обслуговування і ремонту рухомого складу за рахунок збільшення ресурсу основних вузлів і агрегатів, що впливає на міжремонтні пробіги;
- впровадження нових стратегій технічного обслуговування і ремонту на базі RAMS і RCM-технологій, спрямованих на підвищення експлуатаційної надійності локомотивів;
- оптимізація ремонтної бази депо з урахуванням полігонних технологій;
- оптимізація ремонтної бази локомотиворемонтних заводів;
- оптимізація системи ремонту за рахунок формування нової циклічності ремонтів і формування нових заводських видів ремонту;
- забезпечення безпеки руху рухомого складу на основі впровадження сучасних систем управління якістю технічного обслуговування і ремонту рухомого складу;
- впровадження моніторингу технічного стану рухомого складу;
- розрахунок економічної оцінки оптимізації системи ремонту локомотивів з урахуванням технічного стану його обладнання.

У [49] відмічається, що модернізація існуючого парку локомотивів та створення більш економічних, сучасних тепловозів та електровозів повинні супроводжуватись заходами щодо забезпечення якісного їх утримання за рахунок вдосконалення системи технічного обслуговування та ремонту. Крім того, швидке старіння локомотивного парку при поступовому відновленні вантажо- та пасажирооборотів вимагає вирішення проблеми підтримки локомотивів у працездатному стані у післянормативний термін експлуатації. У статті пропонується методика коректування технологічного процесу ТО і ПР локомотивів у післянормативний термін експлуатації. При формуванні

технології враховуються особливості умов експлуатації та стан локомотиву. Моделювання організації системи ТОі ПР з коригуванням їх обсягів пропонується здійснювати методами динамічного програмування. Потім формування комбінації робіт з ТО і ПР виконувати за допомогою методів теорії розпізнавання образів за критеріями надійності, безвідмовності, довговічності та ефективності.

У [50] також відмічається, що для забезпечення виконання пасажирських та вантажних перевезень потрібно приділяти велику увагу оновленню парку локомотивів, його своєчасному і якісному ремонту. Старіння локомотивного парку і його ремонтних комплексів веде до різкого погіршення їх технічного стану.

Витрати на підтримку і повернення одиниць рухомого складу в працездатний стан, тобто на технічне обслуговування та ремонт, складають одну з найбільш значущих частин бюджету Укрзалізниці.

У [51] на прикладі серійних пасажирських тепловозів SP32, експлуатованих на польських залізницях, представлена методологія по науково-практичному обґрунтуванню вибору варіанту модернізації цих локомотивів. Доцільний обсяг модернізації тепловозів SP32 визначений шляхом варіювання вартості життєвого циклу в залежності від обраної комплектації обладнання. Пропонована методологія оцінки величини LCC включає аналіз RAM (reliability, availability, maintainability) для визначення показників надійності по локомотиву. Аналіз проводиться згідно з європейським стандартом PN-EN 60300-3-3: 2006.

У [52] розглядається варіант скорочення даних витрат шляхом впровадження системи технічного обслуговування і ремонту за результатами діагностування та прогнозування технічного стану рухомого складу. Автори зазначають, що сучасний стан засобів вимірювальної техніки, обробки, зберігання та передачі інформації формують об'єктивні умови для широкого впровадження діагностичних систем на залізничному транспорті. А якість отриманої інформації забезпечує можливість отримання достовірного

діагнозу технічного стану рухомих одиниць залізничної техніки. Таким чином, ці чинники є основою для впровадження елементів більш прогресивної системи утримання рухомого складу.

Основні умови успішного функціонування системи моніторингу (СМ) рухомого складу [52]:

- достовірні автоматизовані методи неруйнівного контролю;
- точні способи ідентифікації контрольованого об'єкта;
- надійні системи передачі даних моніторингу в режимі реального часу;
- наявність спеціалізованого центру для збору, обробки та аналізу результатів моніторингу;
- можливість прийняття оперативних заходів у разі виявлення, завдяки моніторингу загрози безпеки руху.
- використання експертів спеціалізованих наукових центрів для оцінки результатів моніторингу.

1.3. Огляд методик вибору раціональної системи утримання локомотивів

Вибір критеріїв для визначення раціональної системи утримання локомотивів є основною задачею, що потребує вирішення.

З метою вибору показників оптимізації системи утримання коротко розглянемо методики визначення раціональних пробігів локомотивів.

М.Д. Рахматулін в своїх роботах висловив припущення, що існує залежність між зносом дизеля і витратою палива; облік ступеня завантаження дизеля необхідно проводити за фактичною витратою палива. Ним була висловлена ідея про диференціацію міжремонтного пробігу тепловоза в залежності від конкретних умов роботи і встановлена кореляція між витратою палива і завантаженням локомотива.

Рахматулін М.Д. запропонував методику визначення диференціальних пробігів тепловозів [53] за показником питомої витрати палива:

$$L_p = \frac{P_0}{\varphi} , \quad (1.1)$$

де P_0 – норма витрати палива між окремими видами ремонту;

φ – нормований показник використання потужності локомотива.

Дана методика не враховує зміну експлуатаційної надійності дизеля, з огляду на зміну технічного стану в плані зносу його деталей і вузлів. Також у [53] не ставилось питання про економічну доцільність міжремонтних пробігів. Це питання розглядається в [54], де при визначенні міжремонтного пробігу враховувалися економічні показники експлуатації та ремонту тепловозів. Дослідження [55] показали, що для визначення міжремонтного пробігу необхідні також дані щодо фактичної безвідмовності і довговічності вузлів локомотива.

Використання економічних показників для визначення раціональних термінів служби машин розповсюджено й в інших галузях транспорту. Дослідження Ю.М. Артем'єва, Р.М. Колегаєва, М.А. Халфіна та ін. передбачали визначення термінів служби і періодів між ремонтами як з урахуванням економічних показників, так і з урахуванням надійності і безвідмовності вузлів і деталей.

А.А. Бовін [56] розглядає питання раціоналізації пробігів у залежності від витрат на одиницю ремонту ΔC на прикладі зміни норм пробігів до одного з видів ремонту. З урахуванням вартості самого локомотива та простоїв на складних видах ремонту їм пропонується вираз:

$$\Delta C = \left(1 - \frac{1}{\varphi}\right) \left[(1 - k \cdot \varphi) \cdot P_{cp} + A_0 \right], \quad (1.2)$$

де φ – відношення фактичного пробігу до планового;

k – відсоток зміни вартості ремонту зі збільшенням пробігу на 1%;

P_{cp} – вартість одиниці ремонту;

$A_0 = f(t_{TP-3}, t_3)$ – простій на ПР-3 і ЗР.

Т.В. Буцько [57] мінімізує сумарні витрати на систему утримування (на виконання планових ТО та ПР, непланових ремонтів, витрати запасних частин, матеріалів, енергоресурсів, мастил):

$$Q(S, m_1, m_2, \dots, m_n) = \sum_{j=1}^n \frac{1}{m_j S} \sum_{i=0}^{\infty} (iR_j + C_j) \cdot P(m_j, S, i) + \frac{A}{S} + f_T(S, m_1, m_2, \dots, m_n) * \\ *ST + f_M(S, m_1, m_2, \dots, m_n) \cdot SM + \frac{D}{S}, \quad (1.3)$$

де n – загальна кількість вузлів, які оглядаються на ТО та ПР;

S – міжремонтний пробіг;

m_j – кратність виконання робіт по j -му типу обладнання,

$m_j * S$ – пробіг локомотиву до виконання j -го виду робіт;

C_j – витрати на планову роботу по j -му вузлу (у складі ТО або ПР) або його заміну;

R_j – повні витрати, які пов'язані з відмовою (НР) j -го вузла;

A – збитки депо, які пов'язані з простоем локомотиву на ТО або ПР;

$f_T(S, m_1, m_2, \dots, m_n)$ – витрати пального у кілограмах на 1 км для міжремонтного пробігу S та кратності робіт по j -му виду обладнання

m_j ($j = 1, 2, \dots, n$) – (витрати електроенергії в кВт·г на 1 км);

$f_M(S, m_1, m_2, \dots, m_n)$ – витрати мастила у кілограмах на 1 км для міжремонтного пробігу S та кратності робіт по j -му виду обладнання;

$P(m_j, S, i)$ – імовірність того, що за пробіг $m_j \cdot S$ виникне i відмов у j -го виду обладнання;

D – витрати, пов'язані з проведенням діагностичних операцій;

ST – вартість 1 кг палива або 1 кВт·г електроенергії;

SM – вартість 1 кг мастила.

Мінімізація функції сумарних витрат на систему утримування відбувається у два кроки. На першому кроці – для кожного номеру j (вузла локомотива) визначається значення оптимального міжремонтного пробігу S_j^{opt} , яке доставляє мінімум функції:

$$Q_j(S_j) = (1/S_j) \cdot \{R_j \cdot M_j[T(S_j)] + C_j\}, \quad (1.4)$$

де $M_j[T(S_j)] = \sum_{i=0}^{\infty} i \cdot P(m_j, S, i)$ – функція відновлення.

На другому кроці визначається оптимальний міжремонтний пробіг між ТО або ПР – S^{opt} для всього локомотиву цілком.

Наведені вище методики не враховують режими експлуатації локомотивів, їх конструктивні особливості і технологію ремонту. Більш універсальною, що враховує перераховані недоліки є математична модель відновлення (ремонту), запропонована професором А.А. Босовим [58].

Критерій оптимізації міжремонтних періодів – мінімізація питомих витрат коштів на одиницю наробітку (чи пробігу локомотивів).

Для прийнятої періодичності ремонту розв’язується задача:

$$C_y = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} C_t \Rightarrow \min, \quad (1.5)$$

за умови, що:

$$T_y \leq \frac{qK_\phi N}{W} - 1, \quad (1.6)$$

де C_y – питомі витрати коштів;

T_y – сумарний час перебування локомотива у всіх видах ремонту за напрацювання t з урахуванням технології ремонту;

C_t – витрати на планові і позапланові ремонти з урахуванням технології ремонту за напрацювання t ;

q – продуктивність локомотива в працездатному стані при наявності фронту робіт;

K_ϕ – коефіцієнт наявності фронту робіт;

N – парк локомотивів;

W – потрібна продуктивність локомотивів для виконання заданого обсягу роботи в заданий період.

Професор Капіца М.І. [25] запропонував для визначення раціональної системи планово-попереджувальних ремонтів (ППР) для ТРС

використовувати критерій «мінімум витрат ресурсів» і друге правило відбору – інтенсивність відмов локомотива повинна бути не більшою заданого рівня $\bar{\lambda}$.

Основна задача по визначенню раціональної системи, планово-попереджувальних ремонтів для ТРС із лінійними λ -характеристиками розглядається, коли цільова функція F (витрати ресурсів) має дві компоненти:

$$F[V_t] = \begin{pmatrix} F_1(V_t) \\ F_2[V_t] \end{pmatrix} \rightarrow \min, \quad (1.7)$$

де:

$$F_1[V_t] = \sum_{i=1}^k C^1(V_i),$$

$$F_2[V_t] = \sum_{i=1}^k C^2(V_i),$$

де $C^1(V_i)$; $C^2(V_i)$ – витрати 1-го і 2-го ресурсів при ремонті в обсязі V_i

Інтенсивність відмов визначається по моделі зсуву:

$$\lambda(t \setminus V_t) = \lambda \left(t - \sum x_i \gamma(V_i \setminus \bigcup_{j=1}^{n(t)} V_j) \right), \quad (1.8)$$

де $n(t)$ такий максимальний номер ремонтного впливу, коли:

$$x_n \leq t < x_{n+1}$$

Відзначимо, що ні в одному з перерахованих вище джерел при описі системи утримання складних технічних об'єктів або при розрахунках на надійність не враховувалися залежні відмови елементів. Однак, як показує залізнична практика [59], залежні відмови елементів тягового рухомого складу є однією з основних причин транспортних пригод. Облік їх при побудові раціональної системи утримання технічних об'єктів залізничного транспорту є основою підвищення безпеки руху.

1.4. Аналіз досліджень залежних відмов технічних об'єктах

Складність обзору літературних джерел, які розглядають залежні відмови в технічних системах, полягає у застосуванні різної термінологічної бази при описі відмов даного виду. Крім терміну «залежна відмова», в різних галузях застосовують терміни «множинна відмова», «відмови за загальною причиною».

Множинні відмови розглядаються, як правило, у електричних системах [60-63]. Наприклад, у [63] множинні відмови розглядаються у контексті розв'язання деяких задач аналізу режимної надійності електроенергетичних систем.

Відмови за загальною причиною можна зустріти у джерелах, які розглядають питання безпеки на АЕС [64].

Залежні відмови згадуються у джерелах, що вивчають автоматизовані системи управління, теоретичні питання пов'язані з різноманітними послідовно-паралельними структурами [64]. У [65] пропонується формалізувати підхід до оцінки надійності автоматизованої системи управління (АСУ) с залежними відмовам, що, в свою чергу, дозволить побудувати модель, яка буде мати більшу гнучкість та враховувати вплив небезпечних ситуацій на безвідмовність багатофункціональних АСУ .

Залежні відмови технічних об'єктів залізничного транспорту згадуються у [66]. У статті залежні відмови розглядаються як один з видів причин відмов турбокомпресора. Аналіз експлуатації та ремонту тепловозного парку локомотивних депо дозволив авторам встановити, що істотний вплив на працездатність турбокомпресора надають: характер експлуатації тепловоза, теплотехнічний стан дизеля, існуюча в депо технологія ремонту.

У якості математичного апарату для вивчення залежних відмов в деяких джерелах пропонується використовувати теорію розгалужених процесів.

На початку досліджень розгалужених процесів в якості об'єкта розглядалися дві моделі: процес Гальтона-Ватсона (кожна частка, яка існує в цілочисельний момент часу, незалежно від передісторії і еволюції інших частинок виробляє випадкове число частинок-нащадків) і марковський розгалужений процес з безперервним часом (узагальнення процесу Гальтона-Ватсона, в якому передбачається, що перетворення часток відбуваються в будь-який момент часу). Опису цих процесів присвячені окремі розділи в монографіях Т. Є. Харріса [67], Б.А. Севастьянова [68], І.І. Гіхмана і А.В. Скорохода [69-71], К.В. Athreya і Р.Е. Ney [72].

Узагальненням цих моделей є розгалужений процес з імміграцією, в якому поряд з розмноженням і перетворенням частинок є постійний приплив частинок ззовні, керований випадковим механізмом, не залежним від числа існуючих частинок (М.С. Бартлетт [73], Б.А. Севастьянов, S . Karlin і J. McGregor [74]).

Для процесів Гальтона-Ватсона, марковських розгалужених процесів і розгалужених процесів з імміграцією вивчалися різні характеристики і граничні теореми.

При дослідженні граничних теорем теорії ймовірностей одним з центральних є питання опису граничної множини. Граничні теореми для деяких розгалужених процесів з імміграцією були отримані Б.А. Севастьяновим [75], В.А. Ватутіним [76], С.В. Нагаєвим [77, 78], Е. Сенета [79], К.В. Мітов [80], Ш.К. Формановим і Р.Х. Ібрагімовим [81].

Останнім часом з'являється все більше публікацій на тему залежних відмов в різних системах, в яких пропонуються різні підходи щодо обліку і обробці даних про відмови даного виду.

У статті Аронова І.З. «Аналіз залежних відмов – важливий спосіб забезпечення безпеки складних систем» [82] розглядаються такі поняття, пов'язані з аналізом відмов, як залежна відмова і відмова з загальної причини.

Залежна відмова – множинна відмова декількох елементів системи, ймовірність якої не може бути виражена просто як добуток ймовірностей безумовних відмов окремих елементів.

Відмова з загальної причини – вид залежної відмови, коли одночасна (або майже одночасна) множинна відмова відбувається за єдиною причиною [82].

Тут же розглянуті різні причини виникнення залежних відмов, а саме:

- Функціональні причини:
 - відмови інших елементів (систем);
 - відмови інших елементів з тимчасовою затримкою;
 - регламентні обмеження або вимоги правил техніки безпеки при проведенні ТОіР.
- Випадкові події:
 - концептуальні проектно-конструкторські помилки;
 - помилки при виробництві;
 - помилки при експлуатації;
 - несприятливі впливи навколишнього середовища.

Також в статті розглянуті можливі помилки при проектуванні та експлуатації технічного об'єкта, що призводять до залежних відмов. Запропонована наступна класифікація елементів, схильних до відмов із загальної причини:

1 клас: спільність конструкції резервованих елементів.

2 клас: розміщення резервованих елементів в одному приміщенні.

3 клас: однакові для різних елементів процедури технічного обслуговування та/або перевірок, які супроводжуються або можуть супроводжуватися зміною стану елемента.

Також розглянуті декілька моделей аналізу відмов із загальної причини.

1. Модель базового параметра. Заснована на статистичному аналізі відмов із загальної причини. У ній ймовірність відмов k елементів із

загальної причини обчислюється за формулою $q_k = \frac{n_k}{N_k}$, де n_k – число подій, при яких k елементів одночасно перебували в непрацездатному стані; N_k – число вимог на спрацьовування будь-якого з k розглянутих елементів в групі з m елементів. Перевага моделі: простий спосіб розрахунку ймовірностей відмов із загальної причини. Недолік: необхідна наявність статистики з відмов із загальної причини.

2. Модель b-фактора. Параметр b дорівнює відношенню ймовірності відмови елемента від загальних причин до повної (загальної) ймовірності його відмови. Перевага: Зручність моделі при нестачі статистичної інформації по відмовам від загальної причини. Така модель рекомендована при оціночних розрахунках. Недоліки: не доведено припущення про пропорційні залежності між відмовами від загальної причини і незалежними відмовами, яке визначається на підставі експлуатаційної статистики

Крім того, в статті показано облік залежних відмов в моделі кількісного аналізу, при побудові дерева відмов. Запропоновано і обґрунтовано наступні шляхи зменшення ймовірності відмови систем з загальної причини:

- фізичний розподіл елементів, що резервуються;
- різнотипність елементів, що резервуються.

Підходи до моделювання відмов із загальної причини також розглядаються в статті [83]. Автори відзначають, що підхід до моделювання відмов загального вигляду для груп однотипних резервованих компонентів, що знаходяться в різних експлуатаційних станах в режимі нормальної експлуатації в світовій практиці ще не сформувався. У роботі пропонується узагальнити існуючу в світі практику виконання подібних аналізів для традиційних випадків, і враховуються сучасні тенденції проектування нових АЕС, спрямовані, в тому числі, на посилення захисту від відмов загального вигляду.

Серед причин виникнення відмов із загальної причини (відмов загального вигляду) в статті виділяють:

- зміна стану групи елементів, яка позначається, в тому числі, і на зміні параметрів навантаження;
- перевищення (не екстремальне) характерних для нормальної експлуатації значень параметрів навколишнього середовища;
- погіршення умов взаємодії, тобто внутрішніх зв'язків, що забезпечують роботу конструктивних елементів в обладнанні (наприклад, погіршення властивостей мастила, ослаблення кріплення в тепломеханічному обладнанні, зміна електричного навантаження елементів в апаратурі і т.п.).
- виникнення екстремальних (що перевищують проектні) параметрів впливу навколишнього середовища, які призводять до залежних відмов обладнання («летальні шоки»).

Серед заходів щодо зменшення впливу залежних відмов на надійність системи в [83] описані:

- виключення або зниження впливу чинників спільності;
- реалізація принципу різноманітності, тобто застосування систем (елементів) різного принципу дії, які є незалежними один від одного.

Тут же відмічається, що в умовах відсутності представницької статистичної інформації щодо подій з відмовами за загальною причиною оцінити кількісно ефективність зазначених заходів вкрай важко.

Дослідження залежних відмов складних технічних систем не обмежується статтями. У навчальному посібнику [84] Олександрівська Л.Н., Аронов І.З. та інші вчені описують в якості одного з методів забезпечення потенційної надійності технічних систем аналіз залежних відмов. Крім того, тут же, в розділі 8 «Імовірнісний аналіз безпеки» розглянуті аналіз вихідних подій, аналіз аварійних послідовностей і аналіз кінцевих станів.

В електронному посібнику [85] описаний метод, що враховує залежні відмови елементів в електричних системах. Для обліку залежних відмов

пропонується застосування топологічних моделей на основі сигнальних графів Мезона.

Недоліки методу: надійність систем розглядається в статичному стані при відмовах у вигляді коротких замикань; в оцінці надійності не враховується резервування елементів; виключається вплив зовнішніх стохастичних факторів на систему.

1.5. Аналіз причин транспортних подій у локомотивному господарстві

Актуальність вивчення залежних відмов та їх вплив на безпеку та надійність тягового рухомого складу можна проілюструвати наступною статистикою транспортних пригод за участю локомотивів. Статистичні дані взяті з Аналіз стану безпеки руху на залізницях України за 2005-20015 роки [86-89].

Розподіл кількості транспортних подій (ТП) на залізницях України за участю тягового рухомого складу з 2005 по 2015 рік показано на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Розподіл кількості транспортних подій на залізницях України за участю тягового рухомого складу з 2005 по 2015 рік

Розподіл кількості транспортних подій по причинах у відсотках з 2005 по 2015 роки показано в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Розподіл кількості транспортних подій

Причини ТП	2005р.	2006р.	2007р.	2008р.	2013р.	2014р.	2015р.
Неякісний ремонт в депо	55,37%	52,10%	53,49%	51,85%	56,22 %	54,46 %	53,05 %
Невірні дії локомотивних бригад	28,40%	24,37%	24,42%	26,85%	17,18 %	16,23 %	15,99 %
Неякісний заводський ремонт	7,88%	9,52%	6,40%	10,49%	2,39%	0,48%	0,00%
Технічні	7,64%	11,20%	13,66%	8,95%	4,30%	4,30%	7,88%
Інші	0,72%	2,80%	2,03%	1,85%	0,48%	2,15%	0,00%

Динаміка зміни кількості транспортних подій за роками і по причинах показана на рис. 1.2.

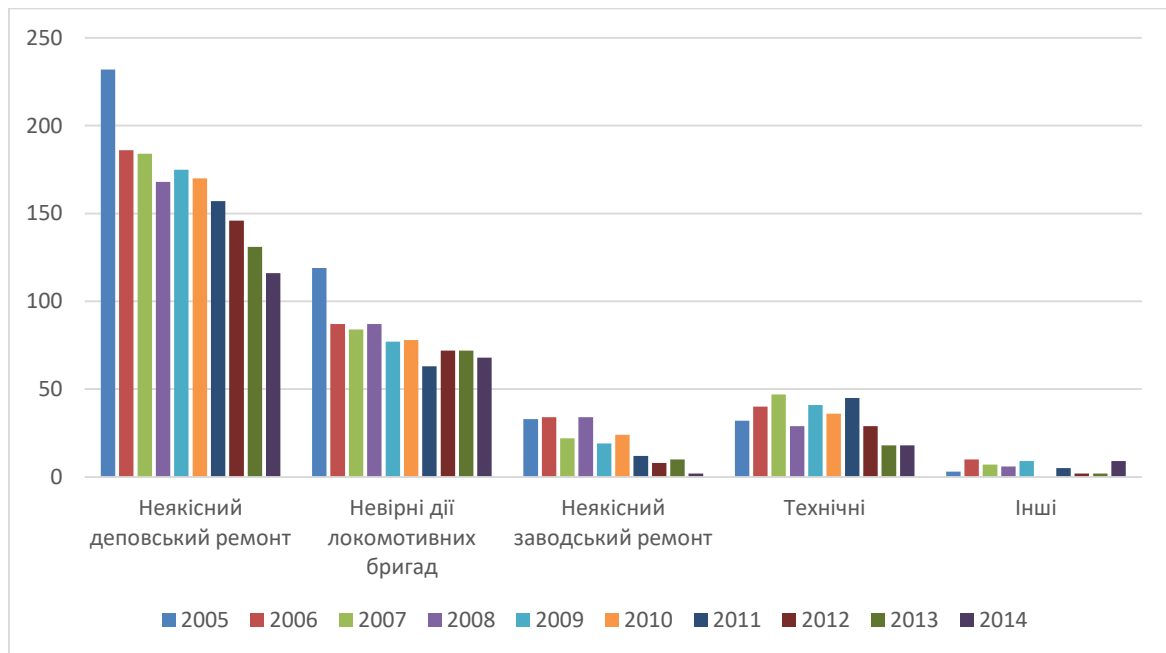


Рисунок 1.2 – Динаміка зміни кількості транспортних пригод за роками і по причинах

Таким чином, статистичні дані показують, що найбільш значущими причинами транспортних пригод є неякісний ремонт і некомпетентні дії локомотивних бригад.

Розглянемо розподіл транспортних пригод в залежності від ступеня тяжкості [89] з 2005 по 2008 рр. (дивись рисунок 1.3 а-г).

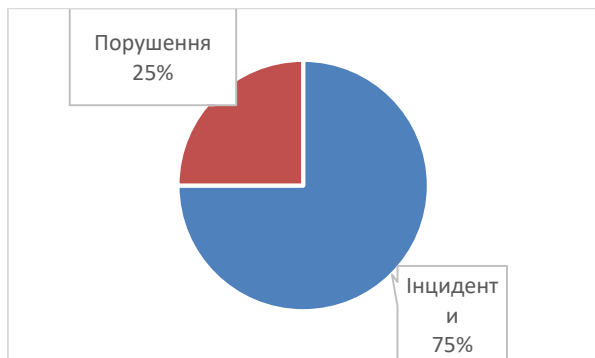


Рисунок 1.3 а – Розподіл подій за категоріями, 2005 р.

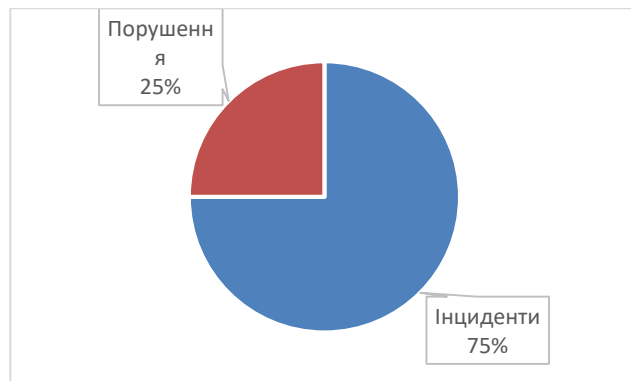


Рисунок 1.3 б – Розподіл подій за категоріями, 2006 р.

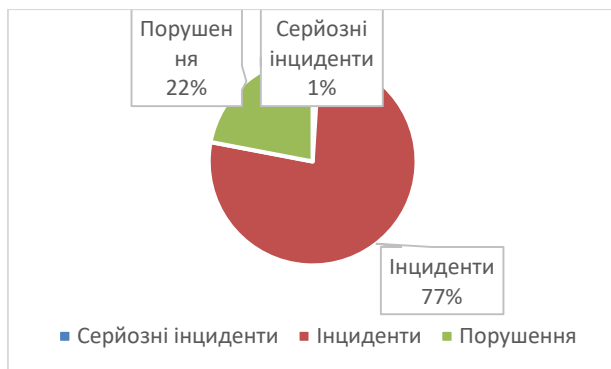


Рисунок 1.3 в – Розподіл подій за категоріями, 2007 р.

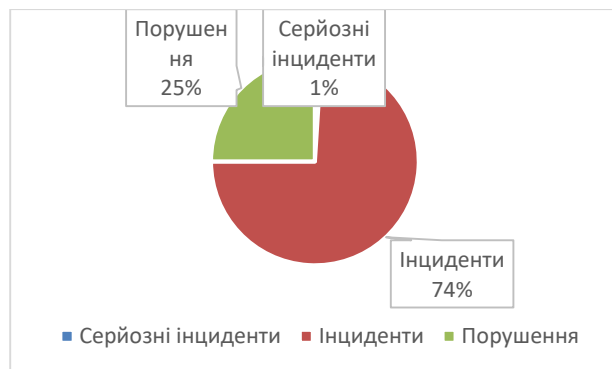


Рисунок 1.3 г – Розподіл подій за категоріями, 2008 р.

Аналіз графіків дозволяє зробити наступні висновки:

- кількість транспортних пригод має тенденцію до зниження;
- складність транспортних пригод з роками зростає (кількість серйозних інцидентів збільшується).

Для подальшого аналізу розглянемо дані про розподіл збитків від транспортних подій у локомотивному господарстві (дивись рисунок 1.4).

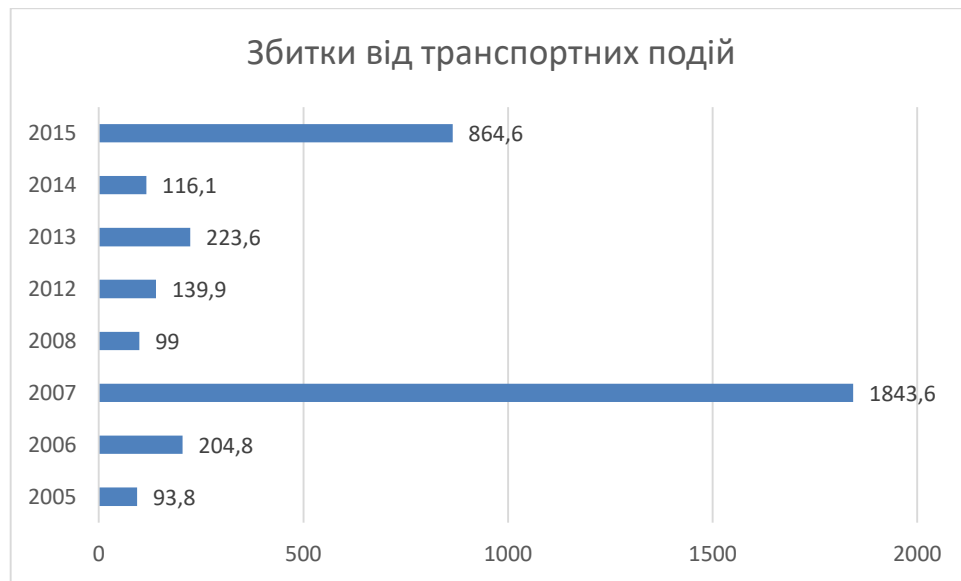


Рисунок 1.4 – Збитки від транспортних подій за участю ТРС, тис.грн.

Далі розглянемо види несправностей основного обладнання ТРС, а також вплив їх відмов на частоту транспортних подій. На рисунках 1.5 – 1.11 показаний відсоток транспортних подій, що сталися з причин відмов основного обладнання.

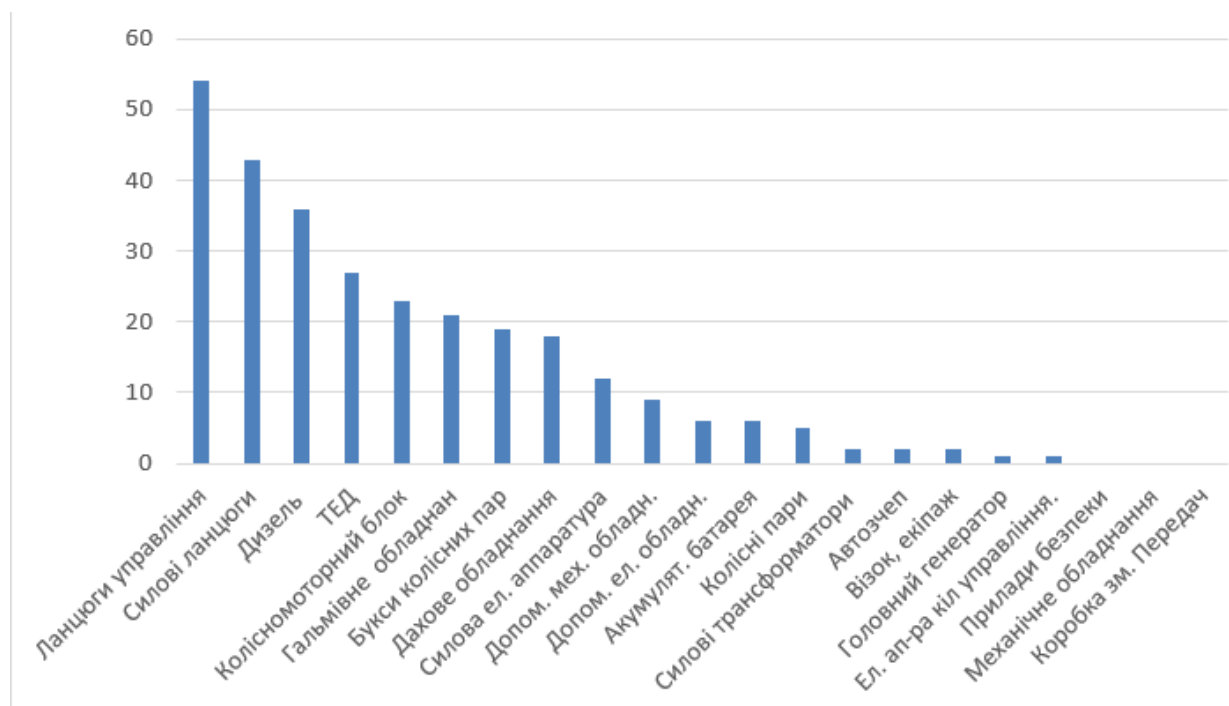


Рисунок 1.5 – Несправності основного обладнання, 2008 р.

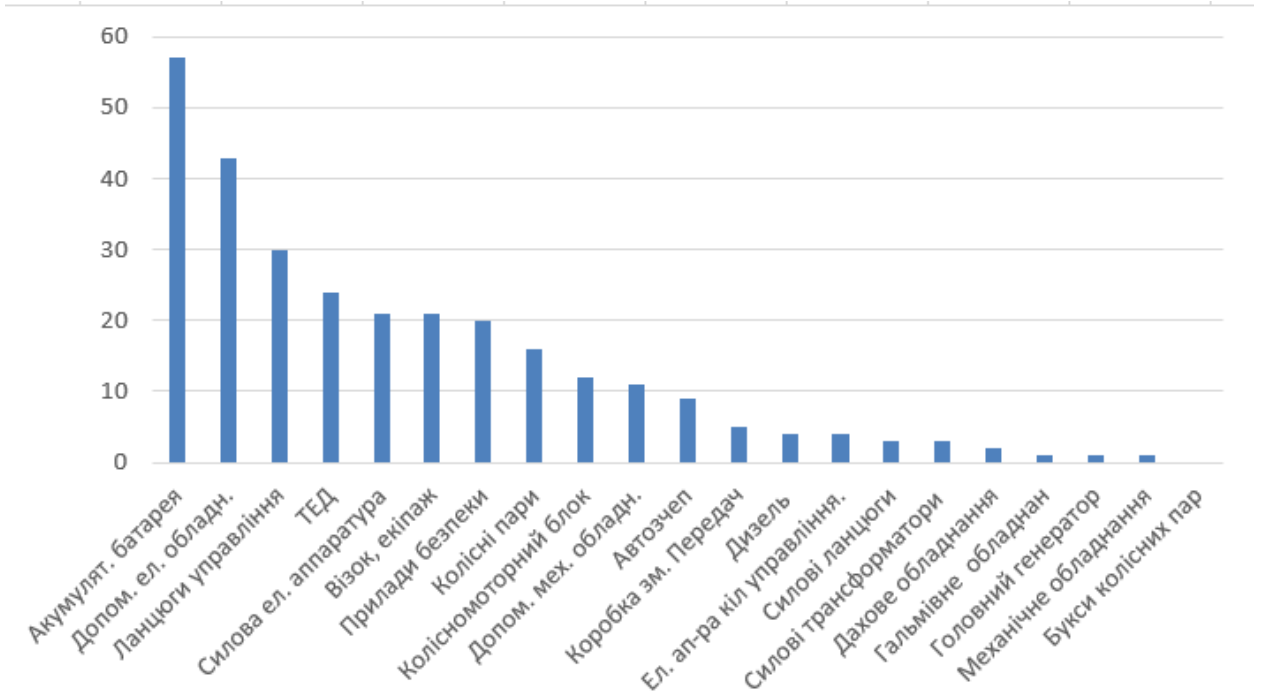


Рисунок 1.6 – Несправності основного обладнання, 2009 р.

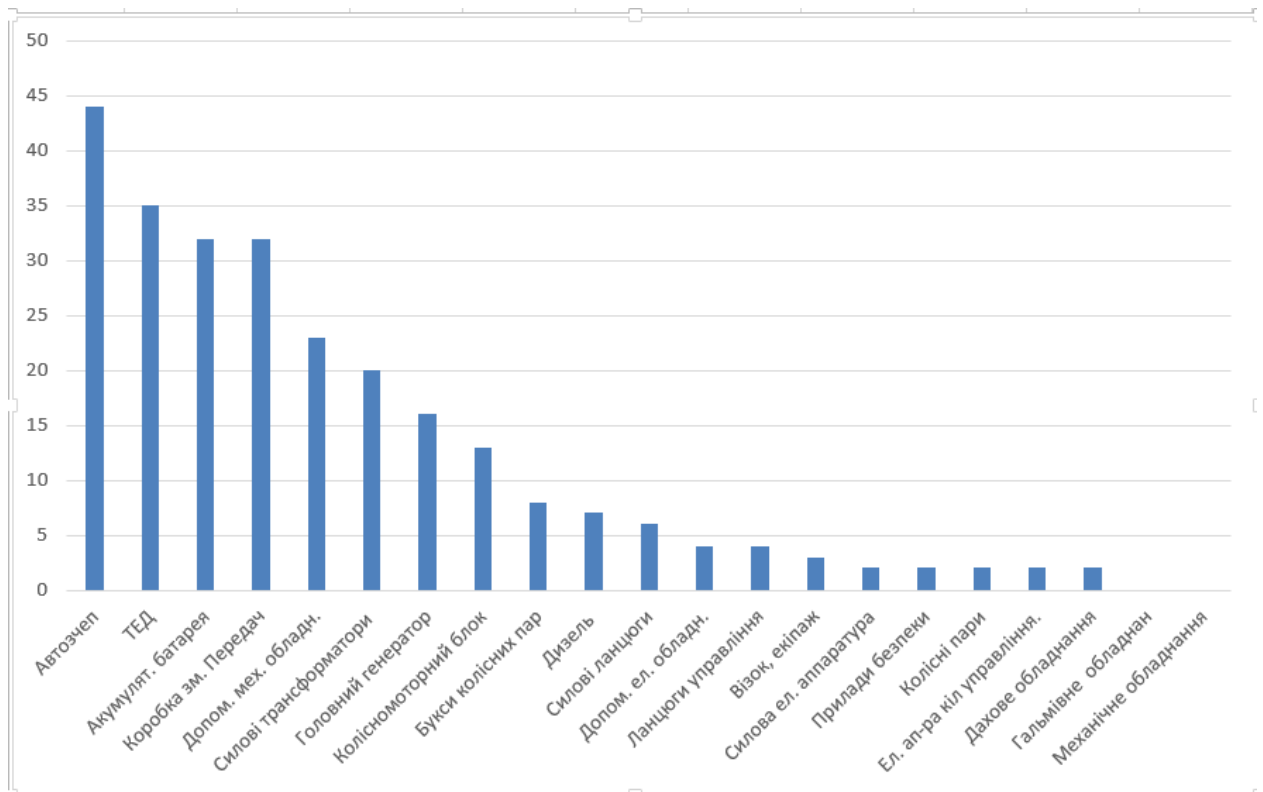


Рисунок 1.7 – Несправності основного обладнання, 2010 р.

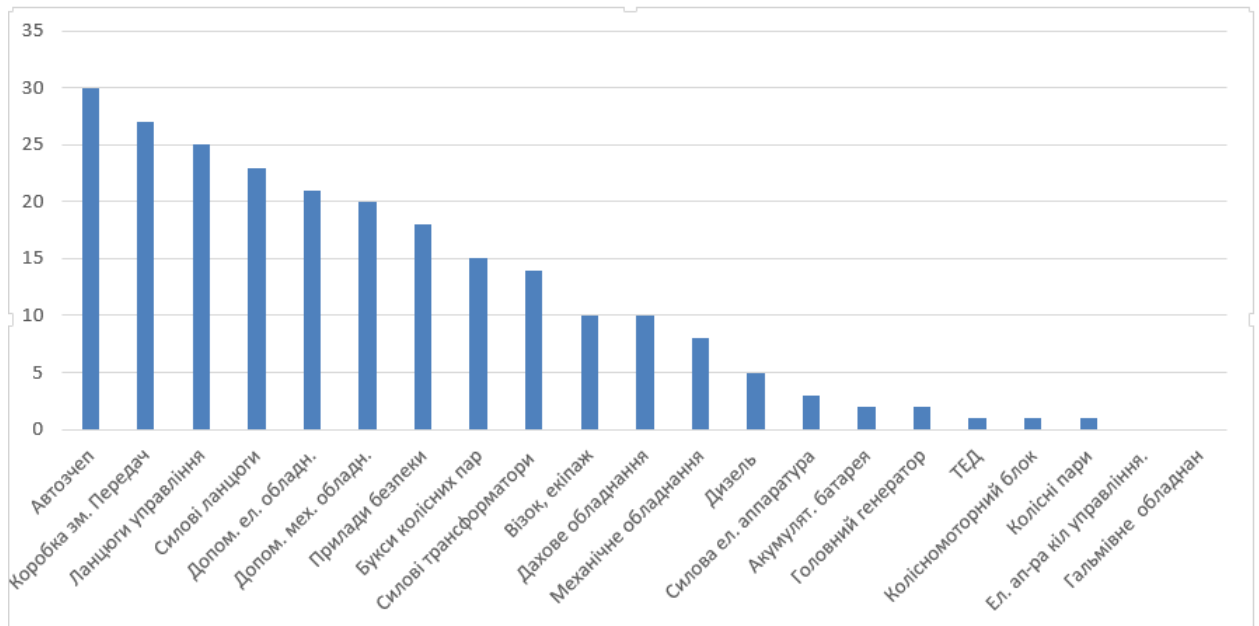


Рисунок 1.8 – Несправності основного обладнання, 2011 р.

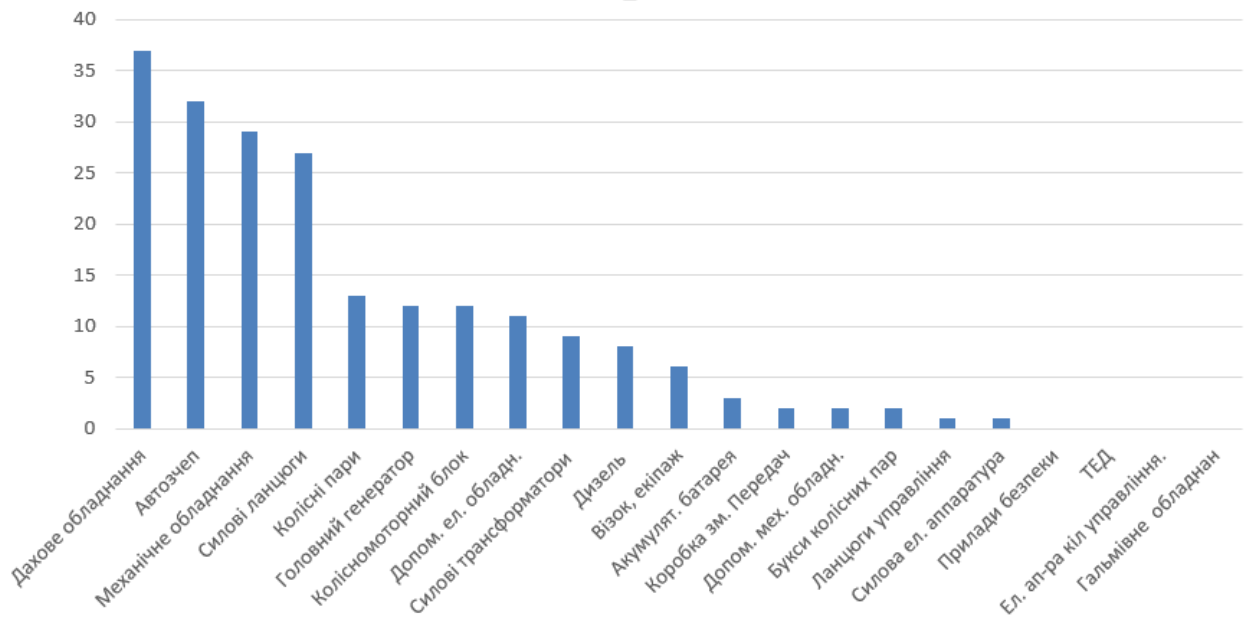


Рисунок 1.9 – Несправності основного обладнання, 2012 р.

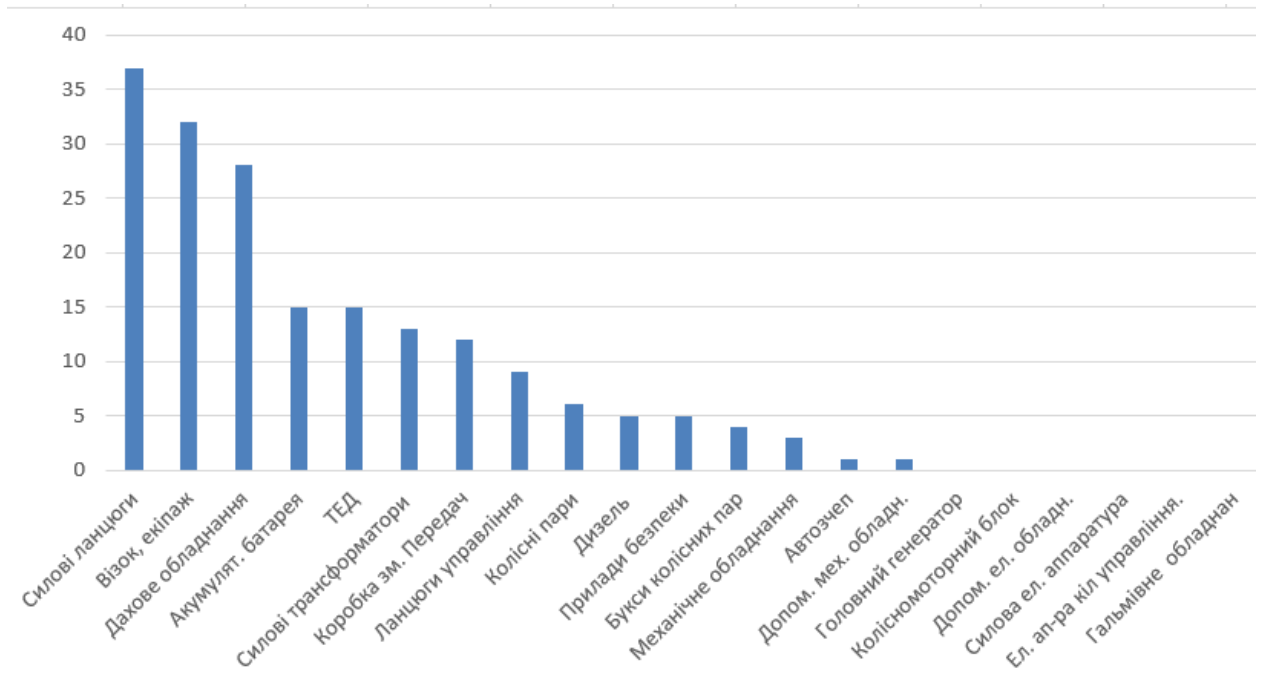


Рисунок 1.10 – Несправності основного обладнання, 2013 р.

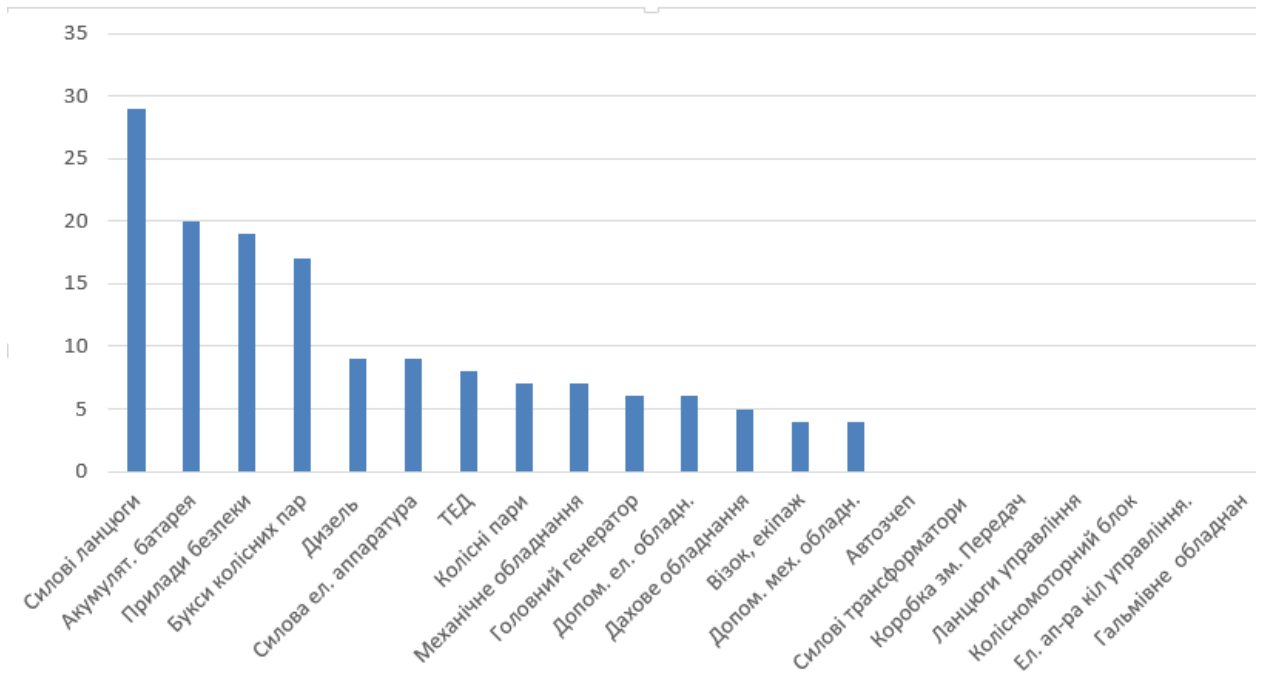


Рисунок 1.11 – Несправності основного обладнання, 2014 р.

Найбільше транспортних подій відбувається через неякісний ремонт в депо. Однак частка транспортних подій з вини локомотивних бригад досить велика і з часом не зменшується, тримаючись на рівні 25% від загальної кількості транспортних подій. Серед основного обладнання найбільш «уразливими» є електричні ланцюги (низьковольтні і силові), дизель, тягові електричні двигуни [90, 91].

Розглянемо більш докладно деякі транспортні події, а також їх причини.

У 2008 р відбулося 3 транспортні події через пожежі. Причинами пожеж в двох випадках з трьох стали залежні відмови устаткування локомотивів.

Перше пригода сталася наступним чином: розбандажування якоря тягового електричного двигуна спричинило пожежу в районі реверсора в блоці силових агрегатів на електровозі.

Друга транспортна подія через пожежу сталася через неякісний поточний ремонт, який викликав наступний ланцюг подій (дивись Схему 1): через поломки шини від акумуляторної батареї сталося коротке замикання в електричних ланцюгах управління з подальшим виникненням пожежі в кабіні управління і в високовольтній камері.

Схема 1				
Шина від акумуляторної батареї (поломка)	→	Електричні ланцюги керування (коротке замикання)	→	Пожежа у високовольтній камері
			→	Пожежа в кабіні управління

Таким чином, першопричиною 2/3 транспортних подій, що сталися через пожежу, з'явилися залежні відмови елементів тягового рухомого складу.

Розглянемо транспортні події, що відбулися через несправність автосцепок. У 2008 році кількість таких пригод склала 2. Одна з них була класифікована як серйозний інцидент. Був пошкоджений електровоз і 6 вагонів. Поширення відмов показано на схемі 2. Вихідний і підсумковий набори ушкоджень зображені на рисунку 1.12.

Схема 2				
Пошкодження автосцеплення (саморозчип між електровозом і першим вагоном вантажного потяга)	→	Розширене пошкодження автосцеплення (жорстке зчеплення)	→	Пошкодження електровоза
			→	Пошкодження перших шести вагонів

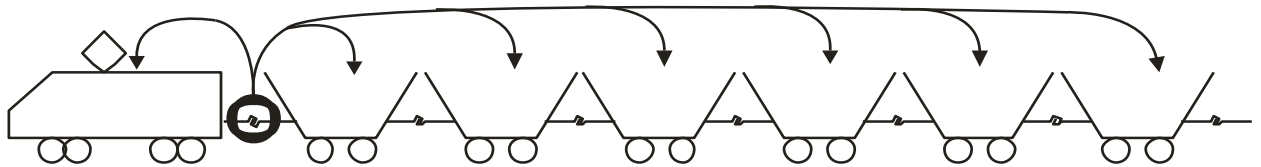


Рисунок 1.12 – Вихідний і підсумковий набори пошкоджень

Серйозний інцидент через несправність механічного обладнання стався в 2006 році: обрив і падіння на шлях похилої тяги візка електровоза. Ланцюг подій показано на схемі 3. Відмова незначної деталі (випадання втулки) призвела до відмови основного обладнання – обриву похилої тяги.

Схема 3								
Конструктивна недосконалість кріплення втулки	→	Випадання втулки із отвору нижнього кронштейну	→	Поява тріщини з внутрішньої сторони кронштейну	→	Поломка верхнього кронштейна тяги	→	Обрив і падіння на шлях похилої тяги
Конструктивна недосконалість страхувального механізму для втулки								

Інцидент, що стався через несправність колісних пар (схід колісної пари), був результатом ланцюга відмов, який наведено на Схемі 4.

Місцезнаходження тріщини (первинної відмови) показано на рисунку 1.13.

Схема 4								
Використання ТРС після завершення строку експлуатації (1974-1994)	→	Виникнення тріщини до 76% поперечного розрізу по галтелі при переході з різних діаметрів шийки осі	→	Не виявлення тріщини при повному огляді 19.06.2006	→	Поломка шийки осі колісної пари	→	Схід однієї колісної пари вагону електропотяга

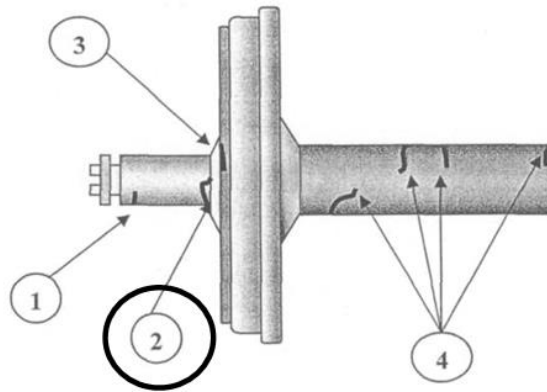


Рисунок 1.13 – Тріщини осі колісної пари: 1 - на шийці осі, 2 - на галтелі шийки осі, 3 - на циліндричній поверхні і галтелі передподступічатої частини, 4 - в середній частині осі

Таким чином, при детальному розгляді причини транспортних подій можна умовно розділити на три категорії:

- транспортні події, які сталися через виникнення залежних відмов обладнання;
- транспортні події, що відбулися з вини локомотивних бригад;
- транспортні події, що відбулися з інших причин (неякісний ремонт, несправності основного обладнання тощо.).

Основна проблема при вивченні залежних відмов полягає в тому, що статистика транспортних подій за даними відмовами не ведеться. Як показано вище, всі транспортні події, які сталися через залежні відмови елементів рухомого складу, класифікувалися з інших причин – неякісний заводський і деповський ремонт, несправність обладнання (хоча фактично це було не так), пожежі та інше.

Транспортні події з вини локомотивних бригад відповідним чином враховуються. Накопичені дані дають можливість управляти впливом людського фактору.

Необхідно відмітити, що статистики виникнення залежних відмов, а також обліку їх за ступенем складності наслідків немає. Однак, як показано вище, при детальному вивченні транспортних подій з різних причин (пожежі, неякісний ремонт та ін.), першопричиною виявляються саме залежні відмови елементів.

Таким чином, для підвищення надійності перевізного процесу, зменшення виникнення транспортних подій, а також мінімізації витрат на ліквідацію їх наслідків необхідно вести облік і контроль залежних відмов елементів рухомого складу та на підставі даного обліку виконувати вдосконалення системи утримання.

1.6. Висновки за розділом 1

1. Аналіз причин виникнення транспортних подій у локомотивному господарстві виявив, що майже 64 % відмов виникають через залежні відмови вузлів локомотивів. При цьому існуючі системи утримання не враховують можливість виникнення даного виду відмов. Тобто для більш ефективного удосконалення системи утримання необхідно враховувати залежні відмови вузлів локомотивів. Для цього виникає необхідність вивчення внутрішньої природи виникнення залежних відмов та їх розповсюдження по системі.

2. Проведений огляд сучасних систем утримання технічних об'єктів залізничного транспорту показав, що основною тенденцією їх розвитку та удосконалення є поступовий перехід до комбінованих систем утримання, які об'єднують у собі елементи планово-попереджувальної та системи технічного огляду та ремонту за фактичним станом. При цьому наявні методики побудови раціональних систем утримання не враховують можливість виникнення залежних відмов та їх вплив на вартість непланових ремонтів.

3. Виконаний аналіз літератури щодо розвитку систем утримування локомотивів показав актуальність створення системи утримання локомотивів, раціональною за показниками витрат коштів, часу та екологічних ресурсів.

4. Проведений аналіз сучасних методик вибору раціональної системи утримування локомотивів показав, що залежні відмови не враховувались ні у якості критеріїв для визначення раціональної системи

утримування, ні при розрахунках на надійність. При цьому їх вплив на надійність тягового рухомого складу і, відповідно, на безпеку рух досить суттєвий.

Вирішення вищеперелічених питань дозволить підвищити надійність тягового рухомого складу та безпеку руху поїздів.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ УТРИМАННЯ ЛОКОМОТИВІВ

2.1. Аналіз кількісних характеристик надійності технічних об'єктів

На підставі принципів системного аналізу стосовно до залізничного транспорту взаємозв'язок задач в області надійності можна відобразити у вигляді наступної блок-схеми. Основною задачею залізничного транспорту є забезпечення потреби населення у перевезеннях.

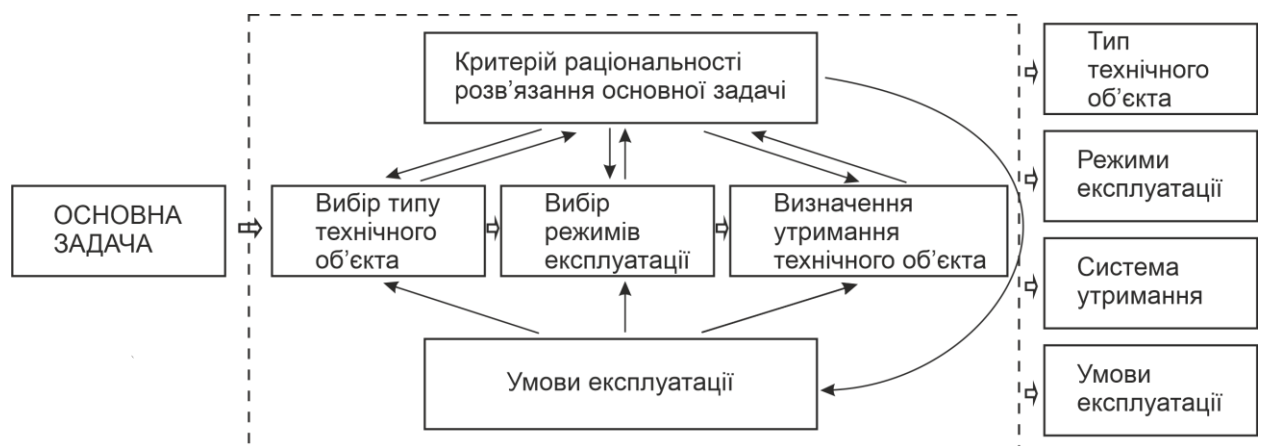


Рисунок 2.1 – Задача підвищення надійності залізничного транспорту

Згідно з даною схемою, реалізація основної задачі передбачає вирішення наступних завдань:

- створення більш досконалих типів рухомого складу, машин, механізмів, засобів автоматизації, телемеханіки та інших пристроїв на базі науково-технічного прогресу;
- визначення раціональних режимів роботи для обраного технічного об'єкта;
- визначення раціональної системи технічного обслуговування і ремонту технічного об'єкта з урахуванням режимів його роботи.

Важливим елементом в даній схемі є вибір критерію раціональності вирішення основної задачі.

Теорія і практика вирішення основної задачі вказує на те, що оцінка прийнятих рішень повинна проводитися за кількома показниками, серед яких повинні бути:

- економічні показники (показники господарської діяльності);
- показники, що характеризують екологічні наслідки;
- показники, що відображають соціальні наслідки.

Стан технічних об'єктів залізничного транспорту в будь-який момент часу можна характеризувати сукупністю параметрів $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Дані параметри розглядаємо як функції часу.

Більш точно відповідно до [34] введемо поняття напрацювання, чисельне значення якого будемо позначати символом t . Інженерний зміст поняття напрацювання може бути:

- календарний час;
- час роботи;
- пробіг;
- обсяг перевезеного вантажу;
- і т.д.

Наступним важливим поняттям є поняття відмови технічного об'єкта, коли порушується його працездатність. «Відмова» є подією, на відміну від «несправності», що характеризується станом та причиною відмови [34].

У загальному випадку, як описано у роботі [93], в просторі можливих значень параметрів технічного об'єкта, що позначається E_n (n – число параметрів), виділяється деяка область $X \subset E_n$, яка є множиною значень параметрів, при яких технічний об'єкт працездатний. Якщо ж при деякому напрацюванні t точка $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$ належить області X , то об'єкт працездатний, а якщо $x(t)$ не належить X , то об'єкт непрацездатний. Таким чином, вихід $x(t)$ з області X відповідає події відмови технічного об'єкта.

Дана формалізація являє собою математичну модель відмови.

Нехай після виготовлення (або після капітального ремонту) об'єкт є працездатним, а його стан описується вектором $x(0) = (x_1(0), x_2(0), \dots, x_n(0)) \in X$. В процесі роботи об'єкта параметри змінюються і при деякому напрацюванні t_1 відбувається перший вихід точки $x(t_1)$ з області X , тоді напрацювання t_1 є напрацюванням до першої відмови.

Відзначимо, що чисельне значення напрацювання до відмови (t_1) істотно залежить від початкового стану і від того, як змінюється $x(t)$ від напрацювання t (іншими словами, від режимів та умов експлуатації).

Якщо позначити через \cup – режими експлуатації, а через Σ – сукупність умов експлуатації, тоді стан об'єкта можна описати таким чином: $x = (t, \cup, \Sigma, x(0))$.

Розкриття цієї залежності являє собою дуже важливу задачу. Обставини, які супроводжують вирішення даної задачі:

- початкове значення вектору $x(0)$ є невизначеним, в кращому випадку відомо з певною точністю;
- умови експлуатації Σ непостійні, а часом змінюються майже непередбачуваним чином (температура, вологість і т.д.);
- режими експлуатації \cup істотно визначаються основною задачею (обсяги перевезень), характеристики якої можуть суттєво змінюватись;
- для опису $x(t)$ необхідно залучати значну кількість фізико-хімічних, а іноді і соціальних процесів, що призводить до неосяжності задачі;
- доводиться розглядати не один, а сукупність технічних об'єктів.

Тому для вирішення задач теорії надійності в більшості випадків використовуються методи теорії ймовірностей і математичної статистики [3].

Математична модель напрацювання до відмови

Напрацювання до відмови для кожного об'єкта є істотно невизначеною величиною [93], тому в якості її математичної моделі береться

випадкова величина, яка позначається символом ξ . Тобто ξ – це математичний об'єкт, що використовується для опису невизначеної величини (напрацювання технічного об'єкта до відмови).

Для опису випадкової величини ξ будемо використовувати наступні кількісні характеристики [8]:

1. Функція $F(t)$ – ймовірність відмови за напрацювання t .
2. Функція $P(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи за напрацювання t .
3. Інтенсивність відмов λ .
4. Середнє напрацювання до першої відмови T_1 .

Нехай t – деяка детермінована величина, тоді співвідношення $\{\xi < t\}$ розглядаємо як випадкову подію, ймовірність якої позначимо через $F(t)$. Так як за фізичним змістом $\xi \geq 0$, то функція $F(t)$ визначена для невід'ємних значень t і дорівнює нулю при $t < 0$, тому що $\{\xi < 0\}$ – неможлива подія.

Найбільш повною кількісною характеристикою випадкової величини є функція $F(t)$.

Також розглянемо протилежну їй функцію:

$$P(t) = 1 - F(t). \quad (2.1)$$

$P(t)$ являє собою ймовірність безвідмовної роботи технічного об'єкта за напрацювання t .

Вважаємо функцію $F(t)$ диференційованою (з точки зору прикладних задач). Таким чином можна ввести наступну характеристику (λ – характеристика технічного об'єкта або інтенсивність відмов):

$$\lambda = \frac{F'(t)}{1 - F(t)}. \quad (2.2)$$

Знайдемо функцію $F(t)$ із співвідношення (2.2). Вважаємо, що $F(0) = 0$. Тобто припускаємо, що в початковий момент часу ймовірність відмови технічного об'єкта дорівнює нулю:

$$F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau}. \quad (2.3)$$

Ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau} \quad (2.4)$$

Якісний характер залежності функції інтенсивності відмов від напрацювання показано на рисунку 2.2 [93].

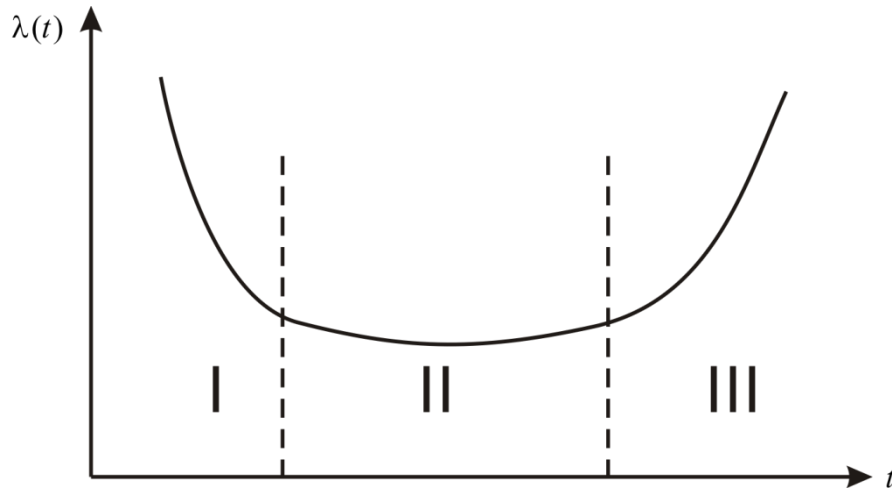


Рисунок 2.2 – Якісний характер залежності $\lambda(t)$ від напрацювання

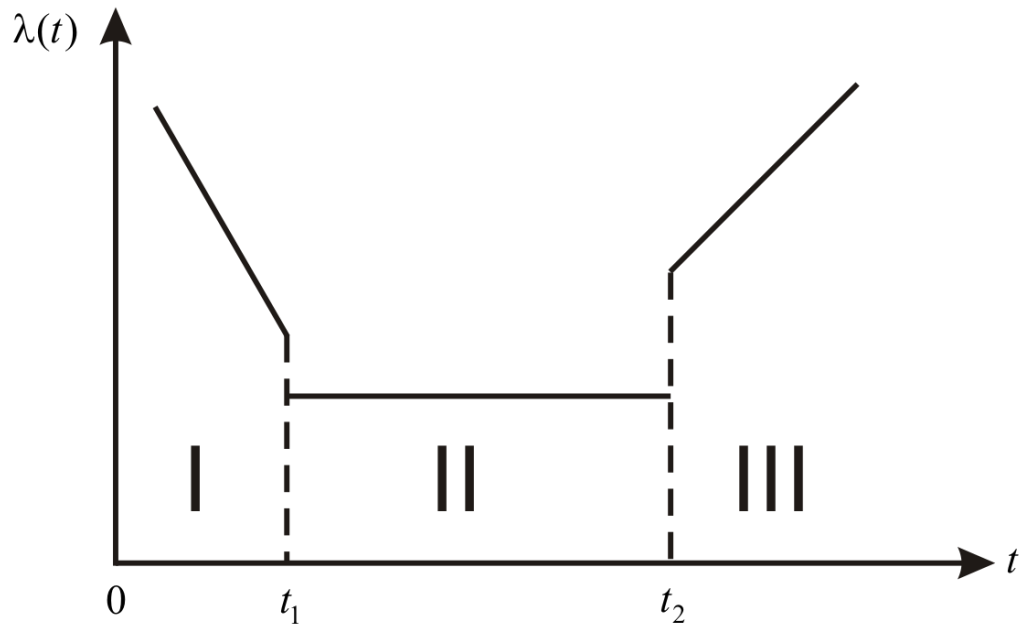
Виділяють три зони:

I зона «випалювання дефектів» або зона приробітку;

II зона – зона нормального функціонування об'єкта;

III зона – зона «старіння» об'єкта, коли в об'єкті відбуваються незворотні фізико-хімічні процеси і спостерігається зростання інтенсивності відмов.

У якості математичної моделі функції інтенсивності відмов пропонується використовувати модель, графічне зображення якої показане на рисунку 2.3 [93]. Вигляд основної моделі для $\lambda(t)$ приймається відповідно до ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. Використовуємо експоненціальний закон розподілу $\lambda e^{-\lambda t}$, де λ – це параметр масштабу розподілу, $\lambda > 0$.

Рисунок 2.3 – Основна модель для $\lambda(t)$

Аналітично дана модель описується кусковою функцією:

$$\lambda(t) = \begin{cases} 2a_1(t_1 - t) + b_1, & \text{якщо } 0 \leq t \leq t_1 \\ b_2, & \text{якщо } t_1 \leq t \leq t_2 \\ 2a_3(t - t_2) + b_3, & \text{якщо } t_2 \leq t \end{cases} \quad (2.5)$$

Коефіцієнти a_1, b_1, b_2, a_3, b_3 повинні бути додатними.

Наступна кількісна характеристика – середнє напрацювання до першої відмови T_1 . Обчислюється як математичне очікування випадкової величини ξ :

$$T_1 = \int_0^{\infty} t \cdot F'(t) dt$$

або

$$T_1 = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (2.6)$$

Підставимо значення $P(t)$ і $\lambda(t)$ у формулу (2.6.) отримаємо:

$$T_1 = \int_0^{\infty} e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau} dt,$$

$$\text{де } \lambda(t) = \begin{cases} 2a_1(t-t_1) + b_1, & \text{якщо } 0 \leq t \leq t_1 \\ b_2, & \text{якщо } t_1 \leq t \leq t_2 \\ 2a_3(t-t_2) + b_3, & \text{якщо } t_2 \leq t \end{cases}$$

Тоді:

$$T_1 = \int_0^{t_1} e^{-\Lambda_1(t)} dt + \int_{t_1}^{t_2} e^{-\Lambda_2(t)} dt + \int_{t_2}^{t_3} e^{-\Lambda_3(t)} dt,$$

$$\text{де } \Lambda_1(t) = a_1(2t_1t - t^2) + b_1t;$$

$$\Lambda_2(t) = b_2(t - t_1) + \Lambda_1(t_1);$$

$$\Lambda_3(t) = a_3(t - t_2)^2 + b_3(t - t_2) + \Lambda_2(t_2).$$

Після інтегрування отримаємо:

$$T_1 = e^{a_1\left(t_1 + \frac{b_1}{2a_1}\right)^2} \cdot \int_{\frac{b_1}{2a_1}}^{t_1 + \frac{b_1}{2a_1}} e^{a_1x^2} dx + e^{-\Lambda_1(t_1)} \frac{1}{b_2} \left(1 - e^{-b_2(t_2 - t_1)}\right) + e^{\frac{b_3^2}{4a_3} - \Lambda_2(t_2)} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{a_3}} \left(\frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{b_3}{\sqrt{2a_3}}\right)\right),$$

$$\text{де } \Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

Якщо першої зоною (зоною приробітку) знехтувати, вважати $t_1 = 0$, то отримаємо:

$$T_1 = \frac{1}{b_2} \left(1 - e^{-b_2t_2}\right) + e^{\frac{b_3^2}{4a_3} - b_2t_2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{a_3}} \left(\frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{b_3}{\sqrt{2a_3}}\right)\right). \quad (2.7)$$

Якщо друга зона (зона нормальної роботи) теж відсутня ($t_1 = 0$ і $t_2 = 0$), то отримаємо:

$$T_1 = e^{\frac{b_3^2}{4a_3}} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{a_3}} \left(\frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{b_3}{\sqrt{2a_3}}\right)\right). \quad (2.8)$$

Далі для середнього наробітку знаходимо границю:

$$T_1 = \lim_{a_3 \rightarrow 0} e^{\frac{b_3^2}{4a_3}} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{a_3}} \left(\frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{b_3}{\sqrt{2a_3}}\right)\right).$$

Отримаємо:

$$T_1 = \frac{1}{b_3}.$$

Інтенсивність відмов відновлювального об'єкта.

Нехай після наробітку τ об'єкт піддається повному відновленню. У цьому випадку інтенсивність відмов – періодична функція з періодом τ і її можна буде описати наступним чином [94]:

$$\lambda(t; \tau) = \lambda\left(t - \tau \cdot \left[\frac{t}{\tau}\right]\right), \quad (2.9)$$

де $\left[\frac{t}{\tau}\right]$ – ціла частина відношення $\frac{t}{\tau}$.

У цьому випадку ймовірність безвідмовної роботи визначитися за формулою:

$$P(t; \tau) = e^{-\int_0^t \lambda(x; \tau) dx}.$$

Якщо замість $\lambda(x; \tau)$ підставити (2.9), отримаємо:

$$P(t; \tau) = e^{-\left(\left[\frac{t}{\tau}\right]\Lambda(\tau) + \Lambda\left(t - \tau \cdot \left[\frac{t}{\tau}\right]\right)\right)}, \quad (2.10)$$

де

$$\Lambda(t) = \int_0^t \lambda(x) dx.$$

Підставивши (2.10) в (2.6), для середнього наробітку до першої відмови маємо:

$$T_1(\tau) = \frac{\int_0^{\tau} e^{-\Lambda(t)} dt}{1 - e^{-\Lambda(\tau)}}. \quad (2.11)$$

В якості ілюстрації розглянемо приклад, коли $a_1 = 0.7$, $b_1 = 1$, $t_1 = 5$, $b_2 = 0.2$, $t_2 = 7$, $a_3 = 0.3$, $b_3 = 1.5$.

Чисельні розрахунки будемо виконувати в середовищі Maple [95]. Використовуючи функцію Хевісайда [96], інтенсивність відмов представимо у вигляді:

$$\lambda := t \rightarrow (2 a_1 (t_1 - t) + b_1) \text{Heaviside}(t_1 - t) + b_2 (-\text{Heaviside}(t_1 - t) + \text{Heaviside}(t_2 - t)) + (2 a_3 (t - t_2) + b_3) \text{Heaviside}(t - t_2)$$

Для розглянутого прикладу графік представлений на рисунку 2.4.

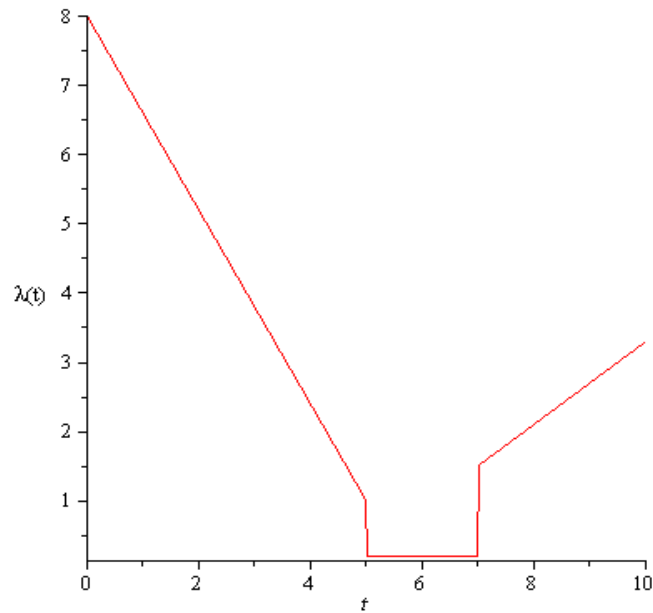


Рисунок 2.4 – Залежність інтенсивності відмов від напрацювання

Інтеграл від $\lambda(t)$, позначений через $\Lambda(t)$ для даного прикладу представлений на рис.2.5.

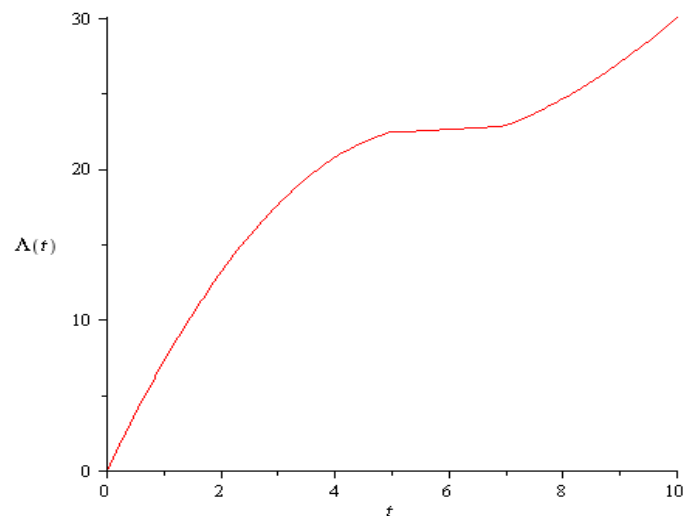


Рис 2.5 – Графік залежності $\Lambda(t)$ від напрацювання

Якщо з періодом по наробітку τ будемо виконувати повне відновлення, то середнє напрацювання до відмови визначається за формулою (2.11), а графік $T_1(\tau)$ для даного прикладу представлений на рисунку 2.6.

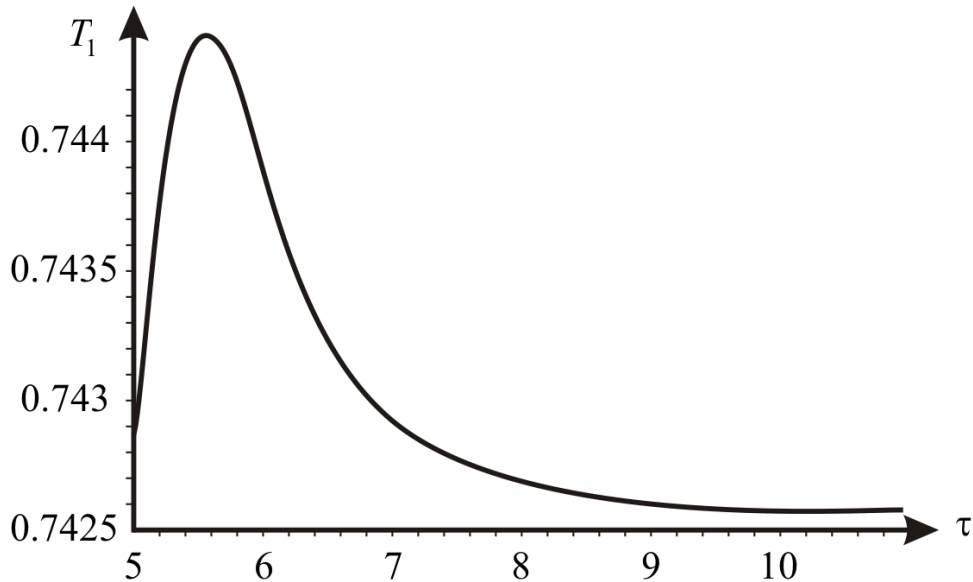


Рисунок 2.6 – Залежність напрацювання до першої відмови

Як впливає з графіка, напрацювання до першої відмови досягає максимального значення при $\tau = 5.97$ і дорівнює $T_1(\tau) = 0.74445$. При подальшому збільшенні напрацювання τ до першої відмови зменшується і при $\tau > 9$ користь від проведення подібних заходів практично не відчувається так $T_1 \approx 0.7425$, що практично збігається з напрацюванням, обчисленим за формулою (2.7).

Таким чином, роботи щодо відновлення необхідно проводити з періодичністю не менш ніж $\tau = 5.97$. Якщо зменшити цей період, то це призведе к погіршенню характеристик надійності.

2.2. Математична модель процесу відновлення та моделювання ремонтного впливу

Розглянута λ -характеристика описує ймовірні властивості об'єкта до першої відмови. Так як технічний об'єкт відновлюваний, то після першої відмови та після відновлення у нього λ -характеристика в загальному випадку буде відмінною від λ -характеристики нового технічного об'єкта.

Нехай величина $S_n(t)$ означає, що за напрацювання t технічний об'єкт мав n відмов.

Графічно даний процес показано на рисунку 2.7 [97].

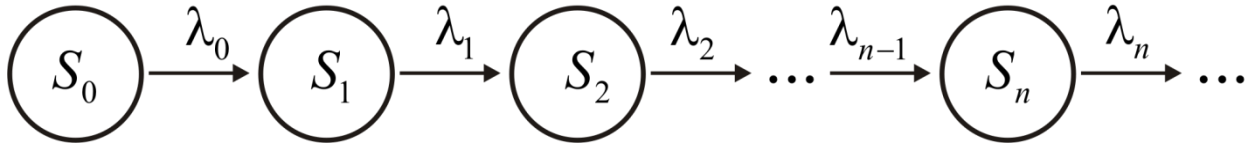


Рисунок 2.7 – Граф можливих станів і переходів відновлюваного технічного об'єкта

Позначимо через $P_n(t)$ ймовірність того, що за напрацювання t об'єкт мав n відмов, тобто, що при наробітку t об'єкт знаходиться в стані $S_n(t)$.

Для даних ймовірностей отримуємо наступну систему диференціальних рівнянь [98]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_0}{dt} = -\lambda_0 P_0 \\ \frac{dP_1}{dt} = -\lambda_1 P_1 + \lambda_0 P_0 \\ \dots \\ \frac{dP_n}{dt} = -\lambda_n P_n + \lambda_{n-1} P_{n-1} \\ \dots \end{array} \right. , \quad (2.12)$$

з початковими умовами:

$$P_0(0) = 1; \quad P_n(0) = 0; \quad n \geq 1. \quad (2.13)$$

Середнє число відновлень $H(t)$ за напрацювання t визначається за формулою:

$$H(t) = \sum_{n=0}^{\infty} n P_n(t). \quad (2.14)$$

Продиференціюємо (2.14) по t та підставимо замість $P'_n(t)$ праві частини системи (2.12):

$$\frac{dH}{dt} = \sum_{n=0}^{\infty} n (-\lambda_n P_n + \lambda_{n-1} P_{n-1}).$$

Після перетворень:

$$\frac{dH}{dt} = \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_n P_n. \quad (2.15)$$

Співвідношення (2.15) дозволяє визначати $H(t)$ через інтенсивності $\lambda_n(t)$ і розв'язання системи (2.12) - (2.13).

Вперше цю задачу розглянув В. Феллер, в припущенні, що відновлення після відмови повне, тоді з (2.15) маємо:

$$\begin{aligned} \frac{dH}{dt} &= \lambda(t), \\ H(t) &= \int_0^t \lambda(x) dx. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Коли після відмови відновлення не є повним, функція $\lambda_n(t)$ розглядається не тільки як функція від наробітку, а й від номера відмови n .

Для прикладу розглянемо відмови електродвигунів електровоза з причини виникнення кругових вогнів [93].

Апроксимуємо $\lambda_n(t)$ наступною залежністю:

$$\lambda_n(t) = a + bt + cn.$$

Початкова умова:

$$H(0) = 0.$$

Вирішуючи дане рівняння, з урахуванням початкової умови отримаємо:

$$H(t) = \left(\frac{a}{c} + \frac{b}{c^2} \right) (e^{ct} - 1) - \frac{b}{c} t. \quad (2.17)$$

Параметри в цій залежності визначалися за методом найменших квадратів і автори [66] їм надали наступні характеристики:

a – характеризує вплив на надійність техніки виготовлення двигунів;

b – враховує старіння елементів в залежності від пробігу;

c – визначає зміни в надійності двигунів через наслідки, які залишилися після усунення відмови.

Незважаючи на досить хороший опис по (2.16) числа відмов (кругових вогнів), виникає необхідність побудови математичної моделі ремонтного впливу на показники надійності і, в першу чергу, на λ -характеристику.

Коли після відмови відбувається відновлення технічного об'єкта в повному об'ємі (або заміна його на новий), то взаємозв'язок між $F(t)$ і $H(t)$ описується класичним рівнянням відновлення [92]:

$$H(t) = F(t) + \int_0^t H(t-x)dF(x), \quad (2.18)$$

де

$$F(x) = 1 - \exp\left\{-\int_0^x \lambda(x)dx\right\}.$$

Рівняння (2.18) дозволяє по $H(t)$ знаходити $F(t)$ і, відповідно, $\lambda(t)$.

На практиці $H(t)$ часто наближають поліноміальною залежністю:

$$H(t) = \sum_{k=1}^{\infty} b_k t^k.$$

Тоді λ -характеристику шукають у вигляді:

$$\lambda(t) = \sum_{k=1}^{\infty} k \alpha_k t^{k-1}.$$

Це дозволяє представити $F(t)$ наступним чином:

$$F(t) = 1 - \exp\left\{-\sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k t^k\right\}.$$

Розкладаючи $F(t)$ в ряд по t отримаємо:

$$F(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k t^k.$$

А зв'язок між α_k і a_k встановлюється співвідношенням:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= a_1, \\ \alpha_k &= a_k + \sum_{v=1}^{k-1} \left(1 - \frac{v}{k}\right) \alpha_{k-v} a_v, \quad k \geq 2. \end{aligned} \quad (2.19)$$

З урахуванням (2.19), зв'язок між a_k і b_k в силу (2.17) буде наступним:

$$a_1 = b_1,$$

$$a_k = b_k - \sum_{v=1}^{k-1} \left(\frac{b_v a_{k-v}}{c_k^v} \right), \quad k \geq 2. \quad (2.20)$$

Часто використовують H -характеристику у вигляді:

$$H(t) = b_1 t + b_2 t^2.$$

Тоді співвідношення (2.20) буде наступним:

$$\begin{aligned} a_1 &= b_1, \\ a_2 &= b_2 - \frac{b_1^2}{2}, \\ a_3 &= -\frac{1}{3} \left(2b_1 b_2 - \frac{b_1^3}{2} \right), \\ a_4 &= -\frac{b_2^2}{4} + \frac{b_1^2 b_2}{4} - \frac{b_1^4}{24}, \\ &\text{і т.д.} \end{aligned}$$

За формулами (2.19) отримаємо:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= b_1, \\ \alpha_2 &= b_2, \\ \alpha_3 &= \frac{b_1 b_2}{3}, \\ \alpha_4 &= \frac{1}{3} \left(b_2^2 + \frac{b_1^2 b_2}{4} \right), \\ &\text{і т.д.} \end{aligned}$$

Отримаємо розклад для λ -характеристики:

$$\lambda(t) = b_1 + 2b_2 t + b_1 b_2 t^2 + \left(b_1^2 b_2 + \frac{4}{8} b_2^2 \right) t^3 + \dots$$

Цей розклад дозволяє обчислювати $\lambda(t)$ з заданою точністю.

Коли напрацювання невелике для оцінки λ -характеристики використовується наближена формула:

$$\lambda(t) \approx H'(t) = b_1 + 2b_2 t.$$

Моделювання ремонтного впливу

Розглядаємо технічний об'єкт, який складається з елементів, які позначимо наступним чином:

$$w_i, i = \overline{1, M},$$

де i – номер елементу;

M – загальна кількість елементів.

Кожен елемент з точки зору надійності характеризується інтенсивністю відмов $\lambda_i(t)$, які i визначають інтенсивність відмов об'єкта в цілому $\lambda(t)$. Зв'язок між інтенсивністю відмов об'єкта та інтенсивністю відмов його елементів може бути досить різним в залежності від конструкції технічного об'єкта.

Розглянемо випадок, коли відмова будь-якого елемента призводить до відмови об'єкта (за аналогією з послідовним з'єднанням елементів у електричних ланцюгах). Тоді зв'язок між $\lambda(t)$ и $\lambda_i(t)$, $i = \overline{1, M}$ визначається за формулою:

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^M \lambda_i(t). \quad (2.21)$$

В роботі [93] в якості математичної моделі ремонтного впливу запропоновано взяти оператор, дія якого визначена на невід'ємних функціях $\lambda(t) \in \Lambda$, де Λ – множина невід'ємних функцій, тобто:

$$\Lambda = \{ \lambda(t) : \lambda(t) \geq 0, t \geq 0 \}. \quad (2.22)$$

Напрацювання t по інженерно-фізичному змісту не може бути від'ємною величиною. А $\lambda(t)$ за своєю ймовірнісною природою є умовною ймовірністю ($\lambda(t)\Delta t + o(\Delta t)$) появи відмови на відрізку $[t, t + \Delta t]$ за умови, що на відрізку $[0, t]$ не було відмови, і також задовольняє вимогу невід'ємності.

Позначимо через V перелік елементів, які піддаються ремонту після напрацювання x , тоді після виконання ремонту в обсязі V , отримаємо нову

інтенсивність відмов технічного об'єкта, яку будемо позначати у вигляді $\lambda(t|\{x, V\})$, $t \geq x$.

При відновленні технічного об'єкта процес ремонту розбивається на деяку сукупність елементарних (найпростіших) технологічних операцій відповідно до обраної технології ремонту. Елементарна технологічна операція \mathcal{G} при цьому є первинним поняттям. Тобто, елементарна технологічна операція не визначається, а лише пояснюється.

Наприклад, при відновленні дизеля тепловоза в якості елементарних технологічних операцій можна приймати наступні дії:

- зняття навісного обладнання;
- очищення дизеля від забруднень;
- розбирання;
- заміну вкладишів, кілець;
- дефектацію;
- і т.д.

Ступінь поділу дій залежить від задачі, яка поставлена, та від прийнятої технології ремонту. Якщо обрати дуже дрібний поділ, то це призведе до необхідності збору великої кількості інформації, необхідної для розв'язання задачі. З одного боку це підвищить точність результатів. З іншого боку це істотно знизить швидкість розв'язання поставленої задачі.

Після прийняття рішення про ступінь поділу дій можна розглядати множину елементарних технологічних операцій:

$$\Theta = \{\mathcal{G}_j : j = \overline{1, N}\},$$

де \mathcal{G}_j – j -та елементарна технологічна операція;

N – загальна кількість елементарних технологічних операцій (залежить від ступеню розбиття, який був обраний).

Позначимо через V перелік елементів, які повинні бути відновлені, тоді цьому переліку можна зіставити $\Theta(V)$ – підмножину множини Θ . У практичному сенсі це є технологічний обсяг ремонту для відновлення.

Позначимо через A деякий набір підмножин множини Θ , який буде називатися системою обсягів ремонтів технічного об'єкта.

Математична модель відновлення визначається як відображення:

$$R_x^V : \Lambda \rightarrow \Lambda,$$

де V – перелік елементів, що піддаються відновленню, тобто $V \in A$;

x – напрацювання, після якого виконується ремонт в обсязі V .

Тобто, R_x^V – це математична модель ремонту, оператор, у якого область визначення Λ , область значень Λ .

Дане визначення оператора R_x^V достатньо загальне. Щоб був врахований вплив ремонтних впливів на надійність технічного об'єкта, необхідно накласти деякі вимоги (припущення). В роботі [67] ці припущення сформульовані у вигляді аксіом, які наводимо нижче.

Аксіома 1. Нехай $\mathcal{A}(\Theta)$ – це набір підмножин множини Θ . Причому $\mathcal{A}(\Theta)$ має бути алгеброю, якщо Θ кінцева множина, або σ -алгеброю в іншому випадку [92]. Дане припущення необхідно для забезпечення області визначення ремонтного впливу.

Надалі замість обсягу технологічних операцій $\Theta(V)$, необхідних для відновлення елементів з переліку V , будемо під обсягом відновлення розуміти множину V , а $\Theta(V)$ однозначно визначається технологією ремонту.

Позначимо через $\Omega = \{w_i : i = \overline{1, M}\}$ перелік всіх елементів, з яких складається технічний об'єкт. У цих позначеннях замість $\mathcal{A}(\Theta)$ вводимо $\mathcal{A}(\Omega)$ – множину підмножин множини Ω , і вимагаємо щоб $\mathcal{A}(\Omega)$ була алгеброю.

Аксіома 2.

$$R_x^\Omega \lambda(t) = \lambda(t - x),$$

при $t \geq x$.

У цій аксіомі відображена можливість повного відновлення технічного об'єкта. Стосовно до інженерній практиці останнє означає, що з певним ступенем точності оператор R_x^Ω можна приймати як математичну

модель капітального відновлення, а точніше – це модель повного відновлення технічного об'єкта.

Аксіома 3.

$$R_x^{V_2} \left(R_x^{V_1} \lambda(t) \right) = R_x^{V_1 \cup V_2} \lambda(t),$$

при $t \geq x$; $V_1, V_2 \in \mathcal{A}(\Omega)$.

Тобто, якщо після напрацювання x виконується ремонт в обсязі V_1 , а потім в обсязі V_2 , то такий ремонтний вплив з точки зору надійності еквівалентний ремонту в обсязі $V_1 \cup V_2$. Необхідно зауважити, що з точки зору витрат коштів і часу дані ремонтні впливи, як правило, не є еквівалентними.

Аксіома 4. Технічний об'єкт «пам'ятає», коли і в яких обсягах проводилися ремонтні впливи.

В математичному плані дане припущення може бути записано у вигляді:

$$R_{x_2}^{V_2} \left(R_{x_1}^{V_1} \lambda(t) \right) = \begin{cases} \lambda(t), & \text{— при } t < x_1; \\ \lambda(t | x_1, V_1), & \text{— при } x_1 \leq t < x_2; \\ \lambda(t | x_1, V_1, x_2, V_2), & \text{— при } t \geq x_2, \end{cases}$$

де $x_1 \leq x_2$.

Розглянемо приклад математичної моделі ремонтного впливу у вигляді оператора зсуву, тобто .:

$$R_x^V \lambda(t) = \lambda(t - \mu(V)x), \quad (2.23)$$

де $t \geq x$; $0 \leq \mu(V) \leq 1$

В силу аксіоми 2 маємо:

$$\mu(\Omega) = 1, \quad (2.24)$$

З аксіоми 3 отримаємо:

$$R_x^{V_2} R_x^{V_1} \lambda(t) = \lambda(t - \mu(V_1 \cup V_2)x).$$

Аксіома 4 тепер може бути записана у вигляді:

$$R_{x_2}^{V_2} \left(R_{x_1}^{V_1} \lambda(t) \right) = \begin{cases} \lambda(t), & \text{при } t < x_1, \\ \lambda(t - \mu(V_1)x_1), & \text{при } x_1 \leq t < x_2, \\ \lambda(t - \mu(V_1 \setminus V_2)x_1 - \mu(V_2)x_2), & \text{при } t \geq x_2. \end{cases}$$

Функцію множини $\mu(V)$ назвемо ступенем відновлення ремонтного впливу в обсязі V . Крім властивості (2.24) відзначимо, що має місце:

$$\mu(V_1 \setminus V_2) + \mu(V_2) = \mu(V_1 \cup V_2) \quad (2.25)$$

та

$$\mu(0) = \emptyset \quad (2.26)$$

При трьох ремонтних впливах аксіома 4 набуває наступного вигляду:

$$R_{x_3}^{V_3} \left(R_{x_2}^{V_2} \left(R_{x_1}^{V_1} \lambda(t) \right) \right) = \begin{cases} \lambda(t), & \text{при } t < x_1; \\ \lambda(t | x_1, V_1), & \text{при } x_1 \leq t < x_2; \\ \lambda(t | x_1, V_1, x_2, V_2), & \text{при } x_2 \leq t < x_3; \\ \lambda(t | x_1, V_1, x_2, V_2, x_3, V_3), & \text{при } t \geq x_3. \end{cases}$$

Через ступінь відновлення $\mu(V)$ маємо:

$$\lambda(t | x_1, V_1, x_2, V_2, x_3, V_3) = \lambda(t - \mu(V_1 \setminus (V_2 \cup V_3))x_1 - \mu(V_2 \setminus V_3)x_2 - \mu(V_3)x_3)$$

Тоді якщо $V_1 \in V_2 \cup V_3$, $V_2 \in V_3$, то отримаємо:

$$\lambda(t | x_1, V_1, x_2, V_2, x_3, V_3) = \lambda(t - \mu(V_3)x_3).$$

Останнє означає, що якщо останній обсяг ремонту містить в собі попередні обсяги, то після його проведення об'єкт буде «пам'ятати» тільки останній обсяг ремонту.

Таким чином, якщо маємо послідовність пар $\{x_i, V_i\}, i = \overline{1, k}$, то вважаючи, що $x_i \leq x_{i+1}$, отримаємо наступну формулу для розрахунку інтенсивності відмов:

$$\lambda(t | \{x_i, V_i\}, i = \overline{1, k}) = \left(\prod_{i=1}^k R_{x_i}^{V_i \setminus \bigcup_{v=i+1}^k V_v} \right) \lambda(t),$$

при $t \geq x_k$.

А якщо необхідно знати інтенсивність відмов при $x_v \leq t < x_{v+1}$, то отримаємо:

$$\lambda(t|\{x_i, V_i\}, i = \overline{1, v}) = \left(\prod_{i=1}^v R_{x_i}^{V_i \setminus \bigcup_{m=i+1}^v V_m} \right) \lambda(t).$$

Через ступінь відновлення $\mu(V)$ для моделей зсуву маємо:

$$\lambda(t|\{x_i, V_i\}, i = \overline{1, v}) = \lambda \left(t - \sum_{i=1}^k \mu \left(V_i \setminus \bigcup_{v=i+1}^k V_v \right) x_i \right) \text{ при } t \geq x_k.$$

Отримані формули для оцінки ремонтних впливів дозволяють визначати їх вплив на надійність, як при плануванні системи утримання, так і після відмов.

2.3. Поняття залежної відмови. Моделі розповсюдження залежних відмов по системі

У Державному стандарті України ДСТУ 2860-94 «Надійність техніки» наступне визначення терміну «залежна відмова»: залежна відмова – це відмова об'єкта, спричинена прямо чи непрямо відмовою або несправністю іншого об'єкта [34].

У складній технічній системі, якою є засоби транспорту, залежні відмови розглядаються з точки зору впливу відмови одного елемента на надійність залежних від нього елементів. Тобто відмова одного елемента може призводити до порушення працездатності інших елементів системи. Іншими словами, якщо відмовив елемент, то йому можна поставити у відповідність деяку множину елементів, які при цьому повинні бути відновлені.

Дана множина – це результат деякого гіллястого процесу, в якому при відмові елемента можливі пошкодження пов'язаних з ним елементів, а ті, в свою чергу, можуть пошкодити інші і т.д.

Математичне моделювання гіллястих процесів вперше було розглянуто Гальтон і Ватсоном. Узагальнена модель Гальтона-Ватсона

розглянута в монографії Т.Харріса [67]. Її суть ілюструється наступною задачею.

Нехай з ймовірностями p_0, p_1, p_2, \dots батько має відповідно 0, 1, 2, ... нащадків. З тими ж ймовірностями у кожного з нащадків будуть свої нащадки і т.д. Тоді виникає задача визначення ймовірності того, що прізвище (рід) зникне.

Для вивчення подібних процесів приймають наступні припущення:

1. Якщо чисельність n -го покоління (хвилі) відома, то імовірнісний закон, що визначає наступні покоління, не залежить від чисельності поколінь, що передують n -му. Тобто, якщо Z_0, Z_1, Z_2, \dots – чисельності поколінь, то вони утворюють ланцюг Маркова, а перехідні ймовірності цього кола не змінюються в часі.

2. Різні частинки одного покоління не взаємодіють одна з одною, число нащадків однієї частинки не залежить від кількості існуючих на даний момент частинок (властивість ланцюга Маркова).

Основним математичним апаратом для вивчення подібних гіллястих випадкових процесів є апарат виробничих функцій.

Виробничу функцію задаємо у наступному вигляді:

$$f(s) = \sum_{k=0}^{\infty} p_k s^k, \quad |s| < 1,$$

де s – комплексне число.

Далі визначаємо ітераційний процес:

$$f_0(s) = s;$$

$$f_1(s) = f(s);$$

$$f_{n+1}(s) = f(f_n(s)), \quad n = 1, 2, \dots$$

Даний ітераційний процес має наступну важливу властивість:

$$f_{n+m}(s) = f_n(f_m(s)), \quad m, n = 0, 1, 2, \dots,$$

зокрема:

$$f_{n+1}(s) = f_n(f(s)).$$

Тобто, значення функції на $n+1$ -й ітерації залежить від попередньої ітерації.

Один з основних результатів теорії гіллястих процесів міститься в теоремі, яка доводить наступне твердження: виробничою функцією випадкової величини Z_n є n -та ітерація $f_n(s)$.

Необхідно відмітити, що на даний час більшість робіт за даним напрямком засновано на припущенні, що частинки еволюціонують незалежно одна від одної. У [98] зауважується, що є ряд робіт, в яких вирішуються окремі задачі для процесів з істотною взаємодією частинок, але загальна математична теорія таких процесів поки що не побудована.

Моделювання розповсюдження залежних відмов по системі

Гіллясті випадкові процеси надають ідею «поколінь» для вивчення розповсюдження залежних відмов по системі.

Перед початком моделювання визначаємо множини залежних елементів для кожного елементу системи:

$$A = [V_1, V_2, \dots, V_n],$$

де V_i – перелік залежних елементів, які будуть пошкоджені при відмові w_i елемента («перше покоління відмов»):

$$V_i = V_i(1) = \{x_k, k = 1, m\}.$$

Далі, на другому етапі («друге покоління») виходять з ладу елементи, які пов'язані з елементами «першого покоління»:

$$V_i(2) = \bigcup_{j \in V_i(1)} V_j(1). \quad (2.27)$$

Даний процес буде тривати поки множина чергового «покоління» відмов не стане порожньою:

$$V_i(n) = \bigcup_{j \in V_i(n-1)} V_j(1) = \emptyset.$$

Тобто, при вивченні розповсюдження залежних відмов елементів системи ми приходимо до рекурентних співвідношень на множині.

Загальна множина пошкоджень у результаті виникнення залежних відмов визначається як об'єднання усіх «поколінь» відмов.

$$V(w_i) = \bigcup_{k=1}^n V_i(k). \quad (2.28)$$

При ймовірнісному підході, коли відмова елементу може спричинити, а може і не спричинити відмови залежних від нього елементів, кожному елементу ставиться у відповідність множина наступних пар («перше покоління» відмов):

$$V_i(1) = \{ \langle x_k, p_k \rangle, k = 1, m \}.$$

Друге «покоління» відмов знаходимо наступним чином:

$$V_i(2) = \bigcup_{j \in V_i(1)} p_j V_j(1).$$

І у загальному вигляді n -те покоління відмов:

$$V_i(n) = \bigcup_{j \in V_i(n-1)} p_{j-1} V_j(1). \quad (2.29)$$

2.3.1. Розповсюдження залежних відмов по технічній системі.

Розглянемо на прикладі розповсюдження залежних відмов по технічній системі [99]. Нехай технічний об'єкт складається з 10 елементів. Відмова кожного елементу з необхідністю призводить до відмов залежних елементів. Множини залежних елементів задані у вигляді наступного масиву:

$$A = [\{3\}, \{5, 7\}, \{5, 6, 7\}, \{2\}, \{4\}, \{\}, \{8\}, \{\}, \{1\}, \{\}].$$

У цьому масиві перший елемент – $\{3\}$ – означає, що відмова першого елементу приведе до відмови третього елементу. Другий елемент – $\{5, 7\}$ – означає, що відмова другого елементу приведе до відмови множини елементів, а саме п'ятого та сьомого. Відмови шостого, восьмого та десятого елементів наслідків (залежних відмов інших елементів) не мають.

Встановимо загальні наслідки для об'єкту (технічної системи) при пошкодженні того чи іншого елемента, якщо відомі первинні хвилі відмов.

Для першого елемента системи хвилі відмов показані на рисунку 2.1:

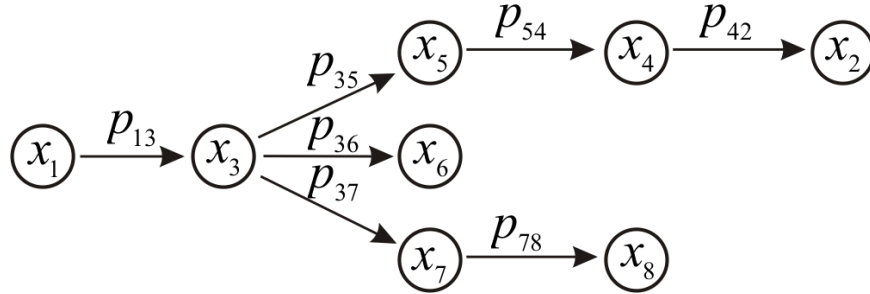


Рисунок 2.8 – Хвилі залежних відмов при відмові 1-го елемента

Для другого елемента хвилі відмов розподілилися наступним чином:

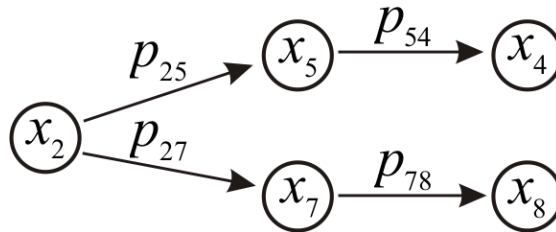


Рисунок 2.9 – Хвилі залежних відмов при відмові 2-го елемента

Хвилі відмов третього елемента:

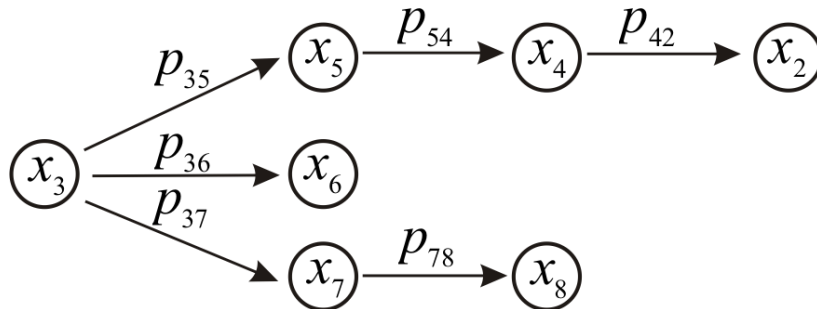


Рисунок 2.10 – Хвилі залежних відмов при відмові 3-го елемента

Хвилі відмов четвертого елемента:

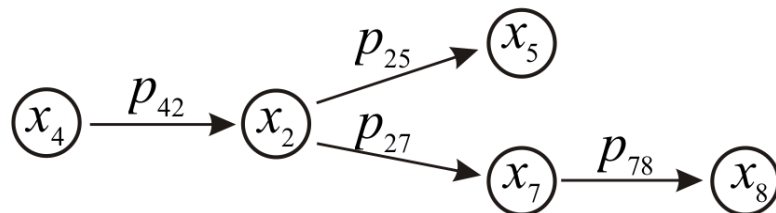


Рисунок 2.11 – Хвилі залежних відмов при відмові 4-го елемента

Хвилі відмов п'ятого елемента:

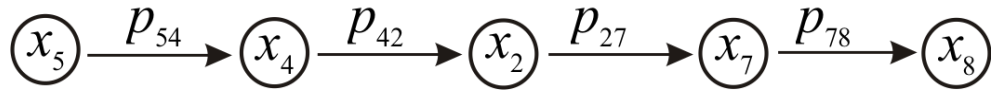


Рисунок 2.12 – Хвилі залежних відмов при відмові 5-го елемента
Хвилі відмов сьомого елемента:

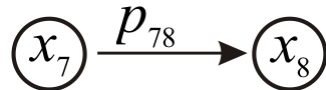


Рисунок 2.13 – Хвилі залежних відмов при відмові 7-го елемента
Хвилі відмов дев'ятого елемента:

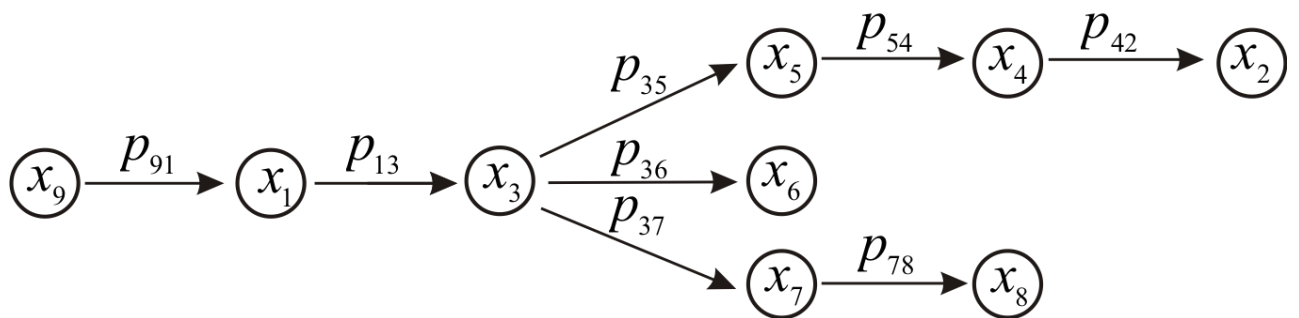


Рисунок 2.14 – Хвилі залежних відмов при відмові 9-го елемента
Підсумкові наслідки відмов елементів запишемо у таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Наслідки відмов елементів

Номер початкового елемента	Кількість хвиль відмов	Сумарні наслідки відмов
1	4	{1,2,3,4,5,6,7,8}
2	2	{2,4,5,7,8}
3	3	{2,3,4,5,6,7,8}
4	3	{2,4,5,7,8}
5	4	{2,4,5,7,8}
6	0	{6}
7	1	{7,8}
8	0	{8}
9	5	{1,2,3,4,5,6,7,8,9}
10	0	{10}

2.3.2. Моделі залежних відмов

Узагальнимо модель розповсюдження залежних відмов з попереднього прикладу та розглянемо два підходи – детермінований та ймовірнісний.

Нехай технічна система складається з M елементів. Для кожного елемента відомі $\lambda_i(t)$ – інтенсивність його відмов та Ω_i – множина залежних елементів (тобто перша хвиля відмов).

Ймовірність відмови i -го елемента визначається через ξ зі співвідношення:

$$1 - \exp\left\{-\int_0^t \lambda_i(x) dx\right\} = \xi, \quad (2.30)$$

де ξ – реалізація випадкової величини рівномірно розподіленою на проміжку $[0;1]$.

Час виникнення відмови i -го елемента визначається з наступного рівняння:

$$\int_0^t \lambda_i(x) dx = -\ln(1 - \xi). \quad (2.31)$$

Розглянемо об'єкт з лінійною функцією $\lambda_i = a_i t_i$. Тоді момент настання відмови i -го елемента (напрацювання до відмови) знаходиться за формулою:

$$t_i = \sqrt{-\frac{2}{a_i} \ln(1 - \xi)}, \quad i = \overline{1, M}. \quad (2.32)$$

Для кожного елемента системи визначаємо момент виникнення відмови:

$$\{t_1, t_2, \dots, t_M\}.$$

Знаходимо елемент k , який відмовив першим:

$$t_k = \min\{t_1, t_2, \dots, t_M\}.$$

Множина залежних елементів Ω_k для k -го елемента – це множина, елементів, які виходять з ладу при відмові даного елемента.

Для знаходження витрат на усунення наслідків залежних відмов необхідно також враховувати вплив технології ремонту на витрати ресурсів. У роботі [25] пропонується цей вплив враховувати за допомогою технологіко-економічної карти (ТЕК) – спеціальної схеми, де вказано перелік елементів, із яких складається локомотив (або вузол локомотива), перелік елементарних технологічних операцій при ремонті на даній ремонтній базі, витрати кожного ресурсу при виконанні кожної елементарної технологічної операції.

Згідно технологіко-економічній карті ремонту (ТЕК) визначаємо набір елементарних технологічних операцій, необхідних для відновлення кожного елемента, які входять в перелік. Знаючи вартість проведення кожної операції, визначаємо загальні витрати на непланові ремонти з урахуванням технології ремонту:

$$C_{\text{неп}}(\tau) = \sum_{i=1}^M \left(\sum_{j=1}^J c_j T_{ij} \right) N_i(\tau), \quad (2.33)$$

де c_j – витрати на j -у елементарну операцію;

$$T_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } j\text{-а операція приймає участь} \\ & \text{при відновленні } i\text{-го елемента;} \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases}$$

J – кількість елементарних операцій;

M – кількість елементів в системі;

τ – заданий час повного відновлення технічної системи (локомотива).

Час повного відновлення τ у моделі задається в умовних одиницях, від 0,5 до 6. Для різних τ отримуємо різні значення витрат. За отриманими точкам визначаємо функцію $C_{\text{неп}}(\tau)$ – середні витрати на непланові ремонти.

Для побудови раціональної системи утримання необхідно вирішити задачу:

$$\frac{C_n}{\tau} + C_{\text{неп}} \tau \rightarrow \min,$$

де C_n – витрати на планові відновлення;

$C_{неп}$ – витрати на непланові відновлення.

У підсумку отримуємо оптимальний час (періодичність) повного відновлення технічної системи:

$$\tau = \sqrt{\frac{C_n}{C_{неп}}}.$$

Детермінована модель залежних відмов в технічній системі.

Дана модель передбачає при відмові k -го елементу гарантовану відмову усіх залежних від нього елементів. Тобто після відмови k -го елементу необхідно відновлювати множину $\{k, \Omega_k\}$. Напрацювання до відмови для кожного елементу множини $\{k, \Omega_k\}$ буде дорівнювати напрацюванню до відмови k -го елементу:

$$\tilde{t}_{i \in \Omega_k} = t_k.$$

Далі повторно визначаємо за формулою (2.32) напрацювання до відмови для усіх елементів системи. Знаходимо перший елемент, який відмовив та множину залежних від нього елементів. Час до їх відновлення (напрацювання до відмови) додаємо до наробітку до відмови, знайденому на попередньому етапі.

Продовжуємо моделювання до тих пір, поки виконується умова:

$$t_k < \tau,$$

де τ – час до повного відновлення системи.

У підсумку за час τ для кожного i -го елементу отримаємо кількість його відмов N_i (залежних та незалежних).

Далі формуємо множину $\{N_1, N_2, \dots, N_M\}$ – кількість відмов (відновлень) всіх елементів за час τ . Дану множину можна використовувати при побудові раціональної системи утримання при розрахунках витрат на непланові ремонти.

Ймовірнісна модель залежних відмов в технічній системі

Ймовірнісна модель передбачає деяку можливість (ймовірність) відмови елементів з множини Ω_k (залежних елементів) при відмові k -го елемента. Тобто, кожному елементу ставиться у відповідність множина:

$$\{p_k, \Omega_k\},$$

де p_k – ймовірність відмови k -го елемента;

Ω_k – множина залежних елементів.

Як і в випадку детермінованої моделі, продовжуємо моделювання до тих пір, поки сумарне напрацювання до відмови одного з елементів не перевищить заданого часу до повного відновлення системи.

Розглянемо більш детально роботу даних моделей на прикладі технічної системи з п.2.3.1.

Для кожного елемента системи задані наступні характеристики: інтенсивність відмов елемента, множина залежних відмов, вартість відновлення елемента з урахуванням залежних відмов, ймовірності залежних відмов. Модельні значення параметрів наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Характеристики елементів системи

i	a_i	Ω_i	$\sum_{j=1}^J c_j T_{ij}$	p_i
1	0.1	{3}	2	0.6
2	0.2	{5,7}	3	0.3
3	0.3	{5,6,7}	1	0.7
4	0.4	{2}	4	0.1
5	0.5	{4}	2	0.2
6	0.6	{}	4	0.2
7	0.5	{8}	3	0.5
8	0.4	{}	5	0.4
9	0.3	{1}	2	0.6
10	0.2	{}	1	0.4

де a_i – величина, що характеризує інтенсивність відмов даного елемента;

Ω_i – множина залежних елементів;

p_i – ймовірність пошкодження елементів з множини Ω_i при відмові i -го елемента;

$\sum_{j=1}^J c_j T_{ij}$ – вартість відновлення i -го елемента з урахуванням технології ремонту.

Моделювання залежних відмов за допомогою детермінованої моделі.

При відмові i -й елемент з необхідністю пошкоджує елементи з множини Ω_i . В даному випадку ймовірність $p_i = 1$, $i = \overline{1, M}$. Так, наприклад, відмова першого елемента приведе до відмови третього. А відмова третього – до відмов п'ятого, шостого та сьомого елементів.

Проводимо моделювання та знаходимо за формулою (2.32) напрацювання до відмови для кожного елемента системи. Це напрацювання – випадкова величина, яка залежить від інтенсивності відмов елемента.

За результатами моделювання отримали наступні значення для кожного елемента:

Для першого елемента напрацювання до відмови t склало $7.11 \cdot 10^3$ год. Для другого елемента напрацювання до відмови t склало $2.74 \cdot 10^3$ год. Для третього елемента напрацювання до відмови t склало $4.47 \cdot 10^3$ год. Для четвертого елемента напрацювання до відмови t склало $0.506 \cdot 10^3$ год. Для п'ятого елемента напрацювання до відмови t склало $3.74 \cdot 10^3$ год. Для шостого елемента напрацювання до відмови t склало $1.7 \cdot 10^3$ год. Для сьомого елемента напрацювання до відмови t склало $1.5 \cdot 10^3$ год. Для восьмого елемента напрацювання до відмови t склало $4.8 \cdot 10^3$ год. Для дев'ятого елемента напрацювання до відмови t склало $1.75 \cdot 10^3$ год. Для десятого елемента напрацювання до відмови t склало $3.38 \cdot 10^3$ год.

Обираємо елемент, який перший відмовив, а також залежні від нього елементи:

$$w_4, \Omega_4 = \{2\}.$$

Отримаємо напрацювання до першої відмови для елементів системи:

$$[0, 0.506, 0, 0.506, 0, 0, 0, 0, 0, 0].$$

Кількість відмов до даного часу:

$$N = [0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0].$$

Далі повторюємо процедуру визначення напрацювання до відмови. Наступним за результатами моделювання елементом, який перший відмовив, став елемент w_7 з напрацюванням до відмови $t_7 = 0.863$. З урахуванням залежної множини $\Omega_7 = \{8\}$ отримаємо масив напрацювань до відмов елементів:

$$[0, 0.506, 0, 0.506, 0, 0, 0.863, 0.863, 0, 0].$$

Та кількості відмов для кожного елементу:

$$N = [0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0].$$

На третьому випробуванні мінімальний час відмови був знов у сьомого елементу – $t_7 = 0.747$. Таким чином, напрацювання до відмови для елементів w_7 та w_8 склало $0.863 + 0.747 = 1.61$.

Тоді масив напрацювань до відмов приймає наступний вигляд:

$$[0, 0.506, 0, 0.506, 0, 0, 1.61, 1.61, 0, 0].$$

Кількості відмов:

$$N = [0, 1, 0, 1, 0, 0, 2, 2, 0, 0]$$

Продовжуємо моделювання до тих пір, поки сумарне напрацювання до відмови одного з елементів не перевищить заданого часу до повного відновлення технічної системи.

Моделювання залежних відмов за допомогою ймовірнісної моделі.

У даному випадку при моделюванні для кожного елементу враховуємо показник p_i – ймовірність відмови елементу w_i .

Наприклад, нехай при відмові елемента w_2 ймовірність пошкодження залежного елемента w_5 склала 0.14, що менше заданої $p_5 = 0.2$. Імовірність ушкодження залежного елемента w_7 склала 0.63 (що більше заданої $p_7 = 0.5$).

Таким чином, в даному випадку елемент w_5 залишився працездатним, а елементи w_2 і w_7 відмовили.

Знаючи витрати на відновлення кожного елемента (2.33) визначаємо функції витрат на відновлення систем з урахуванням залежних відмов їх елементів (дивись таблицю 2.3).

Таблиця 2.3 – Результати моделювання

Час до повного відновлення системи (τ)	Кількості відмов (N). Детермінована модель	Кількості відмов (N). Ймовірнісна модель
0,5	202	70
1	284	104
2	354	128
3	374	198
4	566	334
5	666	414
6	786	466

Функція витрат для детермінованої моделі:

$$C_1 = 145 + 103t.$$

Функція витрат для ймовірнісної моделі:

$$C_2 = 10.2 + 76.4t.$$

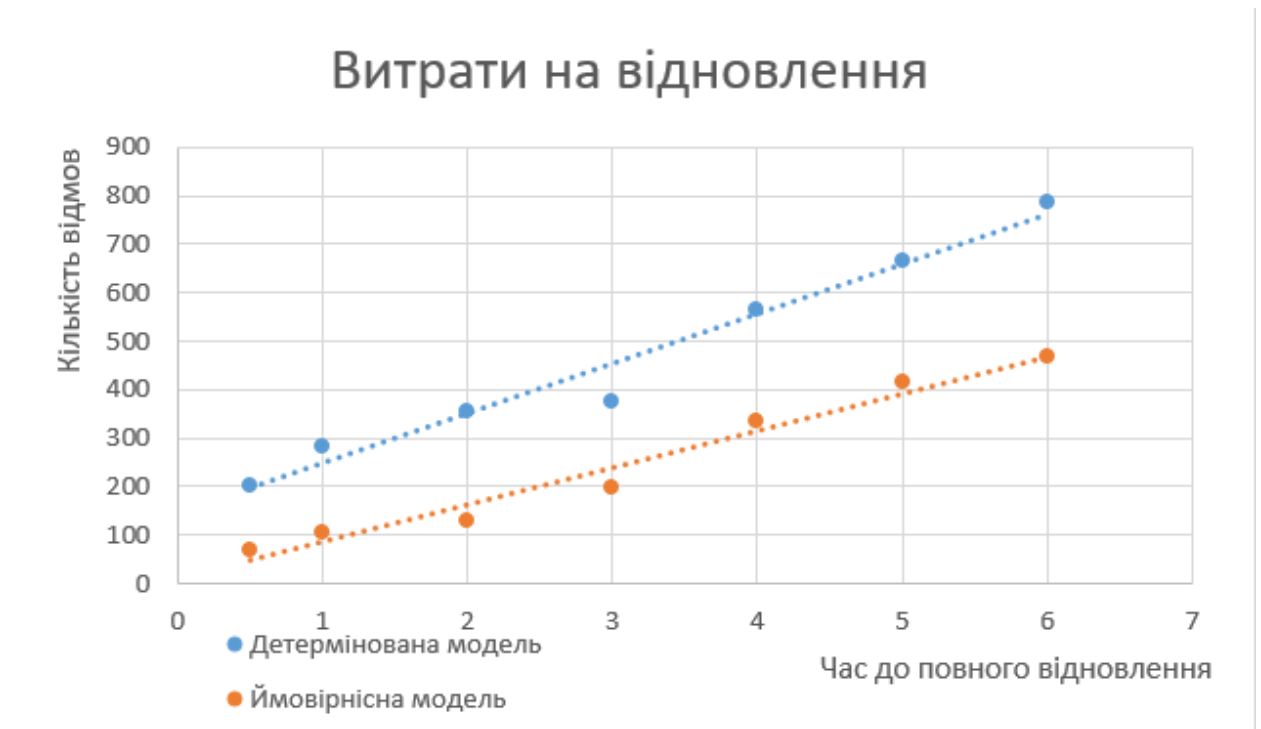


Рисунок 2.15 – Витрати на відновлення після відмов

Отримана залежність дозволяє оцінювати і прогнозувати витрати на непланові ремонти технічної системи.

На основі запропонованих моделей був розроблений програмний продукт у системі комп'ютерної алгебри Maple. Текст програми приведено у Додатку 1. На даний програмний продукт отримане Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №82306 від 17.10.2018.

2.4. Методика оцінки роботи локомотивного парку

Для аналізу ефективності експлуатації локомотивів на залізницях функціонує система показників, які характеризують роботу рухомого складу. Але існуючий порядок визначення впливу конкретного показника є недосконалим. Багато факторів, які впливають на результати використання локомотивного парку не враховуються або можливі випадки подвійного обліку. Тому виникає необхідність у розробці методики оцінки роботи локомотивного парку, яка на основі наявної статистичної інформації дозволить проводити оцінку і робити висновки щодо роботи локомотивного парку з заданою мірою інформативності. Дану методику доцільно за допомогою методів зниження розмірності даних.

Серед варіантів методів зниження розмірності [100, 101, 102] (метод головних компонент, факторний аналіз, екстремальне групування параметрів, відбір найбільш інформативних показників в моделях дискримінантного аналізу та моделях регресії та ін.) був обраний метод головних компонент як відповідний математичний апарат, що дозволяє провести аналіз існуючих показників, що характеризують виконану роботу та стан безпеки руху з необхідною мірою інформативності.

Переваги даного методу аналізу та прогнозування на відміну від, наприклад, класичного регресійного аналізу полягають у тому, що при останньому в модель намагаються включити максимально можливу кількість факторів, які часто характеризуються істотною корельованістю (мультилінійністю). Прогноз за такими змінними, як правило, буває не точним. Тому виникає задача про заміну вихідних взаємопов'язаних змінних сукупністю некорельованих параметрів. Ця задача вирішується саме за допомогою метода головних компонент.

Даний метод апроксимує n -розмірну множину спостережень до n -мірного еліпсоїда. Зниження розмірності відбувається шляхом проєкцій на піввісі цього еліпсоїда. Таким чином, зберігається найбільша кількість інформації. А піввісі одержаного еліпсоїда і будуть головними компонентами – новими, некорельованими між собою показниками.

Застосування даного методу при вирішенні задач оцінки роботи локомотивного господарства полягає у наступному.

Задаємо k -мірний вектор вихідних змінних (наприклад, показників, пов'язаних з безпекою руху):

$$X = (x_1, \dots, x_k). \quad (2.34)$$

Знаходимо лінійну комбінацію вихідних даних:

$$G = AX, \quad (2.35)$$

Матриця A має вигляд:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1k} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{i1} & \dots & a_{ik} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{k1} & \dots & a_{kk} \end{pmatrix}, \quad (2.36)$$

де a_{ik} – k -й елемент i -ого власного вектору матриці A .

Для кожного рядка матриці повинна виконуватись умова:

$$\bar{a}_i \bar{a}_i^T = 1. \quad (2.37)$$

Для того, щоб кожна наступна лінійна комбінація виявляла нові фактори, не пов'язані з попередніми, додаємо умову попарної кореляції головних компонент:

$$\text{corr}(g_i, g_j) = 0, \quad i = \overline{1, k}, \quad j = \overline{1, k} \quad (2.38)$$

Для обчислення першої головної компоненти розв'язуємо оптимізаційну задачу:

$$\begin{cases} D(g_1) \rightarrow \max_{a_1} \\ \bar{a}_1 \bar{a}_1^T = 1 \end{cases}, \quad (2.39)$$

де \bar{a}_1 – перший рядок матриці A , власний вектор, що відповідає найбільшому власному значенню матриці A .

Аналогічно знаходимо всі головні компоненти вектору G . В результаті отримуємо вектор нових змінних – головних компонент:

$$G = (g_1, \dots, g_k).$$

Для визначення значущої кількості головних компонент використовуємо умову:

$$\sum_{i=1}^p D(g_i) \leq \alpha, \quad p \leq k \quad (2.40)$$

де α – необхідний відсоток збереження вихідної інформації. Цей відсоток обирається відповідно до поставленої задачі. Особа, що приймає рішення, обирає необхідну точність при виконанні оцінки.

Для визначення єдиного інтегрального показника стану безпеки руху виконуються розрахунки з використанням методу аналізу ієрархій [102]. Вихідними даними для методу аналізу ієрархій є результатами роботи методу головних компонент (а саме, кількість головних компонент та їх дисперсії). Розрахунок з використанням методу ієрархій полягає в наступній послідовності дій.

1. Будується матриця попарних порівнянь. Кількість стовбців матриці – кількість головних компонент, отриманих на попередньому етапі. Елементи першої строки:

$$a_{11} = 1,$$

$$a_{12} = \frac{s_2}{s_1},$$

$$a_{13} = \frac{s_3}{s_1},$$

де s_i – дисперсія i -ї головної компоненти.

2. Визначаються ваги компонент:

$$w_i = \frac{a_{1n}}{a_{1i}}, \quad (2.41)$$

3. Визначаються відносні значення ваг:

$$w_i^* = \frac{w_i}{\sum_{k=1}^n w_k}, \quad (2.42)$$

4. Визначається індекс стану безпеки руху:

$$I_{\text{бр}} = \sum_{i=1}^n w_i^* g_i, \quad (2.43)$$

де g_i – i -та головна компонента.

За допомогою даної методики пропонується проводити оцінку виконання системи утримання локомотивного парку та оцінку стану безпеки руху у локомотивному господарстві. Реалізація даної методики приведена у

Розділі 4 з використанням статистичних даних Придніпровської залізниці та даних по локомотивному господарстві Укрзалізниці.

2.5. Висновки за розділом 2

1. Узагальнено поняття залежної відмови. Розглянуті особливості хвильового підходу при вивченні залежних відмов. Це дозволило застосовувати теорію множин при вивченні залежних відмов в технічних системах, та оцінювати їх вплив на надійність ТРС.

2. Розроблена методика визначення розповсюдження залежних відмов по технічній системі, яка дозволяє визначати сумарні пошкодження елементів технічної системи внаслідок виникнення залежних відмов окремих вузлів.

3. Вперше отримано рекурентне співвідношення на множинах, яке описує процес розповсюдження залежних відмов по технічній системі, що дозволяє визначати об'єми та вартості відновлень, які необхідно виконувати після виникнення залежних відмов.

4. Розроблена детермінована модель залежних відмов в технічній системі, яка дозволяє знаходити множини пошкоджених елементів у разі гарантованої відмови залежних елементів.

5. Розроблена ймовірнісна модель залежних відмов в технічній системі, яка дозволяє визначати множини пошкоджених елементів з урахуванням ймовірностей відмов залежних елементів. За допомогою цієї моделі визначають вузли локомотива, вартість усунення наслідків відмов яких з урахуванням залежних відмов значно перевищує номінальну вартість відновлення цього вузла.

6. Розроблено методику оцінки роботи локомотивного парку, яка дозволяє за допомогою методів зниження розмірностей даних на основі статистичних звітів виконувати аналіз роботи локомотивного парку.

7. Запропоновано використання єдиного інтегрального показника для оцінки роботи локомотивного господарства, який на відміну від

існуючих, дозволяє проводити оцінку роботи локомотивного парку на основі великої кількості показників з мінімальною втратою інформації.

РОЗДІЛ 3.

ПОБУДОВА РАЦІОНАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УТРИМАННЯ ЛОКОМОТИВІВ

3.1. Аналіз впливу системи утримання на витрати коштів та часу

Проведений у Розділі 1 огляд сучасних систем утримання технічних об'єктів залізничного транспорту показав, що основною тенденцією їх розвитку та удосконалення є поступовий перехід до комбінованих систем утримання, які об'єднують у собі елементи планово-попереджувальної та системи технічного огляду та ремонту за фактичним станом [103, 104].

Нехай технічний об'єкт складається з певної кількості елементів, які ми позначили як $\Omega = \{w_i, i = \overline{1, M}\}$.

Протягом напрацювання x об'єкт піддається ремонтним впливам в обсязі V , де V – деяка підмножина всіх елементів технічного об'єкта, яку необхідно відновлювати на даному ремонтному впливі:

$$V \subseteq \Omega.$$

Напрацювання між плановими ремонтами позначимо τ_i (дивись рисунок 3.1).

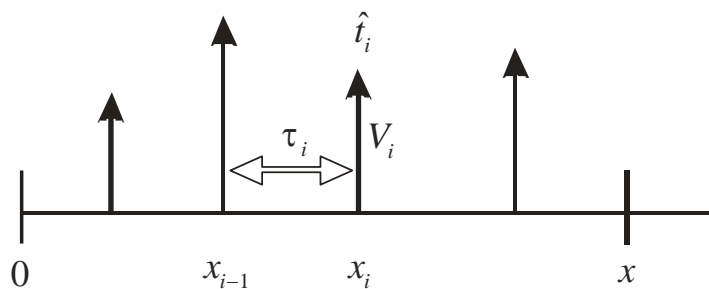


Рисунок 3.1 – Схематичне представлення системи утримання

Позначимо через γ наступну послідовність пар:

$$\gamma = [(\tau_1, V_1), (\tau_2, V_2), \dots, (\tau_i, V_i), \dots].$$

Цю послідовність будемо називати системою утримання технічного об'єкта. Вплив даної системи утримання на надійність локомотива можна оцінити за допомогою наступного співвідношення, що відображає залежність інтенсивності відмов від системи утримання:

$$\lambda(t|\gamma) = \left(\prod_{i=1}^{\infty} R_{x_i}^{V_i} \right) \lambda(t),$$

де $\lambda(t)$ – інтенсивність відмов (λ -характеристика технічного об'єкта);

$R_{x_i}^{V_i}$ – оператор відновлення:

$$R_x^V \lambda(t) = \begin{cases} \lambda(t), & \text{при } t < x; \\ \lambda(t|V, x), & \text{при } t \geq x; \end{cases}$$

де x_i – напрацювання, після якого виконується відновлення в обсязі V_i .

Якщо після напрацювання x виконується ремонт в обсязі V_1 , а потім в обсязі V_2 , то таке ремонтний вплив з точки зору надійності еквівалентний ремонту в обсязі $V_1 \cup V_2$.

Розглянемо дані ремонтні впливи з точки зору витрат коштів і часу. Для цього будемо використовувати поняття технолого-економічної карти (ТЕК) ремонту. В розділі 2.3.2 був приведений опис ТЕК. Для розв'язання поставленої задачі розглянемо технолого-економічну карту більш детально.

У загальному вигляді ТЕК є таблицею (дивись таблицю 3.1).

Таблиця 3.1 – Технолого- економічна карта

Θ_j	Θ_1	Θ_2	...	Θ_j	...	Θ_N
ω_i	T11	T12	...	T_{1j}	...	T_{1N}
ω_2	T21	T22	...	T_{2j}	...	T_{2N}
:	:	:	:	:	:	:
ω_i	Ti1	Ti2	...	T_{ij}	...	T_{iN}
:	:	:	:	:	:	:
ω_M	TM1	TM2	...	T_{Mj}	...	T_{MN}
C_j^1	C11	C12	...	C_j^1	...	C_N^1
C_j^2	C11	C22	...	C_j^2	...	C_N^2
...
C_j^v	C_{v1}^v	C_{v2}^v	...	C_j^v	...	C_N^v

У даній карті прийняті наступні позначення:

$\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M\}$ – перелік елементів, з яких складається локомотив (або якийсь із вузлів локомотива);

$\Xi = \{\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_N\}$ – перелік елементарних технологічних операцій при ремонті на даній ремонтній базі;

C_j^k – витрати k -го ресурсу при виконанні елементарної технологічної операції Θ_j ; $k = \overline{1, N}$;

ν – число видів ресурсів;

$T_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо операція } \Theta_j \text{ використовується при відновленні елемента } \omega_i; \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$

Витрати коштів розраховуються за формулою:

$$C^n(V) = \sum_{j=1}^N C_j^n \sigma \left(\sum_{i \in V} T_{ij} \right),$$

де N – число елементарних операцій;

$$\sigma(x) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x > 0 \\ 0, & \text{якщо } x \leq 0 \end{cases};$$

V – набір елементів, які підлягають відновленню;

Витрати часу на ремонт визначаються за формулою:

$$t^n(V) = \max_{i \in V} \sum_{j=1}^N t_j^n T_{ij}.$$

3.2. Визначення раціональної системи утримання з використанням векторної оптимізації

Витрати системи утримання тягового рухомого складу можна розділити на дві групи:

- витрати, пов'язані безпосередньо з проведенням планових ремонтів;
- витрати по усуненню відмов та їх наслідків (витрати на непланові ремонти).

Як правило, вирішується задача мінімізації сумарних витрат за час повного відновлення. В економіці дану задачу пропонуються вирішувати за

допомогою моделі Уілсона. Вона дозволяє знаходити оптимальний рівень запасів товарів, при якому сумарні витрати на закупівлю та збереження товару будуть мінімальними. Якщо адаптувати дану модель до вирішення задачі знаходження раціональної системи утримання локомотивів, отримаємо наступну картину.

Систему планових відновлень будемо називати раціональною якщо при її реалізації витрати всіх видів ресурсів мінімальні за умови, що показники надійності локомотива не гірше заданих [106].

Геометрична інтерпретація наведена на рисунку 3.2 [25].

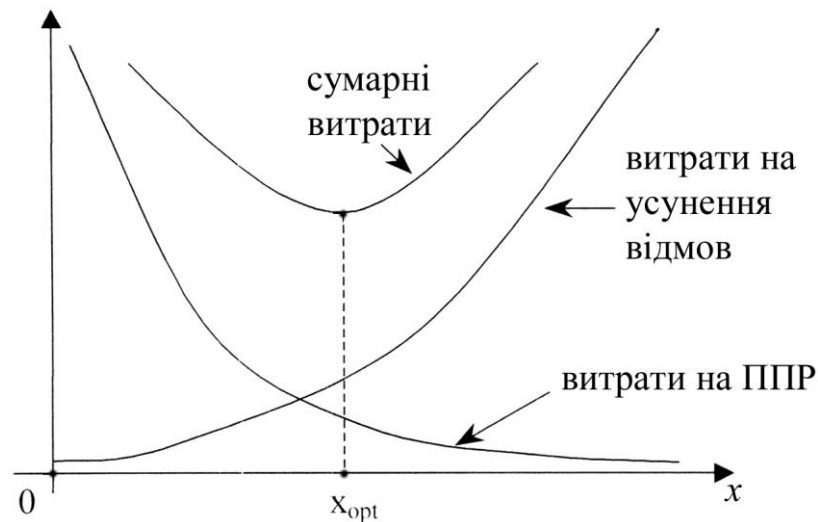


Рисунок 3.2 – Витрати системи утримання

Нехай $0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n < \tau$ є напрацювання, після яких виконуються ремонти тягового рухомого складу в обсягах відповідно V_1, V_2, \dots, V_n , тоді вважаємо, що система утримання задана, якщо при будь-якому $t \in [0, \tau]$ задано:

$$V_t = \begin{cases} V_i, & \text{если } t = t_i, i = \overline{1, n} \\ \emptyset, & \text{если } t \neq t_i, i = \overline{1, n}, \end{cases}$$

де V_i – перелік елементів, які підлягають відновленню.

Нехай $f_k(V_t)dt$ – витрати k -того ресурсу при напрацюванні на відрізьку при заданій системі утримання, тоді:

$$F[K] = \int_0^{\tau} f_k(V_t) dt$$

буде являти собою сумарні витрати k -того ресурсу на відрізку $[0, \tau]$. Якщо розглядається декілька видів ресурсів, тоді вектор:

$$F[V_t] = \begin{pmatrix} F_1[V_t] \\ F_2[V_t] \\ \dots \\ F_n[V_t] \end{pmatrix}$$

характеризує витрати всіх видів ресурсів при обраній системі утримання.

Якщо $\lambda(t)$ – інтенсивність відмов локомотива, то $\lambda(t \setminus V_t)$ – буде являти собою інтенсивність відмов при даній системі утримання.

Отримуємо наступну задачу. Необхідно знайти таке багатозначне відображення V_t , щоб:

$$F[V_t] \rightarrow \min$$

і виконувалася умова:

$$\lambda(t \setminus V_t) \leq \bar{\lambda}$$

для будь-якого $t \in [0, \tau]$.

В цій задачі $\bar{\lambda}$ – максимально допустима інтенсивність відмов, яка визначається із задач, які виконує локомотив в експлуатації.

Сформульована задача з математичної точки зору являє собою задачу векторної оптимізації.

3.3. Розв'язок задачі векторної оптимізації при побудові раціональної системи утримання

Системою утримання технічного об'єкта (локомотива) назвемо наступну послідовність пар [105]:

$$\gamma = [(t_1, V_1), (t_2, V_2), \dots, (t_i, V_i), \dots],$$

де t_i – напрацювання між відновленнями;

V_i – обсяг ремонтного впливу.

Система планових відновлень технічного об'єкта є заданою, якщо при будь-якому $t \in [0, T]$ задано:

$$V_t = \begin{cases} V_i, & \text{якщо } t = t_i, \quad i = \overline{1, n} \\ \emptyset, & \text{якщо } t \neq t_i, \quad i = \overline{1, n} \end{cases}$$

де $0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n < T$ – напрацювання, після яких виконуються ремонти у відповідних обсягах (V_1, V_2, \dots, V_n) .

Нехай $F_k(V_i)$ – витрати k -го ресурсу при реалізації обраної системи утримання на проміжку часу $[0, T]$.

Для знаходження раціональної системи утримання необхідно вирішувати задачу мінімізації функції-вектору всіх видів витрат:

$$\begin{pmatrix} F_1(V_i) \\ F_2(V_i) \\ \dots \\ F_n(V_i) \end{pmatrix} \rightarrow \min.$$

Система утримання характеризується наступними показниками:

- витрати коштів на матеріали та запчастини при ремонтних впливах $F_1(\gamma)$;
- витрати часу на проведення ремонтних впливів $F_2(\gamma)$;
- витрати екологічних ресурсів (витрати води, мастил, електроенергії, забруднення навколишнього середовища) при ремонтних впливах $F_3(\gamma)$.

Розглядаємо функції $F_1(\gamma)$, $F_2(\gamma)$, $F_3(\gamma)$ визначені на множині $\Gamma \subseteq E^2$.

Область визначення є:

$$\Gamma = \{\gamma(t, V) : t \geq 0, V \geq 0\}.$$

З інженерної точки зору множина Γ – це множина усіх варіантів систем утримання технічного об'єкта. Тобто, це множина усіх послідовностей пар (t, V) , що задають систему утримання ТРС.

Маємо задачу векторної оптимізації за трьома показниками:

$$\begin{pmatrix} F_1(\gamma) \\ F_2(\gamma) \\ F_3(\gamma) \end{pmatrix} \rightarrow \min, \quad (3.1)$$

де γ – обрана система утримання, набір пар:

$$\gamma = [(t_1, V_1), (t_2, V_2), \dots, (t_i, V_i), \dots, (t_n, V_n)],$$

де t_i – напрацювання між V_{i-1} та V_i відновленнями;

V_i – обсяг i -го ремонтного впливу (об'єм ремонту). З математичної точки зору він являє собою набір всіляких підмножин множини усіх деталей локомотива:

$$V_i \subseteq A(\Omega),$$

де Ω – множина усіх деталей локомотива:

$$\Omega = \{w_k, k = \overline{1, M}\},$$

де w_k – назва k -ї деталі локомотиву;

M – загальна кількість деталей локомотиву.

Розв'язок задачі (3.1) – це множина $\Gamma_* \subseteq \Gamma$, яка має наступні властивості:

1. Будь-яка система утримання з цієї множини $\forall \gamma \in \Gamma_*$ є ефективною;
2. Будь-які дві системи утримання з цієї множини $\forall \gamma_1, \gamma_2 \in \Gamma_*$ є незрівнянними між собою.

Система утримання $\forall \gamma \in \Gamma_*$ є ефективною, якщо знайдуться такі функції $F_i(\gamma)$ та $F_j(\gamma)$, що будь-яка зміна γ приведе до збільшенню однієї функції та зменшенню іншої.

Дві системи утримання γ_1 та γ_2 називаються незрівняними, якщо знайдуться дві функції $F_i(\gamma)$ та $F_j(\gamma)$ такі, що виконується одна з двох умов:

$$\left(\begin{array}{l} F_i(\gamma_1) \leq F_j(\gamma_1) \\ F_i(\gamma_2) \geq F_j(\gamma_2) \end{array} \right) \text{ або } \left(\begin{array}{l} F_i(\gamma_1) \geq F_j(\gamma_1) \\ F_i(\gamma_2) \leq F_j(\gamma_2) \end{array} \right),$$

причому, хоча б одна з нерівностей є строгою.

Розглянемо більш детально визначення функцій для задачі векторної оптимізації (3.1).

Нехай w_k – k -й елемент технічного об'єкта. Він характеризується трьома показниками:

$F_1(w_k)$ – вартість запасних частин, матеріалів та амортизаційні відрахування на відновлення елемента. Обчислюються за формулою:

$$F_1(w_k) = \sum_{j=1}^J c_j T_{kj},$$

де c_j – витрати на j -у елементарну операцію;

$$T_{kj} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } j\text{-а операція приймає участь} \\ & \text{при відновленні } k\text{-го елемента;} \\ 0, & \text{в протилежному випадку} \end{cases};$$

J – загальна кількість елементарних операцій. Перелік елементарних операцій, їх вартість та час виконання зберігаються у технологічно-економічних картах (ТЕК) локомотивів.

$F_2(w_k)$ – витрати, пов'язані з оплатою праці, які супроводжують відновлення k -го елемента.

$$F_2(w_k) = t^*(w_k) \cdot \bar{c} \cdot p,$$

де \bar{c} – годинна тарифна ставка;

p – кількість робітників, необхідна для відновлення k -го елемента.

$t^*(w_k)$ – час відновлення k -го елемента.

Час відновлення k -го елемента знаходиться за формулою:

$$t^*(w_k) = \sum_{j=1}^J t_j T_{kj},$$

де t_j – тривалість j -ї елементарної операції.

$F_3(w_k)$ – витрати екологічних ресурсів, що супроводжують відновлення k -го елемента (витрати води, мастил, енергоресурсів та екологічні збори):

$$F_3(w_k) = \sum_{m=1}^M \left(c_m \cdot \sum_{j=1}^J v_{mj} T_{kj} \right),$$

де M – кількість екологічних ресурсів, які витрачаються при відновленні k -го елемента;

c_m – вартість одиниці m -го ресурсу;

v_{mj} – об'єм m -го ресурсу, який витрачається на j -у елементарну операцію.

Визначаємо фінансові витрати системи утримання:

$$F_1(\gamma) = \sum_{i=1}^n F_1(V_i),$$

де $F_1(V_i)$ – витрати на запчастини та матеріали на ремонт в обсязі V_i :

$$F_1(V_i) = \sum_{k \in V_i} F_1(w_k).$$

Таким чином:

$$F_1(\gamma) = \sum_{i=1}^n \sum_{k \in V_i} F_1(w_k),$$

$$F_1(\gamma) = \sum_{i=1}^n \sum_{k \in V_i} \sum_{j=1}^J c_j T_{kj}.$$

Соціальні витрати системи утримання:

$$F_2(\gamma) = \sum_{i=1}^n F_2(V_i).$$

Для визначення потрібної чисельності робочої сили на ремонт локомотивів встановлюються середні норми трудомісткості технічних обслуговувань і ремонтів в чол/год.

$$F_2(V_i) = \sum_{i=1}^n \sum_{k \in V_i} \left[\left(\sum_{j=1}^J t_j T_{kj} \right) \cdot \bar{c} \right].$$

Екологічні витрати системи утримання включають в себе витрати на воду, електроенергію, паливо та ін.:

$$F_3(\gamma) = \sum_{i=1}^n F_3(V_i),$$

де екологічні витрати в обсязі V_i знаходяться за формулою:

$$F_3(V_i) = \sum_{k \in V_i} F_3(w_k).$$

Таким чином:

$$F_3(\gamma) = \sum_{i=1}^n \sum_{k \in V_i} F_3(w_k),$$

$$F_3(w_k) = \sum_{i=1}^n \sum_{k \in V_i} \sum_{m=1}^M \left(c_m \cdot \sum_{j=1}^J v_{mj} T_{kj} \right).$$

Задача векторної оптимізації приймає наступний вигляд:

$$\left(\begin{array}{l} \sum_{i=1}^n \sum_{k \in V_i} \sum_{j=1}^J c_j T_{kj} \\ \sum_{i=1}^n \sum_{k \in V_i} \left[\left(\sum_{j=1}^J t_j T_{kj} \right) \cdot \bar{c} \right] \\ \sum_{i=1}^n \sum_{k \in V_i} \sum_{m=1}^M \left(c_m \cdot \sum_{j=1}^J v_{mj} T_{kj} \right) \end{array} \right) \rightarrow \min.$$

3.4. Висновки за розділом 3

1. Проведено аналіз впливу системи утримання на витрати коштів та часу при проведенні ремонтних впливів. Розглянуто поняття технологіко-економічної карти ремонту, яке дозволяє враховувати технологію ремонту ТРС.
2. Розроблено методика визначення раціональної системи утримання, яка враховує показники витрат коштів, часу та екологічних ресурсів, які використовуються при утриманні ТРС.
3. Сформульована задача векторної оптимізації створення раціональної системи утримання локомотивів за трьома критеріями, вирішення якої дозволяє оптимізувати витрати на утримання локомотивів при підтримці заданого рівня надійності ТРС.

РОЗДІЛ 4.

ОЦІНКА РОБОТИ ЛОКОМОТИВНОГО ПАРКУ МЕТОДАМИ ЗНИЖЕННЯ РОЗМІРНОСТІ

4.1. Оцінка виконання системи утримання локомотивного парку

Основними параметрами системи утримання локомотивного парку дороги є міжремонтні пробіги, кількості і види (обсяги) планових ремонтів.

Однак, розглядаючи ту чи іншу систему утримування, необхідно в першу чергу оцінювати якість її виконання. Така оцінка не може одночасно брати до уваги множину значень взаємопов'язаних між собою показників.

Тому основною задачею є створення єдиного показника, що об'єднує в собі дані про параметри конкретної системи утримання парку ТРС дороги і характеризує стан даної системи.

При вивченні стану системи утримання локомотивного парку дороги були взяті значення наступних показників з 2006 по 2013 рік:

- кількості планових ТОЗ та деповських ремонтів – ПР1, ПР2, ПР3 (шт);
- простої на планових ремонтах (год.);
- кількості (шт.) і простої (год.) на непланових ремонтах;
- вантажообіг (ткм-брутто);
- відсоток несправних електровозів (%).

Задача знаходження єдиного узагальненого показника була реалізована в два етапи.

На першому етапі використовувався метод головних компонент [80]. Даний метод дозволяє вихідні змінні шляхом лінійних перетворень привести до нових, нормованих і некорельованих між собою змінних. Причому, їх кількість вже істотно менше вихідних. В результаті вдалося скоротити кількість розглянутих факторів з 12 до 4 із збереженням 87% значимої вихідної інформації.

Далі, на другому етапі застосовувався метод аналізу ієрархій [101]. За допомогою нього на підставі отриманих головних компонент був побудований індекс оцінки виконання системи утримання. Даний індекс має вигляд:

$$Z = \sum_{i=1}^n w_i z_i ,$$

де $z_i, i = \overline{1, n}$ – головні компоненти, отримані на першому етапі аналізу;

$w_i, i = \overline{1, n}$ – вагові коефіцієнти, які визначаються як компоненти власного вектора матриці попарних порівнянь [102].

Значення індексу для системи утримання локомотивного парку Придніпровської залізниці наведено по роках і графічно на рисунку 4.1:

Рік	Індекс
2006	0,55
2007	0,47
2008	0,26
2009	0,40
2010	0,49
2011	0,52
2012	0,47
2013	0,58

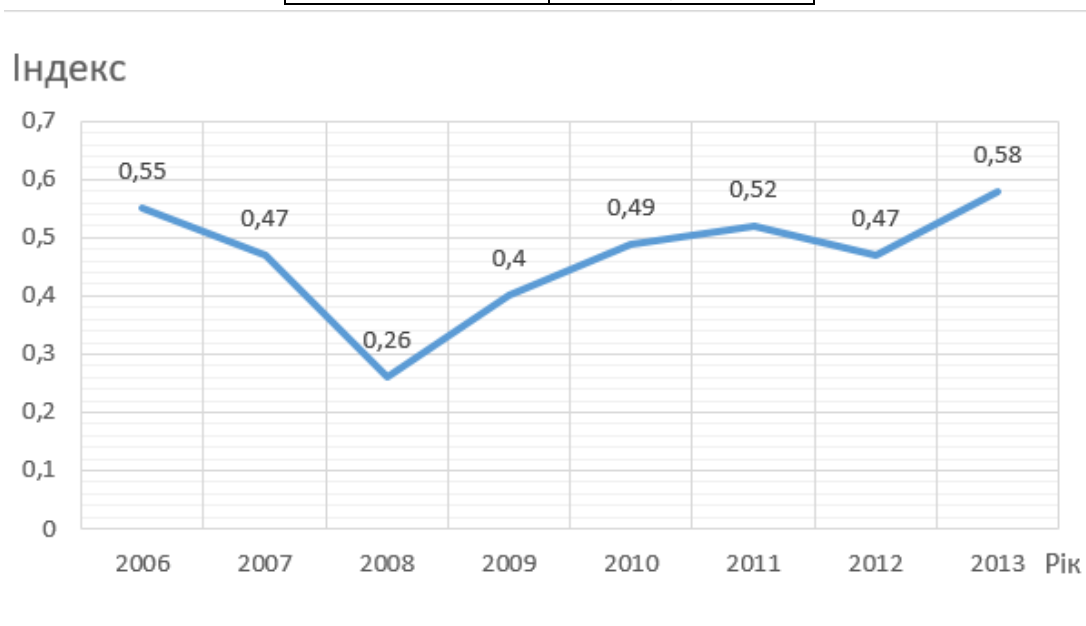


Рисунок 4.1 – Індекс оцінки виконання системи утримання локомотивного парку

Далі, на підставі щорічних даних про лінійному пробігу і кількостях проведених ремонтів (дивись таблицю 4.1) визначимо фактичне виконання системи утримання локомотивного парку дороги.

Таблиця 4.1 – Фактичне виконання плану по ремонтам локомотивів

	ТОЗ	ПР1	ПР2	ПР3	Неплан. рем.	Неплан. на 1 млн.км	пробіг, млн.км	пробіг, км
2006	1700	1858	125	50	705	13,86	50,87	50 865 801
2007	1740	1898	108	53	679	12,9	52,64	52 635 659
2008	1637	1748	93	70	767	14,44	53,12	53 116 343
2009	1494	1639	138	59	676	14,72	45,92	45 923 913
2010	1521	1697	140	55	836	17,6	47,50	47 500 000
2011	1544	1782	121	78	1156	23,25	49,72	49 720 430
2012	1410	1670	111	62	3013	62,18	48,46	48 456 095
2013	1306	1569	131	63	2796	60,69	46,07	46 070 193

Проведемо порівняння фактичного виконання плану ремонтів і побудованого на підставі методу головних компонент і методу аналізу ієрархій індексу виконання системи утримання.

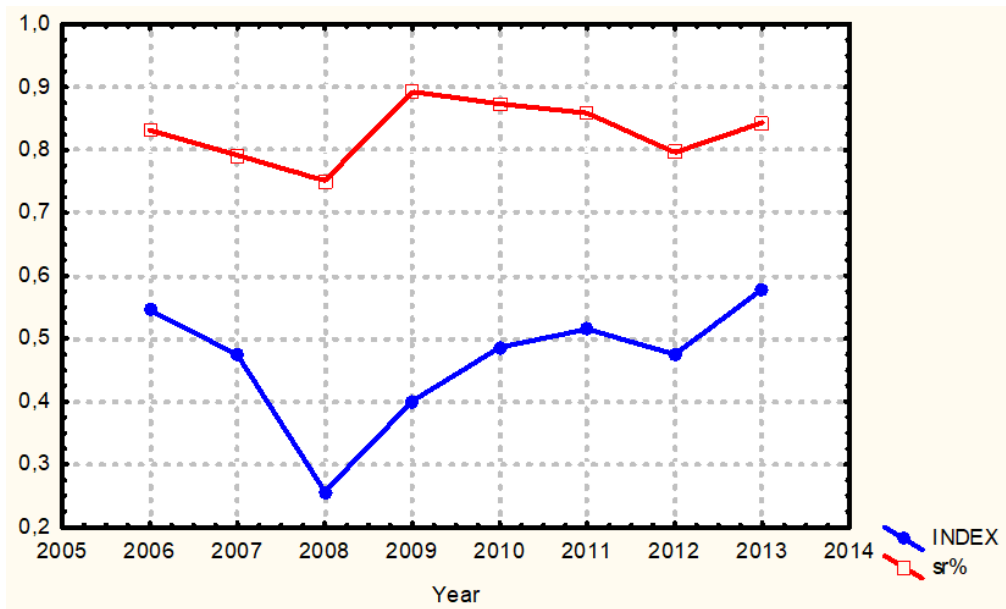


Рисунок 4.2 – Порівняння індексу виконання системи утримання та показника середнього відсотка виконання плану ремонтів

Далі, для перевірки гіпотези рівності математичних очікувань цих випадкових величин розрахуємо t -критерій Стьюдента (7 ступенів свободи, ймовірність помилки $p = 0.001$):

$$t = 11.66.$$

При цьому граничне значення t -критерію становить 5.41, що говорить про приналежність емпіричного значення зоні значущих результатів.

Для більш детального вивчення взаємозв'язку даних показників розглянемо індекс як функцію від середнього відсотку виконання плану ремонту (дивись рисунок 4.3).

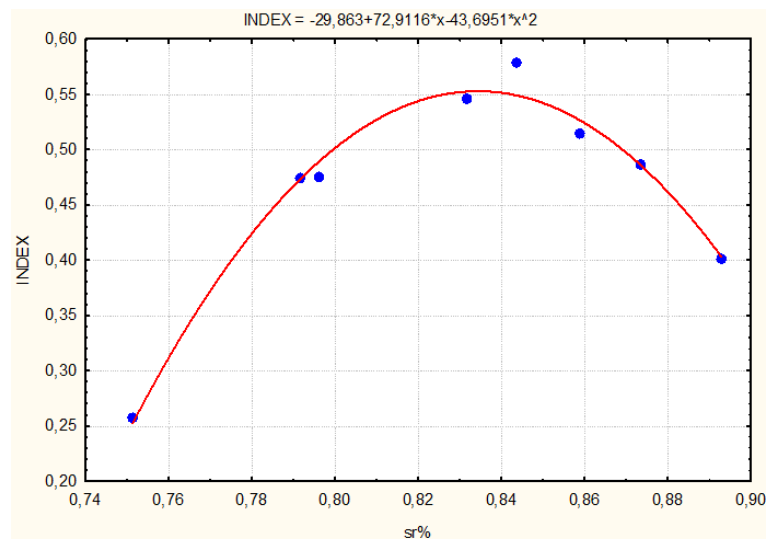


Рисунок 4.3 – Взаємозв'язок індексу якості виконання системи утримання і показника середнього відсотка виконання плану ремонтів

Після апроксимації даних поліномом, отримали наступну залежність індексу як функції від середнього відсотка виконання плану ремонту:

$$INDEX = -29.8 + 72.9x - 43.7x^2,$$

де x – середній відсоток виконання плану ремонту.

Використання отриманого індексу дозволить проводити оцінку якісних змін в системі утримання всього локомотивного парку дороги.

4.2. Оцінка стану безпеки руху локомотивного господарства

Забезпечення ефективності використання локомотивного парку досягається його належною технічною експлуатацією. І невід'ємною частиною його роботи є забезпечення безпеки руху.

В якості вихідних даних взято інформацію з статистичних джерел Укрзалізниці (УЗ). При проведенні розрахунків не розглядалась можливість створення нових показників надійності локомотивів, а лише використовувались прийняті в локомотивному господарстві УЗ класифікатори.

Був обраний метод головних компонент як відповідний математичний апарат, що дозволяє провести аналіз існуючих показників, що характеризують виконану роботу та стан безпеки руху з необхідною мірою інформативності.

Методика застосування даного методу наведена у Розділі 2 (формули 2.34 – 2.40).

Після знаходження множини головних компонент, що описує α (необхідний відсоток збереження вихідної інформації) переходимо до наступного кроку – застосування методу аналізу ієрархій для знаходження ваг кожної головної компоненти у складі єдиного інтегрально показника, що характеризує стан безпеки руху.

Для визначення єдиного інтегрального показника стану безпеки руху виконуються розрахунки з використанням методу аналізу ієрархій [81]. Вихідними даними для методу аналізу ієрархій є результатами роботи методу головних компонент (а саме, кількість головних компонент та їх дисперсії). Розрахунок з використанням методу ієрархій наведено у Розділі 2 (формули 2.41 – 2.43).

В якості вихідних даних використовувались статистичні дані згруповані відповідно рубрик. Статистичні дані приведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2. – Статистичні данні щодо транспортних подій

Рубрика	Показник		Значення по роках							
			2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Рубрика транспортні події	проїзд заборонено сигналу (серйозний інцидент)	x_1	3	1	0	7	3	4	3	5
	сходи та зіткнення рухомого складу при маневрах (інциденти)	x_2	4	7	19	21	16	0	0	0
	саморозчіп та обрив автосцеплення (інциденти);	x_3	1	1	2	0	4	0	0	0
	невірні дії персоналу (інциденти);	x_4	0	0	0	6	48	47	56	40
	поява несправності ТРС (інциденти);	x_5	234	207	186	195	200	186	150	173
Рубрика причини транспортних подій	незадовільний деповський ремонт	x_6	168	175	170	157	146	131	116	113
	невірні дії локомотивних бригад (події)	x_7	87	77	78	63	72	72	68	67
	незадовільний заводський ремонт	x_8	34	19	24	12	8	10	2	0
	технічні	x_9	29	41	36	45	29	18	18	33
	інші	x_{10}	6	9	0	5	2	2	9	0
Рубрика несправності основного обладнання тягового рухомого складу:	дизель	x_{11}	36	30	32	30	32	28	29	37
	головний генератор	x_{12}	1	3	4	1	2	1	4	2
	силові трансформатори	x_{13}	2	4	4	2	1	3	5	4
	тягові електродвигуни	x_{14}	27	24	35	27	27	37	20	18
	допоміжне механічне обладнання	x_{15}	9	12	2	20	11	6	8	8
	допоміжне електричне обладнання	x_{16}	6	1	3	14	2	0	0	0
	Елементи тягової передачі	x_{17}	0	0	2	2	0	0	0	0
	колісні пари	x_{18}	5	2	2	1	2	0	0	0
	букси колісних пар	x_{19}	19	21	13	15	9	13	7	10
	колісно-моторний блок	x_{20}	23	11	23	5	6	5	9	3
	силові ланцюги	x_{21}	43	43	44	23	37	32	19	24
	ланцюги управління	x_{22}	54	57	32	21	29	15	17	15
	силова електрична апаратура	x_{23}	12	16	7	25	8	12	7	15
електрична апаратура кіл управління	x_{24}	1	3	2	10	1	1	0	3	
аккумуляторна батарея	x_{25}	6	9	6	3	3	4	4	3	

гальмівне обладнання	x_{26}	21	21	20	18	12	9	6	12
прилади безпеки	x_{27}	0	1	2	0	0	0	0	0
механічне обладнання	x_{28}	0	4	0	0	12	5	6	3
дахове обладнання	x_{29}	18	20	16	10	13	15	9	12
автозчеп	x_{30}	2	1	0	0	0	0	0	0
візок, екіпаж	x_{31}	2	5	8	8	0	0	0	0
інші	x_{32}	5	0	0	1	1	0	7	0
невірні дії бригад (відмови обладнання)	x_{33}	32	30	51	45	49	47	56	40

Аналіз статистичних даних про аварійність на залізничному транспорті свідчить про те, що вони перевантажені абсолютними показниками (рисунок 4.4 та рисунок 4.5). Значення цих показників не дозволяють зробити об'єктивних висновків щодо стану безпеки руху.

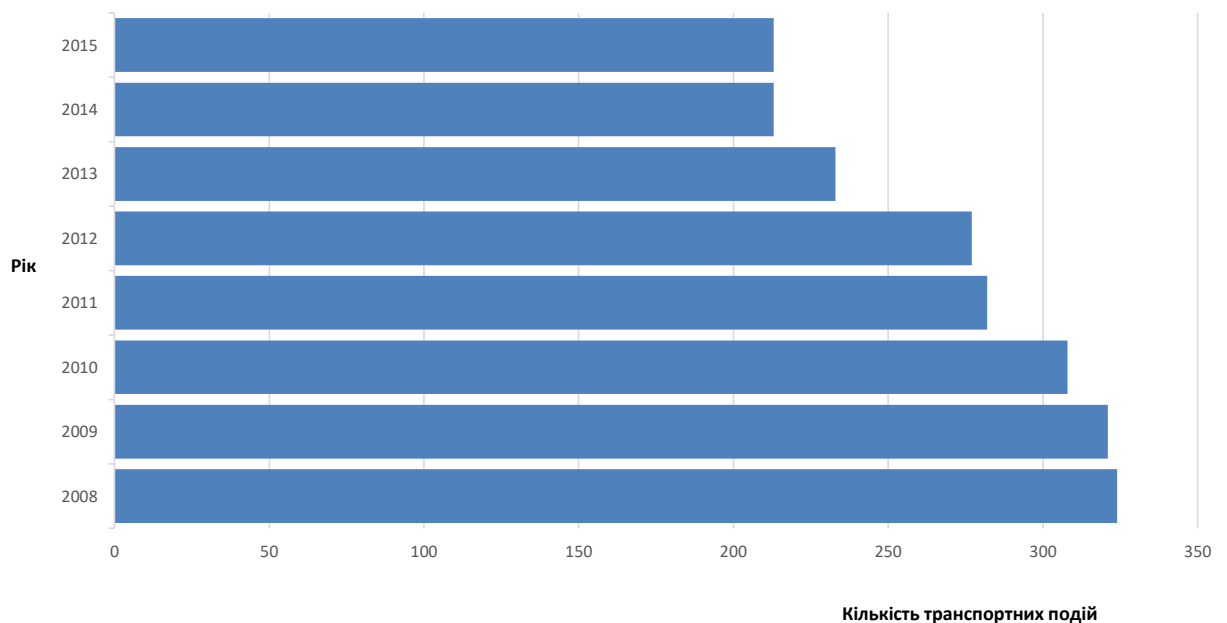


Рисунок 4.4 – Динаміка кількості транспортних подій у локомотивному господарстві

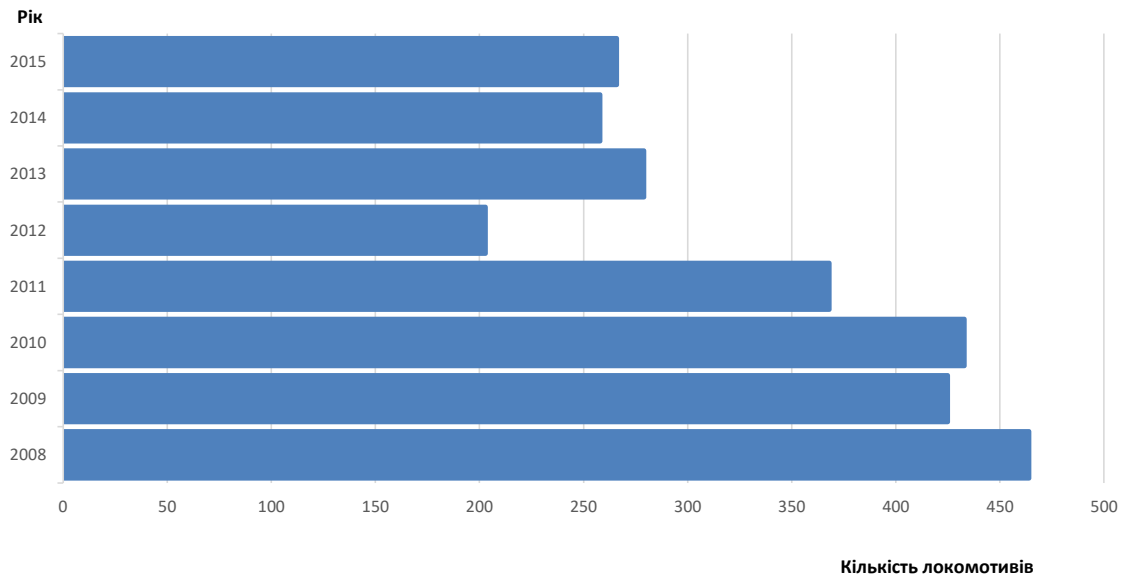


Рисунок 4.5 – Динаміка кількості локомотивів, що потрапили у транспортні події

Для більш детального вивчення стану безпеки руху у локомотивному господарстві необхідно виконувати спільний аналіз якісних та кількісних показників та показників які відображають надійність, працездатність та якість роботи парку ТРС Укрзалізниці.

В межах дослідження поставлена задача – об’єднати інформацію від показників, які характеризують стан безпеки руху $\{x, i \in \overline{1,33}\}$ та ранжувати впорядкувати величини за мірою їх впливу на працездатність, надійність та стан безпеки руху в локомотивному господарстві.

В якості узагальнюючого показника використовуємо поняття – Індекс стану безпеки руху $I_{\text{бр}}$, який знаходиться за методикою, що описана у Розділі 2 (формули (2.34)-(2.43)).

При виконанні розрахунку приймаємо необхідний відсоток збереження вихідної інформації не менше $\alpha = 85\%$. В результаті розрахунків за методом головних компонент визначено 8 головних компонент $g_1 \dots g_8$, які в загальній кількості містять 89% вихідної інформації. Кожна з компонент g_i містить певну кількість інформації щодо стану безпеки руху. Структурна схема індексу стану безпеки руху $I_{\text{бр}}$ приведена на рисунку 4.6.

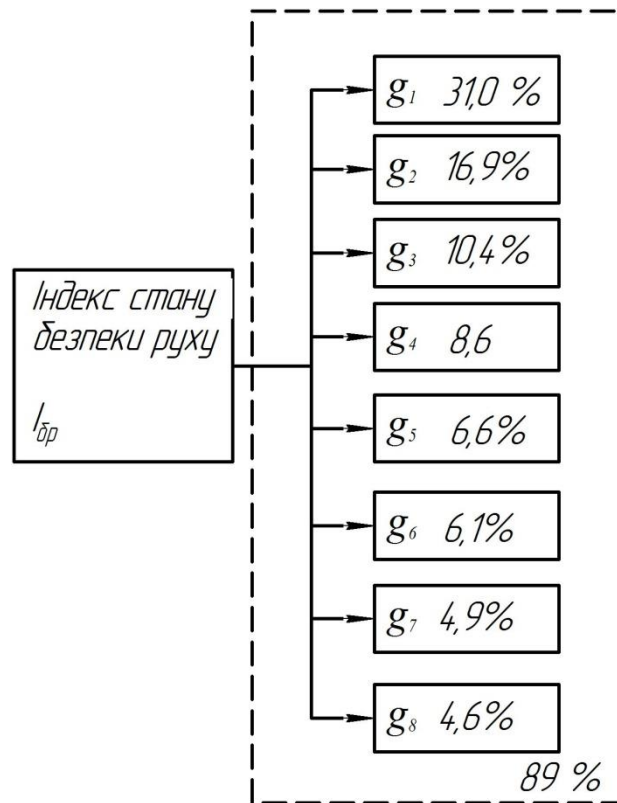


Рисунок 4.6 – Структурна схема Індексу стану безпеки руху

До складу кожної з компонент входять значення показників $[x_1, \dots, x_{33}]$ в тій чи іншій мірі (в залежності від дисперсій). Кожна з головних компонент містить в собі певну кількість інформації та впливає на значення загального Індексу стану безпеки руху. Найбільша кількість інформації міститься в першій головній компоненті. Схема, що відображує структуру першої головної компоненти наведена на рисунку 4.7. В кожній з головних компонент виділено дві складові: технічну та безпекову.

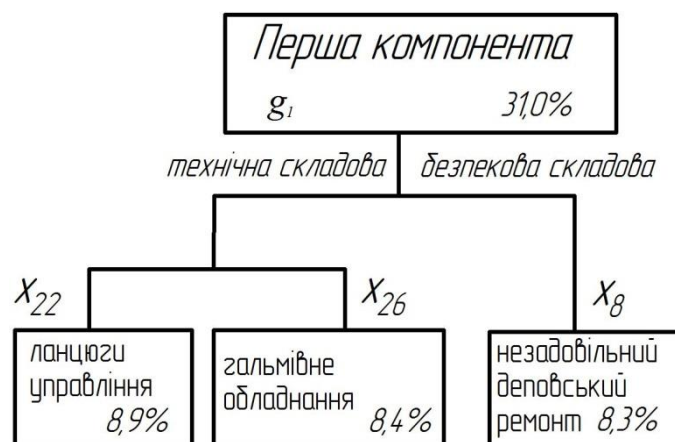


Рисунок 4.7 – Структура першої головної компоненти

Найбільш інформативно стан безпеки руху в локомотивному господарстві з точки зору безпекової складової описується значеннями такого показника як незадовільний деповський ремонт. До складу технічної складової увійшли: гальмівне обладнання та електричні кола управління.

Структурна схема другої головної компоненти показана на рисунку 4.8.

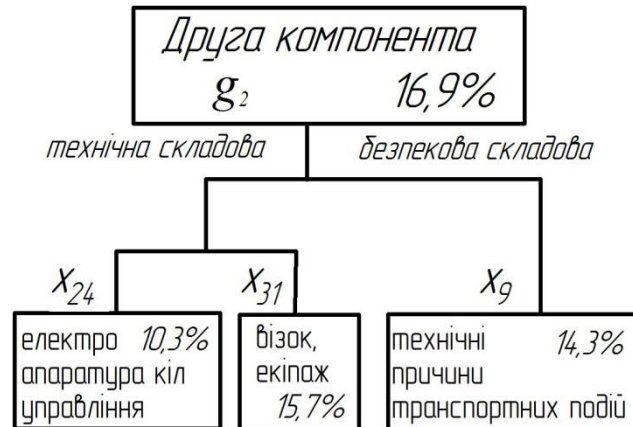


Рисунок 4.8 – Структура другої головної компоненти

З точки зору безпекової складової найбільш інформативним у другій головній компоненті є величина – технічні причини транспортних подій. До складу технічної складової увійшли: електроапаратура управління, візок та екіпаж.

Структурна схема третьої головної компоненти приведена на рисунку 4.9.

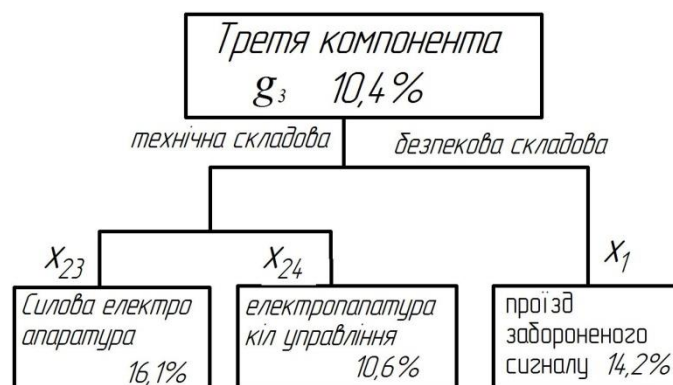


Рисунок 4.9 – Структура третьої головної компоненти

Структурні схеми інших компонент є аналогічними за складом, але іншими за змістом. Враховуючи, що сьома і восьма головні компоненти мають інформативність менше 5%, пропонуємо вплив цих компонент на загальний Індекс стану безпеки руху $I_{бр}$ не враховувати. Розподіл головних

компонент які є складовими Індексу стану безпеки руху приведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Розподіл складових індексу стану безпеки руху

Компонента		Технічна складова				Безпекова складова	
№	інформати вність	показник	частка, %	показник	частка, %	показник	частка, %
1	0,310	Ланцюги управління	8,9	Гальмівне обладнання	8,4	Незадовільний деповський ремонт	8,3
2	0,169	Електроапаратура кіл управління	10,3	Візок, екіпаж	15,7	Технічні причини транспортних подій	14,3
3	0,104	Силова електроапаратура	16,1	Електроапаратура кіл управління	10,6	Проїзд забороненого сигналу	14,2
4	0,086	Букси	7,3	Колісно-моторний блок	9,8	Невірні дії локомотивних бригад (транспортні події)	16,6
5	0,066	Головний генератор	10	Акумуляторна батарея	9,9	Невірні дії локомотивних бригад (несправності обладнання)	19,6
6	0,061	Силові трансформатори	15	Коробка зміни швидкостей	10,2	Сходи, зіткнення при маневрах (інциденти)	10,8

В таблиці виконано ранжирування показників технічної та безпекової складової за ступенем їх впливу на загальний індекс безпеки руху. На основі аналізу результатів, наведених в таблиці 1, визначено вузли локомотивів які найбільше впливають на стан безпеки руху та надійність. Аналіз безпекової складової показує внесок кожного з наведених показників на стан безпеки руху. Виконуючи аналіз впливу показника на загальний індекс безпеки руху, необхідно враховувати інформативність відповідної компоненти та частку, яку цей показник вносить в відповідну головну компоненту.

Запропонований Індекс стану безпеки руху $I_{\text{бр}}$ є інтегральним показником. Він враховує весь обсяг наданої статистичної інформації щодо стану безпеки руху, але одночасно дозволяє визначити ступінь впливу кожного з показників на загальний індекс безпеки руху. Значення $I_{\text{бр}}$ є безрозмірною величиною яка відображує загальний рівень безпеки руху. Чим

більше значення $I_{бр}$ тим гіршим є стан безпеки руху. Динаміка зміни $I_{бр}$ по роках наведена на рисунку 4.10.

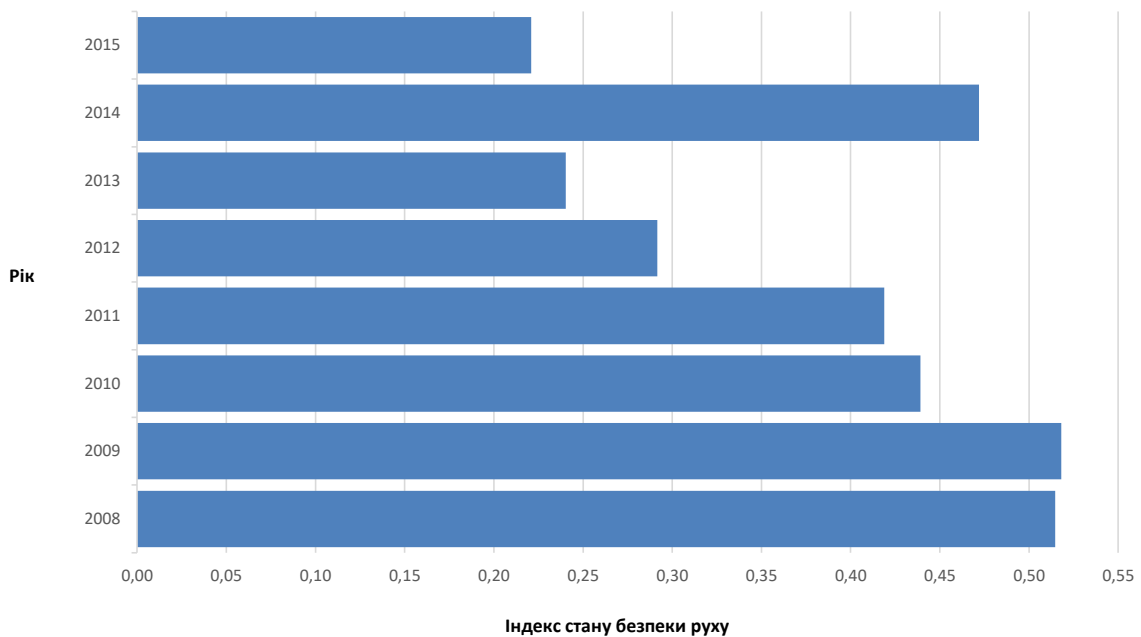


Рисунок 4.10.– Індекс стану безпеки руху в локомотивному господарстві

Різде зростання індексу безпеки руху у 2014 році (тобто погіршення стану безпеки руху у локомотивному господарстві) пояснюється впливом на даний показник не тільки технічних, а і економічних і соціальних причин.

Подальшим удосконаленням запропонованого індексу $I_{бр}$ є визначення питомих значень індексу з урахуванням виконаної роботи локомотивами, приписним парком локомотивів, кількістю робітників в локомотивному господарстві та інших. На початковому етапі значення індексу $I_{бр}$ дозволяє оцінювати загальний стан безпеки руху і може бути використано для порівняння рівня безпеки руху по роках.

Сучасні тенденції досліджень [107-110] в напрямку надійності та безпеки руху полягають в поступовому переході від абсолютних значень показників до більш точних і об'єктивних оцінок.

При проведенні розрахунків розглядалась доцільність використання нових та удосконалення існуючих показників для оцінки стану безпеки руху

в локомотивному господарстві. Запропоновані показники x_i ($[x_1, \dots, x_{11}]$), які є відносними, і враховують обсяги виконаної роботи та стан безпеки руху.

Кожен з запропонованих показників визначається як відношення безпекової складової (SF) до кількісних та якісних показників використання локомотивів (LP):

$$x_i = \frac{SF_i}{LP_i} . \quad (4.1)$$

Характеристика запропонованих показників приведена в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Характеристика запропонованих показників аналізу стану безпеки руху локомотивів

Показник	Одиниця виміру	Визначення
x_1	подія/секція локомотива	(загальна кількість транспортних подій)/(парк локомотивів в експлуатації)
x_2	подія / ткм.брутто	(загальна кількість транспортних подій)/(середньорічна продуктивність локомотива)
x_3	подія / тис тон	(загальна кількість транспортних подій)/(перевезено.вантажів)
x_4	подія / тис осіб	(загальна кількість транспортних подій)/ (кількість працівників локомотивного господарства задіяних в експлуатації локомотивів)
x_5	подія/(секція локомотива/добу)	(кількість транспортних подій що виникли в наслідок незадовільного деповського ремонту)/(середньодобовий експлуатаційний парк локомотивів)
x_6	подія / тис осіб	(кількість транспортних подій що виникли в наслідок незадовільного деповського ремонту)/ (кількість працівників, зайнятих на експлуатаційній роботі у локомотивному господарстві)
x_7	подія / тис осіб	(кількість транспортних подій що виникли в наслідок невірних дій локомотивних бригад)/(кількість працівників, зайнятих на експлуатаційній роботі у локомотивному господарстві)
x_8	подія / тис осіб	(кількість транспортних подій що виникли в наслідок проїзду забороненого сигналу)/ (кількість працівників, зайнятих на експлуатаційній роботі у локомотивному господарстві)
x_9	подія / тис тон	(кількість транспортних подій що виникли в наслідок проїзду забороненого сигналу)/ перевезено.вантажів)
x_{10}	подія/(секція локомотива/добу)	кількість транспортних подій що виникли в наслідок несправності локомотивів/ середньодобовий експлуатаційний парк локомотивів)
x_{11}	подія / (тис осіб/добу)	(кількість транспортних подій що виникли в наслідок невірних дій локомотивних бригад)/ середньооблікова кількість працівників, зайнятих на експлуатаційній роботі у локомотивному господарстві.

Показники x_i сформовані на основі логічного аналізу взаємного зв'язку складових безпеки та експлуатації локомотивів. З метою перевірки ступеня і характеру взаємного зв'язку складових розраховано коефіцієнти взаємної лінійної кореляції. Результати розрахунку приведені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Коефіцієнти кореляції складових запропонованих показників

Показник	Складові запропонованого показника		Значення коефіцієнта лінійної кореляції між складовими
	стан безпеки руху (SF)	використання локомотивів (LP)	
X1	загальна кількість транспортних подій	парк локомотивів в експлуатації	0,87
X2	загальна кількість транспортних подій	середньорічна продуктивність локомотива	-0,92
X3	загальна кількість транспортних подій	перевезено.вантажів за рік	0,43
X4	загальна кількість транспортних подій	кількість працівників локомотивного господарства задіяних в експлуатації локомотивів	0,95
X5	кількість транспортних подій що виникли в наслідок незадовільного деповського ремонту	середньодобовий експлуатаційний парк локомотивів	0,87
X6	кількість транспортних подій що виникли в наслідок незадовільного деповського ремонту	кількість працівників, зайнятих на експлуатаційній роботі у локомотивному господарстві	0,92
X7	кількість транспортних подій що виникли в наслідок невірних дій локомотивних бригад	кількість працівників, зайнятих на експлуатаційній роботі у локомотивному господарстві	0,75
X8	кількість транспортних подій що виникли в наслідок проїзду забороненого сигналу	кількість працівників, зайнятих на експлуатаційній роботі у локомотивному господарстві	-0,34
X9	кількість транспортних подій що виникли в наслідок проїзду забороненого сигналу	перевезено.вантажів за рік	0,16
X10	кількість транспортних	середньодобовий	0,86

	подій що виникли в наслідок несправності локомотивів	експлуатаційний парк локомотивів	
X11	кількість транспортних подій що виникли в наслідок невірних дій локомотивних бригад	середньооблікова кількість працівників, зайнятих на експлуатаційній роботі у локомотивному господарстві за добу	-0,53

Як бачимо з результатів розрахунку складові показників $x_1, x_2, x_4, x_5, x_6, x_7, x_{10}$ мають лінійний взаємозв'язок. Наявність зв'язку свідчить про доцільність використання цих показників для подальшого аналізу, так як їх складові взаємопов'язані. При зміні одної з складових має змінитись на певну величину і інша складова, причому ця величина взаємної зміни складових є постійною. При виникненні порушень в організації роботи системи забезпечення безпеки експлуатації локомотивів характер відхилення між складовими зміниться. Таким чином аналіз зміни цих показників на певному інтервалі часу дозволить визначати стан безпеки руху.

Актуальним є збільшення інформативності існуючих показників або створення інтегрального показника для аналізу стану безпеки руху. Метою розрахунків є визначення рівня впливу кожного з запропонованих показників x_i на загальний інтегральний питомий показник стану безпеки руху $I'_{бр}$. Так як показники x_i враховують кількість транспортних інцидентів віднесених на одиницю роботи або чисельність персоналу, то інтегральний показник стану безпеки руху $I'_{бр}$ за своїм змістом є питомим показником.

Вихідні данні для розрахунку приведені в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Вихідні дані для розрахунку

Показник	Значення показника по роках							
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
X_1	0,00029	0,00034	0,00032	0,00028	0,00028	0,00027	0,00028	0,00030
X_2	0,00074	0,00070	0,00065	0,00058	0,00051	0,00045	0,00040	0,00042
X_3	0,00081	0,00100	0,00086	0,00073	0,00068	0,00062	0,00065	0,00072

X_4	6,32813	6,71548	6,63793	6,17068	5,73661	5,45667	5,27228	5,54688
X_5	0,00015	0,00019	0,00018	0,00016	0,00016	0,00015	0,00015	0,00016
X_6	3,28125	3,66109	3,66379	3,43545	3,25893	3,06792	2,87129	2,94271
X_7	1,69922	1,61088	1,68103	1,37856	1,60714	1,68618	1,68317	1,74479
X_8	0,00099	0,00039	0,00000	0,00256	0,00117	0,00168	0,00143	0,00260
X_9	0,00001	0,00000	0,00000	0,00002	0,00001	0,00001	0,00001	0,00002
X_{10}	0,00021	0,00022	0,00019	0,00020	0,00021	0,00021	0,00020	0,00025
X_{11}	0,62500	0,62762	1,09914	0,98468	1,09375	1,10070	1,38614	1,04167

При виконанні розрахунку прийнято необхідний відсоток збереження вихідної інформації не менше $\alpha = 87\%$. В результаті розрахунку визначено 4 головних компоненти $g_1 \dots g_4$, які в загальній кількості містять 92% вихідної інформації. Кожна з компонент g_i містить певну кількість інформації щодо стану безпеки руху. Структурна схема питомого індексу стану безпеки руху $I'_{бр}$ приведена на рисунку 4.11.

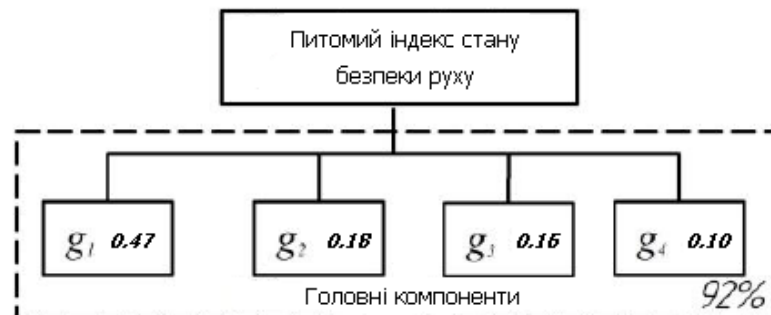


Рисунок 4.11 – Структурна схема питомого індексу стану безпеки руху

До складу кожної з компонент входять значення величин $[x_1, \dots, x_{11}]$ в тій чи іншій мірі. На значення першої головної компоненти найбільший вплив мають показники x_3, x_4, x_6 . На формування другої компоненти найбільше впливають x_9, x_{11}, x_2 . На третю найбільше впливають x_1, x_6, x_8 ; на четверту – x_9, x_6, x_{11} .

Далі за допомогою методу аналізу ієрархій на підставі отриманих головних компонент визначаємо єдиний інтегральний показник – індекс експлуатаційної безпеки.

Динаміка зміни $I_{бр}$ по роках наведена на рисунку 4.12.

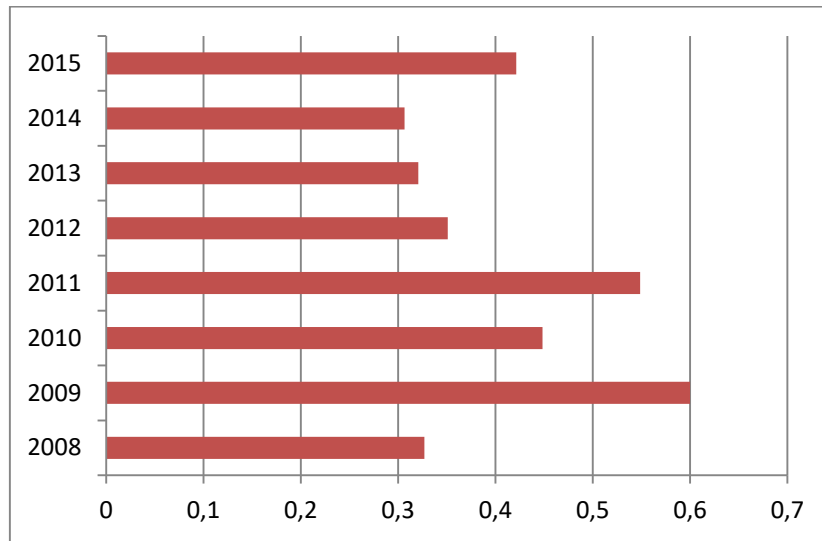


Рисунок 4.12 – Індекс стану безпеки руху та експлуатаційної роботи в локомотивному господарстві

Отримані значення свідчать про погіршення відносного стану безпеки руху у локомотивному господарстві у 2009, 2011 та 2015 роках.

Найбільш впливовими на індекс показниками стали x_9 (18% впливу), x_{11} (14,5% впливу), x_1 (14,5% впливу) та x_6 (13,5% впливу).

4.3. Висновки за розділом 4

1. Здійснено оцінювання системи утримання локомотивного парку методами зниження розмірності великих масивів даних. Проведена оцінка системи утримання локомотивного парку Придніпровської залізниці.

2. Запропоновано використання єдиного інтегрального показника, який, на відміну від існуючих, дозволяє оцінити роботу локомотивного парку на основі великої кількості показників з мінімальною втратою інформації.

3. Виконано оцінювання стану безпеки руху в локомотивному господарстві на підставі аналізу абсолютних показників безпеки руху. Розроблена методика дозволила об'єднати 33 показники зі збереженням 85 % вихідної інформації. Розроблений показник дав можливість виявити значне погіршення стану безпеки руху в локомотивному господарстві у 2014 році.

РОЗДІЛ 5.

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ УТРИМАННЯ ЛОКОМОТИВІВ З УРАХУВАННЯМ ЗАЛЕЖНИХ ВІДМОВ ОБЛАДНАННЯ

5.1. Аналіз нормативних документів щодо розрахунків вартості життєвого циклу об'єктів залізничного транспорту

Найбільш поширеним в світовій практиці підходом при розробці систем управління вартістю життєвого циклу є використання підходу RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Safety).

Основні положення RAMS можуть бути використані для оцінки системи експлуатації та утримання локомотивів з точки зору надійності, доступності, ремонтпридатності та безпеки при їх взаємодії. Запропонований підхід визначає процес, заснований на життєвому циклі всієї системи та задачі в ньому; дозволяє ефективно контролювати та управляти взаємодією між елементами.

Європейський стандарт EN50126 «Застосування до залізничного транспорту: специфікація та демонстрація надійності, наявності, підтриманості та безпеки (RAMS)» [111] містить основні характеристики, визначення та основні терміни, що стосуються до визначення вартості життєвого циклу об'єктів залізничного транспорту.

Схематичне представлення етапів життєвого циклу за даним стандартом показано на рисунку 5.1.

Життєвий цикл системи являє собою послідовність фаз, кожна з яких містить перелік відповідних задач. Ці задачі охоплюють весь термін служби системи від початкової концепції до виведення з експлуатації та утилізації.

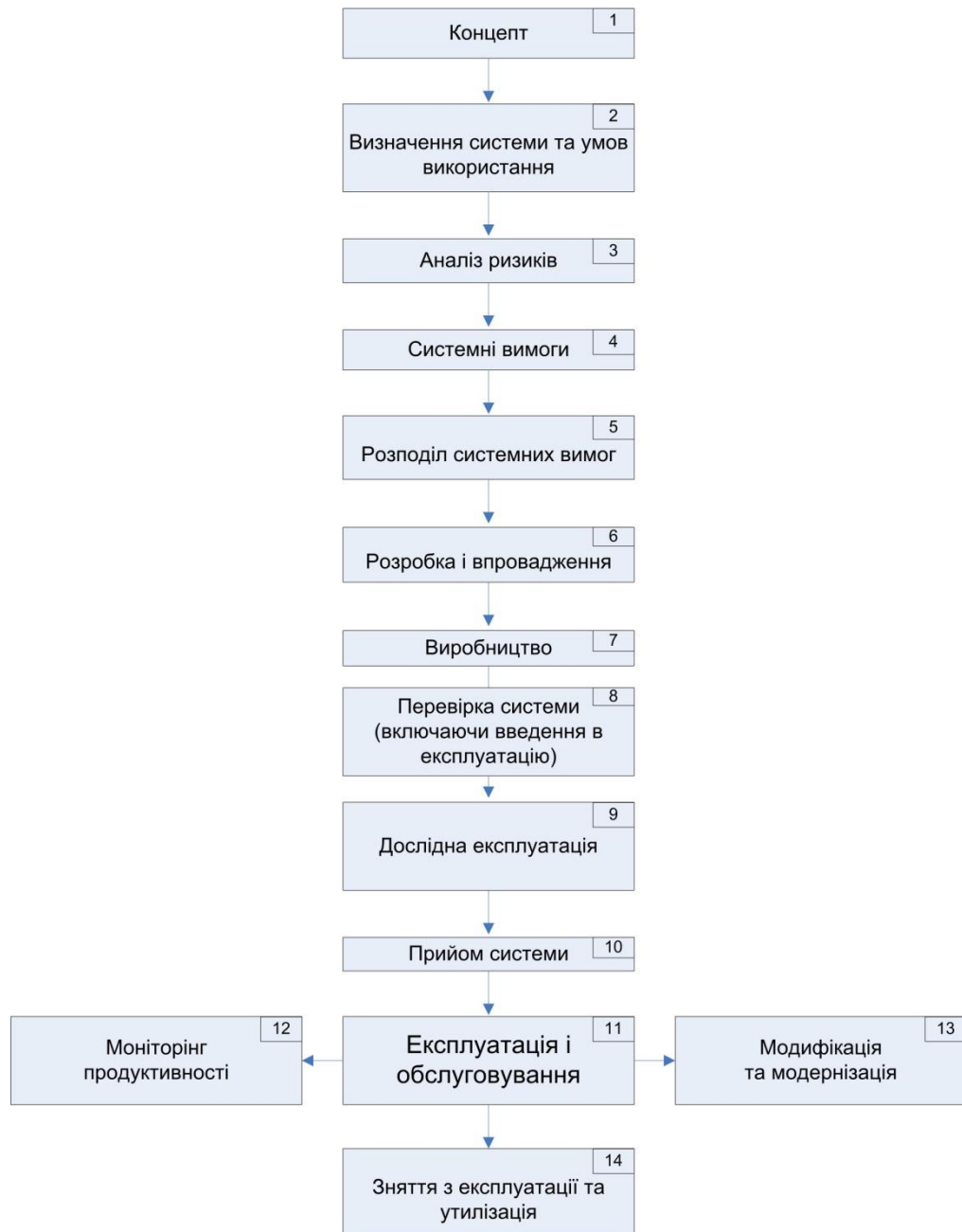


Рисунок 5.1 – Етапи життєвого циклу

Концепція життєвого циклу за стандартом EN 50126 допомагає отримати якісний продукт за прийнятною ціною в узгоджені часові рамки.

На кожному етапі життєвого циклу виникають певні, пов'язані з цим етапом, задачі: загальні, задачі щодо надійності, працездатності, обслуговуваності, а також задачі пов'язані з безпекою.

На другому етапі життєвого циклу необхідно вирішувати наступні задачі:

- створення профілю призначення системи;

- підготовка опису системи;
- визначення стратегії експлуатації та обслуговування;
- визначення умов роботи;
- визначення впливу існуючих інфраструктурних обмежень.

Профіль призначення системи включає в себе визначення:

- вимог до робочих характеристик
- цілей щодо надійності, працездатності, обслуговуваності та безпеки (RAMS);
- довгострокової експлуатаційної стратегії і умов;
- довгострокової стратегії обслуговування і умов;
- розгляд життєвого циклу системи, включаючи питання калькуляції життєвого циклу
- логістичний розгляд.

На рисунку 5.2 приведена схема витрат на життєвий цикл технічного об'єкту залізничного транспорту.

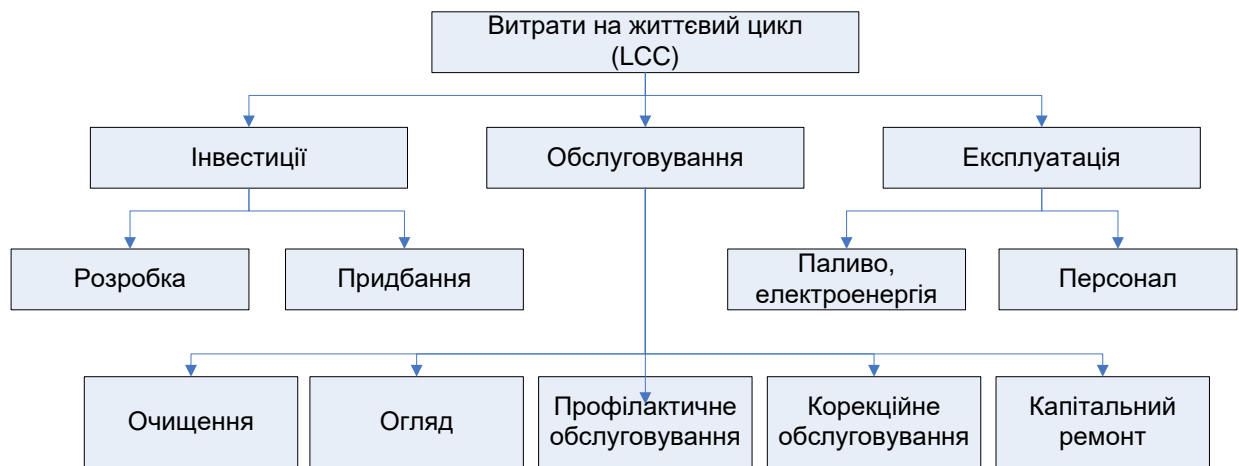


Рисунок 5.2 – Схема витрат на життєвий цикл

Витрати на життєвий цикл включають у себе інвестиційні витрати, витрати на експлуатацію та обслуговування.

Витрати, що закладені на етапі проектування системи і які заплановані на формуванні вимог до експлуатації і технічного обслуговування, складають велику частину витрат на життєвий цикл

ЛОКОМОТИВА.

Визначити точні витрати на весь життєвий цикл неможливо. Витрати можуть оцінюватися тільки з різним ступенем впевненості.

У стандарті EN50126 описано дві методики розрахунків витрат на життєвий цикл:

1. Калькуляція витрат на профілактичне обслуговування (аналог планово-попереджувальної системи)
2. Калькуляція витрат на корекційне обслуговування (після відмов) (аналог системи обслуговування за поточним станом)

Розглянемо більш детально ці методики.

Калькуляція витрат на профілактичне обслуговування.

Профілактичне обслуговування згідно з європейським стандартом EN 13306 (2001) – це технічне обслуговування, яке виконується з заданими інтервалами або відповідно до запропонованим критеріям і призначене для зниження ймовірності відмови або погіршення функціонування технічної одиниці.

Обчислення витрат CY_{MP} на профілактичне обслуговування протягом життєвого циклу виконується за формулою:

$$CY_{MP} = \sum_{i=1}^X N_{MP_i} \times QT_i \times (CM_{MP_i} + MH_{MP_i} \times CMH),$$

де X – загальна кількість елементарних технологічних операцій;

N_{MP_i} – кількість i -тих елементарних технологічних операцій, які необхідно виконати за весь життєвий цикл;

QT_i – загальна кількість елементів, які потребують застосування i -тої елементарної технологічної операції;

CM_{MP_i} – середня вартість матеріалів, які необхідно використати при застосуванні i -тої елементарної технологічної операції;

MH_{MP_i} – кількість робочих годин, яка необхідна на виконання i -тої елементарної технологічної операції;

CMH – вартість 1 робочої години.

В наведеній методиці не враховуються такі витрати часу:

- на організаційні, адміністративні та логістичні процеси;
- для закупівлі / доставки витратних матеріалів;
- для випорожнення резервуарів для стічних вод;
- в очікуванні обслуговування;
- на тривалість утилізації;
- на зовнішню і внутрішню очистку транспортного засобу.

Калькуляція витрат на корекційне обслуговування

Корекційне (непланове) обслуговування згідно з [112] – це технічне обслуговування, яке виконується після розпізнавання несправностей, і призначене для відновлення локомотива до того технічного стану, в якому він може виконувати необхідні функції.

Обчислення витрат на корекційне обслуговування CY_{MC} протягом життєвого циклу:

$$QT = IN_FAI_i \times OT ,$$

$$CY_{MP} = \sum_{i=1}^x N_{MC_i} \times QT_i \times (CM_{MC_i} + MH_{MC_i} \times CMH) .$$

де QT – кількість елементів, які необхідно відновити за весь життєвий цикл;

IN_FAI_i – інтенсивність відмов i -го елементу

OT – час роботи або пробіг за життєвий цикл (залежить від інтенсивності відмов / швидкості відмов)

N_{MC_i} – кількість i -тих елементарних технологічних операцій, які необхідно виконати за весь життєвий цикл;

QT_i – кількість елементів, які для відновлення потребують застосування i -ї елементарної технологічної операції;

CM_{MC_i} - середня вартість матеріалів для виконання i -ї елементарної технологічної операції;

MH_{MC_i} – кількість робочих годин на виконання i -ї елементарної

технологічної операції;

СМН – вартість робочої години.

Вихідними даними для аналізу даних та розрахунку вартості життєвого циклу тягового рухомого складу є:

1. Для аналізу на надійність, доступність, працездатність та безпеку (RAMS-аналізу):

- термін служби;
- пробіг на транспортний засіб в рік;
- середній час роботи на локомотив на рік;
- середній час установки на локомотив на рік;
- та інші кількісні та якісні показники використання локомотивів.

2. Для розрахунку вартості життєвого циклу:

- специфікації / технічні керівництва від постачальника компонентів або підсистем (наприклад, MTBF rate, FIT rate);
- ідентифікація, збір і використання історичних даних проекту (наприклад, показники відмов на транспортному засобі, зусилля по ремонту, поведінка зношених деталей і т. д.);
- імітація / моделювання поведінки компонента або підсистеми;
- бази даних;
- надійні статистичні звіти.

Основні правила визначення вартості життєвого циклу рухомого складу і складних технічних систем залізничного транспорту на російських залізницях наведені у [113]. Дана методика містить основні положення і формули розрахунку показників ефективності рухомого складу і складних технічних систем залізничного транспорту, таких, як вартість життєвого циклу, корисний економічний ефект і лімітна ціна техніки.

Показник витрат життєвого циклу використовується у даній методиці для оцінки ефективності інноваційних заходів, в тому числі на залізничному транспорті.

Поняття «вартість життєвого циклу» (LCC) технічного засобу у [111]

визначається як сукупні витрати споживача на придбання і використання техніки за термін її служби.

Витрати життєвого циклу технічного засобу включають всі витрати споживача, пов'язані з його придбанням і володінням ним, тобто ціну придбання, супутні одноразові витрати, а також експлуатаційні витрати за весь термін служби і витрати на утилізацію.

Кількість стадій життєвого циклу технічних засобів у [111] пропонується обмежити наступними стадіями:

- 1) розробка концепцій і визначень;
- 2) дослідно-конструкторські роботи;
- 3) виготовлення технічного засобу;
- 4) введення технічного засобу в експлуатацію з проведенням супутніх заходів щодо навчання персоналу, дооснащення ремонтної бази і т.п.;
- 5) експлуатація і технічне обслуговування;
- 6) вилучення (ліквідація, утилізація).

Загальна LCC (всіх його шести стадій) виробу розділяється на дві основні частини:

1. витрати, пов'язані з придбанням (1-4 стадії);
2. витрати, пов'язані з експлуатацією і утилізацією (5-6 стадії).

Початковий аналіз LCC здійснюється на етапі придбання – проводяться порівняння з аналогами. Потім на етапі експлуатації проводиться моніторинг економічних показників з метою підтвердження початкових оцінок вартості життєвого циклу.

LCC рухомого складу і складних технічних систем залізничного транспорту визначається в [112] за формулою:

$$LCC = C_{np} + \sum_{t=1}^T (I_t + \Delta K_t - L_t) \cdot \alpha_t,$$

де C_{np} – ціна придбання об'єкта (первісна вартість). На стадії розробки концепції нового локомотива і дослідно-конструкторських робіт (I-II стадії життєвого циклу) в якості ціни придбання техніки може виступати її лімітна

ціна;

I_t – річні експлуатаційні витрати;

ΔK_t – супутні одноразові витрати, пов'язані з впровадженням техніки в експлуатацію;

L_t – ліквідаційна вартість об'єкта;

α_t – коефіцієнт дисконтування;

t – поточний рік експлуатації;

T – кінцевий рік експлуатації, який встановлюється відповідно до технічних вимог або іншою документацією (в тому числі і обліковою політикою підприємства, на балансі якого значиться об'єкт).

Коефіцієнт дисконтування для постійної норми дисконту визначається з виразу:

$$\alpha_t = \frac{1}{(1+E)^t},$$

де t – крок розрахункового періоду ($t = 0, 1, 2, \dots, T$);

T – горизонт розрахунку (тривалість життєвого циклу);

E – норма дисконту (ставка дисконтування).

В Україні нормативних документів, що регламентують розрахунки вартості життєвого циклу об'єктів залізничного транспорту нема. Але існують дослідження стосовно цього питання. У [112] відмічається, що незважаючи на значну кількість результатів дослідження стосовно використання економічного показника LCC як одного з основних критеріїв при оцінках і ухваленні рішень інвестиційного характеру на довгостроковий період, питання адаптації цього показника до експлуатаційних особливостей залізниць України потребує подальшого розвитку. В роботі пропонується вартість життєвого циклу парку тягового рухомого складу за альтернативними варіантами інвестицій в його оновлення визначати наступним чином:

$$LCC_i = \sum_{t=t_{n_i}}^{t_{k_i}} (m_i \cdot C_i^n \cdot \alpha_t) + \sum_{t=t_{n_i}}^{t_{k_i}} (K_i^{syn} \cdot \alpha_t) + \sum_{t=t_{n_i}}^{t_{k_i}} (m_i \cdot C_i^{KP} \cdot \alpha_t) + \\ + \sum_{t=t_{n_i}}^{t_{k_i}} (m_i \cdot C_i^M \cdot \alpha_t) + \sum_{t=t_{n_i}}^{t_{k_i}} (m_i \cdot I_i \cdot \alpha_t) - \sum_{t=t_{n_i}}^{t_{k_i}} (m_i \cdot L_i \cdot \alpha_t),$$

де i – це номер варіанту інвестицій,

m_i – кількість одиниць тягового рухомого складу за i -им варіантом інвестицій, яку придбано в рік t життєвого циклу.

C_i^n – ціна придбання одиниці тягового рухомого складу за i -им варіантом інвестицій в рік t життєвого циклу, грн.;

K_i^{syn} – одноразові супутні витрати при втіленні парку тягового рухомого складу за i -им варіантом інвестицій в рік t життєвого циклу, грн.;

C_i^{KP} – ціна капітального ремонту одиниці тягового рухомого складу за i -им варіантом інвестицій в рік t життєвого циклу, грн.;

C_i^M – ціна модернізації одиниці тягового рухомого складу за i -им варіантом інвестицій в рік t життєвого циклу, грн.;

I_i – поточні витрати на експлуатацію та утримання в технічно справному стані парку тягового рухомого складу за i -им варіантом інвестицій в рік t життєвого циклу, грн.;

L_i – ліквідаційна вартість одиниці тягового рухомого складу за i -им варіантом інвестицій в рік t життєвого циклу, грн.;

α_t - коефіцієнт дисконтування;

t_{n_i} – рік придбання парку тягового рухомого складу за i -им варіантом інвестицій;

t_{k_i} – рік ліквідації парку тягового рухомого складу за i -им варіантом інвестицій.

Проведений аналіз підходів до оцінки і розрахунків вартості життєвого циклу дозволяє зробити висновок, що жоден з розглянутих

способів не враховує вплив відмови одного вузла на відмову інших пов'язаних з ним вузлів (залежних відмов елементів систем) локомотива.

5.2. Розрахунок вартості життєвого циклу з урахуванням залежних відмов обладнання

За даними досліджень [59, 106], досить суттєва частина відмов (і, як наслідок, непланових ремонтів) відбувається за рахунок виникнення саме залежних відмов елементів. Таким чином, при розрахунку показника вартості життєвого циклу LCC та витрат на всі види технічного обслуговування необхідно враховувати вплив залежних відмов вузлів локомотивів.

Однією з складових вартості життєвого циклу LCC є витрати на обслуговування локомотива, величина цих витрат залежить від показників надійності та прийнятої системи технічного утримання. Методики оцінки економічної ефективності системи утримання локомотивів приведено в [105-107, 114]. Для удосконалення методики розрахунку вартості системи утримання локомотивів авторами пропонується враховувати залежні відмови вузлів.

Відповідно [28] вартість непланових ремонтів в раціональній системі без урахування залежних відмов може бути визначена як:

$$C = C_{непл} \cdot H_p,$$

де $C_{непл}$ – середня вартість непланового ремонту вузла локомотива;

H_p – середня кількість відмов за час життєвого циклу локомотиву.

Середня вартість одного непланового ремонту $C_{непл}$ визначається з виразу

$$C_{непл} = C_{пл} + C_{лг} (t_{тр} + t_{нр}),$$

де $C_{пл}$ – вартість одного планового ремонту

$C_{лг}$ – вартість однієї локомотиво-години;

$t_{тр}$ – час транспортування локомотива до місця ремонту;

t_{np} – час простою локомотива на ремонті.

При обчисленні вартості відновлень при непланових ремонтах необхідно враховувати залежні відмови елементів. Для розрахунку вартості життєвого циклу локомотиву з урахуванням залежних відмов його елементів необхідно визначити імовірнісні залежності між відмовами його основних вузлів. Тобто відмова кожного вузла з якою ймовірністю вплине на відмови інших вузлів локомотиву.

Середня вартість одного непланового ремонту C_3 з урахуванням залежних відмов визначається з виразу:

$$C_3 = C_{nl} + \sum_{i \in V} p_i C_{nl}^i + C_{лз} (t_{mp} + t_{np}),$$

де C_{nl}^i – вартість одного планового ремонту i -го залежного елемента;

p_i – ймовірність залежної відмови i -го елемента;

V – множина залежних елементів.

Визначення ймовірності залежних відмов може бути виконано з використанням методів експертних досліджень [23], методів нечіткої логіки та нейронних мереж [107]. В загальному вигляді ймовірності виникнення залежних відмов можуть бути представлені у вигляді таблиці 5.1.

Таблиця 5.1. Ймовірності виникнення залежних відмов

Обладнання локомотива	Вузол 1	Вузол 2	...	Вузол i	...	Вузол N
Вузол 1		p_{12}		p_{1i}		p_{1N}
Вузол 2	p_{21}			p_{2i}		p_{2N}
...						
Вузол i	p_{i1}	p_{i2}				p_{iN}
...						
Вузол N	p_{N1}	p_{N2}		p_{Ni}		

У таблиці 5.1 по стовбцях вказано назви вузлів з первинними відмовами. У рядках – назви вузлів с залежними відмовами. Елементи даної

матриці (таблиці) заповнюються експертами, які вказують ймовірності залежних відмов для кожного вузла локомотива.

Наприклад: p_{12} – ймовірність того, що відбудеться залежна відмова Вузла №1 при відмові Вузла №2. І у загальному виді: p_{iN} – ймовірність того, що відбудеться залежна відмова Вузла №і при відмові Вузла №N.

Очевидно, що ймовірності типу p_{ii} завжди дорівнюють одиниці.

Для оцінки впливу залежних відмов на систему утримання та вартість життєвого циклу локомотива пропонується використовувати коефіцієнт P_{30} .

Даний показник оцінки впливу залежних відмов на вартість відновлення після відмови обчислюємо наступним чином:

$$P_{30} = \frac{C_3}{C_{\text{непл}}} \cdot 100\% .$$

Розрахунок коефіцієнту P_{30} для кожного вузла локомотива виконується у вигляді таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Оцінка впливу залежних відмов на систему утримання

Групи вузлів	Назва вузла	Вартість планового ремонту вузла,	Вартість непланового ремонту вузла	Вартість непланового ремонту вузла з урахуванням залежних відмов	Оцінка впливу залежних відмов
	Вузол №1	$C_{\text{пл}}$	$C_{\text{непл}}$	C_3	P_{30}
	Вузол №2				
	...				
	Вузол №і				

Розглянемо на прикладі реалізацію даної методики. Для визначення ймовірності залежних відмов вузлів електровоза ДЕ1 було використано метод експертних досліджень. Матриця залежностей приведена у таблиці 5.3. У даній матриці у стовбцях назви елементів з первинною відмовою, у рядках – назви елементів, відмови яких були залежними. Наприклад, відмова вузла Пускові і гальмові резистори з ймовірністю 100% приведе до залежної відмови вузлів Контактори електропневматичні і Контактори допоміжних ланцюгів.

Таблиця 5.3 – Ймовірності виникнення залежних відмов

	Контактори електропневматичні	Контактори електромагнітні	Пускові і гальмові резистори	Демпферні резистори	Швидкодійні вимикачі	Струмоприймачі	Головні повітряні вимикачі	Реле захисту і контролю	Розрядники і обмежники напруги	Високовольтні запобіжники	Контактори допоміжних ланцюгів	Групові перемикачі	Інші перемикачі і роз'єднувачі	Резистори	Акумуляторна батарея	Лічильники електроенергії	Низьковольтні проводи	Блокування і реле	Контролери машиніста	Розділові діоди	Низьковольтні запобіжники	Електронне устаткування	ТЕД
Контактори електропневматичні	1	0,5	1				0,5							1							1		
Контактори електромагнітні	0,5	1												1			1	1				0,5	
Пускові і гальмові резистори	1	1	1											1				1				0,5	
Демпферні резистори				1																			
Швидкодійні вимикачі					1																		
Струмоприймачі						1																	
Головні повітряні вимикачі							1																
Реле захисту і контролю	0,5	0,5						1						1			1	0,5				0,5	1
Розрядники і обмежники напруги									1														
Високовольтні запобіжники										1					1								
Контактори допоміжних ланцюгів	0,3	0,3	1								1						1	0,5				0,5	0,5
Групові перемикачі												1											
Інші перемикачі і роз'єднувачі													1									0,5	0,5
Резистори														1				1	0,5			0,5	0,5
Акумуляторна батарея															1		0,5					0,5	
Лічильники електроенергії																1							
Низьковольтні проводи																	1				1		
Блокування і реле	0,5	0,5																1	0,5			0,5	0,5
Контролери машиніста																			1				
Розділові діоди																				1			
Низьковольтні запобіжники																					1	0,5	
<i>Електронне устаткування</i>	0,5	0,5															0,5					0,5	0,5
<i>ТЕД</i>	0,55	0,33												1	1		1	1				0,5	1

Порівняння вартості ремонтів основних вузлів локомотиву: планових, непланових без урахування залежних відмов та непланових з урахуванням залежних відмов зведені у таблицю 5.4.

Таблиця 5.4 – Оцінка впливу залежних відмов на систему утримання електровоза ДЕ1

Групи вузлів	Назва вузла	Спл	Снепл	Снепл з.о.	% зміни
Апарати силової мережі	Контактори електропневматичні	3,20	22,05	159,764	624,55%
	Контактори електромагнітні	1,16	15,39	103,4272	572,04%
	Пускові і гальмові резистори	4,01	24,69	30,13	22,03%
	Демпферні резистори	0,86	14,66	14,66	0,00%
	Швидкодіючі вимикачі	5,07	26,74	26,74	0,00%
	Струмоприймачі	2,34	19,42	19,42	0,00%
Апарати захисту	Головні повітряні вимикачі	3,14	20,97	20,97	0,00%
	Реле захисту і контролю	3,14	20,97	22,57	7,63%
	Розрядники і обмежники напруги	0,63	13,86	13,86	0,00%
	Високовольтні запобіжники	0,11	12,00	276,07	2200,58%
	Контактори допоміжних ланцюгів	2,24	18,97	18,97	0,00%
Перемикачі	Групові перемикачі	54,76	175,45	175,45	0,00%
	Інші перемикачі і роз'єднувачі	14,20	58,64	58,64	0,00%
Допоміжна апаратура	Резистори	1,75	17,83	248,27	1292,43%
	Акумуляторна батарея	4,04	25,94	286,9	1006,01%
	Лічильники електроенергії	27,59	109,51	109,51	0,00%
Ланцюги керування	Низьковольтні проводи	0,53	12,91	12,91	0,00%
	Блокування і реле	5,68	26,36	274,89	942,83%
	Контролери машиніста	6,48	32,74	277,955	748,98%
	Розділові діоди	0,63	13,88	13,88	0,00%
	Низьковольтні запобіжники	0,15	12,06	12,59	4,39%
	Електронне устаткування	2,60	18,00	154,605	758,92%
	ТЕД	230,44	699,02	715,395	2,34%

Урахування залежних відмов дозволяє виявити вузли локомотива, відмови яких призведуть до значного зростання загальної вартості відновлення (до 12 кратного зростання від номінальної вартості заміни вузла). Тому їх необхідно обслуговувати за плановою системою, а не за технічним станом.

5.3. Формування раціональної системи утримування локомотивів, яка враховує залежні відмови обладнання

В умовах економічного спаду основний напрям скорочення витрат підприємств Укрзалізниці полягає в економії за рахунок підвищення якості послуг, вдосконалення внутрішніх процесів, раціональному використанню ресурсів. Це відноситься повною мірою і до підприємств, які здійснюють технічне обслуговування та ремонт рухомого складу.

Положення про планово-попереджувальну систему ремонту і технічного обслуговування тягового рухомого складу, затверджене наказом №093 – ЦЗ від 30.06.2010, визначає організацію і технологію обслуговування і ремонту локомотивів згідно з наступними параметрами:

- види ТО та ПР та їх кількість;
- періодичність ремонтних впливів;
- обсяги ремонтних впливів.

Норми міжремонтних періодів ДЕ1 по АТ «Укрзалізниця» наступні:

НОРМАТИВНІ МІЖРЕМОНТНІ ПЕРІОДИ					
Технічне обслуговування	Поточні ремонти			Капітальні ремонти	
	ТО-3 (тис.км)	ПР-1 (тис.км)	ПР-2 (тис.км)	ПР-3 (тис.км)	КР-1 (тис.км)
15	30	200	400	800	2400

Раціональна система утримання для даного виду електровозів запропонована у роботі [28]. Для цього виконані наступні дослідження:

1. проведено аналіз надійності вузлів та систем електровозу. З'ясовано, що серед основного обладнання найбільше відмов приходить на електричну апаратуру та тягові двигуни;
2. розроблені технологіко-економічні карти та перелік технологічних операцій ремонту тягового двигуна електровозу ДЕ1, та перелік технологічних операцій ремонту електричної апаратури. Це дозволило провести оцінку витрат на проведення ремонту обсягом ПР-3;
3. побудована залежність витрат на ремонт вузлів електровозу від параметрів його системи утримування: мінімального пробігу між найближчими ремонтами, пробігу до кінця експлуатації і максимально припустимої швидкості приросту середньої кількості відмов.

Запропонована раціональна система утримування ТРС не враховує вплив залежних відмов обладнання. Але як показано у розділі 5.2, залежні відмови можуть приводити до 20-кратного збільшення вартість відновлення обладнання.

Для вдосконалення періодів проведення технічних оглядів і ремонтів з метою підвищення ефективності використання локомотивів за рахунок обліку та мінімізації впливу залежних відмов елементів у дисертаційній роботі проведені наступні дослідження:

1. розроблені матриці для виявлення залежностей між відмовами вузлів локомотиву. Запропоновані матриці заповнюються експертами, для кожного вузла локомотива визначаються залежні вузли (на надійність яких впливає вихід з ладу даного вузла) та ймовірності виникнення їх залежних відмов;
2. розрахована система утримування з урахуванням залежних відмов на прикладі апаратів силової мережі електровоза ДЕ1 (для ремонту ПР-3).

Залежності між вузлами, а також ймовірності виникнення залежних відмов для апаратів силової мережі наведені у таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Залежності між вузлами

№	Апарати силової мережі	Вартість відновлення	Ймовірність виникнення залежної відмови	Залежні елементи
{1}	Контактори електропневматичні	8.62	0,5	
{2}	Електромагнітні контактори	6.29	0,5	{1,3,4}
{3}	Пускові і гальмові резистори	50.51	0,5	{1}
{4}	Демпферні резистори	6.59	0,5	{2}
{5}	Швидкодіючі вимикачі	36.6	0,5	{1,2,3,4}
{6}	Струмоприймачі	32.74	0,5	{1,2,3,4,5}

За допомогою системи комп'ютерної алгебри Maple написана програма для визначення раціональних періодів відновлення вузлів з урахуванням залежних відмов елементів.

Результати розрахунків системи утримування апаратів силової мережі електровозу ДЕ1 з урахуванням залежних відмов показані на рисунку 5.3 (витрати та середні витрати на одиницю пробігу – до ПРЗ) та в таблиці 5.6 (пробіги, об'єми відновлень, об'єми відновлень залежних елементів, вартості відновлень).

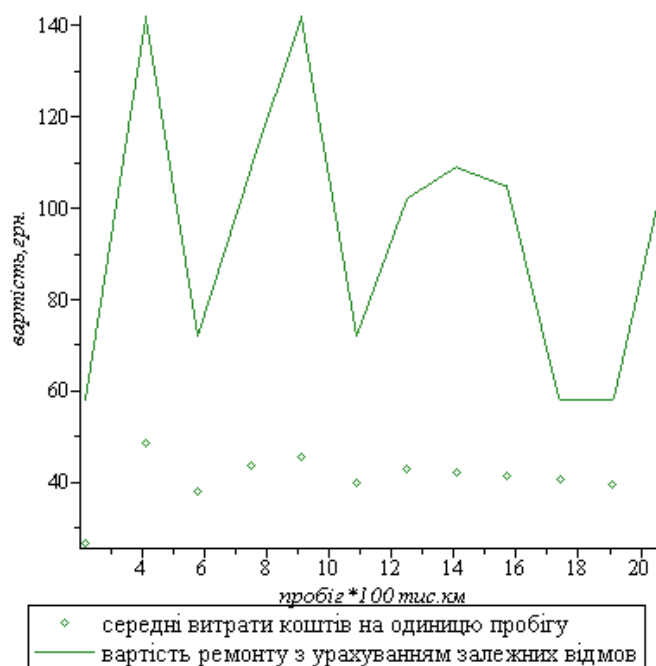


Рисунок 5.3 – Результати розрахунків системи утримування апаратів силової мережі електровозу ДЕ1 з урахуванням залежних відмов

Таблиця 5.6 – Результати розрахунків системи утримування апаратів силової мережі електровозу ДЕ1

n	Пробіг до n-го ремонту (100 тис.км)	Середні витрати на одиницю пробігу при V(n)	V(n) - об'єм n-го ремонту без урахування залежних відмов	об'єм залежних відмов на n-му ремонті	Vz(n) -об'єм n-го ремонту з урахуванням залежних відмов	витрати коштів на ремонт в об'єми Vz(n)
1	2.18	31.2	{w ₁ ,w ₂ ,w ₄ ,w ₅ }	{}	{w ₁ ,w ₂ ,w ₄ ,w ₅ }	58.1
2	4.11	41.1	{w ₁ ,w ₂ ,w ₄ ,w ₅ ,w ₆ }	{w ₃ }	{w ₁ ,w ₂ ,w ₃ ,w ₄ ,w ₅ ,w ₆ }	142
3	5.80	43.3	{w ₁ ,w ₂ ,w ₃ ,w ₄ }	{}	{w ₁ ,w ₂ ,w ₃ ,w ₄ }	72.0
4	7.49	41.7	{w ₁ ,w ₂ ,w ₅ }	{w ₃ ,w ₄ }	{w ₁ ,w ₂ ,w ₃ ,w ₄ ,w ₅ }	109
5	9.10	45.4	{w ₁ ,w ₂ ,w ₄ ,w ₅ ,w ₆ }	{w ₃ }	{w ₁ ,w ₂ ,w ₃ ,w ₄ ,w ₅ ,w ₆ }	142
6	10.9	45.4	{w ₁ ,w ₂ ,w ₃ ,w ₄ }	{}	{w ₁ ,w ₂ ,w ₃ ,w ₄ }	72.0
7	12.5	44.5	{w ₁ ,w ₂ ,w ₅ }	{w ₃ }	{w ₁ ,w ₂ ,w ₃ ,w ₅ }	102
8	14.1	44.3	{w ₁ ,w ₂ ,w ₄ ,w ₅ }	{w ₃ }	{w ₁ ,w ₂ ,w ₃ ,w ₄ ,w ₅ }	109

9	15.7	47.1	{w ₁ ,w ₂ ,w ₃ , w ₄ ,w ₆ }	{}	{w ₁ ,w ₂ ,w ₃ , w ₄ ,w ₆ }	105
10	17.4	46.0	{w ₁ ,w ₂ ,w ₅ }	{w ₄ }	{w ₁ ,w ₂ ,w ₄ ,w ₅ }	58.1
11	19.1	45.4	{w ₁ ,w ₂ ,w ₄ ,w ₅ }	{}	{w ₁ ,w ₂ ,w ₄ ,w ₅ }	58.1
12	20.8	47.1	{w ₁ ,w ₂ ,w ₃ ,w ₅ }	{w ₄ }	{w ₁ ,w ₂ ,w ₃ , w ₄ ,w ₅ }	109

Порівняння систем утримування без урахування і з урахуванням залежних відмов обладнання показано на рисунку 5.4.

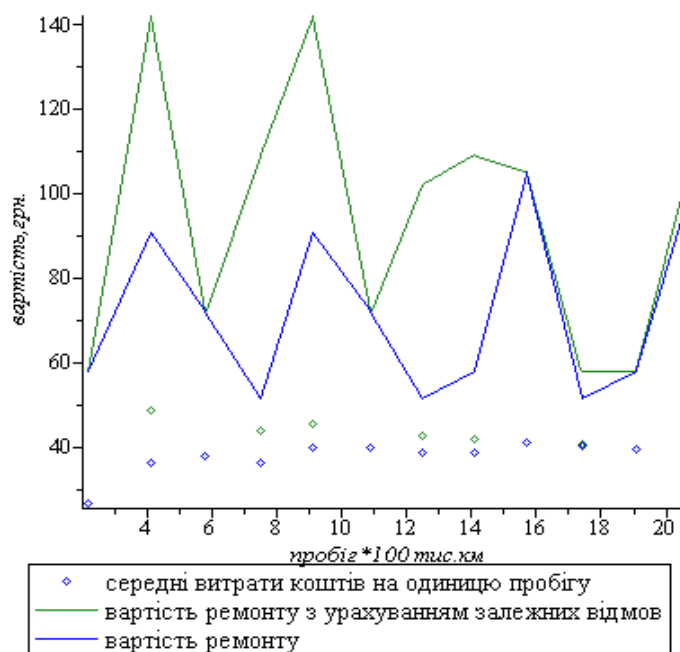


Рисунок 5.4 – Порівняння витрат на систему утримування без урахування та з урахуванням залежних відмов обладнання апаратів силової мережі ДЕ1.

Аналіз розрахунків раціональних періодів ремонту та ймовірностей виникнення залежних відмов обладнання в умовах експлуатації дозволили уточнити перелік технологічних операцій ТО і ПР для електричної апаратури електровоза ДЕ1.

Для оцінки економічної ефективності удосконалення системи ремонту локомотивів шляхом урахування залежних відмов вузлів виконаємо наступні розрахунки (на прикладі ТЕД).

Економічний ефект визначаємо по формулі:

$$E = C_3 \Delta H - C_{\text{нелл}},$$

де C_3 – середня вартість непланового ремонту одного ТЕД з урахуванням залежних відмов;

$\Delta H = H - H_3$ – різниця кількості відмов при існуючій системі утримування і системі, що враховує залежні відмови;

$C_3 \Delta H$ – економія коштів на непланових ремонтах;

Середня вартість одного непланового ремонту C_3 з урахуванням залежних відмов визначається з виразу:

$$C_3 = C_{\text{пл}} + \sum_{i \in V} p_i C_{\text{пл}}^i + C_{\text{лг}} (t_{\text{тр}} + t_{\text{пр}}),$$

де $C_{\text{пл}}^i$ – вартість одного планового ремонту i -го залежного елемента;

$C_{\text{пл}}$ – вартість одного планового ремонту ТЕД ($C_{\text{пл}} = 230,44$ грн.).

p_i – ймовірність залежної відмови i -го елемента;

V – множина залежних елементів;

$C_{\text{лг}}$ – вартість однієї локомотиво-години (5.81 грн.);

$t_{\text{тр}}$ – час транспортування локомотива до місця ремонту;

$t_{\text{пр}}$ – час простою локомотива на ремонті.

Середня кількість відмов при існуючій системі знайдена у [105] в залежності від функції швидкості приросту середньої кількості відмов вузлів локомотива від пробігу. Кількість відмов ТЕД при існуючій системі утримування та при запропонованій системі з урахуванням залежних відмов елементів складає відповідно 4,78 та 1,43.

Розрахуємо економічний ефект від врахування виникнення залежних відмов (для одного ТЕД):

$$E = C_3 \Delta H - C_{\text{нелл}} = 715,40 \cdot (4,78 - 1,43) - 699,02 = 1697,57 \text{ грн.}$$

Економічний ефект від врахування залежних відмов в системі утримування тягового двигуна електровоза ДЕ1 складає 1697,57 грн (до ПРЗ) на один електровоз.

З урахуванням коефіцієнту інфляції, на 2021 рік економічний ефект для ТЕД ДЕ1 складе 10,51 тис. грн. Тобто економія витрат на життєвий цикл ТЕД ДЕ1 при удосконаленні системи утримання з урахуванням залежних відмов складе 10,51 тис.грн.

Методика розрахунку може бути використана для порівняння та оцінки варіантів системи утримання локомотивів та розробці систем діагностування локомотивів.

5.4. Висновки до 5 розділу

1. Запропоновано коефіцієнт, який дозволяє визначати вузли, відмова яких впливає на вартість відновлення більше ніж номінальна їх вартість. За допомогою даного коефіцієнту враховуються ймовірні втрати внаслідок відмови вузла при розробці та коригуванні системи утримання локомотивів.

2. Обчислено вплив залежних відмов на вартість непланових ремонтів вузлів електровоза серії ДЕ1, що дозволило визначити вузли, які потребують посиленого контролю під час проведення регламентних робіт.

3. Запропоновано раціональну систему утримання локомотивів, яка враховує залежні відмови обладнання, та виконано оцінку її економічної ефективності на прикладі ТЕД електровоза серії ДЕ1. Запропонована система утримання дозволяє зменшити вартість життєвого циклу для одного ТЕД цього електровоза на 10,51 тис. грн.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз літератури щодо розвитку систем утримування локомотивів показав на необхідність управління технічним станом локомотивів шляхом корегування термінів проведення профілактичних і ремонтних заходів з урахуванням ймовірності виникнення залежних відмов вузлів локомотива. Виконаний огляд методик вибору раціональної системи утримування локомотивів показав, що сучасні методики не враховують вплив залежних відмов вузлів локомотиву на надійність ТРС.
2. Аналіз причин виникнення транспортних подій виявив значний вплив залежних відмов вузлів локомотиву на статистику появи транспортних подій у локомотивному господарстві. Існуючі системи утримування не враховують можливість виникнення даного виду відмов. Облік залежних відмов вузлів ТРС потребує вивчення розповсюдження залежних відмов по технічній системі.
3. З використанням рекурентних співвідношень на множинах розроблена математична модель розповсюдження залежних відмов по системі. За допомогою даної моделі з'являється можливість визначати елементи системи (вузли локомотива), вартість усунення наслідків відмов яких значно перевищує номінальну вартість відновлення даного елемента (вузла).
4. Запропонована удосконалена методика для вибору раціональної системи утримування локомотивів, в основу якої покладена мінімізація витрат коштів, часу та екологічних ресурсів при збереженні заданого рівня надійності.
5. Розроблено методику оцінки роботи локомотивного парку. Запропоновано використання єдиного інтегрального показника для оцінки різних аспектів роботи локомотивного господарства, який на

відміну від існуючих дозволяє проводити оцінку роботи локомотивного парку на основі великої кількості показників з мінімальною втратою інформації.

6. Проведено оцінку якості виконання системи утримання локомотивного парку, що дозволяє визначати для існуючої системи утримування ступінь її виконання
7. Удосконалено методика аналізу стану безпеки руху в локомотивному господарстві, що дозволяє визначати стан безпеки руху з урахуванням великої кількості факторів, які на нього впливають.
8. Проведена оцінка впливу залежних відмов на вартість непланових ремонтів, що дозволило визначити набір вузлів локомотиву, які потребують корегування міжремонтних строків для зменшення загальної вартості витрат на весь життєвий цикл ТРС.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ушаков И. Жива ли еще теория надежности? *Reliability: Theory & Applications*. 2007. № 1 (Vol. 2). С. 66–83.
2. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. Москва : Наука, 1965. 524 с.
3. Barlow R., F. Proschan. *Mathematical Theory of Reliability*. New York : John Wiley & Sons, 1965. 256 p.
4. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности / под ред. Б. В. Гнеденко. Москва : Сов. радио, 1969. 488 с.
5. Барлоу Р., Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность / под ред. И. А. Ушакова. Москва : Наука, 1984. 328 с.
6. Козлов Б. А., Ушаков И. А. Краткий справочник по расчету надежности радиоэлектронной аппаратуры. Москва : Сов. радио, 1966. 472 с.
7. Козлов Б. А., Ушаков И. А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. Москва : Сов. радио, 1975. 472 с.
8. Надежность технических систем : справочник / под ред. И. А. Ушакова. Москва : Радио и связь, 1985. 606 с.
9. Герцбах И. Б. Модели профилактики (теоретические основы планирования профилактических работ). Москва : Сов. радио, 1969. 214 с.
10. Ушаков И. А. Оценка эффективности сложных систем. *Надежность радиоэлектронной аппаратуры*. Москва : Сов. радио, 1960.
11. Ушаков И. А. Эффективность функционирования сложных систем. *О надежности сложных систем*. Москва : Сов. радио, 1966.
12. Дзиркал Э. В. Задание и проверка требований к надежности сложных изделий. Москва : Радио и связь, 1981. 176 с.
13. Вопросы математической теории надежности / под ред. Б. В. Гнеденко. Москва, 1983. 376 с.
14. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров, М. И. Озеров ; под ред. И. П. Исаева. Москва : Транспорт, 1995. 294 с.
15. Исаев И. П., Матвеевичев А. П., Козлов Л. Г. Ускоренные испытания и прогнозирование надежности электрооборудования локомотивов. Москва : Транспорт, 1984. 244 с.
16. Алехин С. В., Продан Н. С. Надежность механической части подвижного состава. Москва : Транспорт, 1969. 176 с.
17. Галкин В. Г., Парамзин В. П., Четвергов В. А. Надежность тягового подвижного состава. Москва : Транспорт, 1981. 184 с.

18. Повышение надежности экипажной части тепловозов / А. И. Беляев, Б. Б. Бунин, С. М. Голубятников и др. Москва : Транспорт, 1984. 248 с.
19. Мурадян Л. А. Відмови та безвідмовність вагонів як складові експлуатаційної надійності. *Вісн. нац. техн. ун-ту «ХПІ»* : зб. наук. пр. 2015. № 52 (1161). С. 127–130.
20. Боднар Б. Е., Очкасов О. Б., Боднар Е. Б. Использование диагностической информации при разработке системы управления техническим состоянием локомотивов. *Локомотив-информ.* 2011. № 3-4. С.10–13.
21. Боднар Б. Е., Мосендз А. И. Применение структурного моделирования для исследования работы предприятия железнодорожного транспорта. *Межвузовский сб. науч. тр. Днепропетровск*, 1998. С.106–116.
22. Боднар Є. Б., Очкасов О. Б., Шепотенко А. П. Оцінка економічної ефективності впровадження раціональної системи ремонту локомотивів. *Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля.* 2004. № 8(78). С. 25–28.
23. Боднар Б. Е., Очкасов А. Б. Использование метода экспертных оценок при разработке диагностического обеспечения локомотивов. *Научные тр. Кременчугского гос. политехн. ун-та.* 2001. № 1(10). Проблемы создания новых машин и технологий. С. 217– 220.
24. Kapitsa M. I., Hnennyi O. M., Bobyr D. V. Efficiency of modernization of wheel-motor blocks (wmb) using anti-friction traction motor support bearings (TMSB). *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport.* 2018. 4(76). P. 111–124.
25. Капіца М. І. Розвиток наукових основ удосконалення систем утримування тягового рухомого складу : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07. Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. 40 с.
26. Моделювання зміни коефіцієнту технічного використання маневрового тепловозу для різних систем утримання / Фалендиш А. П., Сумцов А. Л., Артеменко О. В., Клецька О. В. *Восточно-Европейский журн. передовых технологий.* 2016. Т. 1. №. 3 (79). С. 24–31.
27. Методы оценки жизненного цикла тягового подвижного состава железных дорог : монография / Э. Д. Тартаковский [и др.]. Луганск : Ноулидж, 2011. 173 с.
28. Боднар Є. Б. Підвищення експлуатаційної надійності локомотивів шляхом впровадження раціональної системи утримування : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07. Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2004. 161 с.

29. Четвергов В. А., Пузанков А. Д. Надежность локомотивов : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / под ред. д-ра техн. наук, проф. В. А. Четвергова. Москва : Маршрут, 2003.
30. Четвергов В. А., Грейф К. И. Организация ремонта и обслуживания тепловозов с проведением предремонтных мероприятий дизель-генераторной установки. *Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава* : материалы Всерос. научно-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2011. С. 97–101.
31. Капустьян М. Ф., Шантаренко С. Г. Инженерные методы анализа и обеспечения эксплуатационной надежности колесно-моторных блоков локомотивов новых серий. *Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава* : материалы Всерос. научно-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2011. С. 72–76.
32. ДНАОП 5.1.11-1.17-96 Правила безопасности при эксплуатации электровозов, тепловозов и моторвагонного подвижного состава : Наказ Держнаглядохоронпраці України від 25.12.96 № 230. URL: https://dnaop.com/html/43737/doc-%D0%94%D0%9D%D0%90%D0%9E%D0%9F_5.1.11-1.17-96 (дата звернення: 15.03.2021).
33. Про затвердження та введення в дію Положення про порядок подачі в ремонт і видачі з ремонту рухомого складу : Наказ Міністерства транспорту України від 22.04.2002. № 261. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0261361-02#Text> (дата звернення: 15.03.2021).
34. ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення. Затверджено і введено в дію наказом Держстандарту України № 333 від 28 грудня 1994 р. URL: https://dnaop.com/html/2273/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_2860-94 (дата звернення: 15.03.2021).
35. ДСТУ 3004-95 Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними. Затверджено і введено наказом Держстандарту України № 31 від 25 січня 1995 р. URL: https://dnaop.com/html/43855/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_3004-95 (дата звернення: 15.03.2021).
36. Данковцев В. Т. Техническое обслуживание и ремонт локомотивов. Москва : УМЦ ЖДТ, 2007. 558 с.
37. Быков Б. В. Технология ремонта вагонов. Москва : Желдориздат, 2001. 559 с.

38. Бервинов В. И. Техническое диагностирование и неразрушающий контроль деталей и узлов локомотивов. Москва : УМЦ ЖДТ, 2008. 332 с.
39. Криворудченко В. Ф. Современные методы технической диагностики и неразрушающего контроля деталей и узлов подвижного состава железнодорожного транспорта. Москва : Маршрут, 2005. 436 с.
40. Ремонт электровозов и электропоездов : учебник для техникумов ж.д. транспорта / В. М. Находкин, А. Г. Хрисанов, Р. Г. Черепашенец, Е. Ф. Ершов, Д. В. Яковлев, С. Я. Мазо. Москва : Транспорт, 1981.
41. Ремонт электроподвижного состава : учеб. для техникумов ж. д. трансп. / В. М. Находкин, Д. В. Яковлев, Р. Г. Черепашенец. Москва : Транспорт, 1989. 295 с.
42. Текущий ремонт и техническое обслуживание электровозов постоянного тока / С. Н. Красковская, Э. Э. Ридель, Р. Г. Черепашенец. Москва : Транспорт, 1989. 408 с.
43. Электровозы и электропоезда / В. К. Калинин. Москва : Транспорт, 1991. 480 с.
44. Петропавлов Ю. П. Технология ремонта электроподвижного состава. Москва : Маршрут, 2006. 432 с.
45. Электровозы ВЛ10 и ВЛ10у. Руководство по эксплуатации / под ред. О. А. Кикнадзе. Москва : Транспорт, 1981. 519 с.
46. Механизация и автоматизация технического обслуживания и ремонта подвижного состава / В. Я. Алтухов, А. Ф. Трофименко, А. С. Зенкин. Москва : Транспорт, 1989. 200 с.
47. Мудраченко С. В., Родионов А. В., Родионов Р. А. Движение поездов без опасности! Тула : Ариэль, 2006. 224 с.
48. Осяев А. Т., Капустьян М. Ф., Шантаренко С. Г. Организационно-технические аспекты организации системы технического обслуживания и ремонта локомотивов. *Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава* : материалы Всерос. научно-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2011. С. 15–30.
49. Тартаковський Е. Д., Крашенін О. О., Бурлуцький О. В. Методика формування технології ТО, ПР локомотивів у післянормативний термін експлуатації. *Вестник Харьковського національного автомобільно-дорожного університета* : сб. науч. тр. 2013. Вып. 60. С. 66–71.
50. Підвищення ефективності використання електричного рухомого складу в депо / А. П. Фалендиш, І. Р. Вихопень, В. Ю. Цапенко, Ф. О. Шатайло. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2016. № 6. С. 44–55. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ikszt_2016_6_8 (дата звернення: 15.03.2021).

- 51.Бабел Марек, Шкода Мацей. Выбор объема модернизации пассажирского тепловоза SP32 по критерию стоимости жизненного цикла. *Вестник СамГУПС*. 2014. № 1 (23). С.54–60.
- 52.Четвергов В. А., Сиряк П. А., Мишин А. И. Роль комплексной системы мониторинга в развитии технического обслуживания и ремонта подвижного состава по результатам диагностирования. *Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава* : материалы Всерос. научно-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2011. С. 233–237.
- 53.Рахматулин М. Л. К вопросу установления периодичности сроков ремонта тепловозов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1960. 18 с.
- 54.Эксплуатационная надежность тепловозов / под ред. д.т.н., проф. Н. А. Фурьянского. Москва : Транспорт, 1966. 208 с.
- 55.Малоземов Н. А., Шапошников В. А. Резервы тепловозной тяги. *Электрическая и тепловозная тяга*. 1967. № 2. С. 34–36.
- 56.Бовин А. А. Влияние соотношения пробегов локомотивов между ремонтами на себестоимость ремонта. *Науч. тр. Днепропетр. ин-та инж. ж.-д. трансп.* 1972. Вып. 141. Повышение эффективности работы тепловоза. С. 11–15.
- 57.Буцько Т. В. Удосконалення методів розрахунку параметрів системи технічного утримання локомотивів : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07. ХарДАЗТ, 1996. 43 с.
- 58.Босов А. А. Теоретические основы и методика расчета рациональных плановых восстановлений локомотивов и вагонов : дис. ... д-ра техн. наук. Днепропетровск, 1986.
- 59.Босов А. А., Гришечкина Т. С., Савченко Л. Н. Влияние зависимых отказов на безопасность технических систем на примере анализа транспортных происшествий с 2005 по 2008 год. *Локомотив-информ*. 2010. № 1. С. 5–8.
- 60.Шепилов О. Н., Домышев А. В., Осак А. Б. Алгоритмы и программы анализа режимной надёжности ЭЭС при множественных отказах с учётом срабатывания противоаварийной автоматики. DOI: 10.13140/RG.2.1.2670.4080
- 61.Моделирование отказов по общей причине в рамках ВАБ АЭС на основе новых информационных технологий и подходов / Г. А. Ершов, Ю. Л. Ермакович, М. А. Парфентьев, В. Б. Морозов, Г. В. Токмачев. *Сб. тр. 5-й Междунар. Конф. «обеспечение безопасности АЭС С ВВЭР»*. (Подольск, 29 мая - 1 июня 2007 г.). Подольск, 2007.
- 62.Анищенко В. А., Машко А. В. Надежность резервированных релейно-контактных систем при множественных отказах.

- Энергетика. Изв. вузов и энергетических объединений СНГ.* 2007. № 1. Р. 16–22.
63. Osak A., Shepilov O. N., Domyshev A. Modern methods and software for contingency analysis of power systems with multiple faults modeling and system protection devices modeling. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики.* 2008. I. С. 170–78.
64. Павлов А. Н. Исследование структурной надежности П-сетей с независимыми и зависимыми отказами элементов. *Тр. СПИИРАН.* 2009. Вып. 11. С. 81–91.
65. Кузнецов П. А. Зависимые отказы в многофункциональных автоматизированных системах управления. *Сибирский журн. науки и технологий.* 2015. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zavisimye-otkazy-v-mnogofunktsionalnyh-avtomatizirovannyh-sistemah-upravleniya> (дата звернения: 15.03.2021).
66. Щербицкая Т. В., Басова Н. С., Валиуллин Р. Г. Основные факторы и причины повреждаемости узлов и деталей турбокомпрессоров. *Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава* : материалы Всерос. научно-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2011. С. 122–125.
67. Харрис Т. Е. Теория ветвящихся случайных процессов. Москва : Мир, 1966. 356 с.
68. Севастьянов Б. А. Ветвящиеся процессы. Москва : Наука, 1971. 436 с.
69. Гихман И. И., Скороход А. В. Введение в теорию случайных процессов. Москва, 1977. 568 с.
70. Гихман И. И., Скороход А. В. Теория вероятностей. В 3 т. Москва : Наука, 1971. 665 с.
71. Гихман И. И., Скороход А. В., Ядренко М. И. Теория вероятностей и математическая статистика. Киев : Вища шк., 1979. 408 с.
72. Athreya K. V., Ney P. E. Branching process. Berlin : Springer – Verlag, 1972. 285 p.
73. Бартлетт М. С. Введение в теорию случайных процессов. Москва : Изд-во иностранной лит-ры, 1959. 384 с.
74. Karlin S., McGregor J. On the spectral representation of branching processes with mean one. *J. Math. Anal. And Appl.* 1968. 21, №3. P. 486–495.
75. Севастьянов Б. А. Предельные теоремы для ветвящихся процессов с превращениями, зависящими от возраста частиц. Теория вероятности и ее применение. 1968. 13, N 2. С. 243–264.
76. Ватутин В. А., Зубков А. М. Ветвящиеся процессы. *Итоги науки и техн. Сер.: Теория вероятности. Математическая статистика. Теоретическая кибернетика.* 1985. № 23. С. 3–67.

77. Нагаев С. В., Мухамедханова Р. Некоторые предельные теоремы из теории ветвящихся случайных процессов. *Предельные теоремы и статистические выводы*. Ташкент, 1966. С. 83–90.
78. Нагаев С. В., Асадуллин М. Х. Предельные теоремы для критического ветвящегося процесса с иммиграцией. *Математические заметки*. 1982. 32, № 4. С. 537–548.
79. Сенета Е. *Правильно меняющиеся функции*. Москва : Наука, 1985. 144 с.
80. Митов К. В. Условная предельная теорема для докритического ветвящегося процесса с иммиграцией. *Мат. и мат. образов. Докл. 11 пролет. конф, Союза мат. Болгария, Сличев Бряг, 6–9 апр. 1982. София, 1982, С. 398–403.*
81. Форманов Ш. К., Ибрагимов Р. Предельная теорема для ветвящихся процессов с иммиграцией в критическом случае. *Научн. тр. Ташкент. ун-та*. 1970. Вып. 394. С. 176–184.
82. Аронов И. З. Анализ зависимых отказов – важный способ обеспечения безопасности сложных систем. *Методы менеджмента качества*. 2004. № 10. С. 49–53. URL: http://ria-stk.ru/mmqa/detail.php?ID=7725&sphrase_id=686315 (дата звернення: 15.03.2021).
83. Морозов В. Б., Токмачев Г. В. Подход к моделированию отказов по общей причине в вероятностном анализе безопасности проектов новых АЭС с ВВЭР-1000. *Изв. вузов. Ядерная энергетика*. 2008. № 4. С. 31–41.
84. Александровская Л. Н., Аронов И. З., Круглов В. И., Кузнецов А. Г., Патраков Н. Н., Шолом А. М. *Безопасность и надежность технических систем*. Москва : Логос, 2004. 376 с. URL: <http://www.bibliorossica.com/book.html?currBookId=6317&ln=en> (дата звернення: 15.03.2021).
85. Надежность в электроэнергетике. URL: <http://ee-system.ru/metod-uchityvayushhij-zavisimye-otkazy-elementov/> (дата звернення: 15.03.2021).
86. Аналіз стану безпеки руху на залізницях України за 2006 рік. Київ, 2007.
87. Аналіз стану безпеки руху на залізницях України за 2007 рік. Київ, 2008.
88. Аналіз стану безпеки руху на залізницях України за 2008 рік. Київ, 2009.
89. Положення про класифікацію транспортних подій на залізничному транспорті та метрополітенах України : Наказ Міністерства транспорту України від 22.03.2002 N 196. URL: https://zakononline.com.ua/documents/show/80689__534322 (дата звернення: 15.03.2021).

90. Босов А. А., Курасов Д. А. Прогнозирование эффективности технологических мероприятий по увеличению коммутационной надежности тяговых двигателей. *Вопросы оптимизации содержания электроподвижного состава* : Тр. ДИИТа. 1972. Вып. 134. С.156–165.
91. Наговицын В. С., Кудрявцев В. М. Опыт эксплуатации переносной высоковольтной установки. *Локомотив*. 1995. № 10. С. 31–32.
92. Босов А. А. Аксиоматическое построение математической модели восстановления. *Вестник ХГУ «Прикладная математика и механика»*. 1978. Вып. 43. С. 50–55.
93. Босов А. А., Лоза П. А. Теоретические основы рационального содержания подвижного состава железных дорог. Днепропетровск : Изд-во ООО предприятие «Дриант», 2015. 252 с.
94. Кокс Д., Смит В. Теория восстановления. Москва : Сов. радио, 1967. 299 с.
95. Прохоров Г. В., Леденев М. А., Колбеев В. В. Пакет символьных вычислений MapleV. Москва : Петит, 1997. 200 с.
96. Ван дер Ваден Б. Л. Алгебра. Москва : Мир, 1976. 648 с.
97. Хинчин А. Я. Работы по математической теории массового обслуживания. Москва : ФМ, 1963. 235 с.
98. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и её приложения. Москва : Мир, 1967. Т. 2. 752 с.
99. Гришечкина Т. С. Моделирование зависимых отказов элементов сложных технических систем. *Труды Ростов. гос. ун-та путей сообщения*. 2015. № 3. С. 50–56.
100. Лоули Д., Максвелл А. Факторный анализ как статистический метод. Москва : Мир, 1967. 144 с.
101. Ногин В. Д. Упрощенный вариант метода анализа иерархий на основе нелинейной свертки критериев. Санкт-Петербург, 2004. 17 с.
102. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. Москва : Радио и связь, 1993. 278 с.
103. Інструкція № ЦС/ЦТ-0010 щодо обліку наявності, стану й використання локомотивів та МВРС : затв. наказом УЗ №72-Ц від 20.02.2002. Київ, 2002. 27 с.
104. Виноградов Ю. Н. Выбор показателей использования электровозов для дифференцирования норм пробегов между их ремонтами. *Вестн. ВНИИЖТа*. 1975. № 7. С. 6–9.
105. Гришечкіна Т. С. Побудова математичної моделі раціональної системи утримання технічних об'єктів залізничного транспорту. *Транспортные системы и технологии перевозок*. 2017. №14. С. 30–35.

106. Боднар Є. Б., Очкасов О. Б., Шепотенко А. П. ефективності впровадження раціональної системи ремонту локомотивів. *Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля*. 2004. № 8(78). С. 25–28.
107. Ochkasov O., Shvets O., Černiauskaitė L. Usage of Intelligent Technologies in Choosing the Strategy of Technical Maintenance of Locomotives. *Technologijos ir Menas = Technology and Art*. 2017. № 8. P. 68–71.
108. Bodnar B. E., Bolzhelarskyi Y. V., Ochkasov O. B., Hryshechkina T. S., Černiauskaitė L. Determination of integrated indicator for analysis of the trafficsafety condition for traction rollingstock. *Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2018) : The 12th International Scientific Conf., (April 26–27, 2018, Panevėžys)*. P. 45–54.
109. Gelumbickas Gintaras, Vaičiūnas Gediminas. Research on the influence of operational factors on the number of failures of diesel locomotives' engines. *Transport Problems: an International Scientific Journal*. 2014. Vol. 9, Issue 1. P. 5-12.
110. Measurement and Evaluation of Reliability, Availability and Maintainability of a Diesel Locomotive Engine / D. Bose, G. Ghosh, K. Mandal, S. P. Sau, S. Kunar. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2013. Vol. 6, N. 4. P. 515–534.
111. NFEN 50126-1-2000 Стандарт: EN50126 «Застосування до залізничного транспорту: специфікація та демонстрація надійності, наявності, підтриманості та безпеки (RAMS)» URL: <https://standards.globalspec.com/std/1272146/cenelec-en-50126-1> (дата звернення: 15.03.2021).
112. Калабухін Ю. Є., Каменева Н. М., Зленко Д. Д. Концепція життєвого циклу в теоретичному підході до вибору варіанту інвестицій в оновлення парка тягового рухомого складу. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2018. № 62. С. 241–248.
113. Методика определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта. Утверждена распоряжением ОАО РЖД от 27.12.2007. URL: <http://ipem.ru/images/stories/Files/lcc/llc%20methodology%20rzd.pdf> (дата звернення: 15.03.2021).
114. Bodnar B., Ochkasov O. System Choice of the Technical Maintenance of Locomotives Equipped with on-Board Diagnostic Systems. *Transport Means : Proc. of 21st Internat. Scientific Conf., September 20–22, 2017 / Kaunas University of Technology Klaipėda University [and others]. Juodkrante, Kaunas, Lithuania, 2017. P. I. P. 43–47.*

ДОДАТОК А

Текст програми

```

>restart;
A:=[{3},{5,7},{5,6,7},{2,10},{4,1,3},{},{8},{},{1,10},{}];#Взає
мозвязки між елементами
  A :=[{3},{5,7},{5,6,7},{2,10},{1,3,4},{},{8},{},{1,10},{}]

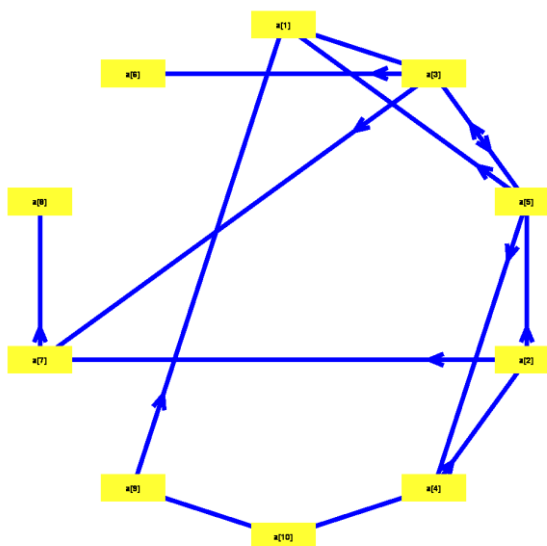
>C:=array(1..10,[2,7,3,4,1,5,2,5,9,1]):#вартості відновлень
>with(GraphTheory):
  Побудова графа взаємозвязків елементів
>V:=[seq(a[i1],i1=1..nops(A))];#Побудова вершин
  V :=[a1,a2,a3,a4,a5,a6,a7,a8,a9,a10]

>kk:=0:EE:={}:#Побудова ребер
for jj from 1 to nops(A) do
  for i3 from 1 to nops(A[jj]) do
    B[i3]:=[a[jj],a[op(i3,A[jj])]];
    EE:=EE union {B[i3]};
  end do;
kk:=kk+1:end do:EE;
  {[a1,a3],[a2,a5],[a2,a7],[a3,a5],[a3,a6],[a3,a7],[a4,a2],[a4,a10],[a5,a1],[a5,a3],
  [a5,a4],[a7,a8],[a9,a1],[a9,a10]}

>F:=Graph(V,EE);
  F := Graph 1: a directed unweighted graph with 10 vertices and 14 arc(s)

>DrawGraph(F);

```



Детермінована модель

```

>w:=2:#Елемент, якій відмовив першим
>m:=1:#Номер хвили відмов
T[m]:=A[w];#Список елементів, пошкоджених на m-й хвили
Z:={w};#Загальне число пошкоджених елементів
  T1 := {5,7}

```

Z := {2}

```
>while T[m]<>{} do
  for i from 1 to nops(T[m]) do
    Z:=Z union A[op(i,T[m])];
  end do;
  T1:={}:
  for j from 1 to m do T1:=T1 union T[j]: end do:#Список
елементів, пошкоджених на попередніх хвилях
  m:=m+1:
  T[m]:=Z minus T1;
end do:
print(`Через відмову елемента`,w,` будуть пошкоджені
елементи`,Z,` Загальна кількість хвиль відмов - `,m-1);
  ×āđāç â³āīāó āēāīāīdā, 2, āóāōdū īřēīāāāī³ āēāīāīdē, { 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10 },
  Çāāāēūā ē³ēūē³ñōū dāēēū ā³āīā - , 3
```

```
>k1:=0:
```

```
>c_all:=0:
```

Розрахунок повної вартості відновлення

```
>for k in Z do k1:=k1+1;
```

```
  c_all:=c_all+C[k];
```

```
  #print(k1,k,C[k]);
```

```
end do:
```

```
>print("Кількість елементів, що відмовили - ",k1);
```

```
"E³ēūē³ñōū āēāīāīdā, ū ā³āīāāēē - ", 9
```

```
>print("Повна вартість відновлення - ",c_all);
```

```
"Īāāā āāđd³ñōū ā³āīāāāū - ", 30
```

Ймовірнісна модель

```
>p:=array(1..10,[0.6,0.2,0.1,0.6,0.2,0.6,0.1,0.6,0.6,0.6]):#зад
ані ймовірності залежних відмов
```

```
>w:=2:#Елемент, якій відмовив першим
```

```
>m:=1:#Номер хвилі відмов
```

```
>#Моделюємо ймовірності відмов
```

```
>r1 := rand(0 .. 100):
```

```
>r:=array(1..10,[]);
```

```
r := array(1 .. 10, [ ])
```

```
>for i from 1 to 10 do
```

```
  r[i] := 0.01*r1();
```

```
  if r[i] = 1 then r[i] := .99;
```

```
  elif r[i] = 0 then r[i] := 0.1e-1;
```

```
  end if;
```

```
  print(i, r[i]);
```

```
end do:
```

```
1, 0.92
```

```
2, 0.44
```

```
3, 0.95
```

```

4, 0.05
5, 0.97
6, 0.58
7, 0.43
8, 0.99
9, 0.37
10, 0.68

>T[m]:={};
T1 := { }

>for i in A[w] do
  if r[i]>p[i] then T[m]:=T[m] union {i}; end if;
  print(i,r[i],p[i],T[m]);
end do;
5, 0.97, 0.2, {5}
7, 0.43, 0.1, {5, 7}

>T[m];#Список елементів, пошкоджених на m-й хвилі
Z:={w} union T[m];#Загальне число пошкоджених елементів
{5, 7}
Z:={2, 5, 7}

>while T[m]<>{} do
  for i from 1 to nops(T[m]) do
    A[op(i,T[m])];#1 volna z.o.
    r1 := rand(0 .. 100):
    r:=array(1..10,[]);
    for i2 from 1 to 10 do
      r[i2] := 0.01*r1();
      if r[i2] = 1 then r[i2] := .99;
      elif r[i2] = 0 then r[i2] := 0.1e-1;
      end if;
      #print(i2, r[i2]);
    end do:
    TT[m+1]:={};
    for i in A[op(i,T[m])] do
      if r[i]>p[i] then TT[m+1]:=TT[m+1] union {i}; end
if;
      #print(m+1,i,r[i],p[i],TT[m+1]);
    end do;

    Z:=Z union TT[m+1];
    #print("z= ",Z);
  end do;
  T1:={}:
  for j from 1 to m do

```

```
T1:=T1 union T[j]:#Список елементів, пошкоджених на
попередніх хвилях
```

```
end do:
```

```
  m:=m+1:
```

```
  T[m]:=Z minus (T1 union {w});
```

```
  #print("m=",m," T[m]=",T[m]);
```

```
end do;
```

```
print(`Через відмову елемента`,w,` будуть пошкоджені
елементи`,Z,` Загальна кількість хвиль відмов - `,m-1);
```

```
  T1 := { }
```

```
  m := 2
```

```
  T2 := {3,4}
```

```
  T1 := { }
```

```
  m := 3
```

```
  T3 := {6}
```

```
  T1 := { }
```

```
  m := 4
```

```
  T4 := { }
```

$\times \hat{a} \hat{d} \hat{a} \hat{c} \hat{a}^3 \hat{a} \hat{i} \hat{a} \hat{o} \hat{a} \hat{e} \hat{a} \hat{i} \hat{a} \hat{o} \hat{a}, 2, \acute{a} \acute{o} \acute{a} \acute{o} \acute{o} \acute{u} \acute{i} \acute{\eta} \acute{e} \acute{i} \acute{a} \acute{x} \acute{a} \acute{f} \acute{a} \acute{e} \acute{a} \acute{i} \acute{a} \acute{o} \acute{e}, \{2, 3, 4, 5, 6, 7\},$

$\zeta \hat{a} \hat{a} \hat{a} \hat{e} \hat{u} \hat{i} \hat{a} \hat{e}^3 \hat{e} \hat{u} \hat{e}^3 \hat{n} \hat{o} \hat{u} \hat{o} \hat{a} \hat{e} \hat{e} \hat{u} \hat{a}^3 \hat{a} \hat{i} \hat{a} -, 3$

```
>#for k from 1 to m do print(T[k]) end do;
```

```
>k1:=0:
```

```
>c_all:=0:
```

Розрахунок повної вартості відновлення ймовірнісної моделі

```
>for k in Z do k1:=k1+1;
```

```
  c_all:=c_all+C[k];
```

```
  #print(k1,k,C[k]);
```

```
end do:
```

```
>print("Кількість елементів, що відмовили - ",k1);
```

```
"E3eue3nou aeaio3a, u1 a3aiaee - ", 6
```

```
>print("Повна вартість відновлення - ",c_all);
```

```
"I1a1a1 a1a1o3nou a3aiaea1y - ", 22
```

```
>with(plots):
```

```
>with(CurveFitting):t:='t':
```

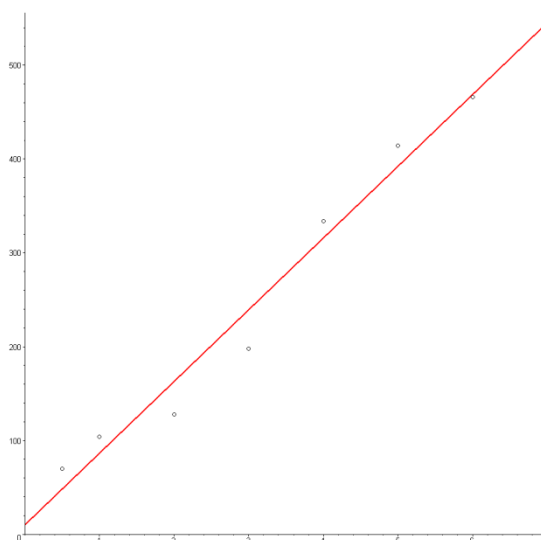
```
c1:=LeastSquares([[0.5,70],[1,104],[2,128],[3,198],[4,334],[5,414],[6,466]], x);
```

```
c1 := 10.17563739 + 76.40793201 x
```

```
>p1:=plot([[0.5,70],[1,104],[2,128],[3,198],[4,334],[5,414],[6,466]], thickness=5, symbol=CIRCLE, symbolsize=13, style=POINT, color=black):
```

```
>p2:=plot(c1,x=0..7, thickness=3):
```

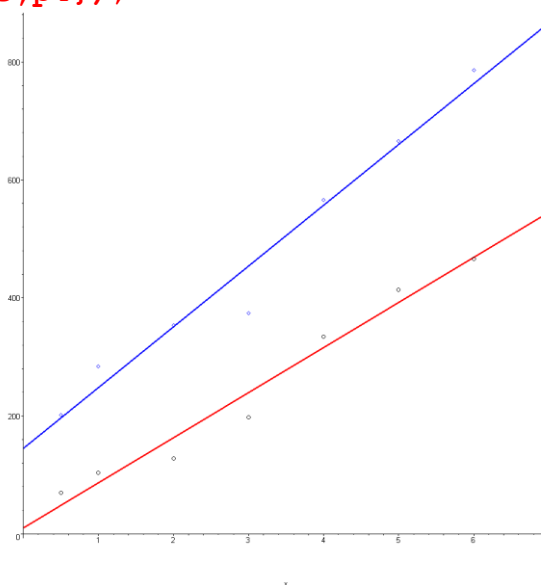
```
>display({p1,p2});
```



```
p3:=plot([[0.5,202],[1,284],[2,354],[3,374],[4,566],[5,666],[6,786]],thickness=5,symbol=diamond,symbolsize=13,style=POINT,color=blue):
```

```
>p4:=plot(145+103*x,x=0..7,thickness=3,color=blue):
```

```
>display({p1,p2,p3,p4});
```



ДОДАТОК Б

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні праці:

1. Босов А. А., Гришечкина Т. С., Савченко Л. Н. Математическое моделирование зависимых отказов технического объекта. *Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*. 2009. Вып. 28. С. 129-132.
2. Kapitsa M. I., Hryshechkina T. S. Rational Recovery Model of Depot Processing Equipment at the Industrial Enterprise. *Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*. 2014. Вып. 4 (52). С. 60-66.
3. Лоза П. А., Гришечкина Т. С. Оценка качества выполнения системы содержания парка электроподвижного состава. *Электрификация транспорта*. 2015. № 9. С. 87-93.
4. Гришечкіна Т. С. Побудова математичної моделі раціональної системи утримання технічних об'єктів залізничного транспорту. *Транспортные системы и технологии перевозок*. 2017. Вып. 14. С. 30-35. DOI: 10.15802/tstt2017/123165
5. Bodnar B., Bolzhelarskyi Y., Ochkasov O., Hryshechkina T., Černiauskaite L. Determination of Integrated Indicator for Analysis of the Traffic Safety Condition for Traction Rolling Stock. *Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2018) : the 12th Intern. Sci. Conf. (April 26–27, 2018, Panevėžys) / Kaunas University of Technology. Panevėžys, 2018. P. 45–54. Retrieved from www.scopus.com*
6. Bodnar B., Ochkasov O., Bodnar E., Hryshechkina T., Keršys R. Safety Performance Analysis of the Movement and Operation of Locomotives. *Transport Means 2018 : proc. of the 22nd Intern. Sci. Conf. (Oct. 03–05, 2018, Trakai, Lithuania). Kaunas, 2018. Pt. II. P. 839–843. Retrieved from www.scopus.com*
7. Bodnar B. E., Ochkasov O. B., Bodnar E. B., Hryshechkina T. S., Ocheretnyuk M. V. Simulation of locomotive repair organization by the methods of queue systems theory. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2018. № 5 (77). P. 28–40. DOI: 10.15802/stp2018/147740
8. Bodnar B. E., Hryshechkina T. S., Bodnar E. B. Choosing the System of Locomotive Maintenance in View of the Effect of Dependent Failures. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2018. № 6 (78). P. 47-58.

9. Bodnar B., Ochkasov O., Hryscheckina T., Bodnar E., Skvireckas R. Consideration of Dependent Failures Impact on Selecting the System of Locomotive Maintenance. *Transport Means 2019* : proc. of the 23rd Intern. Sci. Conf. (Oct. 02–04, 2019, Palanga, Lithuania). Kaunas, 2019. Pt. III. P. 1103–1107. Access Mode: <https://transportmeans.ktu.edu/wp-content/uploads/sites/307/2018/02/Transport-means-2019-Part-3.pdf> (18.11.19). Retrieved from www.scopus.com

Праці апробаційного характеру:

10. Гришечкина Т. С. Моделирование зависимых отказов в технических системах. *Системный анализ и информационные технологии* : материалы

14-й Междунар. научно-техн. конф. SAIT 2012 (Київ, УНК “ІПСА” НТУУ “КПІ”, 24 квітня 2012 г.). Київ, 2012. С. 48-49.

11. Босов А. А., Гришечкина Т. С. Учет зависимых отказов при усовершенствовании систем содержания технических объектов. *Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта* : тезисы докл. 68-й Междунар. научно-практ. конф. (Днепропетровск, ДНУЖТ, 2008 г.). Днепропетровск, 2008. С.16.

12. Гришечкина Т. С. Повышение надежности тягового подвижного состава путем усовершенствования контроля отказов элементов. *Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта* : тезисы докл. 69-й Междунар. научно-практ. конф. (Днепропетровск, ДНУЖТ, 21-22 мая 2009 г.). Днепропетровск, 2009. С.71.

13. Гришечкина Т. С. Сравнительный обзор систем содержания локомотивов. *Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта* : тезисы докл. 74-й Междунар. научно-практ. конф. (Днепропетровск, ДНУЖТ, 15-16.05.2014). Днепропетровск, 2014. С. 11-13.

14. Лоза П. А., Гришечкина Т. С. Новый подход к оценке системы содержания локомотивного парка дороги. *Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта* : тезисы докл. 75-й Междунар. научно-практ. конф. (Днепропетровск, ДНУЖТ, 14-15 мая 2015 г.). Днепропетровск, 2015. 510 с.

15. Гришечкина Т. С. Модели зависимых отказов элементов технических систем. *Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта* : тезисы докл. 76-й Междунар. научно-практ. конф. (Днепропетровск, ДНУЖТ, 20.05.2016). Днепропетровск, 2016. С. 13-14.

16. Очкасов О. Б., Гришечкина Т. С., Коренюк Р. О. Оцінка інформативності діагностичних параметрів з використанням методів зниження розмірності. *Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств* : тези 6-ї Міжнар. науково-практ. конф. (Дніпро, ДНУЗТ, 29.11 – 30.11.2017). Дніпро, 2017. С. 111-113.

17. Очкасов О. Б., Гришечкіна Т. С. Вплив показників надійності на вартість життєвого циклу локомотива. *Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств* : тези 7-ї Міжнар. науково-практ. конф. (Дніпро, ДНУЗТ, 30 листопада 2018 р.). Дніпро, 2018. С. 121-123.

18. Боднар Б. Є., Очкасов О. Б., Боднар Є. Б., Гришечкіна Т. С. Оцінка роботи локомотивного парку з використанням методів зменшення розмірності. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : тези 79-ї Міжнар. науково-практ. конф. (Дніпро, ДНУЗТ, 16-17 травня 2019 р.). Дніпро, 2019. С. 23-24.

Додаткові праці, які відображають наукові результати дисертації

19. А.с. Твір Комп'ютерна програма «Програмне забезпечення для оцінки впливу залежних відмов на систему утримування технічних об'єктів залізничного транспорту» / Т. С. Гришечкіна (Україна). №82306; опубл. 17.10.2018.

20. Гришечкіна Т. С. Моделирование зависимых отказов элементов сложных технических систем. *Труды Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2016. № 2. С. 13-17.

21. Очкасов О. Б., Гришечкіна Т. С., Очеретнюк М. В. Применение методов теории массового обслуживания при моделировании работы цеха ремонта локомотивов. *21th Conference for Lithuanian Junior Researchers "Science - Future of Lithuania. Transport Engineering and Management"* (Vilnius Gediminas Technical University. May 4, 2018 – May 5, 2018). Vilnius, 2012. P. 40-44.

22. Очкасов А. Б., Гришечкіна Т. С., Очеретнюк М. В. Подходы к моделированию системы технического обслуживания локомотивов. *Актуальні проблеми автоматизації та управління* : V Міжнар. науково-практ. інтернет-конф. молодих учених та студентів (Луцьк, Луцький національний технічний університет, 2017). Луцьк, 2017. № 5. С. 100-105.

23. Босов А. А., Гришечкіна Т. С., Савченко Л. Н. Влияние зависимых отказов на безопасность технических систем: анализ транспортных происшествий с 2005 по 2008 гг. *Локомотив-информ*. 2010. № 5. С. 46-50.

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

УЗГОДЖЕНО:

Проректор з навчально-наукової, економічної роботи, перспективного та інноваційного розвитку ДНУЗТ, професор Радкевич А.В.




« 23 » 12 2020р.




ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор технічний
ПрАТ «Металургтрансремонт»
Мінчук В.П.



« 28 » 12 2020р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НДР

Ми, які нижче підписалися, представник **Виконавця** – проректор з навчально-наукової, економічної роботи, перспективного та інноваційного розвитку Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, професор Радкевич Анатолій Валентинович з однієї сторони та представник **Замовника** – директор технічний ПрАТ «Металургтрансремонт» Мінчук Вячеслав Петрович з другої сторони, склали цей акт про те, що згідно договору №0117U002068 «Удосконалення методів випробування та діагностування обладнання локомотивів» проведено наукові дослідження та досягнуто наступні результати:

Удосконалено методику визначення пошкоджень обладнання локомотивів шляхом урахування впливу залежних відмов вузлів локомотивів. Запропоновано облік впливу залежних відмов виконувати за допомогою рекурентних співвідношень на множинах. Це дозволяє знаходити вузли локомотивів, які відмовляють в наслідок залежних відмов взаємопов'язаного обладнання, а також визначити сумарний набір пошкоджень та загальну вартість відновлення.

Удосконалено методи стендових випробувань та аналізу результатів діагностування гідравлічних передач та дизелів тепловозів в умовах локомотиворемонтного заводу. Запропонована методика визначення пошкоджень з урахуванням залежних відмов дозволяє скоротити час проведення ремонту за рахунок звуження пошуку елементів, які відмовили.

Відповідальні виконавці:

Очкасов О.Б.,
к.т.н., доцент

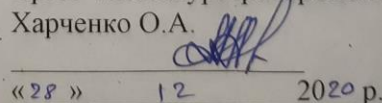


Гришечкіна Т.С.,
фахівець 1 кат.



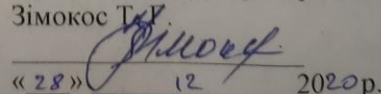
« 23 » 12 2020р.

Начальник відділу технічного контролю
ПрАТ «Металургтрансремонт»
Харченко О.А.



« 28 » 12 2020р.

Начальник технічного відділу
ПрАТ «Металургтрансремонт»
Зімокос Т.В.



« 28 » 12 2020р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор університету

з науково-педагогічної, економічної

роботи, перспективного та

інноваційного розвитку

А. В. Радкевич

«25» 02 2021 р.



АКТ

про використання науково-практичних результатів дисертаційної роботи
Гришечкіної Тетяни Сергіївни
«Удосконалення системи утримання технічних об'єктів залізничного
транспорту з урахуванням залежних відмов їх елементів»

м. Дніпро

«25» 02 2021 р.

Даний акт складено про те, що отримані в дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук Гришечкіної Т.С. наукові результати прийняті до використання при викладанні дисциплін «Математичне забезпечення проектування та експлуатації високошвидкісного рухомого складу» та «Математичні методи та моделі в спеціальних задачах» на кафедрі «Локомотиви», у частинах:

1. В лекційній частині курсу «Математичне забезпечення проектування та експлуатації високошвидкісного рухомого складу» використовуються методи зниження розмірності даних для оцінки прийнятої системи утримання високошвидкісного тягового рухомого складу.
2. В лекційній та практичній частинах курсу «Математичні методи та моделі в спеціальних задачах» використовуються метод головних компонент та метод аналізу ієрархій для оцінки стану безпеки руху у локомотивному господарстві.

Завідувач кафедри «Локомотиви»,

д.т.н., професор

М.І. Капіца