

В.В. Кривда, к.т.н., доц.

О.П. Сакно, к.т.н., доц.

К.І. Корніленко, асист.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

С.П. Чуйко, доктор філософії, доц.

В.П. Шумляківський, к.т.н.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Огляд підходів до підвищення надійності та ефективності технічної експлуатації автотранспорту з урахуванням обґрунтованості інженерних рішень

У статті представлено оглядовий аналіз підходів до забезпечення надійності та ефективності технічної експлуатації автотранспортних засобів через впровадження інженерних рішень, розглянутих як елемент керованої динамічної системи. Управління надійністю базується на системному аналізі вразливих компонентів, застосуванні методів оцінки надійності, перевірки та прогнозування технічного стану. Особливу увагу приділено проблемі прогнозування відмов за умов експлуатації з метою мінімізації витрат. Розрахунки при цьому узагальнюються і спрямовані до мінімізації витрат, пов'язаних з функціонуванням автотранспортних засобів. Під час дослідження аналізуються основи надійності, теплопередачі в енергоустановках, системи технічного обслуговування, техніко-економічне обґрунтування інженерних рішень, а також математичні методи аналізу експлуатаційних властивостей автомобілів, застосування математичних методів аналізу експлуатаційних властивостей автотранспорту. Акцентовано на ролі технологічних процесів, автоматизації та методичних засад підвищення ефективності обслуговування. У контексті технічної експлуатації автотранспорту інженерні рішення передбачають розробку та впровадження технічних, технологічних і організаційних заходів, спрямованих на підвищення надійності, зниження витрат та екологічного навантаження. Підвищення надійності на етапі проєктування та модернізації забезпечується за рахунок довговічності та ремонтпридатності конструкцій. Застосований системний підхід поєднує моделювання процесів та використання інструментів техніко-економічного аналізу.

Ключові слова: технічна експлуатація; надійність; теплопередача; технічне обслуговування; інженерні рішення.

Актуальність теми. У зв'язку з постійним ускладненням конструкцій автотранспортних засобів та зростанням вимог до ефективності їх експлуатації питання комплексного забезпечення надійності та обґрунтованості інженерних рішень стають критично важливими для автотранспортних підприємств. Під інженерними рішеннями розуміють технічні, технологічні й організаційні заходи, що ґрунтуються на аналізі технічного стану транспортних засобів, експлуатаційних даних і ресурсних обмежень. Заходи з оптимізації систем охолодження, вибору конструкційних матеріалів, удосконалення системи технічного обслуговування, впровадження діагностичних та аналітичних програмних засобів. Їх обґрунтованість визначається через техніко-економічний аналіз та оцінку ефективності впровадження щодо забезпечення раціонального використання ресурсів і підвищення надійності транспортних засобів.

Метою дослідження є систематизований огляд підходів до підвищення надійності та ефективності технічної експлуатації автотранспортних засобів, а також можливостей обґрунтування інженерних рішень у цій сфері. Основні завдання полягають в аналізі актуальних технічних, організаційних та економічних рішень, дослідженні методів контролю технічного стану, узагальненні сучасних підходів до діагностики, теплотехнічного моделювання та оцінювання ефективності технічного обслуговування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз робіт вчених з теорії надійності і технічної експлуатації автомобілів свідчить, що розвиток методів забезпечення працездатності рухомого складу і функціонування відбувається у напрямі удосконалення методів теорії інформації. Технічний стан елементів транспортних засобів, працездатність транспортної системи запропоновано описати на основі сукупності діагностичних параметрів їх стану та показників надійності. При цьому, на думку авторів [1], діагностичні параметри поділяються на впливові та ті, що практично не реагують на зміну функцій стану транспортних засобів і транспортних систем. Одним з варіантів такого рішення є розподілене інтелектуальне мережеве управління, засноване на застосуванні кіберфізичного підходу під час створення, функціонування та удосконалення транспортно виробничих систем.

Технічне обслуговування (ТО) є ключовим елементом експлуатаційної стратегії автотранспортного підприємства, оскільки безпосередньо впливає на надійність, довговічність та економічну ефективність

функціонування рухомого складу. Своєчасне та якісне ТО дозволяє запобігати передчасним відмовам агрегатів, знижувати витрати на ремонт та підвищувати технічну готовність автотранспорту.

У [2] стверджено, що доцільність використання різних типів автомобілів залежить від вартості самого автомобіля та вартостей різних компонентів експлуатації, таких як паливо та електроенергія, трудомісткість робіт при ТО, експлуатаційні матеріали, особливості податкового законодавства кожної країни. Це свідчить, що урахування амортизаційних відрахувань під час визначення питомої собівартості експлуатації транспортного засобу є важливою складовою, яку необхідно враховувати, особливо в умовах здійснення комерційної діяльності, як фактор виваженого вибору рухомого складу для заданих умов експлуатації. Розроблена економічна методика оцінки питомої собівартості експлуатації транспортних засобів з різними типами силових установок дозволяє оцінити питому собівартість експлуатації транспортних засобів з різними типами силових установок і врахувати витрати на паливо та електроенергію, ТО та поточний ремонт, мастильні та експлуатаційні матеріали, зношування та ремонт шин, інші прямі витрати, пов'язані з експлуатацією автомобіля.

Важливою складовою якості ТО і ремонту транспортних засобів є економічна складова. У процесі ремонту транспортних засобів (ТЗ) витрати на запасні частини становлять близько 50–70 % від вартості ремонту. Собівартість відновлення деталей не перевищує 30–50 % ціни нових. Таким чином, ціна капітально відремонтованої техніки буде на 30–40 % нижче за ціни нових при порівнянному ресурсі роботи [3].

Застосування на рухомому складі складних високоефективних електронних систем управління, самодіагностування, розвитку супутникових систем навігації, впровадження сучасних інформаційних технологій дає змогу не тільки контролювати географічне положення ТЗ у просторі і здійснювати зв'язок із диспетчером автопідприємства, але і виконувати дистанційний моніторинг (діагностику систем) з оцінкою рівня технічного стану ТЗ, що дає змогу прогнозувати поточний ремонт [4].

Іншим важливим аспектом є документообіг ТО, що забезпечує простежуваність усіх робіт, гарантійних зобов'язань та є основою для формування статистичної бази. За наявності джерел статистичної інформації про тривалу експлуатацію певного об'єкта як класифікаційні ознаки доцільно застосовувати кількісні критерії [5]. Документообіг дозволяє фіксувати дату, обсяг і зміст кожного ТО чи ремонту, відстежити виконавців робіт, а також зберігати історію технічного стану кожного транспортного засобу. Це критично важливо для гарантійного обслуговування, планування технічних втручань і впровадження систем управління якістю, таких як FMEA чи ERP. Зібрані дані слугують основою для аналізу частоти відмов, оцінки ризиків і формування рейтингів технічної надійності. Ідентифікація через простежуваність – один з основних елементів системи управління якістю функціонування об'єкта. Такий підхід допомагає користувачам зменшувати ризики. Проте зростає потреба у вдосконаленні критеріїв ранжування режиму відмови та використання номера черговості змінного пріоритету на межі ризику, наприклад, частота відмов на одну тисячу одиниць ТЗ [5].

Об'єктом дослідження є процес технічної експлуатації автотранспортних засобів, та технічні, технологічні та організаційні рішення, спрямовані на забезпечення їхньої надійності, ефективності та техніко-економічної доцільності. У дослідженні застосовано методи системного аналізу, техніко-економічного моделювання, математичної статистики, а також методи експертного оцінювання.

Викладення основного матеріалу. Теорія надійності послідовно відображає всі етапи функціонування конструкції об'єкта і не лишається незмінною протягом всього етапу експлуатації автомобіля. Спочатку розглянемо основи надійності та триботехнічні аспекти. Надійність автомобіля – це комплексна характеристика, що відображає здатність транспортного засобу безвідмовно виконувати задані функції протягом певного періоду часу та/або пробігу в заданих режимах та умовах експлуатації [6]. Основою формування надійності є триботехнічні аспекти, враховуючи механізми зношування, якість поверхонь тертя, властивості мастильних матеріалів, режими навантаження. Значне місце у забезпеченні надійності займає правильний підбір матеріалів, використання сучасних методів термічної обробки та технологій поверхневого зміцнення.

До ключових факторів належать конструктивні особливості вузлів та агрегатів, якість виготовлення та складання, умови експлуатації, враховуючи кліматичні й дорожні, дотримання режимів технічного обслуговування та ремонтів, рівень кваліфікації персоналу та технічна культура підприємства. Важливим є також впровадження інформаційно-аналітичних систем моніторингу технічного стану, тому доцільно розглянути методи оцінки та прогнозування надійності.

Науковий підхід до оцінки надійності базується на кількісному аналізі відмов, що містить статистичне моделювання з використанням функцій надійності, інтенсивності відмов, середнього напрацювання на відмову (Mean time between failures MTBF) [7]. Експертні оцінки дозволяють враховувати специфіку реальних умов експлуатації. Прогнозування реалізується через моделі деградації, що враховують дані про знос, навантаження та температурні режими. Сучасні підходи враховують використання методів штучного інтелекту та машинного навчання для побудови предиктивних моделей. Прогностична аналітика може трансформувати процес виконання робіт і забезпечити більш точне та ефективне управління

маркетинговими ресурсами. Підхід до аналізу надійності включає системне застосування математичних, статистичних і експертних методів, що дозволяє об'єктивно оцінювати технічний стан транспортних засобів і прогнозувати їх подальше функціонування у складних умовах експлуатації.

Дослідження процесів теплопередачі в енергетичних установках автомобілів є необхідною умовою для забезпечення стабільної роботи двигуна, запобігання перегріву та зниження втрат енергії. Ефективне керування тепловими потоками дозволяє підвищити довговічність агрегатів і оптимізувати паливну ефективність, що напряму пов'язано з надійністю та економічністю технічної експлуатації транспортного засобу. Теплопередача – це невід'ємний інженерно-аналітичний компонент, що обґрунтовує вибір технологічних і технічних рішень у системі експлуатації ТЗ.

У двигунах внутрішнього згорання теплопередача реалізується трьома основними механізмами:

Перший, це теплопровідність:

$$q = -\lambda \nabla T, \quad (1)$$

другий – конвекція:

$$q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty), \quad (2)$$

та тепловим випромінюванням:

$$q = \sigma \varepsilon T^4, \quad (3)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, ∇T – градієнт температури, h – коефіцієнт тепловіддачі, A – площа поверхні, T_s – температура поверхні, T_∞ – температура навколишнього середовища, σ – стала Стефана – Больцмана, ε – коефіцієнт випромінювання.

Застосування цих процесів спостерігається в сорочці охолодження блоку циліндрів двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ), теплообмінниках радіаторів та масляних системах. Розподіл теплових потоків у ДВЗ охоплює передачу тепла від зони згорання до навколишніх вузлів, враховуючи головку блоку циліндрів, поршень, сорочку охолодження та систему мащення. Основна частина тепла (~30–40 %) передається до системи охолодження, ~30 % – через систему випуску, ~5–10 % – через мастильну систему, решта передається через розсіювання і розсіюється назовні.

Таким чином, розподіл тепла в енергоустановках визначається конструктивними особливостями двигуна, тепловим навантаженням, а також ефективністю охолоджувальних та змащувальних систем. Оптимізація теплопередачі дозволяє уникнути термічного перевантаження вузлів і забезпечити довговічність агрегатів. На основі експериментальних даних і CFD-моделювання [8, 9] можна побудувати докладну картину теплових потоків, що стане підґрунтям для подальших конструкторських рішень у технології виробництва ДВЗ.

Тепер розглянемо вплив теплових режимів на експлуатаційні характеристики. Експлуатаційна ефективність ДВЗ істотно залежить від стабільності теплового режиму. Згідно з даними, наведеними у [10], перевищення оптимальної температури на 10 °C знижує ресурс двигуна на 15 %. Перегрів викликає термічні деформації, зниження в'язкості моторної оливи, а також можливість появи детонації. Низька температура призводить до збільшення тертя та утворення нагару.

Підтримання оптимального температурного режиму реалізується шляхом використання високоефективних теплообмінників, електронно-регульованих термостатів та вентиляторів, які забезпечують адаптивну зміну швидкості обертання залежно від температури. Сучасні системи містять електронні блоки керування (ECU) [11], що на основі сигналів з температурних датчиків регулюють подачу охолоджувальної рідини.

Математичне моделювання теплових процесів дозволяє прогнозувати точки перегріву та оптимізувати конфігурацію елементів охолодження ДВЗ. Для цього використовуються програми на базі Computational fluid dynamics CFD-аналізу, такі як ANSYS Fluent або SolidWorks Flow Simulation [11].

Науковий підхід до організації ТО ґрунтується на принципах системності, стандартизації регламентів, оптимізації ресурсів і застосування інтелектуальних систем моніторингу. Основу сучасної методики ТО становлять системи регламентного обслуговування, що базуються на пробігу або часі експлуатації, враховуючи ТО-1, ТО-2, сезонному обслуговуванні, діагностики, що передбачає використання приладів контролю технічного стану з урахуванням параметрів роботи агрегатів (вібрація, температура, тиск, рівень шуму тощо), прогнозно-аналітичні методики, які дозволяють моделювати деградацію вузлів і визначати оптимальні терміни технічного втручання (метод залишкового ресурсу).

У аналізі процесу обслуговування та моніторингу технічного стану автомобіля можна використовувати електронні бази даних на основі Enterprise Resource Planning ERP-систем, наприклад, «SAP», «1C», «My Car», «Manager Pro», «TransOffice», вони дозволяють інтегрувати ТО в загальну логістику підприємства, тобто система планування ресурсів підприємства, яка інтегрує всі ключові бізнес-процеси в межах однієї платформи – облік, постачання, управління технічним обслуговуванням, логістику, документообіг, звітність та ін. Технічна експлуатація повинна бути гнучкою, науково обґрунтованою та інтегрованою в єдину інформаційно-аналітичну систему автотранспортного підприємства. Такий підхід дозволяє досягти зниження експлуатаційних витрат, підвищення безпеки руху та екологічності транспортних процесів.

У контексті технічної експлуатації автотранспорту інженерні рішення передбачають розробку та впровадження технічних, технологічних і організаційних заходів, спрямованих на підвищення надійності, зниження витрат та екологічного навантаження. Науковий підхід до таких рішень базується на системному аналізі, моделюванні експлуатаційних процесів та використанні методів техніко-економічного обґрунтування (ТЕО). ТЕО дозволяє визначити доцільність реалізації конкретного рішення на основі порівняння витрат та очікуваної економії.

Розглянуто ключові етапи, що складаються з аналізу проблеми або вихідної ситуації, формування альтернативних варіантів рішень, розрахунку капітальних та експлуатаційних витрат, оцінки економічного ефекту, зокрема через показники окупності, внутрішньої норми прибутковості, чистого приведенного доходу, врахування ризиків та факторів невизначеності.

Одним із прикладів техніко-економічного аналізу може бути обґрунтування доцільності впровадження автоматизованої системи технічного обслуговування. Наприклад, витрати на придбання та встановлення системи складають 300 тис. грн, щорічна економія на простій техніці та зменшенні витрат на ремонті – близько 120 тис. грн. Термін окупності у такому випадку складе менше трьох років. Інший приклад, коли вибір енергозберігаючого обладнання для сервісного центру при початкових витратах становить 150 тис. грн і річній економії електроенергії – 40 тис. грн, чистий приведений дохід за п'ять років перевищує 50 тис. грн. Методологічною основою для такого аналізу є нормативи з економіки транспорту, галузеві методичні рекомендації та програмні продукти для обчислень ПП Microsoft (Excel). Успішне застосування інженерних рішень вимагає міждисциплінарного підходу з урахуванням технічних, економічних та екологічних факторів.

Водночас методологією ТО вивчено технологічні процеси в системі автотранспортного підприємства (АТП). Вони охоплюють послідовність операцій, що враховують технічне обслуговування (ТО-1, ТО-2, діагностику), ремонтні роботи, передрейсову підготовку, зберігання транспортних засобів та внутрішню логістику на підприємстві. Особливе місце посідає автоматизація, яка включає застосування електронних черг, моніторингових систем і цифрового документообігу. Науковий підхід до організації цих процесів ґрунтується на принципах логістичної оптимізації, стандартизації процедур та інтеграції сучасного обладнання, що сприяє підвищенню ефективності функціонування АТП та сервісу.

Організація технологічного процесу визначається потужністю підприємства, структурою парку ТЗ, рівнем автоматизації та наявністю ремонтної бази. Важливим напрямом є оптимізація логістики – це розташування виробничих зон, внутрішній транспорт, мінімізація переміщень. Для цього застосовуються методи теорії масового обслуговування, мережевого планування та імітаційного моделювання. При цьому треба враховувати технологічне обладнання, інтенсивність потоку ТЗ та інші фактори.

Автоматизація технологічних процесів значно підвищує ефективність, дозволяє зменшити вплив людського фактора, підвищити точність діагностики та оперативність обслуговування. На практиці це реалізується через впровадження автоматизованих ліній ТО, систем керування чергою, електронного документообігу і централізованого моніторингу всіх етапів процесу.

Таким чином, оптимально організовані технологічні процеси є основою раціонального функціонування АТП або сервісу і значною мірою визначають ефективність усієї експлуатаційної системи.

Вище було розкрито технологічні аспекти організації виробничих процесів на АТП та сервісі, що формують матеріальну базу для реалізації експлуатаційних стратегій. Логічним продовженням є аналіз експлуатаційних властивостей транспортних засобів, що дозволяє оцінити ефективність впроваджених технічних і організаційних рішень на основі кількісних показників і математичних моделей. Таким чином, зв'язок між технологічною організацією та фактичними експлуатаційними результатами встановлюється саме через цей етап дослідження.

Нижче представлено експлуатаційні властивості автотранспортного засобу (АТЗ), які визначаються його здатністю ефективно, безпечно та економічно виконувати транспортні функції в умовах реальної експлуатації. Теорія цих властивостей базується на кількісному аналізі таких параметрів, як витрати пального, динаміка, гальмівні характеристики, керованість, стійкість, прохідність та інші. Ключовими техніко-експлуатаційними показниками є коефіцієнт технічної готовності $K_{ТГ}$ за підходом [12]:

$$K_{ТГ} = \frac{T_{\text{експ}}}{T_{\text{експ}} + T_{\text{рем}}}; \quad (4)$$

де $T_{\text{експ}}$ – час, коли транспортний засіб був у експлуатації, $T_{\text{рем}}$ – час, коли транспорт перебував у ремонті.

Середня витрата пального q :

$$q = \frac{V_{\text{п}}}{L}; \quad (5)$$

де $V_{\text{п}}$ – об'єм витраченого пального, л, L – пробіг (пробіг ТЗ, км) [13].

Питома витрата енергії на одиницю роботи:

$$E_{\text{п}} = \frac{W}{Q}; \quad (6)$$

де W – виконана транспортна робота, (т·км), Q – загальна витрачена енергія, (кВт·год / т·км).

Розрахунок питомої витрати енергії дозволяє об'єктивно оцінити енергоефективність транспортного процесу. Чим менше значення цього показника – тим менше енергії витрачається на виконання одиниці

корисної роботи (наприклад, перевезення вантажу на певну відстань), що є критерієм ефективності. Це має важливе значення як для зниження енергозатрат, так і для екологічної сталості автотранспортної системи. Він широко використовується в практиці для порівняння різних типів ТЗ, оптимізації маршрутів, а також у техніко-економічному обґрунтуванні вибору транспортних засобів [14].

У методику пропонується включити математичні та статистичні методи обробки інформації щодо експлуатаційних характеристик. Широко застосовуються такі математичні та статистичні методи як регресійний аналіз, тобто встановлення залежностей між технічними параметрами та експлуатаційними результатами [15]. Метод реалізується у вигляді рівняння:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + \varepsilon, \quad (7)$$

де y – залежна змінна (витрати пального, л/100 км), x_n – незалежні змінні (маса ТЗ, кг; температура двигуна, °C), a_n – коефіцієнти регресії, які не мають одиниць вимірювання, бо визначаються на основі нормалізованих даних, ε – випадкова похибка, яка вимірюється в тих самих одиницях, тобто л/100 км у цьому прикладі.

Кореляційний аналіз – метод виявлення взаємозв'язків між змінними, оцінюється за допомогою коефіцієнта кореляції Пірсона [16], де:

$$-1 \leq r \leq 1, \quad (8)$$

де значення $r \approx 1$ свідчить про сильний прямий зв'язок; $r \approx -1$ – сильний обернений зв'язок; $r \approx 0$ – відсутність зв'язку.

Коефіцієнт r є безрозмірною величиною, оскільки обчислюється як нормалізоване співвідношення коваріації до добутку стандартних відхилень двох змінних. Застосовується для оцінки ступеня лінійної залежності між параметрами, наприклад, між витратами пального та масою ТЗ або температурою двигуна.

Кластерний аналіз – метод багатовимірної статистики, що дозволяє групувати об'єкти, наприклад, транспортні засоби за схожими характеристиками технічного стану [17]. Це здійснюється шляхом поділу даних на групи (кластери), всередині яких об'єкти мають мінімальну варіацію, а між кластерами – максимальні відмінності. Найчастіше застосовується алгоритм k -середніх (k -means), який мінімізує функцію відстані між точками та центрами кластерів за формулою:

$$J = \sum_i = 1^k \sum_{x \in C_i} \|x - \mu_i\|^2, \quad (9)$$

де k – кількість кластерів, C_i – множина об'єктів у кластері, μ_i – центр кластера, а $\|x - \mu_i\|^2$ – квадратична евклідова відстань.

Застосування такого підходу дозволяє виявляти типові групи ТЗ з подібним рівнем зносу, частотою відмов або параметрами експлуатації, що є підґрунтям для індивідуалізованого обслуговування та гнучкого планування технічного втручання, що може бути використано для адаптивного планування ТО, прогнозування відмов або персоналізованих стратегій обслуговування. Інтеграція класичних статистичних методів з сучасними технологіями інтелектуального аналізу даних дозволяє адаптувати підхід до умов реального автопарку. Методика дозволяє інженерам та керівникам автотранспортних підприємств підвищити ефективність планування ТО, зменшити кількість відмов, оптимізувати енерговитрати та забезпечити економічно обґрунтоване управління експлуатацією ТЗ. Методи багатовимірної статистики [17], зокрема факторний аналіз, що дозволяє зменшити розмірність даних та виділити основні латентні (приховані) фактори впливу, основна мета якого це виявити структуру взаємозв'язків між численними змінними та звести їх до меншої кількості узагальнюючих факторів. Типова математична модель факторного аналізу має вигляд:

$$x_i = \lambda_{i1}F_1 + \lambda_{i2}F_2 + \dots + \lambda_{im}F_m + \varepsilon_i, \quad (10)$$

де x_i – i -та початкова змінна мають одиниці відповідно до типу змінної (наприклад, витрата пального – л/100 км, пробіг – км, F_m – m -й фактор (латентна змінна), λ_{im} – факторне навантаження, що показує силу зв'язку між фактором та змінною, ε_i – залишкова похибка моделі.

F_m – безрозмірні латентні фактори, оскільки зазвичай у факторному аналізі застосовується стандартизація наприклад, Y -нормалізація усіх початкових змінних. Тобто кожен фактор – це абстрактна змінна, яка має нульове середнє значення і стандартне відхилення 1. Він вимірюється в умовних одиницях і не має фізичних одиниць вимірювання.

λ_{im} – також безрозмірні коефіцієнти, що показують «вагу» або «внесок» відповідного фактора у формування конкретної початкової змінної. Чим ближче модуль λ до 1 – тим сильніший зв'язок. Розглянемо приклад, якщо x_1 – це «середня витрата пального», то факторний аналіз може показати, що ця змінна залежить на 70 % від загального «технічного стану» та на 30 % – від «стилю керування». У такому випадку $\lambda_{11} = 0.7$, $\lambda_{12} = 0.3$. Методи багатовимірної статистики застосовуються у технічній діагностиці для виявлення ключових параметрів, які впливають на надійність та ресурс вузлів і агрегатів ТЗ. Це дозволяє скоротити обсяг контрольованих параметрів та зосередитися на найбільш інформативних змінних, що покращує якість діагностики та ефективність прийняття інженерних рішень [18].

Сучасна практика передбачає використання інтелектуальних алгоритмів обробки даних (нейронні мережі, дерева рішень) та машинного навчання для побудови предиктивних моделей технічного стану ТЗ. Наприклад, алгоритм регресії може спрогнозувати час до відмови вузла за історичними даними. Високоточне прогнозування дозволяє планувати ТО за станом, оптимізувати ресурси та знижувати ризик відмов.

У таблиці 1 показано аналіз результатів впровадження запропонованої методики технічного обслуговування, який показав суттєві покращення в експлуатаційних показниках. На основі статистичних даних з реального автопарку були побудовані порівняльні характеристики, що демонструють ефективність впроваджених рішень (рис. 1).

Таблиця 1

Порівняльні характеристики методики технічного обслуговування

Показник	Класична методика	Запропонована методика
Середній простій в ТО, ремонті (год/міс.)	24	12
Кількість відмов на 1000 км	3,5	1,2
Річні витрати на ТО, ремонт (тис. грн)	180	120
Рівень технічної готовності (%)	88	95

Для візуального уявлення змін на рисунку 1 представлено порівняльні результати між класичною та запропонованою методикою технічного обслуговування.

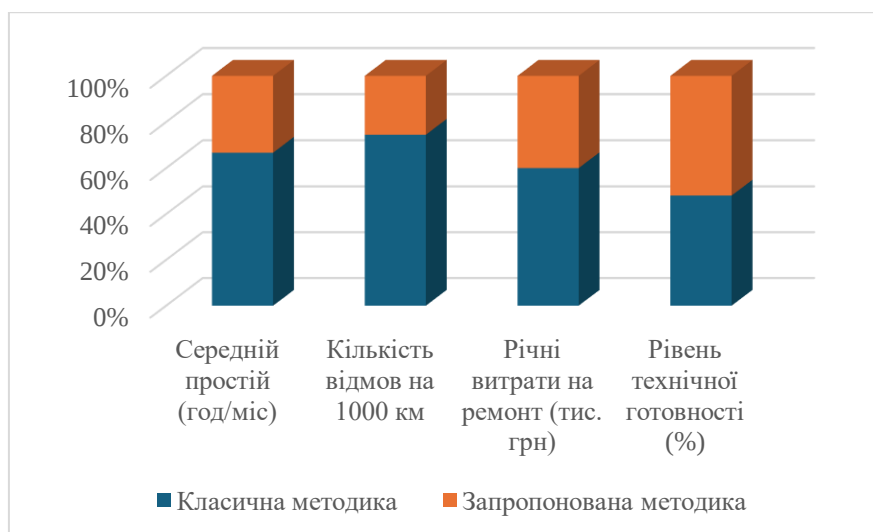


Рис. 1. Порівняння класичної та запропонованої методики технічного обслуговування транспортних засобів

Ці результати підтверджують доцільність використання діагностичних і аналітичних інструментів, що дозволяють скоротити час простоїв, зменшити частоту відмов, підвищити загальну технічну готовність автопарку та знизити витрати. Для реалізації цих завдань пропонується застосовувати спеціалізовані ПЗ.

Висновки. У результаті теоретичного аналізу та узагальнення літературних і нормативних джерел доведено доцільність комплексного підходу до забезпечення надійності, ефективності та обґрунтованості інженерних рішень у системі технічної експлуатації автотранспорту. Розглянуто ключові технічні, теплотехнічні, організаційні та економічні аспекти, що формують основу для розробки рекомендацій щодо вдосконалення практики технічного обслуговування. Представлені оціночні порівняльні дані демонструють потенційні переваги впровадження запропонованих підходів як зменшення кількості відмов, скорочення простоїв, підвищення технічної готовності та зниження витрат. Перспективами подальших досліджень є верифікація висновків шляхом практичного впровадження моделей, розширення бази прогнозування й автоматизація прийняття рішень на основі інтелектуальних систем управління.

Список використаної літератури:

1. Принципи побудови та функціонування кіберфізичної системи технічного сервісу автотранспортної та мобільної сільськогосподарської техніки / В.В. Аулін, А.В. Гриньків, С.В. Лисенко та ін. // Науковий журнал «Інженерія та природокористування». – 2020. – № 3 (17). – С. 101–110 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://surl.li/cgojue>.
2. Технічна інженерія оцінка вартостей експлуатації транспортних засобів з різними типами силових установок / С.І. Андрусенко, О.С. Бугайчук, А.В. Лобода, Д.О. Савостін-Косяк // Технічна інженерія. – 2020. – № 2 (86). – С. 3–12 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://surl.li/qofbhw>.
3. Грушецький С.М. Організація експлуатації та технічного обслуговування транспортних засобів і машин в Україні і за кордоном / С.М. Грушецький, В.М. Яропуд, С.А. Токарчук // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2021. – № 112 (1). – С. 126–136. DOI: 10.37128/2520-6168-2021-1-14.

4. Удосконалення методу оцінки програмного забезпечення контролю параметрів транспортних засобів / В.П. Волков, І.В. Грицук, В.П. Кузьмел та ін. // Вісник машинобудування та транспорту. – 2024. – № 1 (19). – С. 11–20 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [\https://surl.li/nvzcmf\](https://surl.li/nvzcmf).
5. Методологічний підхід до розв'язання проблеми надійності функціонування автомобільних транспортних систем / Д.В. Голуб, В.В. Біличенко, В.В. Аулін та ін. // Вісник машинобудування та транспорту. – 2024. – № 1 (19). – С. 29–38 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [\https://surl.li/buajxw\](https://surl.li/buajxw).
6. Даниленко К.О. Міцність, надійність та довговічність автомобіля / К.О. Даниленко, Г.О. Красна, М.М. Кравцов // Автомобільний транспорт в аграрному секторі: проектування, дизайн та технологічна експлуатація : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. – Харків : ХНТУСГ, 2020. – С. 91–93.
7. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги : ДСТУ 2862-94 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [\https://surl.li/zcmsya\](https://surl.li/zcmsya).
8. Performance comparison of CFD-DEM solver MFiX-Exa, on GPUs and CPUs / S.Lao, A.Holt, D.Vaidhyanathan and other // arXiv:2108.08821. – 2021 [Electronic resource]. – Access mode : [\https://surl.li/gandbj\](https://surl.li/gandbj).
9. Biroun M.H. Unchannelized granular flows: Effect of initial granular column geometry on fluid dynamics / M.H. Biroun, L.Mazzei // Chemical Engineering Science. – 2024. – Vol. 292. DOI: 10.1016/j.ces.2024.119997.
10. Evaluating Vehicle Energy Efficiency in Urban Transport Systems Based on Fuzzy Logic Models / V.Mateichyk, N.Kostian, M.Smieszek and other // Energies. – 2023. – Vol. 16. DOI: 10.3390/en16020734.
11. Probst C. Toyota Prius – Engine Control Systems / C.Probst // Bosch Fuel Injection and Engine Management. – Robert Bentley Incorporated, 1989 [Electronic resource]. – Access mode : www.autoshop101.com.
12. Sandborn P. System Sustainment: Acquisition And Engineering Processes For The Sustainment Of Critical And Legacy Systems / P.Sandborn, W.Lucyshyn. – World Scientific, 2022.
13. Information on the fuel consumption of new cars [Electronic resource]. – Access mode : [\https://surl.li/qaixad\](https://surl.li/qaixad).
14. Чуйко С.П. Ключові фактори енергоефективності міського автобуса / С.П. Чуйко // Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури : збірка тез III міжнар. наук.-практ. конф., 5–7 грудня. – К. : ДП «Державний автотранспортний науково-дослідний і проектний інститут», 2023. – С. 346–349.
15. Використання регресійного аналізу для розуміння складних взаємозв'язків [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [\https://surl.li/gbpwwh\](https://surl.li/gbpwwh).
16. Виведення стандартної помилки для коефіцієнта кореляції Пірсона [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [\https://surl.li/xzqcoo\](https://surl.li/xzqcoo).
17. Tan P.-N. Cluster Analysis: Basic Concepts and Algorithms / P.-N. Tan, M.Steinbach, V.Kumar // Introduction to Data Mining. – Addison-Wesley, 2005. – Chapter 7.
18. Borucka A. Forecasting the readiness of special vehicles using the semi-Markov model / A.Borucka, A.Niewczas, K.Hasilova // Eksploatacja i niezawodnosc – Maintenance and Reliability. – 2019. – Vol. 21 (4). – P. 662–669. DOI: 10.17531/ein.2019.4.16.

References

1. Aulin, V.V., Hryniv, A.V., Lysenko, S.V. et al. (2020), «Pryntsypy pobudovy ta funktsionuvannia kiberfizychnoi systemy tekhnichnoho servisu avtotransportnoi ta mobilnoi silskohospodarskoi tekhniki», *Naukovyi zhurnal «Inzheneriia ta pryrodokorystuvannia»*, No. 3 (17), pp. 101–110, [Online], available at: [\https://surl.li/cgojye\](https://surl.li/cgojye)
2. Andrusenko, S.I., Buhaichuk, O.S., Loboda, A.V. and Savostin-Kosiak, D.O. (2020), «Tekhnichna inzheneriia otsinka vartosti ekspluatatsii transportnykh zasobiv z riznymy typamy sylovykh ustanovok», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 2 (86), pp. 3–12, [Online], available at: [\https://surl.li/qofbhw\](https://surl.li/qofbhw)
3. Hrushetskyi, S.M., Yaropud, V.M. and Tokarchuk, S.A. (2021), «Orhanizatsiia ekspluatatsii ta tekhnichnoho obsluhovuvannia transportnykh zasobiv i mashyn v Ukraini i za kordonom», *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*, No. 112 (1), pp. 126–136, doi: 10.37128/2520-6168-2021-1-14.
4. Volkov, V.P., Hrytsuk, I.V., Kuzhel, V.P. et al. (2024), «Udoskonalennia metodu otsinky prohramnoho zabezpechenniakontroliu parametriv transportnykh zasobiv», *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, No. 1 (19), pp. 11–20, [Online], available at: [\https://surl.li/nvzcmf\](https://surl.li/nvzcmf)
5. Holub, D.V., Bilichenko, V.V., Aulin, V.V. et al. (2024), «Metodolohichniy pidkhid do rozv'iazannia problemy nadiinosti funktsionuvannia avtomobilnykh transportnykh system», *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, No. 1 (19), pp. 29–38, [Online], available at: [\https://surl.li/buajxw\](https://surl.li/buajxw)
6. Danylenko, K.O., Krasna, H.O. and Kravtsov, M.M. (2020), «Mitsnist, nadiinist ta dovhovichnist avtomobilia», *Avtomobilnyi transport v ahrarnomu sektori: proiektuvannia, dyzain ta tekhnolohichna ekspluatatsiia*, materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, KhNTUSH, Kharkiv, pp. 91–93.
7. DSTU 2862-94. Nadiinist tekhniki. Metody rozrakhunku pokaznykiv nadiinosti. Zahalni vymohy, [Online], available at: [\https://surl.li/zcmsya\](https://surl.li/zcmsya)
8. Lao, S., Holt, A., Vaidhyanathan, D. et al. (2021), «Performance comparison of CFD-DEM solver MFiX-Exa, on GPUs and CPUs», *arXiv:2108.08821*, [Online], available at: [\https://surl.li/gandbj\](https://surl.li/gandbj)
9. Biroun, M.H. and Mazzei, L. (2024), «Unchannelized granular flows: Effect of initial granular column geometry on fluid dynamics», *Chemical Engineering Science*, Vol. 292, doi: 10.1016/j.ces.2024.119997.
10. Mateichyk, V., Kostian, N., Smieszek, M. et al. (2023), «Evaluating Vehicle Energy Efficiency in Urban Transport Systems Based on Fuzzy Logic Models», *Energies*, Vol. 16, doi: 10.3390/en16020734.
11. Probst, C. (1989), «Toyota Prius – Engine Control Systems», *Bosch Fuel Injection and Engine Management*, Robert Bentley Incorporated, [Online], available at: www.autoshop101.com
12. Sandborn, P. and Lucyshyn, W. (2022), *System Sustainment: Acquisition And Engineering Processes For The Sustainment Of Critical And Legacy Systems*, World Scientific.
13. «Information on the fuel consumption of new cars» (2019), [Online], available at: [\https://surl.li/qaixad\](https://surl.li/qaixad)

14. Chuiko, S.P. (2023), «Kliuchovi faktory enerhoefektyvnosti miskoho avtobusa», *Perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu ta infrastruktury*, zbirka tez III mizhnar. nauk.-prakt. konf., 5–7 hrudnia, DP «Derzhavnyi avtotransportnyi naukovy-doslidnyi i proektnyi instytut», Kyiv, pp. 346–349.
15. «Vykorystannia rehresiinoho analizu dlia rozuminnia skladnykh vzaємozv'язkiv», [Online], available at: <https://surl.li/gbpwwh>
16. «Vyvedennia standartnoi pomylky dlia koefitsiienta koreliatsii Pirsona», [Online], available at: <https://surl.li/xzqcoo>
17. Tan, P.-N., Steinbach, M. and Kumar, V. (2005), «Chapter 7. Cluster Analysis: Basic Concepts and Algorithms», *Introduction to Data Mining*, Addison-Wesley.
18. Borucka, A., Niewczas, A. and Hasilova, K. (2019), «Forecasting the readiness of special vehicles using the semi-Markov model», *Eksplatacja i niezawodnosc – Maintenance and Reliability*, Vol. 21 (4), pp. 662–669, doi: 10.17531/ein.2019.4.16.

Кривда Віталій Валерійович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автомобілів та автомобільного господарства Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-8304-2016>.

Наукові інтереси:

– технічна експлуатація автомобілів.

E-mail: krivda.v.v@nmu.one.

Сакно Ольга Петрівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів та автомобільного господарства Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-4672-6651>.

Наукові інтереси:

– технічна експлуатація автомобілів.

E-mail: sakno-olga@ukr.net.

Корніленко Костянтин Ігорович – асистент кафедри автомобілів та автомобільного господарства Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-0567-8534>.

Наукові інтереси:

– розробка вібраційного обладнання.

E-mail: Kornilenko.K.I@nmu.one.

Чуйко Сергій Петрович – доктор філософії з автомобільного транспорту, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-7052-5158>.

Наукові інтереси:

– технічна експлуатація автомобілів.

E-mail: expertauto@ukr.net.

Шумляківський Володимир Петрович – кандидат технічних наук, завідувач кафедри автомобілів і транспортних технологій Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-5418-4736>.

Наукові інтереси:

– технічна експлуатація автомобільного транспорту; організація автосервісу; інтелектуальні транспортні системи.

E-mail: shumliakivskyiv@ztu.edu.ua.

Krivda V.V., Sakno O.P., Kornilenko K.I., Chuiko S.P., Shumliakivskyi V.P.

Review of approaches to improving the reliability and efficiency of technical operation of motor vehicles, taking into account the validity of engineering solutions

The article presents an overview analysis of approaches to ensuring the reliability and efficiency of technical operation of motor vehicles through the implementation of engineering solutions considered as an element of a controlled dynamic system. Reliability management is based on system analysis of vulnerable components, application of methods for assessing reliability, checking and predicting technical condition. Special attention is paid to the problem of predicting failures under operating conditions in order to minimize costs. Calculations are summarized and aimed at minimizing the costs associated with the operation of motor vehicles. The study analyzes the basics of reliability, heat transfer in power plants, maintenance systems, feasibility studies of engineering solutions, as well as mathematical methods for analyzing the operational properties of cars, as well as the use of mathematical methods for analyzing the operational properties of vehicles. The role of technological processes, automation and methodological foundations for improving service efficiency is emphasized. In the context of technical operation of motor vehicles, engineering solutions provide for the development and implementation of technical, technological and organizational measures aimed at improving reliability, reducing costs and environmental burden. Improving reliability at the design and modernization stage is ensured by the durability and maintainability of structures. The applied system approach combines process modeling and the use of technical and economic analysis tools.

Keywords: technical operation; reliability; heat transfer; maintenance; engineering solutions.

Стаття надійшла до редакції 25.04.2025.