

Обґрунтування параметричного ризик-орієнтованого підходу до контролю якості і надійності деталей автомобілів

У статті здійснено комплексне теоретичне обґрунтування параметричного ризик-орієнтованого підходу до контролю якості та надійності деталей автомобілів з урахуванням тенденцій цифровізації виробництва, впровадження концепцій Industry 4.0 та переходу до предиктивного управління технічним станом транспортних засобів.

Метою дослідження є розроблення інтегрованої аналітичної моделі, що поєднує багатопараметричний опис технічного стану деталей із кількісною оцінкою ймовірності відмови та визначенням інтегрального ризику з урахуванням тяжкості наслідків. Для досягнення мети застосовано методи статистичного аналізу, нормування параметричних відхилень, багатовимірного ймовірнісного моделювання з урахуванням кореляційних зв'язків між параметрами, а також наближені методи теорії надійності FORM (First-Order Reliability Method) і SORM (Second-Order Reliability Method) для оцінювання індексу надійності та ймовірності відмови. Запропоновано формалізовану модель інтегрального ризику, що враховує нормовані відхилення параметрів, інтенсивність деградаційних процесів, вагові коефіцієнти впливу окремих характеристик і безпекові, економічні та експлуатаційні наслідки відмови. Розроблено алгоритм практичної реалізації підходу, який передбачає перехід від дискретного нормативного контролю до безперервного параметричного моніторингу технічного стану деталей із можливістю інтеграції результатів неруйнівного контролю та експлуатаційних даних. Отримані результати формують методичну основу для побудови адаптивних систем управління якістю і надійністю, підвищують обґрунтованість прийняття технічних рішень та сприяють зменшенню ризику відмов у процесі експлуатації автомобілів.

Ключові слова: якість деталей автомобілів; надійність; інтегральний ризик; параметричний підхід; багатовимірне моделювання; FORM; SORM; неруйнівний контроль; цифровий моніторинг.

Вступ. Сучасний етап розвитку автомобільного транспорту характеризується зростанням складності конструкцій транспортних засобів, підвищенням вимог до їх безпеки, екологічності та економічності, а також інтеграцією інтелектуальних систем керування. У цих умовах забезпечення якості та надійності деталей автомобілів стає одним із ключових чинників технічної безпеки, довговічності та конкурентоспроможності продукції.

Традиційні методи контролю якості базуються переважно на відповідності геометричних і фізико-механічних параметрів установленим нормативам. Проте зростання функціональної складності вузлів, вплив стохастичних навантажень, деградаційні процеси та міжпараметричні залежності обумовлюють необхідність переходу до більш глибоких методологічних підходів.

Одним із перспективних напрямів є впровадження ризик-орієнтованої парадигми управління якістю, що активно розвивається в автомобільній галузі [1]. У поєднанні з параметричним аналізом технічного стану деталей та вузлів такий підхід дозволяє перейти від формального контролю до прогнозно-аналітичного управління надійністю.

Обґрунтування актуальності теми. Глобальні тенденції цифровізації виробництва та експлуатації автомобілів, впровадження концепції Industry 4.0, розвиток цифрових двійників та предиктивної аналітики формують нові вимоги до систем забезпечення якості. Дослідження [2] демонструють ефективність використання цифрових моделей для прогнозування дефектів і підвищення стійкості виробничих процесів в автомобільній промисловості.

Разом з тим, емпіричні дослідження оцінювання ризиків на основі параметричних даних транспортних засобів [3] підтверджують, що аналіз багатовимірних технічних показників дозволяє виявляти приховані закономірності формування відмов ще на ранніх стадіях.

Актуальність проблеми підсилюється переходом від реактивної до проактивної моделі управління надійністю, що передбачає:

- інтеграцію статистичних методів;
- використання аналізу видів і наслідків відмов (Failure Modes and Effects Analysis – FMEA) та багатокритеріального аналізу ризиків [4];
- прогнозування надійності на основі експлуатаційних даних [5];
- врахування взаємозв'язку безпеки та функціональної надійності [6].

Вітчизняні дослідження також підтверджують необхідність удосконалення методів оцінювання технічного стану та підвищення надійності автотранспортних засобів [7], зокрема шляхом впровадження сучасних методів неруйнівного контролю [8].

Проте аналіз літератури свідчить, що питання комплексного поєднання параметричного аналізу та ризик-орієнтованого управління якістю деталей автомобілів залишається недостатньо систематизованим.

Метою статті є наукове обґрунтування параметричного ризик-орієнтованого підходу до контролю якості і надійності деталей автомобілів на основі інтеграції методів статистичного аналізу, оцінювання ризиків та прогнозування відмов.

Для досягнення мети, необхідно виконати такі завдання:

1. Проаналізувати сучасні наукові підходи до управління якістю та надійністю в автомобільній галузі;
2. Систематизувати параметри, що визначають технічний стан деталей;
3. Обґрунтувати структуру ризик-орієнтованої моделі контролю;
4. Запропонувати формалізований підхід до оцінювання інтегрального ризику відмови.

Аналіз відомих досліджень. Сучасні наукові дослідження у сфері забезпечення якості та надійності автомобільної техніки можна умовно згрупувати за кількома напрямками: ризик-менеджмент складних транспортних систем, цифровізація контролю якості, параметричне прогнозування відмов, удосконалення методів FMEA, розвиток неруйнівного контролю та системна оцінка технічної експлуатації.

У роботі Mahmood та Szabolesi [1] представлено систематичний огляд методів управління ризиками та підвищення надійності транспортних засобів. Автори розглядають багаторівневі підходи до ідентифікації небезпек, верифікації та валідації систем керування, а також інтеграцію моделей функціональної безпеки. Проте дослідження фокусується переважно на системному рівні транспортного засобу, залишаючи недостатньо розкритим питання кількісного параметричного оцінювання ризику відмов окремих деталей і механічних компонентів.

Amer та ін. [2] запропонували концепцію цифрового двійника для прогнозного забезпечення якості та стійкості ланцюгів постачання в автомобільній галузі. Перевагою підходу є інтеграція IoT-даних та ключових показників ефективності. Водночас модель орієнтована переважно на виробничі процеси та логістику, тоді як методологія формалізації ризику деградації конкретних деталей у процесі експлуатації потребує подальшого розвитку.

У дослідженні Li та ін. [3] виконано емпіричний аналіз ризиків на основі параметричних даних транспортних засобів із застосуванням статистичних методів та машинного навчання. Робота демонструє перспективність використання багатовимірних моделей. Однак відсутня універсальна процедура визначення вагомості параметрів і механізм інтеграції отриманих оцінок у систему прийняття рішень щодо якості деталей.

Guertani та ін. [4] удосконалили процедуру FMEA шляхом застосування гібридного багатокритеріального підходу до ранжування ризиків. Запропонована методика підвищує точність пріоритизації потенційних відмов. Разом із тим традиційна структура FMEA залишається дискретною та експертно-орієнтованою, що ускладнює її адаптацію до безперервного параметричного моніторингу технічного стану.

У роботі Lee та ін. [5] запропоновано методи прогнозування надійності автомобільних деталей на основі рекламацийних даних із використанням параметричних статистичних моделей. Перевагою є орієнтація на реальні експлуатаційні дані. Проте дослідження не враховує комплексний вплив багатьох технічних параметрів одночасно, а також не інтегрує оцінку ризику у систему управління якістю на ранніх стадіях виробництва та експлуатації.

Nazeri та ін. [6] розглядають мультикамерний візуальний контроль якості складання компонентів автомобіля. Підхід базується на комп'ютерному зорі та глибокому навчанні. Попри високу точність виявлення дефектів, метод залишається інструментом детекції, а не кількісного оцінювання ризику подальшої відмови.

У роботі Li, Liu та Li [7] досліджено взаємозв'язок безпеки та кіберзахисту в автоматизованих транспортних засобах. Автори обґрунтовують необхідність інтегрованого підходу до управління ризиками. Однак фізичні параметри деталей та їх деградаційні характеристики не розглядаються як складові інтегральної ризик-моделі.

Вітчизняні дослідники Кривда та ін. [8] здійснили огляд підходів до підвищення надійності технічної експлуатації автотранспорту, підкреслюючи важливість системної діагностики та прогнозування ресурсу. Проте у роботі відсутня формалізована математична модель інтегрального ризику на основі сукупності параметрів деталей.

У статті Учанина [9] розроблено статистичний метод оцінювання параметрів дефектів при вихрострумовому контролі. Робота робить вагомий внесок у підвищення точності неруйнівної діагностики. Водночас питання трансформації результатів неруйнівного контролю (Non-Destructive Testing – NDT) у кількісну оцінку ризику відмови залишаються відкритими.

Недосека та ін. [10] дослідили використання акустичної емісії для оцінювання якості зварних з'єднань. Показано можливість раннього виявлення дефектів. Проте метод не інтегрується у багатопараметричну модель ризику, що обмежує його застосування у системному контролі якості автомобільних деталей.

Рибіцький та Карпаш [11] запропонували удосконалення методів вимірювального контролю якості середовищ та матеріалів. Хоча дослідження не стосується безпосередньо автомобільних деталей, воно демонструє важливість точності вимірювань як базису для формування надійних параметричних моделей. Однак методологія інтеграції метрологічної невизначеності у ризик-аналіз потребує подальшого розвитку.

Проведений аналіз джерел [1–11] дозволяє зробити такі узагальнення:

1. Ризик-орієнтовані підходи активно застосовуються на рівні систем та виробничих процесів;
2. Параметричні методи прогнозування надійності довели свою ефективність у статистичному аналізі відмов;
3. Сучасні технології NDT та комп'ютерного зору забезпечують високу точність виявлення дефектів;
4. Існує тенденція до інтеграції цифрових технологій та машинного навчання у контроль якості.

Водночас залишаються відкритими такі наукові питання:

- відсутність єдиної формалізованої моделі інтегрального ризику для окремих деталей;
- недостатня інтеграція результатів неруйнівного контролю у кількісні ризик-моделі;
- відсутність механізму визначення вагомості параметрів з урахуванням їх впливу на безпеку руху;
- обмежена адаптація FMEA до безперервного параметричного моніторингу;
- недостатній зв'язок між виробничими параметрами та експлуатаційною надійністю.

Саме ці невирішені питання обумовлюють необхідність розроблення параметричного ризик-орієнтованого підходу до контролю якості і надійності деталей автомобілів, що інтегрує статистичні, метрологічні та експлуатаційні аспекти в єдину аналітичну систему.

Основний матеріал. *Концептуальні положення параметричного ризик-орієнтованого підходу*

Запропонований параметричний ризик-орієнтований підхід базується на інтеграції трьох взаємопов'язаних методологічних складових:

- 1) параметричного опису технічного стану деталі;
- 2) ймовірнісної моделі формування відмови;
- 3) ризик-орієнтованої процедури прийняття рішення щодо придатності або коригувальних дій.

На відміну від традиційного підходу «придатна / непридатна», де контроль часто зводиться до перевірки окремих допусків, у даній роботі технічний стан розглядається як точка у багатовимірному параметричному просторі. Це дає змогу кількісно пов'язувати вимірювані параметри з ймовірністю відмови та керувати допустимим рівнем ризику.

Окремо підкреслюється, що в умовах цифровізації контролю якості результати неруйнівного контролю мають бути представлені не лише у вигляді протоколів, а як фізично змістовні параметри, придатні для включення до цифрового паспорта деталі (амплітудно-частотні характеристики, оцінки розміру/глибини дефектів тощо).

Параметрична модель технічного стану деталі та нормування параметрів

Нехай технічний стан деталі характеризується множиною контрольованих параметрів:

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}, \quad (1)$$

де p_i – i -й контрольований параметр; n – кількість параметрів, що впливають на якість і надійність деталі.

До таких параметрів відносять геометричні (розміри, овальність, шорсткість та ін.), фізико-механічні (твердість, межа міцності та ін.), структурні (мікроструктура, дефектність та ін.), експлуатаційні (зношування, температурні деформації та ін.), а також параметри NDT.

Для кожного параметра визначається номінальне (p_i^{nom}), граничне (p_i^{lim}) та фактичне (p_i^{fact}) значення. Тоді, абсолютне відхилення i -го параметра може бути визначено за формулою:

$$\Delta p_i = p_i^{fact} - p_i^{nom}. \quad (2)$$

Оскільки параметри різномірні за розмірністю та шкалами, виконується нормування, яке приводить дані до єдиного безрозмірного простору відхилень:

$$\delta_i = \frac{p_i^{fact} - p_i^{nom}}{p_i^{lim} - p_i^{nom}}, \quad (3)$$

де δ_i – нормоване відхилення; $\delta_i = 1$ відповідає граничному стану.

Для подальших викладок зручно вводити вектор нормованих відхилень.

$$\delta = [\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n]^T. \quad (4)$$

Ймовірнісна модель формування відмови

Відмова деталі розглядається як випадкова подія, і її ймовірність задається функцією від сукупності параметричних відхилень:

$$P_f = F(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n). \quad (5)$$

Спрощена схема для незалежних параметрів

У найпростішому випадку, коли параметри вважають незалежними, ймовірність безвідмовної роботи може бути подана як:

$$P_{rel} = \prod_{i=1}^n (1 - P_{f,i}). \quad (6)$$

Тоді інтегральна ймовірність відмови визначається співвідношенням:

$$P_f = 1 - P_{rel}. \quad (7)$$

Ця схема є методично зручною, однак обмежується припущенням незалежності параметрів, яке для багатьох деталей не виконується.

Часова деградація та інтенсивність відмов

Для параметрів із часовою деградацією доцільно використовувати експоненційну модель:

$$P_{f,i} = 1 - e^{-\lambda_i t}, \quad (8)$$

де t – час експлуатації; λ_i – інтенсивність відмови.

Для відображення впливу відхилення параметра на інтенсивність відмов доцільно використовувати модель чутливості:

$$\lambda_i = \lambda_{0i} (1 + k_i |\delta_i|), \quad (9)$$

де λ_{0i} – базова інтенсивність відмови; k_i – коефіцієнт чутливості.

З інженерної точки зору, це означає, що наявність навіть невеликих відхилень за тривалого часу експлуатації здатна суттєво підвищити накопичену ймовірність відмови.

Формалізація ризику та деталізація наслідків

У ризик-орієнтованому підході ризик визначається як добуток ймовірності відмови та тяжкості наслідків:

$$R = P_f \cdot C, \quad (10)$$

де C – коефіцієнт тяжкості наслідків.

Для відображення багатокритеріальної природи наслідків доцільно задавати C як зважену суму складових:

$$C = \alpha_1 C_{safe} + \alpha_2 C_{econ} + \alpha_3 C_{env}, \quad \Sigma \alpha_i = 1. \quad (11)$$

Така декомпозиція дозволяє узгодити оцінювання ризику з пріоритетами безпеки руху (C_{safe}), економічними втратами (C_{econ}) та екологічними обмеженнями (C_{env}).

Інтегральна параметрично-ризикова модель та нелінійність впливу параметрів

Ключовим етапом ризик-орієнтованого моделювання є агрегування внесків усіх параметрів в один інтегральний показник. Базова модель має вигляд:

$$R_{int} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot f(\delta_i) \cdot C, \quad (12)$$

де w_i – вагомість параметра; $f(\delta_i)$ – функція ризику, яка відображає нелінійність впливу відхилень параметрів.

Нелінійність важлива, оскільки для багатьох механізмів деградації ризик зростає прискорено після проходження порогових зон. Функція ризику $f(\delta_i)$ може мати різні форми, наприклад:

лінійну:
$$f(\delta_i) = |\delta_i|, \quad (13)$$

квадратичну:
$$f(\delta_i) = \delta_i^2, \quad (14)$$

логістичну:
$$f(\delta_i) = \frac{1}{1 + e^{-a(\delta_i - b)}}. \quad (15)$$

Логістична форма доцільна для параметрів із «пороговою» поведінкою ризику, коли після досягнення критичного рівня відхилення відбувається різкий перехід у небезпечну зону; параметр a задає крутизну зростання рівня відхилень, b – порогове значення.

Перехід до кореляційного багатовимірного опису

Співвідношення (6)–(7) ґрунтуються на припущенні незалежності параметрів. Для реальних деталей це припущення часто порушується, що може призводити до подвійного обліку однакових механізмів деградації або, навпаки, до заниження ризику при синергетичній взаємодії параметрів. Тому параметричний вектор доцільно трактувати як випадковий вектор із кореляційною структурою.

Тому, у подальший розгляд необхідно ввести математичне очікування та коваріаційну матрицю:

$$\mu = E[\delta], \quad (16)$$

$$\Sigma = E[(\delta - \mu)(\delta - \mu)^T]. \quad (17)$$

Для подальшої строгої формалізації часто приймають багатовимірний нормальний розподіл, що є обґрунтованим у багатьох інженерних задачах (сума великої кількості випадкових факторів):

$$\delta \sim N(\mu, \Sigma). \quad (18)$$

Тоді щільність багатовимірного нормального розподілу:

$$f(\delta) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} |\Sigma|^{\frac{1}{2}} \cdot \exp(-1/2 (\delta-\mu)^T \Sigma^{-1} (\delta-\mu))}. \quad (19)$$

Квадратична форма в експоненті задає метрику Махаланобіса і визначає еліпсоїдальні ізоповерхні рівної ймовірності, орієнтовані відповідно до кореляційної структури Σ .

Функція граничного стану та ймовірність відмови як інтеграл по області відмов

З позицій теорії надійності працездатність формалізують функцією граничного стану. Область працездатності:

$$g(\delta) \geq 0. \quad (20)$$

Відмова відповідає області:

$$g(\delta) < 0. \quad (21)$$

Зручною для кореляційного аналізу є квадратична форма функції граничного стану:

$$g(\delta) = \delta^T B \delta - r^2, \quad (22)$$

де B – матриця ваг і взаємодій параметрів; r – параметр, що визначає «радіус» допустимої області.

Ймовірність відмови, у такому випадку, подається багатовимірним інтегралом:

$$P_f = \int_{g(\delta) < 0} f(\delta) d\delta. \quad (23)$$

У загальному випадку інтеграл (23) не має простого аналітичного розв'язку, що зумовлює застосування наближених методів FORM/SORM або чисельних процедур.

Перехід до некорельованого стандартного простору

Методи FORM/SORM формулюються у просторі незалежних стандартних нормальних змінних:

$$u \sim N(0, I). \quad (24)$$

У випадку багатовимірного нормального розподілу δ застосовується розклад Холецького:

$$\Sigma = L L^T, \quad (25)$$

де L — це нижня трикутна матриця, отримана в результаті розкладу Холецького коваріаційної матриці Σ .

Тоді лінійне перетворення до стандартного простору має вигляд:

$$u = L^{-1} (\delta - \mu). \quad (26)$$

Для ненормальних маргінальних розподілів застосовують перетворення Розенבלата або Натафа. Перетворення Розенבלата є строгим (використовує умовні розподіли), але складним у реалізації; перетворення Натафа є інженерно придатним компромісом за умови опису залежності гаусівською копулою.

Індекс надійності та апроксимація ймовірності відмови

Метод першого порядку (FORM) зводить оцінювання (23) до пошуку найбільш імовірної точки відмови у просторі u . Індекс надійності визначається як мінімальна відстань від початку координат до поверхні граничного стану:

$$\beta = \min_{g(u)=0} \|u\|. \quad (27)$$

Ймовірність відмови за FORM апроксимується як:

$$P_f^{FORM} = \Phi(-\beta). \quad (28)$$

Перевага FORM полягає в інваріантності та добрій масштабованості на багатовимірні задачі; метод є достатньо точним для слабо нелінійних поверхонь граничного стану.

Урахування кривини поверхні граничного стану

Якщо поверхня $g(u) = 0$ є суттєво нелінійною, лінеаризація FORM може давати систематичну похибку. Метод SORM вводить поправку через головні кривини κ_i поверхні:

$$P_f^{SORM} = \Phi(-\beta) \cdot \prod_{i=1}^n (1 + \beta \kappa_i)^{-1/2}. \quad (29)$$

Зміст поправки полягає в урахуванні кривини, яка змінює «ефективний об'єм» області відмов у околі найбільш імовірної точки та забезпечує підвищену точність для нелінійних моделей.

Інтегральний ризик у строгій і прикладній постановках

У прикладній постановці ризик визначається (10), а у строгій постановці в нього підставляється оцінка P_f , отримана методами FORM/SORM. Узагальнено:

$$R \approx \Phi(-\beta) \cdot C. \quad (30)$$

Таким чином, параметрична інформація через статистичну модель і граничний стан переходить в індекс β , а далі – в ризик R з урахуванням наслідків, що забезпечує прямий зв'язок між вимірюваннями та управлінським рішенням.

Алгоритм реалізації підходу та правило прийняття рішення

Практична реалізація підходу включає:

- 1) вибір критичних параметрів і каналів їх отримання (включно з NDT);
- 2) нормування та формування δ ;
- 3) оцінювання ваг w_i та/або статистичних характеристик μ, Σ ;

- 4) формування $g(\delta)$ та обчислення P_f (спрощено або через FORM/SORM);
- 5) обчислення інтегрального ризику та порівняння з допустимим рівнем.

Критерій придатності:

$$R_{int} \leq R_{adm} \Rightarrow \text{деталь придатна}$$

$$R_{int} > R_{adm} \Rightarrow \text{коригування / обмеження ресурсу / вибракування.}$$

Перевага такого правила – прозорість для виробництва та експлуатації: оцінюється не лише факт дефекту, а керована межа допустимого ризику, яку можна узгоджувати з політикою безпеки та економічними обмеженнями.

Таким чином, запропонована модель забезпечує інтеграцію параметричних відхилень різної фізичної природи в єдиному просторі нормованих змінних, враховує нелінійність формування ризику через $f(\delta_i)$, поєднує параметри NDT із прогнозуванням надійності та ризику, а також переводить дискретні експертні шкали до безперервної аналітичної оцінки ризику, узгодженої з класичною теорією надійності через FORM/SORM.

Висновки та перспективи подальших досліджень. На основі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Систематизовано сучасні наукові підходи до управління якістю та надійністю в автомобільній галузі. Встановлено, що більшість досліджень зосереджені або на рівні системного ризик-менеджменту, або на окремих методах діагностики та прогнозування відмов. Водночас відсутня інтегрована модель, що поєднує параметричну оцінку стану деталей із кількісним визначенням інтегрального ризику;

2. Обґрунтовано доцільність переходу від дискретного контролю до безперервного параметричного моніторингу. Традиційний підхід «придатна/непридатна» не дозволяє оцінювати динаміку деградації та прогнозувати розвиток відмови. Запропонована модель базується на нормуванні параметричних відхилень і дозволяє інтегрувати їх у єдиний безрозмірний простір оцінювання;

3. Сформовано математичну модель інтегрального ризику відмови деталі, що враховує нормовані параметричні відхилення, інтенсивність деградації, вагомість окремих параметрів, тяжкість наслідків відмови. Інтегральний ризик визначається як функція ймовірності відмови та коефіцієнта тяжкості наслідків, що дозволяє враховувати як технічні, так і безпекові та економічні аспекти;

4. Запропоновано нелінійну функціональну форму оцінювання ризику, що дозволяє адекватно моделювати різні сценарії розвитку дефектів – від поступового зношування до критичного руйнування після досягнення порогових значень параметрів. Розроблено алгоритм практичної реалізації підходу, який включає визначення критичних параметрів, їх нормування, оцінювання вагових коефіцієнтів, розрахунок ймовірності відмови та порівняння інтегрального ризику з допустимим рівнем.

Запропонований підхід формує основу для побудови адаптивних систем управління якістю в умовах цифровізації виробництва та експлуатації автомобільної техніки.

Перспективи подальших досліджень

Подальші наукові дослідження доцільно спрямувати на:

1. Розроблення методики визначення вагових коефіцієнтів параметрів на основі статистичних даних експлуатації;
2. Урахування кореляційних зв'язків між параметрами у багатовимірній ризик-моделі;
3. Інтеграцію метрологічної невизначеності вимірювань у процедуру оцінювання ризику;
4. Розроблення програмного забезпечення для автоматизованого розрахунку інтегрального ризику;
5. Експериментальну апробацію моделі на конкретних деталях автомобілів (вали, гальмівні диски, елементи підвіски тощо);
6. Адаптацію моделі до умов електромобілів та високонавантажених композитних конструкцій.

Список використаної літератури:

1. *Mahmood A.* A systematic review on risk management and enhancing reliability in autonomous vehicles / *A.Mahmood, R.Szabolcsi* // *Machines*. – 2025. – Vol. 13, № 8.
2. A digital twin-based framework for predictive quality assurance and supply chain resilience in the automotive industry / *Y.Amer, A.Soufali, A.Zaghwan and other* // *Procedia CIRP*. – 2026. – Vol. 124. – P. 512–517.
3. *Li P.* An empirical study on risk assessment of vehicle parameter data / *P.Li, Y.Zhang, X.Chen* // *Machines*. – 2025. – Vol. 13, № 8.
4. *Guertarni I.H.M.* Hybrid multi-criteria decision-making approach for FMEA risk ranking / *I.H.M. Guertarni, R.Benmoussa, A.Zammel* // *Machines*. – 2023. – Vol. 11, № 5.
5. *Lee J.-G.* Automobile parts reliability prediction based on claim data / *J.-G. Lee, S.Kim, J.Park* // *Engineering Failure Analysis*. – 2021. – Vol. 127.
6. *Nazeri A.* A multi-camera vision-based approach for fine-grained assembly quality control / *A.Nazeri, D.Kim, H.Park* // *IEEE Access*. – 2025. – Vol. 13. – P. 11234–11247.
7. *Li X.* Modeling the interdependent coupling of safety and security for connected and automated vehicles / *X.Li, Q.Liu, Y.Li* // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. – 2025. – Vol. 26, № 3. – P. 2154–2166.
8. Огляд підходів до підвищення надійності та ефективності технічної експлуатації автотранспорту / *В.В. Кривда, О.П. Сакно, К.І. Корніленко та ін.* // *Технічна інженерія*. – 2025. – № 2. – С. 15–24.

9. Учанін В.М. Методологія використання стандартних зразків з дефектами для вихрострумовеого контролю: класифікація та статистичний метод оцінювання параметрів / В.М. Учанін // Технічна діагностика та неруйнівний контроль. – 2025. – № 4. – С. 12–21.
10. Недоска С.А. Що до оцінки якості зварних з'єднань із використанням методу акустичної емісії / С.А. Недоска, І.В. Коваленко, О.П. Марченко // Технічна діагностика та неруйнівний контроль. – 2025. – № 4. – С. 34–42.
11. Рибіцький І.В. Удосконалення методу контролю якості природного газу з використанням сучасних вимірювальних систем / І.В. Рибіцький, О.М. Карпаш // Технічна діагностика та неруйнівний контроль. – 2025. – № 3. – С. 45–53.

References:

1. Mahmood, A. and Szabolcsi, R. (2025), «A systematic review on risk management and enhancing reliability in autonomous vehicles», *Machines*, Vol. 13, No. 8.
2. Amer, Y., Soufali, A., Zaghwan, A. et al. (2026), «A digital twin-based framework for predictive quality assurance and supply chain resilience in the automotive industry», *Procedia CIRP*, Vol. 124, pp. 512–517.
3. Li, P., Zhang, Y. and Chen, X. (2025), «An empirical study on risk assessment of vehicle parameter data», *Machines*, Vol. 13, No. 8.
5. Guetarni, I.H.M., Benmoussa, R. and Zammel, A. (2023), «Hybrid multi-criteria decision-making approach for FMEA risk ranking», *Machines*, Vol. 11, No. 5.
6. Lee, J.-G., Kim, S. and Park, J. (2021), «Automobile parts reliability prediction based on claim data», *Engineering Failure Analysis*, Vol. 127.
7. Nazeri, A., Kim, D. and Park, H. (2025), «A multi-camera vision-based approach for fine-grained assembly quality control», *IEEE Access*, Vol. 13, pp. 11234–11247.
8. Li, X., Liu, Q. and Li, Y. (2025), «Modeling the interdependent coupling of safety and security for connected and automated vehicles», *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 26, No. 3, pp. 2154–2166.
9. Krivda, V.V., Sakno, O.P., Kornilenko, K.I. et al. (2025), «Ohliad pidkhodiv do pidvyshchennia nadiinosti ta efektyvnosti tekhnichnoi ekspluatatsii avtotransportu», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 2, pp. 15–24.
10. Uchanin, V.M. (2025), «Metodolohiia vykorystannia standartnykh zrazkiv z defektamy dlia vykhrostrumovoho kontroliu: klasyfikatsiia ta statystychnyi metod otsiniuvannia parametrov», *Tekhnichna diahnozyka ta neruivnyi kontrol*, No. 4, pp. 12–21.
11. Nedosieka, S.A., Kovalenko, I.V. and Marchenko, O.P. (2025), «Shchodo otsinky yakosti zvarnykh ziednan iz vykorystanniam metodu akustychnoi emisii», *Tekhnichna diahnozyka ta neruivnyi kontrol*, No. 4, pp. 34–42.
12. Rybitskyi, I.V. and Karpash, O.M. (2025), «Udoskonalennia metodu kontroliu yakosti pryrodnoho hazu z vykorystanniam suchasnykh vymiriuvalnykh system», *Tekhnichna diahnozyka ta neruivnyi kontrol*, No. 3, pp. 45–53.

Бегерський Дмитро Богданович – кандидат технічних наук, доцент кафедри механічної інженерії та автомобільного транспорту Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-8357-0038>.

Наукові інтереси:

- підвищення ефективності експлуатації електромобілів;
- забезпечення безпеки дорожнього руху;
- аеродинаміка автопоїздів;
- якість та надійність деталей автомобілів.

E-mail: amts_bdb@ztu.edu.ua; begerskiy@gmail.com.

Beherskiy D.B.

Substantiation of a parametric risk-based approach to quality control and reliability of automobile parts

The article provides a comprehensive theoretical substantiation of a parametric risk-based approach to quality control and reliability of automobile parts, taking into account the trends of digitalization of production, implementation of Industry 4.0 concepts and transition to predictive management of the technical condition of vehicles. The aim of the study is to develop an integrated analytical model that combines a multiparametric description of the technical condition of parts with a quantitative assessment of the probability of failure and determination of the integral risk taking into account the severity of the consequences. To achieve the goal, methods of statistical analysis, normalization of parametric deviations, multivariate probabilistic modeling taking into account correlations between parameters, as well as approximate methods of reliability theory FORM (First-Order Reliability Method) and SORM (Second-Order Reliability Method) were used to estimate the reliability index and probability of failure. A formalized model of integral risk is proposed, which takes into account normalized deviations of parameters, intensity of degradation processes, weighting factors of influence of individual characteristics and safety, economic and operational consequences of failure. An algorithm for the practical implementation of the approach is developed, which involves the transition from discrete regulatory control to continuous parametric monitoring of the technical condition of parts with the possibility of integrating the results of non-destructive testing and operational data. The results obtained form a methodological basis for building adaptive quality and reliability management systems, increasing the validity of technical decision-making and contributing to reducing the risk of failures during the operation of vehicles.

Keywords: quality of vehicle parts; reliability; integral risk; parametric approach; multidimensional modeling; FORM; SORM; non-destructive testing; digital monitoring.

Стаття надійшла до редакції 12.01.2026.