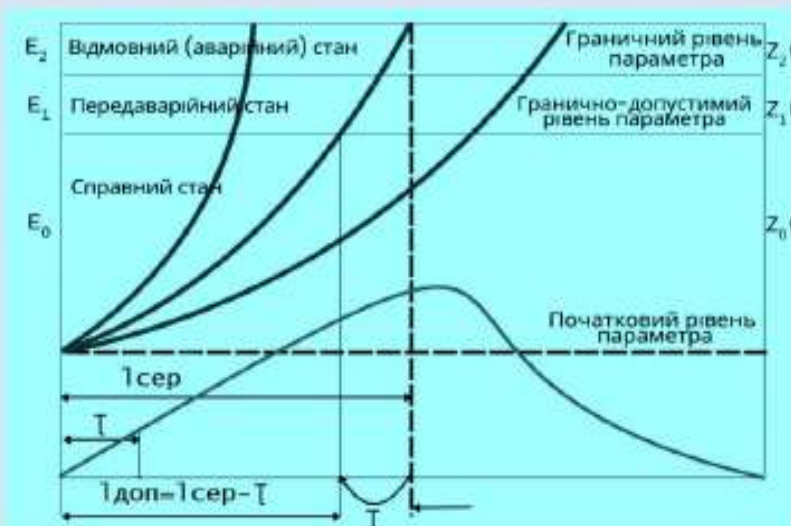


Ефективне управління працездатністю транспортних засобів



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Ефективне управління працездатністю транспортних засобів

Електронний навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2025

УДК 629.083

E90

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 12 від 29.05.2025 р.)

Автори:

О. П. Кравченко, Ю. Герліці, В. А. Макаров, Т. В. Макарова

Рецензенти:

В. П. Сахно, доктор технічних наук, професор

О. Ю. Ребров, доктор технічних наук, професор

В. М. Михалевич, доктор технічних наук, професор

В. П. Кужель, кандидат технічних наук, доцент

Ефективне управління працездатністю транспортних засобів :
E90 навчальний посібник [Електронний ресурс] / Кравченко О. П., Герліці Ю., Макаров В. А., Макарова Т. В. – Вінниця : ВНТУ, 2025. – (PDF, 115 с.).

ISBN 978-617-8163-61-7 (PDF)

Посібник є необхідним для вивчення спеціальних дисциплін здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності J 8 Автомобільний транспорт, головним чином, для опанування освітніх компонентів «Сучасні системи управління працездатністю транспортних засобів» та «Сучасні проблеми теорії і практики управління». Також він становить інтерес для викладачів, вчених і аспірантів, а також всіх, хто займається підтримкою працездатності автомобілів в системі прийняття рішень технічного сервісу.

В посібнику на основі аналізу і узагальнення накопиченого досвіду, а також результатів досліджень сформовано нову концепцію і викладено методологію оперативного управління працездатністю транспортних машин (на прикладі автомобілів), його теоретичні основи і моделі, наведено приклади їх практичного застосування.

УДК 629.083

ISBN 978-617-8163-61-7 (PDF)

© ВНТУ, 2025

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 УПРАВЛІННЯ ПРАЦЕЗДАТНІСТЮ ЯК САМОСТІЙНА СФЕРА ДІЛОВОЇ АКТИВНОСТІ	7
1.1 Переорієнтація фірм – створення високоефективних систем автосервісу	7
1.2 Сервісна підтримка працездатності автомобілів	8
1.3 Нові форми та методи виконання автосервісних послуг	9
1.4 Збільшення прибутку фірм-виробників за виробництво сервісних послуг.....	12
1.5 Технічний сервіс як сполучна ланка підприємств-виробників із клієнтами.....	14
2 АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛІННЯ ПРАЦЕЗДАТНІСТЮ АВТОМОБІЛІВ	17
2.1 Загальні поняття та положення про працездатність автомобіля.....	17
2.2 Розрахункові методи показників для управління працездатністю АТЗ.....	18
2.3 Вихідні передумови та рівні управління працездатністю	18
2.4 Модель для оперативного керування працездатністю автомобіля....	19
2.4.1 Побудова моделі.....	20
2.4.2 Гранично допустиме значення діагностичного параметра.....	22
2.4.3 Модель управління працездатністю провідних мостів автомобіля.....	24
2.4.4 Практична процедура управління працездатністю	25
2.4.5 Управління потенціалом працездатності агрегатів за діагностичними параметрами	26
2.5 Модель оптимізації режимів діагностування для оперативної підтримки потенціалу працездатності за мінімальних витрат і ризику	28
2.5.1 Практичне коригування періодичності діагностування для підтримання оптимального рівня потенціалу працездатності агрегатів трансмісії автомобілів	32
3 ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ РОЗРОБКИ НОВИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРАЦЕЗДАТНІСТЮ АТЗ.....	35
3.1 Загальні закономірності поведінки та запропонована концепція управління працездатністю	35
3.2 Розробка класифікації порушень працездатності та вибір діагностичних моделей.....	37
3.2.1 Залежність втрати працездатності від зміни технічного стану машин у процесі експлуатації.....	42
3.2.2 Швидка та повільна зміна стану агрегату	44
4 МЕТОДОЛОГІЯ РОЗРОБКИ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСУ ЗНИЖЕННЯ І ВТРАТИ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ.....	46
4.1 Вибір математичного апарату.....	55
4.2 Побудова моделі катастрофи працездатності агрегату.....	57

5 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПЕРІОДИЧНОСТЕЙ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ПРАЦЕЗДАТНІСТЮ АГРЕГАТІВ	66
6 РЕКОМЕНДАЦІЇ З РОЗРОБКИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРАЦЕЗДАТНІСТЮ АТЗ.....	71
6.1 Принципи побудови системи	71
6.2 Керівна програма.....	71
6.3 Проблемно-орієнтовані блоки	73
6.4 Програми, що керують роботою проблемно – орієнтованих блоків за завданням користувача	73
6.5 Пакет прикладних загальнонаукових програм	73
6.6 Стандартні програми планування та обробки результатів експерименту	73
6.7 Можливий ступінь автоматизації різних етапів прийняття рішень щодо управління працездатністю агрегатів автомобіля	74
6.8 Особливості вибору параметрів.....	74
6.9 Основні етапи розробки системи.....	74
6.10 Загальна характеристика розрахункового блока системи автомати- зованої технології управління працездатністю та надійністю	76
7 МАРКЕТИНГОВА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ СЕРВІСНИХ ПОСЛУГ	78
8 МОДЕЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ ПРАЦЕЗДАТНІСТЮ АВТОМОБІЛЯ.....	91
8.1 Вибір та структура	93
8.2 Формування функції корисностей.....	95
8.3 Приклад моделі для причепа.....	97
8.3.1 Процедура управління працездатністю причепа	98
8.3.2 Координація завдань діагностування та управління	100
8.4 Особливості накопичення інформації для цілей управління працездатністю	101
8.5 Програма для керування працездатністю АТЗ.....	103
8.6 Оптимізація режимів профілактичного відновлення працездатності	103
8.7 Централізована система забезпечення діагностичної інформації....	107
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	108
Додаток А	112

ВСТУП

Забезпечення високої працездатності транспортних машин в експлуатації потребує у 5 – 6 разів більше коштів, ніж їхнє виготовлення. Через втрату працездатності щодня простоює 30% автомобілів. Внаслідок вимушеного навантаження різко зростає швидкість витрати ресурсу фактично працюючого рухомого складу. В умовах ринкової економіки ця проблема набуває не лише особливого науково-практичного інтересу, а й важливого державного значення. Тільки працездатний рухомий склад є основою збільшення прибутку кожного підприємства та підприємця.

Проте, традиційні методи підтримки працездатності, ідеологічно орієнтовані на констатацію відмов і заміну деталей і вузлів, що вийшли з ладу, вже не відповідають жорстким вимогам ринкових відносин. Ускладнення конструкції автомобілів, підвищення екологічної і транспортної безпеки та особливо відповідальності виконуваної роботи (за характером та часом) різко підвищило «ціну» відмов.

Спроби вирішення цієї проблеми методами «відмовної» теорії надійності, що використовує з метою управління статистичні дані, ефективного результату не дають. Тому концепцію підтримки працездатності з середньостатистичним підходом до автомобіля як об'єкта управління з індивідуальними властивостями потрібно визнати неефективною. Поряд з цим аналіз досліджень підтверджує, що поки відсутні дослідження загальних законів сталого розвитку машини (відповідно до загальноновизнаної нової парадигми) і закономірностей поведінки, а також моделей, що дозволяють заздалегідь обчислювати, прогнозувати і оперативно керувати працездатністю.

Узагальнення інформаційної теорії забезпечення надійності технічних систем, її енергетичного постулату, аналізу щільності потоку енергії та енергоентропіки приводять до висновку, що основою управління працездатністю машин має бути не вивчення подій (відмов), а дослідження станів. У зв'язку з цим необхідна розробка та практичне освоєння принципово нових систем діагностичного управління працездатністю.

Вирішення цієї задачі стає реальним на основі глибокого вивчення, поряд з динамікою зношування сполучених деталей та накопичення пошкоджень у них, динаміки організації, перебудови та збереження стійкого працездатного стану агрегату.

Складність збереження стійкості працездатних станів у тому, що вони далекі від термодинамічної рівноваги системи. У сфері нелінійної залежності енергетичних і речових струмів від агресивних впливів умов експлуатації у структурах агрегатів розігруються принципово нові та найнесподіваніші ефекти, які завжди мають лише кількісний характер. За критичних (біфуркаційних) значень параметрів станів відбуваються якісні зміни структури через інтенсивне зростання флуктуацій термодинамічних сил і різко знижується їх стійкість. Наслідком цього є стрибкоподібна перебудова організації нерівноважної структури. Надмірно зростаюча нестійкість веде до

утворення позитивного зворотного зв'язку деградаційних процесів в агрегаті із зовнішнім середовищем і, як правило, до руйнівного для агрегату обміну енергією. Через багатоярусну нелінійність зв'язків у складному агрегаті це закінчується катастрофою механізму стійкості працездатного стану. Це підтверджує справедливність запропонованої гіпотези: управління спектром станів та динамікою організації структури машини (агрегату, вузла чи механізму) потребує врахування синергетичних ефектів поведінки елементів й підсистем та застосування гомеостатичних принципів.

І, нарешті, підтримка працездатності автотранспортних засобів (АТЗ) стрімко стає самостійною сферою ділової активності. Ефективний розвиток її передбачає на основі використання принципів системотехніки створення нормативної бази. Управління працездатністю АТЗ, як жодна зі сфер, потребує розробки методів і моделей, за допомогою яких ця діяльність може бути поставлена на наукову основу.

Метою навчального посібника є ознайомлення з організацією та управлінням працездатністю колісних транспортних засобів на основі моделювання з урахуванням минулих періодів створення високоефективних систем автосервісу та сервісної підтримки працездатності автомобілів.

1 УПРАВЛІННЯ ПРАЦЕЗДАТНІСТЮ ЯК САМОСТІЙНА СФЕРА ДІЛОВОЇ АКТИВНОСТІ

1.1 Переорієнтація фірм – створення високоефективних систем автосервісу

Констатуючи все більше посилення міжнародної конкуренції, щорічник міністерства міжнародної торгівлі та промисловості Японії 1986 р., підкреслював вирішальну і визначальну роль успішної роботи виробників автомобілів таких чинників, як післяпродажне обслуговування [1]. У фірмах «Citroen» та «Renault» оголосили 1988 р. роком сервісу. Забезпечення працездатності та якості продукції для конкурентоспроможності фірм і досягнення їх переваги на ринку особливо важливе. У таблиці 1.1 наведено специфічні економічні оцінки, основані на побудованій Т. Левітом [2] моделі зміни ставлення до поняття «товар».

Таблиця 1.1 – Сприйняття сервісних послуг у відносинах між виробниками (продукції та послуг) та споживачами

Категорія	Минуле	Сьогодні	Майбутнє
Предмет продажу	Продукція	Покращена продукція	Системні контракти
Продаж	Одиниця	Система	Система на тимчасовому базі
Споживча цінність	Переваги продукції	Технологічні переваги	Переваги системи
Сервісні послуги	Незначні	Значні	Вирішальні
Ринки	Локальні	Національні	Глобальні

Автосервіс безпосередньо сприяє, з одного боку, збільшенню доходів і рентабельності фірм-власників автомобілів за рахунок безвідмовної роботи їх на лінії і більш повному задоволенню попиту споживачів транспортних послуг у перевезеннях; з іншого боку, сервіс є значною, а часом, і найважливішою статтею доходів цих фірм. Незважаючи на те, що існуючий автотранспортний комплекс України може забезпечити високі обсяги перевезень, міжнародні вимоги змушують збільшувати і підвищувати якість мережі автомобільних магістралей, інтеграцію автомобільних магістралей з міжнародними транспортними коридорами, організацію високошвидкісного руху, розвиток мережі автосервісу. Тому щороку Україна втрачає на транзитних автоперевезеннях 2,5 – 3 млрд грн [3]. Однією з причин цього є низький рівень розвитку системи технічного сервісу автомобілів як складової транспортного комплексу, що працює відповідно до інтересів споживачів послуг та сфери розвитку міжнародних перевезень [4]. Деякі дослідження в цьому напрямку розкривають питання в роботах [5 – 11].

1.2 Сервісна підтримка працездатності автомобілів

Останнім часом значення післяпродажного сервісу як засобу розвитку бізнесу різко зростає. Одночасно широко визнається можливість отримання додаткових доходів за рахунок цього джерела. За даними фірми League Gr., дохід від післяпродажного сервісу чотирьох найбільших фірм у галузі виробництва комп'ютерів становив 24-33% загального доходу (таблиця 1.2).

Таблиця 1.2 – Аналіз доходів та прибутку від сервісного обслуговування

Фірма	Доходи від обслуговування, % від усіх доходів	Прибуток від обслуговування, % до доходів від обслуговування	Співвідношення числа зайнятих обслуговуванням до зайнятих громадян
1	15–20	>20	2,0
2	20	>20	1,25
3	28	27	2,4
4	30	20–25	2,5

Аналіз найбільших компаній США у згаданих галузях промисловості, за даними «Management Analyze Center», показує, що доходи від обслуговування становлять 17 – 30% загального доходу фірми. Середня рентабельність сервісних послуг перевищує 20%. Коефіцієнт прибутковості від реалізації сервісних послуг дорівнює або навіть перевищує аналогічний коефіцієнт від прямого продажу. Сам по собі сервіс може і не виявитися прибутковим, але це часто є вирішальним фактором продажу. Результати аналізу, опубліковані в Journal of Marketing, свідчать про те, що під час продажів у Великобританії та США фактор технічного обслуговування був одним з вирішальних критеріїв, що впливають на вибір постачальника продукції. Фактор післяпродажного сервісу займав третє місце після надійності, продуктивності та безпеки системи, ціна системи – лише п'яте місце.

За підрахунками економістів США кожен долар, вкладений в організацію технічного обслуговування та ремонту, виробництво запасних частин, може забезпечити вдвічі більший прибуток, ніж від проданих автомобілів. Для підтримки автомобільного парку країни в технічно справному стані річні витрати на обслуговування і ремонт досягають 25–26 млрд дол. [12]. Фірми-виробники рухомого складу постійно контролюють процес обслуговування і ремонту автомобілів, що випускаються. В обстановці гострої конкурентної боротьби обов'язковою умовою успішної торгівлі на внутрішніх і особливо зовнішніх ринках є організація мережі сервісних центрів, консультаційних пунктів, складів запасних частин і матеріалів, навчальних центрів з підготовки фахівців тощо. В Індії ряд японських фірм відкривають фірмові автосервісні центри [12]. На підприємстві міжнарод-

них перевезень у Луганську отримали сертифікати центри обслуговування автомобілів-тягачів VOLVO і MERCEDES [13].

1.3 Нові форми та методи виконання автосервісних послуг

Підтримка працездатності рухомого складу характеризується різноманіттям організаційних форм і методів виконання технічних операцій. Так, якщо в колишні роки роботи з обслуговування та ремонту здійснювалися або на виробничій базі власників автомобілів, або на фірмових сервісних центрах виготовлювачів, то зі збільшенням випуску автомобілів і розширенням ринків збуту виникла необхідність створення нових служб (рисунк 1.1) вдосконалення організаційної структури та її управління. Розширення мережі обслуговувальних виробництв відбувається за рахунок залучення дилерів та незалежних сервісних фірм [14, 15].

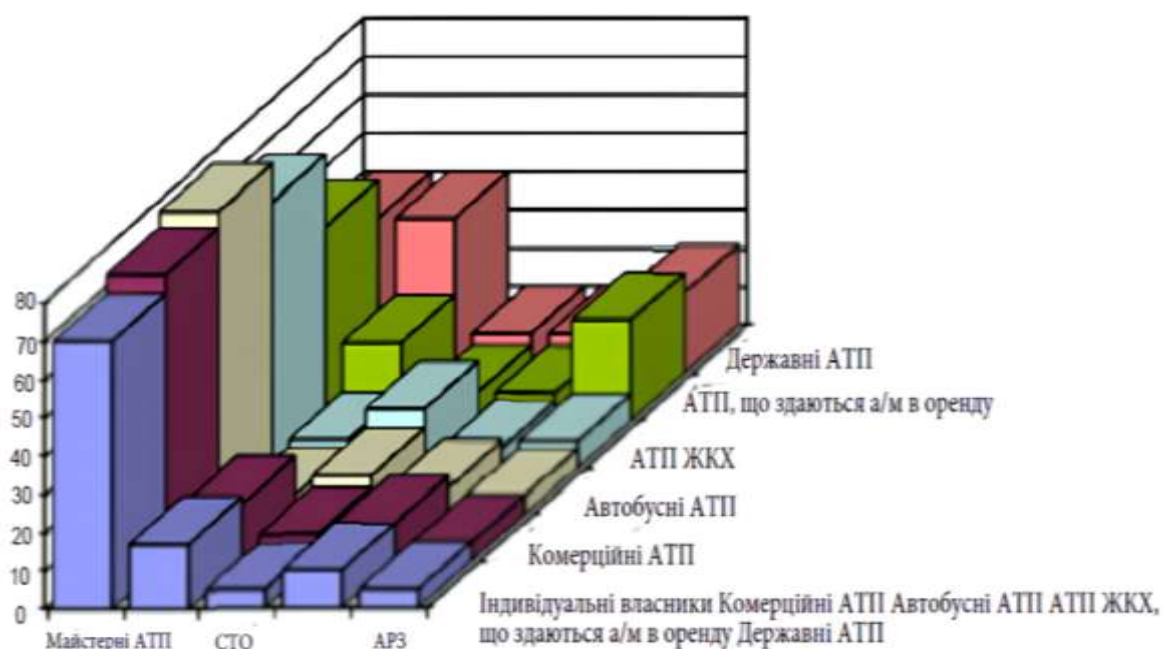
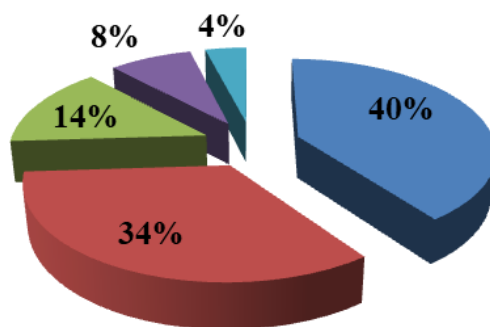


Рисунок 1.1 – Розподіл робіт технічного обслуговування та ремонту за частотою звернення (у %) між ремонтно-обслуговуючими підприємствами

Аналіз показує, що за частотою обігу лідирують майстерні самих власників транспортних засобів. Вони виконують найбільш дрібні, нетрудомісткі та поширені роботи з усунення несправностей або нескладні систематичні профілактичні роботи. Більш складні види профілактик та трудомісткі види робіт здійснюються на спеціалізованих виробництвах. Наочна ілюстрація тому – розподіл часток загального річного доходу підприємств з технічного обслуговування рухомого складу.

Відповідно до досліджень [12], проведених Національним управлінням з безпеки дорожнього руху США, основна частка загального річного доходу виробництв (рисунк 1.2) з надання сервісних послуг припадає на станції технічного обслуговування (СТО).



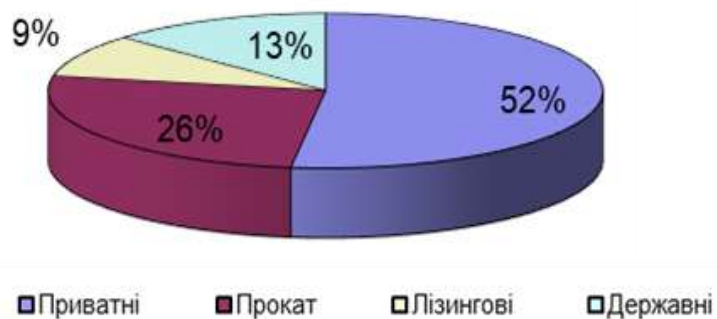
■ СТО ■ Дилери ■ Приватні гаражі ■ АРМ ■ Магазины

Рисунок 1.2 – Розподіл доходів виробництв за надання сервісних послуг

У зв'язку з цим цікавий аналіз, проведений фахівцями журналу DES (США) в 1991 р. [16]. Дослідження проводилися диференційовано за результативними вибірками: за розміром парку рухомого складу у власника (рисунок 1.3, а) та видом власності на транспорт (рисунок 1.3, б); ступенем виконання частки робіт з обслуговування та ремонту на своїй виробничій базі за типами власників у разі технічного обслуговування (рисунок 1.4, а) і у випадку виконання великих ремонтів (рисунок 1.4, б).

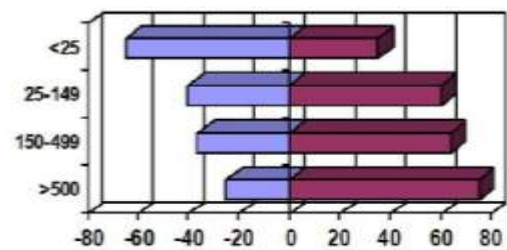
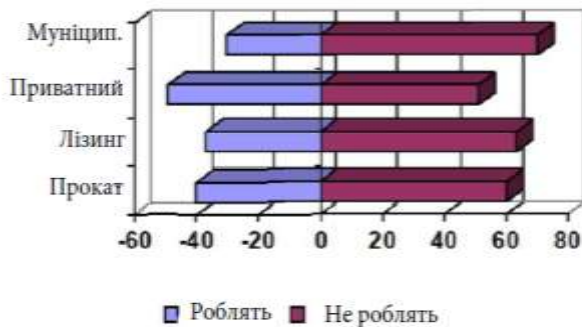
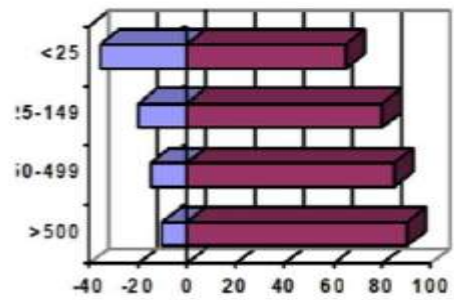
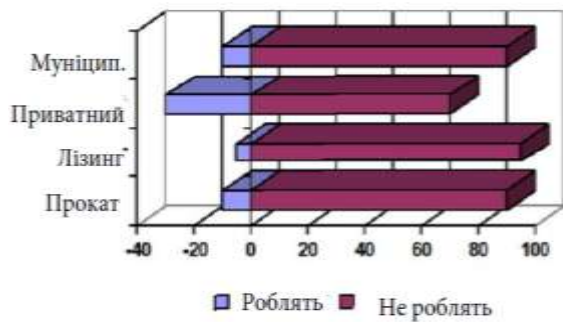


а)



б)

Рисунок 1.3 – Результати диференційованого дослідження з вибірок:
а) – за розміром парку рухомого складу у власника,
б) – за видом власності на транспорт



а)

б)

Рисунок 1.4 – Результати диференційованого дослідження з вибіркою:

а) – за типами власників у разі технічного обслуговування;

б) – у випадку великих ремонтів

Найбільш складні та трудомісткі види ремонтів, що потребують спеціального обладнання та високих технологій, здійснюються на спеціалізованих заводах, які є власністю фірм-виробників. Такі види «фірмових глибоких ремонтів» здійснюються багатьма відомими фірмами: Cummins Caterpillar, (США); British Leyland (Велика Британія); Daimler-Benz, Volkswagen (Німеччина), Berlis (Франція) та багатьма іншими [12, 16]. Вартість таких ремонтів становить 70 – 85% вартості нових агрегатів, а післяремонтний ресурс досягає 80 – 90% ресурсу нового.

Висока якість (за рахунок використання новітніх технологій) відремонтованих агрегатів успішно конкурує з новими за рахунок меншої вартості. Так, наприклад, відновлення міського автобуса, що практикується компанією Flexible corporation (США), під час якого модернізується також кузов і внутрішнє обладнання, коштує 110 тис. дол.; такий самий новий автобус коштує 170 тис. дол.

Для забезпечення ефективної роботи автомобіля необхідно регулярно отримувати дані про технічний стан вузлів та агрегатів. Для цього застосовуються сучасні технологічні та інформаційні методи, а також підходи до вибору систем і засобів моніторингу на постійній основі. Конструкція сучасних транспортних засобів передбачає активне використання електронних (комп'ютерних, інформаційних) систем, які керують різними експлуа-

таційними процесами, забезпечують автоматизацію технологічних операцій, планування та оптимізацію роботи, а також створюють умови для моніторингу параметрів технічного стану автомобіля в інфраструктурному середовищі [17].

Системи віддаленого моніторингу дозволяють на практиці вирішувати широкий спектр завдань у технічній, технологічній, бізнес- та соціальній сферах. З їх допомогою можна систематизувати збір статистичних даних для розробки оптимальних маршрутів; сприяти безпеці (наприклад, у разі аварії система керування транспортним засобом може автоматично передати сигнал про аварію екстреним службам через супутниковий зв'язок); контролювати дотримання графіка руху транспортних засобів.

Безперервний дистанційний контроль параметрів технічного стану сучасного автомобіля в процесі його експлуатації здійснюється за допомогою різноманітних електронних систем, що керують робочими процесами його вузлів і агрегатів. Ці системи виконують функції самодіагностики, а також діагностики керованих процесів, оперативно повідомляючи оператора про деградації, що виникають.

1.4 Збільшення прибутку фірм-виробників за виробництво сервісних послуг

Згідно з дослідженням провідних Південнокорейських корпорацій [16] ефективно виробництво сервісних послуг з обслуговування та ремонту автомобілів дозволили компаніям Hyundai Motor і Kia Service зайняти відповідно 6-е та 10-е місця серед двадцяти найбільш успішних компаній за рівнем продажів (таблиця 1.3), збільшивши цим торговий оборот на 18,1% і 23,5%, відповідно. Наприклад, корпорація Hyundai Motor Service отримала в 1992 чистий прибуток у розмірі 25,45 млрд вон (рисунок 1.5), тобто 62% обсягу чистого прибутку фірми-виробника. Це сприяло тому, що цій фірмі належить 14-те місце із двадцяти найбільш прибуткових компаній.

Таблиця 1.3 – Характеристика компаній, які здійснюють продаж автомобілів та виробництво сервісних послуг з ТО та ремонту (на прикладі провідних Південнокорейських корпорацій)

Ранг	Корпорація	Торговий обіг, млрд вон		Збільшення, %
		1992	1993	
6	Hyundai Motor	6,079	7,181	18,1
12	Hyundai Motor Service	3,220	3,903	21,2
10	Kia Motor, в т.ч.	3,282	4,112	25,3

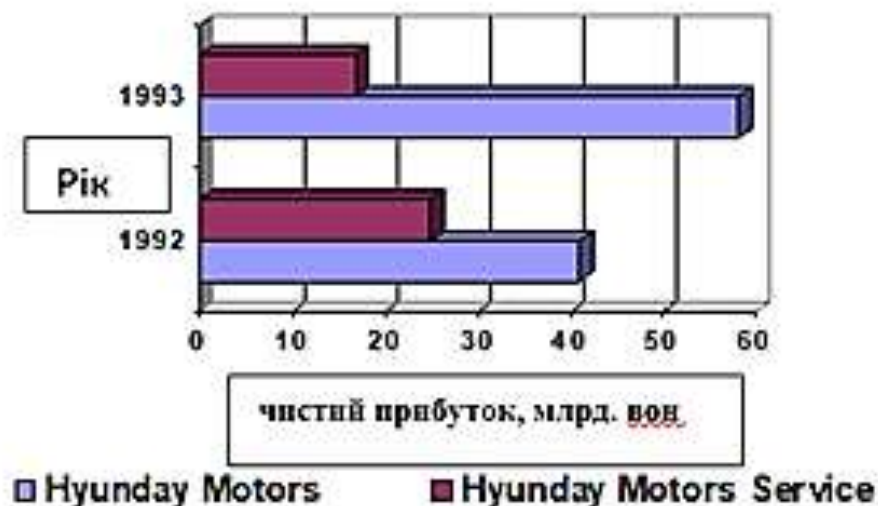


Рисунок 1.5 – Розподіл прибутку за роками від сервісних послуг

У практичній діяльності провідних світових фірм-виробників рухомого складу важливе місце відводиться дослідженню і прогнозуванню потреб у сервісних послугах з метою вдосконалення форм і методів найбільш повного задоволення потреб клієнтури і отримання з цього додаткового комерційного прибутку. Планування розвитку сервісної інфраструктури без знань потреб у послугах може призвести до непотрібних інвестицій, нерационального розміщення мережі обслуговувальних виробництв і, як наслідок, втрат часток сегмента ринку і втрати потенційних доходів.

Потрібно зазначити, що найбільш складною і практично значущою проблемою планування інвестицій у сервісну інфраструктуру є виявлення ступеня та розмірів незадоволених потреб. Прикладом важливості оцінення невдоволених потреб є дослідження, проведені фірмою Mitsubishi [18]. Служба фірмового сервісу провела аналіз серед власників автомобілів своєї марки та виявила таке. У Японії експлуатується понад 500 тис. автомобілів Mitsubishi різних вікових груп, і лише близько 200 тис. охоплено фірмовим сервісом. Тобто, в післягарантійний період експлуатації (більше 3-х років) фірма не відстежує своїх клієнтів, тим самим втрачає значну ринкову частку (рисунок 1.6) і не отримує прихованого потенційного доходу в розмірі 86% від величини існуючого доходу (таблиця 1.4).

Таким чином, технічне обслуговування як самостійна галузь бізнесу є джерелом значних і, що особливо суттєво, постійних доходів у технологічно передових галузях. За рівнем прибутковості обслуговування може навіть перевершувати торгівлю транспортними засобами. Удосконалення сервісного обслуговування дозволяє значною мірою збільшити привабливість продукції, яку підприємство пропонує на ринку. Недостатній рівень сервісу полегшує проникнення в цей сегмент ринку нових конкурентів, що беруть до уваги не тільки ціни та зовнішній вигляд автомобілів, а й якість та обсяги післяпродажного обслуговування.

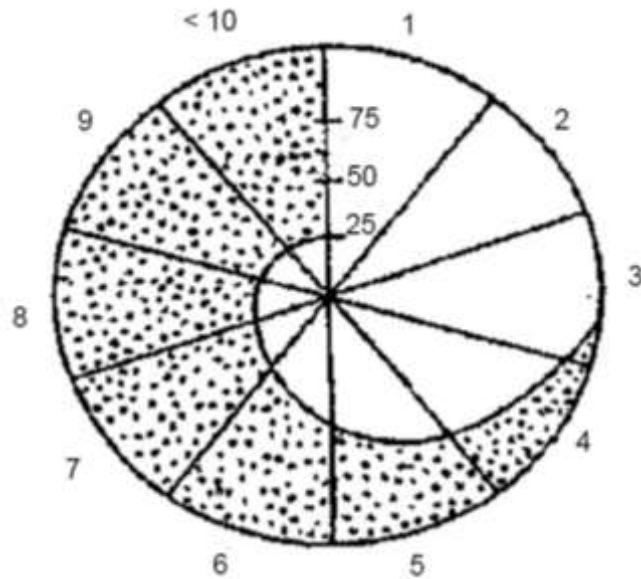


Рисунок 1.6 – Охоплення фірмовим сервісом автомобілів Mitsubishi

Таблиця 1.4 – Аналіз втраченого потенціалу

Період експлуатації	Кількість клієнтів		Середня вартість обслуговування за рік, DM	Річний дохід, тис. DM	Втрачений річний дохід, тис. DM
	охоплених	втрачених			
Гарантійний	199836	-	550	109909,8	-
4-6 років	73350	89650	710	52078	63651,5
6-9 років	29750	69410	970	28857,5	67327,7
більше 9 років	19340	58009	850	16439,0	49307,65
УСЬОГО:				207248,8	180283,85

1.5 Технічний сервіс як сполучна ланка підприємств-виробників із клієнтами

Технічне обслуговування є елементом, який індукує попит на матеріальні блага та сприяє збільшенню доходів і рентабельності підприємства. Обсяг та якість технічного обслуговування впливають на потенційних покупців як за первинної закупівлі, так і у разі оновлення товарів тривалого користування. Крім того, технічний сервіс є найкращим засобом створення системи тісних зв'язків між підприємством-виробником та його клієнтами. Він сприяє закріпленню клієнтури та забезпечує стабільність й зростання доходів підприємства. Поряд з цим забезпечується постійна циркуляція все більшого обсягу технічної та комерційної інформації (у відповідній сфері).

Важливість тісних зв'язків між постачальниками товару та клієнтурою підкреслюється фахівцями з маркетингу різних фірм зі світовою популярністю. За аналізом, наприклад, проведеним відділом маркетингу фірми

Volvo [15, 19, 20], постійний клієнт, що користується послугами сервісного центру, приносить фірмі дохід у розмірі 142 тис. дол. за повний період сервісного обслуговування.

Отже, політика в галузі післяпродажного обслуговування, що полягає в його плануванні, реалізації та комерціалізації, заслуговує, найчастіше, такої ж уваги, як і виробництво самих виробів. У численних секторах автотранспортної галузі технічний сервіс не тільки впливає на конкурентну боротьбу між фірмами, а й визначає її правила.

Розвиток таких субститутів післяпродажного обслуговування, що традиційно здійснюється великими підприємствами (авторемонтними заводами), як самообслуговування або розвиток мережі невеликих майстерень експрес-ремонту, значною мірою змінює правила конкурентної боротьби. Це обов'язково має враховуватися під час розробки технічної політики у сфері технічного обслуговування і ремонту, під час сегментації ринку сервісних послуг.

Сегментація пропозиції послуг необхідна для визначення обсягу і якості послуг, що надаються на різних ринках, різняться між собою у географічному чи соціальному відношенні. Ця сегментація має ґрунтуватися на аналізі змін запитів споживачів залежно від їх потреб і реальної платоспроможності.

Проведений аналіз показав, що до 40% обсягів робіт з технічного обслуговування та ремонту транспортних засобів здійснюється самими власниками (див. рис. 1.1, 1.3, 1.4). У зв'язку з цим виникають нові форми післяпродажного обслуговування. Фірми-виробники реагують на подібну практику шляхом організації продажів допоміжного обладнання за системою самообслуговування (Renault Boutique). Крім того, отримали розвиток мережі компаній, що уклали договори-франшизи з виготовлювачами (наприклад, з фірмою Renault) і що спеціалізуються на реалізації послуг дрібного ремонту: заміна глушників, антикорозійна обробка днища кузова; ремонт шин та дисків коліс тощо [14, 15, 21].

Прагнення зниження витрат, пов'язаних з реалізацією сервісних послуг на заданому рівні якості, є комерційною метою будь-якого виробництва. Вибір технологічних нововведень чи обсягу та диференціації пропозиції не виключає прагнення до підвищення продуктивності й збереження якомога нижчого рівня витрат на елементарну операцію за умови, що зберігається спосіб участі в конкуренції.

Вибір як стратегія оволодіння ринком системи змішаного технічного сервісу дозволить оптимально вирішити двосторонню задачу як найбільш повного задоволення потреб у сервісних послугах, так і отримання максимальних доходів від реалізації сервісних послуг.

Система змішаного сервісу має на увазі диференціацію запропонованих послуг як за обсягом, так і за якістю залежно від технології та місця їх реалізації, основу на інтеграції всіх незалежних різних виробництв.

Проведений аналіз підтверджує необхідність, актуальність та значущість дослідження сервісних послуг як засобу розвитку не тільки самого бізнесу, а й найбільш ефективної системи забезпечення працездатності автотранспортних засобів.

Під час вироблення та вибору шляху розвитку автосервісної системи необхідно також враховувати зміну моделей та нормативності методології, нову парадигму сталого розвитку постіндустріального суспільства. Необхідно прогнозувати найбільш ймовірний вигляд автосервісу з урахуванням зміни його пріоритетів і, насамперед, пов'язаних з необхідністю оптимального використання обмежених ресурсів.

Виконання автосервісною системою основного завдання – підтримання високої працездатності автомобілів потребує розробки методів модельного управління для її розвитку та становлення. Вирішенню низки основних питань аналізованої проблеми і присвячено цю роботу.

2 АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛІННЯ ПРАЦЕЗДАТНІСТЮ АВТОМОБІЛІВ

2.1 Загальні поняття та положення про працездатність автомобіля

Працездатність – це стан, за якого автомобіль здатний виконувати задані функції (рухатися з корисною швидкістю і навантаженням), зберігаючи значення основних параметрів (потужності, витрати палива, зазорів у сполученнях та ін.) в межах, встановлених нормативно-технічною документацією. Працездатність як якісна технічна характеристика стану автомобіля пов'язана з процесами старіння деталей, вузлів, механізмів і агрегатів [22].

Під старінням розуміється незворотна зміна властивостей і параметрів автомобіля та його елементів у бік погіршення порівняно з початковими. Розрізняють два види старіння: моральне та фізичне. Якщо поряд з аналізованим з'являються автомобілі подібного призначення, але з більш високими якісними показниками, це призводить до того, що автомобілі старої конструкції за показниками працездатності стають морально застарілими.

Фізичне старіння полягає у втраті початкових властивостей автомобіля (наприклад, його міцності, зносостійкості, корозійної стійкості, функціональних характеристик: потужності, тягового зусилля, гальмівного шляху, витрати палива).

Старіння деталей і вузлів автомобіля відбувається під дією внутрішніх і зовнішніх факторів: одні мають досить строгий детермінований характер прояви, інші – носять випадковий характер, важко передбачувані або взагалі непередбачувані. Під час експлуатації автомобіль піддається різного роду енергетичним впливам, величина і характер яких визначаються робочими процесами в агрегатах і системах, навколишнім середовищем і особливостями конструкції. Всі впливи, результатом яких є незворотна зміна властивостей автомобіля, призводять до прогресуючого погіршення його робочих характеристик. Коли зміна властивостей автомобіля досягає небезпечних величин, настає відмова: поломки, припинення функціонування тощо. Необоротними процесами в автомобілі є тертя і зношування: втомне старіння; фізико-хіміко-механічні контактні явища; різні види корозії; прогресуюче погіршення функціональних властивостей (наприклад, спад потужності); втрата правильної геометричної форми, різного виду деформаційні процеси.

Основними причинами порушення працездатності є відмови як раптові (поломка зубів, заклинювання золотника гідро-підсилювача), так і зносіві (вихід за допустимі межі зазору в поєднанні шийка валу – підшипник). Тому для управління працездатністю автомобіля використовують у комплексі як діагностичну інформацію, так і основну статистичну характеристику потоку зносівих і раптових відмов – їх інтенсивність.

2.2 Розрахункові методи показників для управління працездатністю АТЗ

Встановлено, що різні фізичні процеси старіння мають загальний характер їх перебігу в часі [23]. Це дозволило сформулювати гіпотезу про існування єдиного закону динаміки старіння елементів автомобіля. На основі такої гіпотези розроблено універсальні методи розрахунку працездатності основних елементів, агрегатів і систем автомобіля. За принципами постановки завдань, підходу до вирішення, використання математичного апарату їх можна розділити на детерміністичні та статистико-імовірнісні.

Під детерміністичними методами опису явищ природи і фізичних процесів розуміють такі, які ґрунтуються на реальних фізичних законах, фізичних або хімічних обумовлених зв'язках і процесах, що протікають в природі. Під наглядом перебуває процес чи явище, а його наслідки є деякими окремими випадками. Апаратом, що використовується в таких розрахунках, є рівняння фізики, механіки, електродинаміки тощо.

Статистико-імовірнісні методи оперують наслідками фізичних явищ або процесів, поширених у часі. Для подібних оцінок вирішальне значення мають частота появи реєстрованих подій всередині фазового простору і геометричний вид розподілу частот. Апаратом опису цих явищ є математична статистика, теорія ймовірностей, теорія масового обслуговування тощо [24].

Під час ігрового моделювання систем працездатності [25] використовуються також економіко-математичні методи дослідження операцій та методи прийняття оптимальних рішень. Це дає можливість програвати моделюванням на ЕОМ різних варіантів систем з урахуванням реально діючих факторів і обмежень. З певними припущеннями і скороченнями в математичній постановці ігрове моделювання дозволяє відобразити реальну ситуацію, яку студенти можуть програвати по кілька разів, поки не набудуть навичок, необхідних для формування оптимальних характеристик систем.

2.3 Вихідні передумови та рівні управління працездатністю

Для вирішення завдання оперативного управління працездатністю АТЗ недостатньо однієї інтенсивності відмов, оскільки ця характеристика надійності статистична і тому не може ефективно застосовуватися до кожного автомобіля окремо.

Невизначеність в оцінці працездатності через параметри технічного стану конкретного автомобіля розкриває діагностику, яка є практичним продовженням аналітичних методів теорії надійності машин. Вона дозволяє без розбирання точно визначати фактичний стан кожного сполучення, вузла агрегату чи системи [23].

Однак діагностика без прогнозування працездатності [26] не дозволяє підтримувати її на необхідному рівні через ризик пропустити виникнення раптових відмов і тих передаварійних станів, які на етапі катастрофічного зношування деталей виникають миттєво. Тому необхідно створити єдиний комплекс методів управління працездатністю з урахуванням статистичних характеристик надійності та результатів діагнозу. Автотранспортні підприємства вкрай зацікавлені в тому, щоб ефективно використовуючи автомобілі, бути впевненими, що вони раптово не відмовлять і що їх агрегати не зносяться на пробігу, необхідному для виконання планових завдань з перевезень вантажів або пасажирів.

Для практичних цілей АТП зазвичай мають у своєму розпорядженні методи забезпечення працездатності рухомого складу на трьох рівнях управління:

- оперативне управління та прогнозування працездатності кожного автомобіля з урахуванням його експлуатаційної надійності та результатів діагностування;
- перепланування (збільшення) періодичності діагностування для профілактичного оцінення потенціалу працездатності агрегатів і систем автомобілів за критерієм мінімуму сумарного ризику;
- оцінення фактичного стану автомобілів та вибір оптимальної стратегії управління (відновлення) працездатності парку АТП загалом.

Розглянемо методику побудови моделей, приклади та їх практичне застосування.

2.4 Модель для оперативного керування працездатністю автомобіля

Для вирішення завдання першого рівня теорія надійності [23] дає такі характеристики, як інтенсивність виникнення відмов (раптових та зносних) та методи розрахунку ймовірності безвідмовної роботи автомобіля. Розрахунок ймовірності безвідмовної роботи автомобіля на певний, заздалегідь заданий відрізок пробігу (наприклад, до наступного ТО) за своєю суттю і є прогнозуванням, тільки статистичним.

Однак на рівні управління працездатністю конкретного автомобіля одна лише статистична інформація недостатня та малоефективна через свій «абстрактний» характер. Разом з нею використовують діагностичну інформацію: закономірність і швидкість зміни діагностичних параметрів з їх гранично допустимими і поточними значеннями. Щоб прогнозування працездатності було більш точним і оперативним, використовують у моделі першого рівня результати діагнозу по автомобілю загалом.

З урахуванням цих особливостей під прогнозуванням будемо розуміти теоретично і експериментально обґрунтоване означення працездатності автомобіля (агрегату) з урахуванням результатів поточного діагностування на заданий пробіг $l + \tau$. Іншими словами, необхідно, знаючи передісторію

поломок та зносу агрегатів, інформація про які полягає в характеристиках надійності – інтенсивності раптових (λ_0) та зносових (λ_1) відмов, а також закономірностях зміни оптимальної сукупності діагностичних параметрів $\sum_{i=1}^k z_i$ на відрізку пробігу $(0, L)$, передбачити на основі розрахунків ймовірність відсутності відмови на пробігу $l+\tau$, тобто, до наступного моменту діагностування за умови, що жоден діагностичний параметр за цей час не вийде за межі гранично допустимого значення. Останнє означатиме, що агрегат не зносився, а регулювання та зазори сполучення в нормі. Відомо, що це можна зробити на основі теореми прийняття гіпотез – формули Байеса [24].

2.4.1 Побудова моделі

Для побудови моделі уточнимо вихідні дані та намітимо її логічну структуру. Механіку-діагносту на рівні оперативного управління працездатністю дуже важливо своєчасно встановити момент, коли настає гранично допустимий стан E_1 агрегату або системи автомобіля (рис. 2.1), за якого для відновлення працездатності необхідно провести профілактику або заміну окремих деталей, щоб уникнути відмови (поломки).

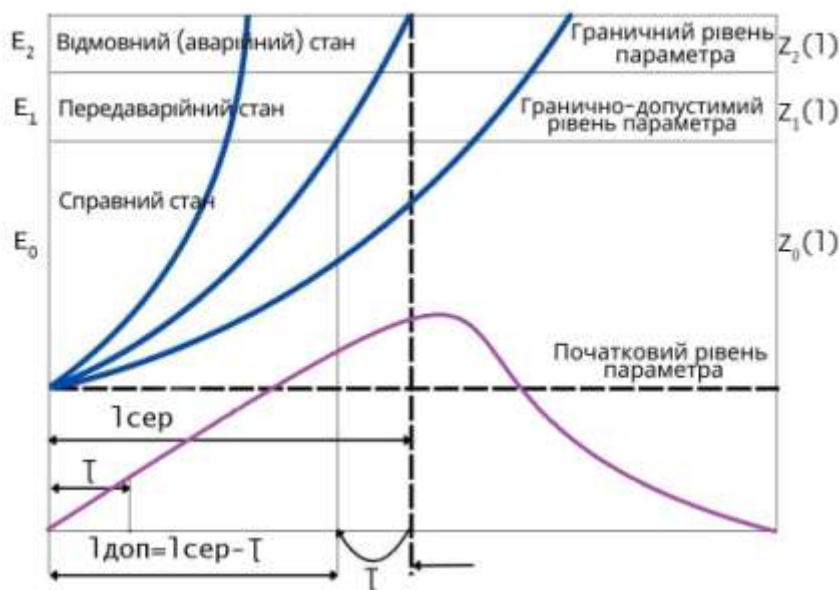


Рисунок 2.1 – Схема обґрунтування гранично допустимого значення діагностичного параметра

Тому першим кроком у вирішенні поставленої задачі є побудова фізико-математичної моделі оптимізації стану E_1 (перший крок). Очевидно, що модель оптимізації стану E_1 доведеться будувати з урахуванням періодичного діагностування, як це робиться в АТП (рис. 2.2). Отже, знадобиться модель оптимізації періодичності τ_{opt} (другий крок).

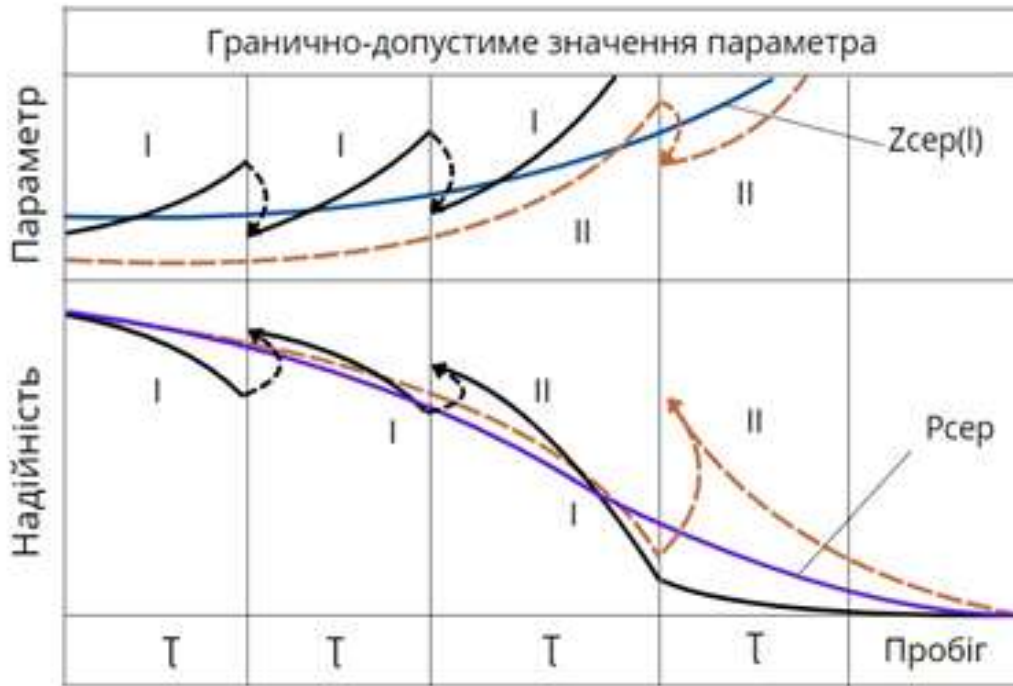


Рисунок 2.2 – Схема ухвалення рішення про необхідність проведення профілактики

За змістом завдання в кінцевій моделі прогнозування працездатності з урахуванням швидкості зміни діагностичного параметра φ_1 мають бути використані:

- $\lambda_0 + \lambda_1$ – сумарна інтенсивність раптових та зносових відмов (третій крок);
- Z_{nd} – відповідне E_1 оптимальне гранично допустиме значення діагностичного параметра (четвертий крок);
- процедура розрахунку, що дозволяє розрахувати прогноз працездатності (шукаю апостеріорну ймовірність (п'ятий крок);
- алгоритм розрахунку на ЕОМ для побудови параметричних сімей працездатності (шостий крок);
- науково обґрунтовані рекомендації із прийняття рішень щодо управління працездатністю $P(L) \leq P_{уср}$ (останній крок).

Для побудови моделі оптимізації стану E_{m-1} відповідного пробігу l_{don} – τ_{onm} з урахуванням застосування періодичного діагностування виберемо періодичність перевірок:

$$\tau_{onm} = l_{cep} t,$$

де l_{cep} – середній наробіток на відмову, км;

t – коефіцієнт оптимальності, тобто критерій економічної доцільності обмежень тривалості експлуатації, що орієнтується на мінімум витрат під час виконання чергового діагностування C_d і непланового ремонту C_{np} .

Коефіцієнт оптимальності визначається за графічною залежністю, побудованою заздалегідь (рис. 2.3).

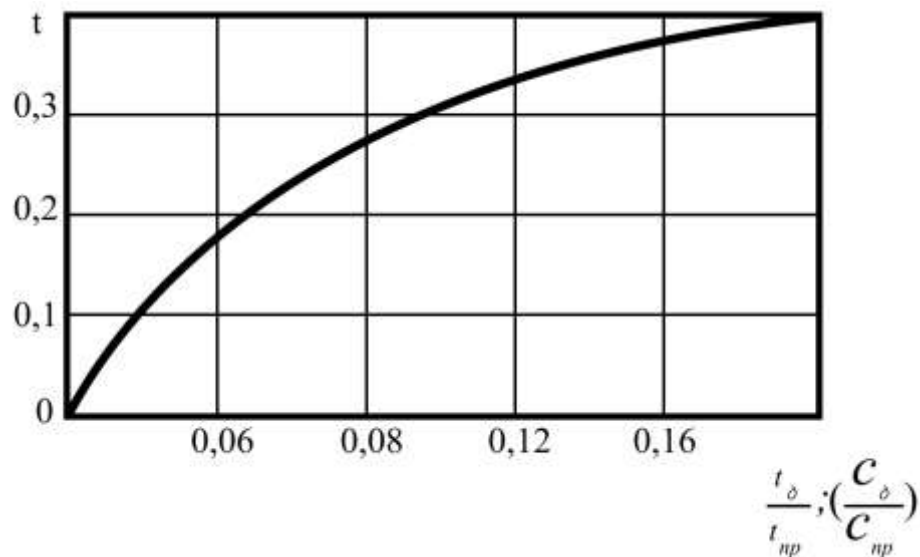


Рисунок 2.3 – Залежність коефіцієнта оптимальності t від співвідношення $t_\delta/t_{np}; C_\delta/C_{np}$

У розробленій моделі враховується наявність зв'язку між зносом і значенням діагностичних параметрів, тобто швидкість зміни діагностичного параметра:

$$\varphi(t) = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \rho \frac{z(l + \Delta l)}{\Delta l}. \quad (2.1)$$

2.4.2 Гранично допустиме значення діагностичного параметра

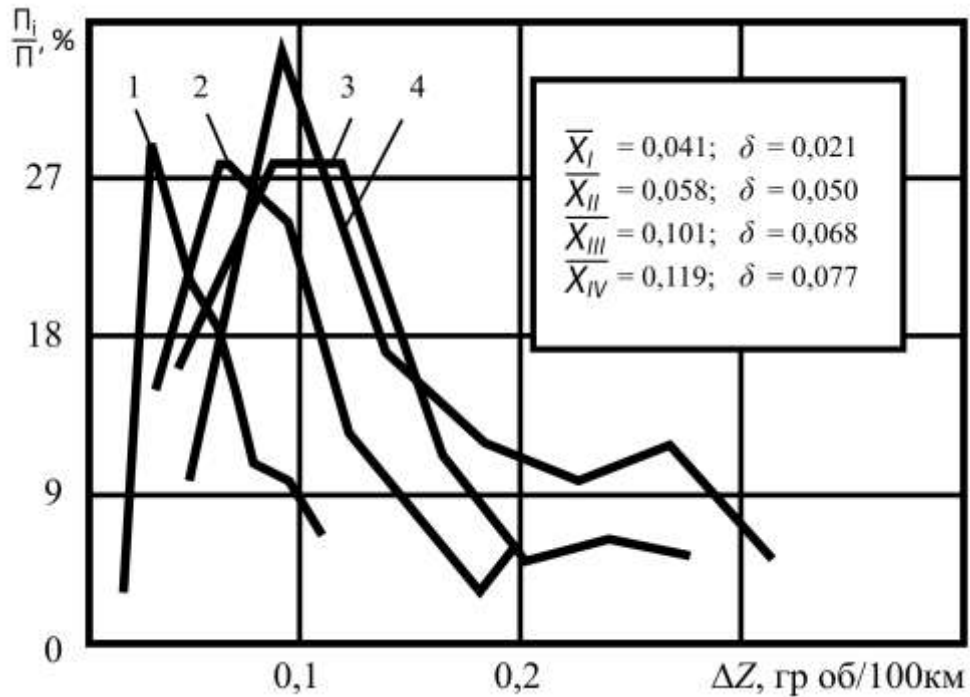
Для цього можна скористатися однією з методик [23]. Визначення гранично допустимого значення (ГДЗ) діагностичного параметра в нашій моделі, наприклад, для агрегатів трансмісії проводиться з урахуванням оптимальної періодичності профілактики $\tau_{onm} = l_{cep}t$, що забезпечує мінімальні витрати на планове діагностування та витрати на неплановий поточний ремонт, спричинений поломкою. Гранично допустимим станом об'єкта вважається стан, за якого параметр $z(l)$ досягає значення на пробігу $l_{дон} = l_{cep}t$. Вибрана оптимальна періодичність τ_{onm} гарантує, що цей стан буде завжди виявлено до настання відмови. ГДЗ розраховуються за встановленими експериментально або отриманими теоретично залежностями зміни та розподілу значень діагностичних параметрів (рис. 2.4 та 2.5).

Наприклад, гранично допустиме значення сумарного кутового зазору для заднього моста автомобіля ГАЗ-53 (за $C_\delta / C_{np} = 0,015$; $t = 0,08$; $l_{cep} = 142$ тис. км; $\tau_{onm} = 11,4$ тис. км.; $\alpha = 9,53^\circ$ – початковий зазор; $b = 0,01^\circ/\text{тис. км}$ – інтенсивність зміни зазору; L – пробіг автомобіля, км):

$$z_{нд} = ae^{bl} = ae^{b(l_{cep} - \tau)} = 9,53 e^{0,01(142-11,4)} = 35^\circ. \quad (2.2)$$

Значення сумарного кутового зазору для головної передачі самоскида ЗІЛ ММЗ-555 (за $C_d/C_{np} = 0,017$; $t = 0,10$; $l_{сер} = 128$ тис. км; $\tau_{omm} = 12,8$ тис. км; $\alpha = 12,199^\circ$; $b=0,011^\circ/\text{тис. км}$):

$$z_{n0} = 12,2e^{0,011(128-12,8)} = 43^\circ.$$



1, 2, 3, 4 – відповідно I, II, III, IV передачі

Рисунок 2.4 – Полігони інтенсивності зміни сумарного кутового зазору у коробці передач автомобіля ГАЗ-53

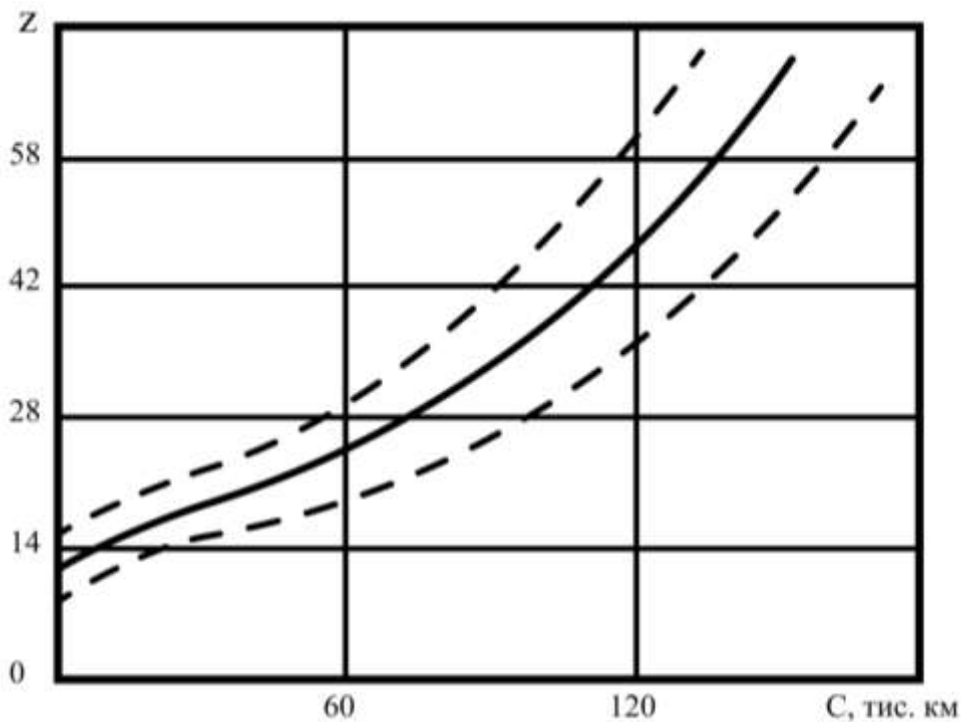


Рисунок 2.5 – Закономірність зміни сумарного кутового зазору у головній передачі заднього моста автомобілів ЗІЛ-ММЗ-555

Порівнюючи поточні значення параметрів z_i та z_{nd} або взявши відношення z_i/z_{nd} , можна визначити швидкість зміни діагностичного параметра, необхідну для прогнозування працездатності.

2.4.3 Модель управління працездатністю ведучих мостів автомобіля

Завдання управління (визначення, відновлення або прогнозування) працездатності під час чергового діагностування (рис. 2.2) вирішується за допомогою моделі, основаної на теоремі Байєса – теоремі прийняття гіпотез [24]. Відповідно до цієї теореми визначається ймовірність відсутності відмови на пробігу $(l+z)$ за умови, що у момент діагностування l стало відомо, що ці діагностичні параметри перебувають у допустимих межах. З цією метою, вважаючи заданими середні напрацювання до зносової λ_1 та раптової λ_0 відмов, гранично допустиме значення кожного діагностичного параметра їхньої оптимальної сукупності $\sum_{i=1}^k z_i$, розглядаючи основний найбільш тривалий стаціонарний період життєвого циклу автомобіля (λ_0 і $\lambda_1, = const$), апостеріорну ймовірність відсутності відмови $P(H_2/A)$ можна визначити за формулою

$$P(H_2 / A) = \frac{P(H_2)P(A / H_2)}{P(H_1)P(A / H_1) + P(H_2)P(A / H_2)}, \quad (2.3)$$

де $P(H_2)$, $P(H_1)$ – отримані на підставі дослідних статистичних даних апріорні ймовірності відповідно до виникнення та відсутності відмови на пробігу $l+\tau$.

Відомо, що $P(L) = e^{-\lambda l}$; тоді ймовірність відсутності відмови (у моделі враховується виникнення раптових і зносових відмов), тобто $(\lambda_0 + \lambda_1)$ буде дорівнювати

$$P(H_2) = e^{-(\lambda_0 + \lambda_1)(l + \tau)}. \quad (2.4)$$

Але, оскільки події H_1 і H_2 несумісні, тобто

$$P(H_1) + P(H_2) = 1, \quad (2.5)$$

то

$$\begin{aligned} P(H_1) &= 1 - e^{-(\lambda_0 + \lambda_1)(l + \tau)}, \\ P(A / H_1) &= 1 - e^{-\tau_0(l + \tau)}, \end{aligned} \quad (2.6)$$

де $P(A/H_1)$ – умовна ймовірність того, що жоден діагностичний параметр не досяг ГДЗ на пробігу $(l + \tau)$, а відмова відбулася:

$$P(A/H_2) = \prod_{i=1}^k e^{-\varphi_i(1+\tau)} = e^{-\sum_{i=1}^k z_i^0(l)(1+\frac{\tau}{l})}. \quad (2.7)$$

де $P(A/H_2)$ – умовна ймовірність того, що жоден діагностичний параметр не досяг ГДЗ та відмова на пробігу $(l + \tau)$ не відбулася.

Отримані за 2.4 – 2.7 апіорні та умовні ймовірності дозволяють визначити шукану апостеріорну ймовірність – прогноз працездатності

$$P(H_2/A) = \frac{e^{-(\lambda_0+\lambda_1)(l+\tau)} e^{-\sum_{i=1}^k z_i^0(l)(1+\frac{\tau}{l})}}{\left[1 - e^{-(\lambda_0-\lambda_1)(l+\tau)} \left[1 - e^{-\lambda_0(l+\tau)} + e^{-(\lambda_0+\lambda_1)(l+\tau)} e^{-\sum_{i=1}^k z_i^0(l)(1+\frac{\tau}{l})} \right] \right]}. \quad (2.8)$$

З аналізу 2.8 видно, що розрахунки зводяться до табличного відшукування значення функції $e^{\pm 8}$ і простих арифметичних процесів. В порядку самостійної роботи, під час підготовки матеріалів до практичних занять, рекомендується кожному студенту розрахувати значення для різної швидкості зміни діагностичних параметрів, наприклад, автомобілів КамАЗ.

2.4.4 Практична процедура управління працездатністю

В процесі проведення розрахунку прогнозу працездатності автомобіля необхідно використовувати спеціальну програму [25].

Методику прогнозування працездатності розглянемо на прикладі. В АТП діагностування ведучих мостів автомобіля КамАЗ-5320 проводять з періодичністю $\tau = 12000$ км на пробігу $l = 113640$ км (друга категорія умов експлуатації). Встановлено, що інтенсивність зносових та раптових відмов агрегатів відповідно $\lambda_1 = 3,7 \cdot 10^{-7}$ та $\lambda_2 = 1,85 \cdot 10^{-7}$.

Сумарний кутовий зазор у задньому мосту першого автомобіля $z_1 = 30^\circ$, другого – $z_2 = 38^\circ$.

За $z_{no} = 44^\circ$ сумарний кутовий зазор у задньому мосту першого автомобіля відносно швидкості зміни стану задніх мостів перевірених автомобілів $z_1 = 0,68$; $z_2 = 0,86$.

Підставивши ці дані в (2.8), отримуємо прогноз працездатності (для пробігу $l = 125,64$ тис. км) $P_1 = 0,48$; $P_2 = 0,38$. Користуючись закономірністю зміни сумарного кутового зазору для ведучих мостів КамАЗ $z_{(l)} = 10 e^{0,01l}$, спочатку обчислюємо його значення $z_{(l)} = 35,25^\circ$ (для пробігу $l = 125,64$ тис. км), яке відповідає нормальному зносу агрегату та $z_{cp} = 0,80$. У цьому випадку працездатність $P_{cp} = 0,42$. Порівнюючи з цією величиною прогноз працездатності кожного моста, робимо висновок, що другому агрегату для зниження швидкості зношування деталей необхідно зробити профілактику: заміну мастила або підтяжку підшипників. Для практичного використання

на станціях діагностики за результатами розрахунків на ЕОМ побудовано параметри сімейства працездатності агрегатів (рис. 2.6).

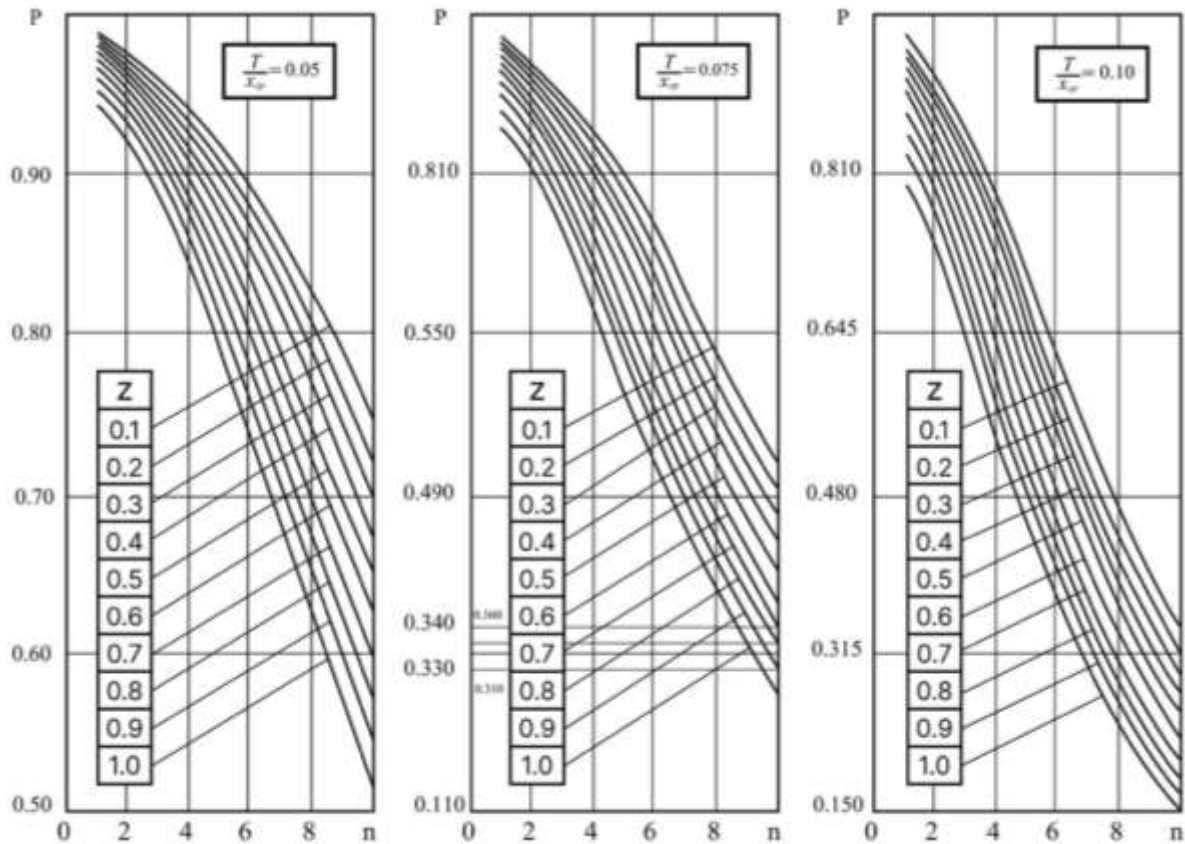


Рисунок 2.6 – Прогнозування працездатності агрегатів автомобіля

2.4.5 Управління потенціалом працездатності агрегатів за діагностичними параметрами

Управління та прогнозування ресурсу машин та їх агрегатів зводиться до оцінення потенціалу працездатності методом узагальнених діагностичних параметрів. Суть запропонованого методу та розробленої моделі станів полягає в такому.

Потенціал працездатності $\Pi(t)$, що містить активну та пасивну складові, є однією з форм оцінки споживчої якості системи за її станом на момент напрацювання t . Досягнення активної частини потенціалу $\Pi_{акм(t)}$ означає, що основна система потребує ремонту, а її складові – усунення несправностей або заміни деталей, що відмовили. Загалом математичне сподівання потенціалу працездатності системи визначається за формулою:

$$\Pi(t) = \Pi_o F(t) + \lambda \Pi_k \int_0^t \frac{F(t)}{F(u)} du, \quad (2.9)$$

де Π_o – потенціал працездатності нової системи;

$F(t)$ – формувальна функція, що характеризує закономірності втрати працездатності модельованої системи;

λ – інтенсивність (швидкість) зниження працездатності;

Π_k – інтенсивність керівних впливів (профілактичних та ремонтних).

Для систем, що характеризуються одним параметром (або коли, наприклад, керують працездатністю за одним параметром), реалізація рівняння (2.9) у загальному вигляді не викликає труднощів. Практичне значення має випадок, коли система оцінюється кількома параметрами у натуральному вираженні. Як приклад, без шкоди методичного підходу, розглянемо коробку передач автомобіля ЗІЛ-130, якість профілактики та ремонту якої може бути оцінена такими параметрами (факторами): кутом повороту вторинного вала за умови фіксованого положення вала первинного (Q_1), тобто, сумарним кутовим зазором; величиною неперекриття зубів муфт синхронізатора і шестерні (Q_2), зусиллям включення передачі (Q_3) і величиною перекосу осі первинного вала коробки передач відносно осі колінчастого вала (Q_4).

Рівняння множинної регресії, що описує залежність напрацювання до відмовного стану від значень i -х факторів на основі проведення плану повного факторного експерименту, має вигляд:

$$t = T_0 - | 0,34 (\theta_1 - 177) + 0,39 (\theta_2 - 0,325) + 0,43 (\theta_3 + 24,5) + (\theta_4 8). \quad (2.10)$$

Оскільки впливи параметрів на працездатність агрегату нерівнозначні, то вибирається лімітувальний параметр, а для залишкових встановлюється допуск зона. Як лімітувальний параметр вибирається показник Q_1 (сумарний кутовий зазор, що характеризує зменшення зубів і шліців, тобто величину лінійного зносу основних елементів коробки передач).

Активна складова початкового потенціалу працездатності коробки передач дорівнює

$$\Pi_{акт}(n) = [\theta_1] - \theta_1^\circ, \quad (2.11)$$

де $[\theta_1]$ і θ_1° – відповідно початкове та граничне значення параметра.

На прогнозне напрацювання (2.11) впливають параметри Q_2 , Q_3 і Q_4 . З урахуванням цього активна складова початкового потенціалу працездатності коробки передач у натуральних одиницях становить

$$\Pi_{акт}(n) = [\theta_1] - (\theta_1^\circ - \lambda\theta_1). \quad (2.12)$$

У безрозмірному вираженні потенціал працездатності коробки передач становить

$$\Pi_{о\ акт}(n) = A(o)[\theta_1 - (\theta_1^\circ + 0,1)] = 1000, \quad (2.13)$$

де 1000 – безрозмірна величина за умови $\Pi = \Pi(0) = 1000$, тобто, значення потенціалу працездатності системи у момент у промілі до її початкового потенціалу

$$A_{(0)} = 1000 \delta / \Pi_{\text{акт}}(n), \quad (2.14)$$

де δ – коефіцієнт ефективності потенціалу працездатності.

Обробкою результатів численних вимірів агрегатів встановлено, що формувальна функція потенціалу працездатності системи загалом і різних агрегатів трансмісії (коробок передач і ведучих мостів) має вигляд

$$F(t) = e^{-\alpha t}. \quad (2.15)$$

Відповідно до цього фактора потенціал працездатності визначається формулою

$$\Pi(t) = 1000 e^{-\alpha t} + (1 - e^{-\alpha t}) \Pi_K / (1 - e^{-\alpha t}), \quad (2.16)$$

де α та $\lambda \Pi_K$ – величини, що підлягають визначенню.

На малому проміжку $[0, 1]$ замінимо функцію $e^{-\alpha t}$ сумою перших двох членів її розкладання у ряд Маклорена

$$e^{-\alpha t} = 1 - \alpha t. \quad (2.17)$$

Перетворюючи вираз (2.16), маємо

$$\Pi(t) = 1000 (1 - \alpha t) + \lambda \Pi_K t, \quad (2.18)$$

звідки

$$1000 - \Pi(t) = t (1000 \alpha - \lambda \Pi_K).$$

Маючи вихідні дані $[Q_{\text{пред}}]$, Q_1 , Q_4 шляхом розв'язання системи рівнянь, що впливають з (2.18), визначаємо

$$\Pi(t) = 791 + 209 e^{-0,06166t}. \quad (2.19)$$

2.5 Модель оптимізації режимів діагностування для оперативної підтримки потенціалу працездатності за мінімальних витрат і ризику

Управління на другому рівні найбільш ефективно можна здійснити із застосуванням тактики перепланування періодичності перевірок з урахуванням фактичної працездатності автомобілів.

Відмінною особливістю такої тактики є те, що з метою зниження витрат на підтримку оптимального рівня працездатності та діагностування модель передбачає збільшення періодичності перевірок за критерієм «мінімум сумарного ризику» R [27]:

$$R = R_{\text{ав}} + R_{\text{д}} = \min, \quad (2.20)$$

де $R_{\text{ав}}$ – ризик аварійної відмови деталей агрегату за період прогнозування;

$R_{\text{д}}$ – ризик передчасного діагностування агрегату.

Зі свого боку

$$R_{\text{ав}} = Q_{\text{ав}} P_{\text{ав}}; R_{\text{д}} = \frac{Q_{\text{д}}}{K} (1 - P_{\text{ав}}), \quad (2.21)$$

де $Q_{\text{ав}}$, $Q_{\text{д}}$ – відповідно витрати на ліквідацію аварійної відмови та загальні витрати на діагностування;

$P_{ав}$ – ймовірність виникнення аварійної відмови деталі за період прогнозу (дорівнює K технічних обслуговувань);

$\frac{Q_0}{K}$ – питомі витрати на діагностування із прогнозом.

Зі збільшенням періоду прогнозу (зростанням K) зростає $P_{ав}$ за рахунок вироблення ресурсу, швидкість якого може бути визначена (рис. 2.7) як

$$tg\lambda_2 = \frac{Z_{нд} - Z_0}{K_г} \quad (2.22)$$

Це відбувається за рахунок зростання σ_{zd} , визначального розкид значень реалізації діагностичного параметра відносно середньостатистичної його величини

$$\sigma_{zd} = KV \frac{Z_{нд} - Z_0}{K_г} \quad (2.23)$$

де σ_{zd} – середньоквадратне відхилення параметра;

V – коефіцієнт варіації параметра Z ;

$Z_0, Z, Z_{нд}$ – початкове, поточне та гранично допустиме значення прогнозувального параметра.

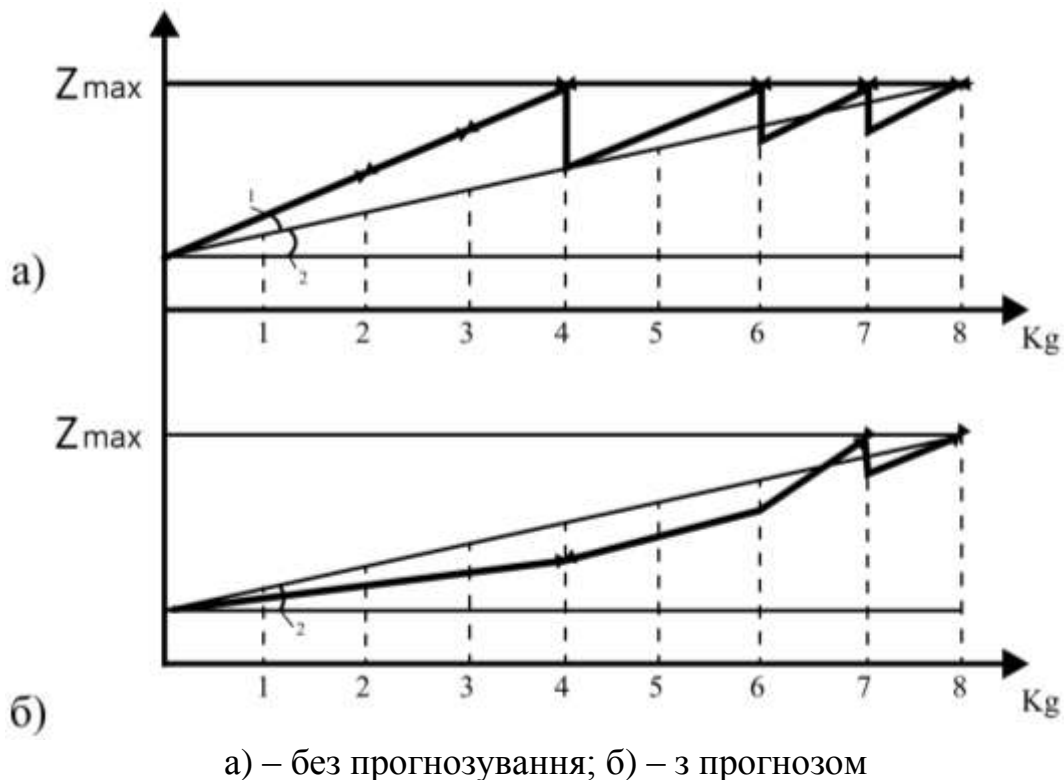


Рисунок 2.7 – Тактики управління працездатністю автомобіля з результатів діагностування

Без істотної втрати точності щільність розподілу, що підпорядковується закону Вейбулла [24], можна замінити нормальним розподілом, оскільки ймовірність аварійної відмови системи $P_{ав}$ визначається площею, що лежить під правою частиною кривої (рис. 2.8, заштрихована частина).

Тоді

$$P_{ав} = \frac{1}{\sigma_{z\partial} \sqrt{2\pi}} \int_{Z_{n\partial}}^{\infty} \exp\left(-\frac{(Z-M_n)^2}{2\sigma_{z\partial}^2}\right) dz, \quad (2.24)$$

де $M_n + Z_{\partial} + K_{\epsilon} \frac{Z_{n\partial} - Z_o}{K_{\epsilon}}$ – математичне сподівання значення прогнозованого діагностичного параметра Z .

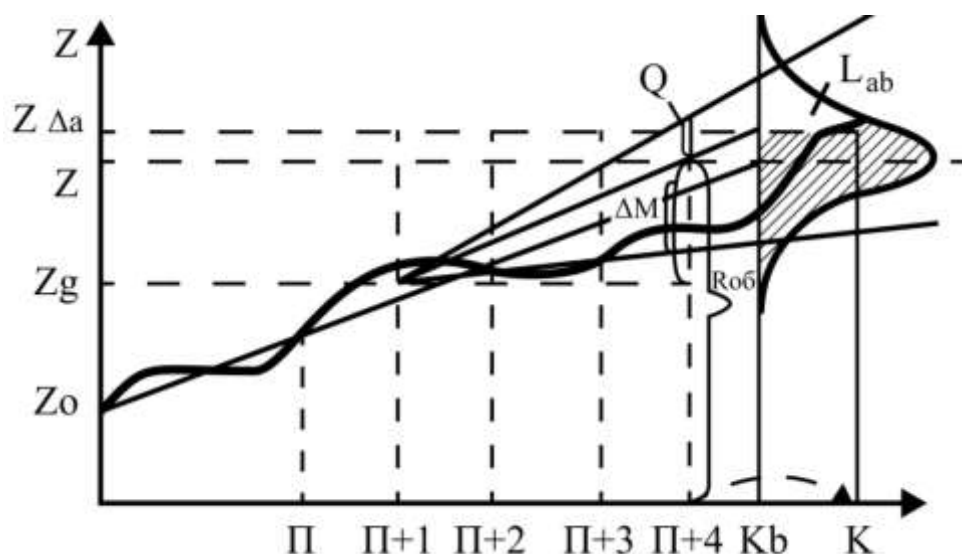


Рисунок 2.8 – Схема прогнозування працездатності з урахуванням вироблення ресурсу агрегату

У розгорнутому вигляді критерій ризику прогнозу (2.20) набуваємо вигляду

$$R = \frac{Q_{ав}}{KV \left(\frac{Z_{n\partial} - Z_o}{K_{\epsilon}}\right) \sqrt{2\pi}} \int_{Z_{n\partial}}^{\infty} \exp\left(-\frac{\left[Z - \left(Z_q + K \frac{Z_{n\partial} - Z_o}{K_{\epsilon}}\right)\right]^2}{2k^2 V^2 \left(\frac{Z_{n\partial} - Z_o}{K_{\epsilon}}\right)^2}\right) dz + \frac{Q_o}{K} \left(1 - \frac{1}{KV \left(\frac{Z_{n\partial} - Z_o}{K_{\epsilon}}\right) \sqrt{2\pi}} \int_{Z_{n\partial}}^{\infty} \exp\left(-\frac{\left[Z - \left(Z_q + K \frac{Z_{n\partial} - Z_o}{K_{\epsilon}}\right)\right]^2}{2K^2 V^2 \left(\frac{Z_{n\partial} - Z_o}{K_{\epsilon}}\right)^2}\right) dz\right) = \min, \quad (2.25)$$

де K – кількість перепусток технічного обслуговування;

K_{ϵ} – середня кількість впливів ТО до ремонту агрегату;

$$Z_{\delta}K = var.$$

Вираз (2.25) дозволяє під час перевірки з урахуванням поточного значення діагностичного параметра Z визначити оптимальне значення K^{opt} , за якого R досягає мінімуму. Обчислення із застосуванням ЕОМ необхідно проводити на етапі проектування станцій діагностики [6], а операторам-діагностам у практичній роботі зручно використовувати графічну залежність

$$K^{opt} = f(Z_{\delta}).$$

Аналіз діагностичного тесту показав, що, користуючись цією моделлю, можна визначити залишковий ресурс агрегату за діагностичними параметрами, за якими складено паспорти (нормативні та гранично допустимі значення, закономірності зміни) та зменшенням значень яких можна охарактеризувати ступінь зниження працездатності на момент перевірки. Взявши за основу середню траєкторію зміни узагальненого діагностичного параметра, що характеризує ступінь вироблення ресурсу, визначають за моделлю число діагнозів з прогнозами. Водночас витрати на діагностування на початку експлуатації визначають за формулою

$$C_{\delta} = \frac{1,237C_{\delta\delta}1\delta}{N_{cn}Lr}, \quad (2.26)$$

де 1,237 – сумарний коефіцієнт, що враховує амортизаційні відрахування (0,137) та експлуатаційні витрати (0,1) з обладнання;

$C_{\delta\delta}$ – вартість діагностичного обладнання;

N_{cn} – облікова кількість автомобілів в АТП.

Витрати на подальші перевірки з прогнозами розраховують за (2.25), а сумарні витрати на діагностування з прогнозом до капітального ремонту автомобіля визначають за формулою:

$$C_{\delta n} = C_{\delta}\lambda + C_{\delta}(1-\alpha)Q, \quad (2.27)$$

де $C_{\delta}\lambda$ – витрати на діагностування без прогнозу;

C_{δ} – вартість одного планово-попереджувального діагностування автомобіля;

λ , $(1 - \lambda)$ – відповідно частки витрат на зміну непрогнозованих і прогнозованих діагностичних параметрів;

$C_{\delta}(1 - \lambda)Q$ – витрати на діагностування із прогнозом;

Q – коефіцієнт зниження на діагностування, що враховує прогнозовані пропуски планових перевірок працездатності:

$$Q = \frac{\sum K^{opt}}{K_{\epsilon}}. \quad (2.28)$$

Таким чином, порівняно з традиційною, розроблена тактика приводить до реалізації принципу підвищеної живучості автотехніки за рахунок ефективного управління її працездатністю. Під час її реалізації методи та режими ТО, ремонту та діагностування можуть бути змінені залежно від пробігу та режимів роботи автомобілів. Основна перевага принципу живучості автомобілів – динамічність і гнучкість управління режимами профілактичного відновлення працездатності парку.

2.5.1 Практичне коригування періодичності діагностування для підтримання оптимального рівня потенціалу працездатності агрегатів трансмісії автомобілів

Ця робота проводиться у напрямку збільшення періодичності на основі вибору оптимальної тактики профілактичного підтримання необхідного рівня потенціалу працездатності за фактичним станом (якщо результати діагнозу підтверджують таку можливість).

Прогноз оптимального збільшення періодичності діагностування, тобто визначення кількості пропусків планових перевірок параметрів, розраховується за допомогою моделі (2.25) за мінімумом сумарного ризику виникнення аварійних відмов і передчасного діагностування агрегатів і вузлів автомобіля. Розрахунок ведеться на ЕОМ за спеціально складеною програмою. Потім за результатами розрахунку будують траєкторії зміни сумарного ризику R [27] (рис. 2.9).

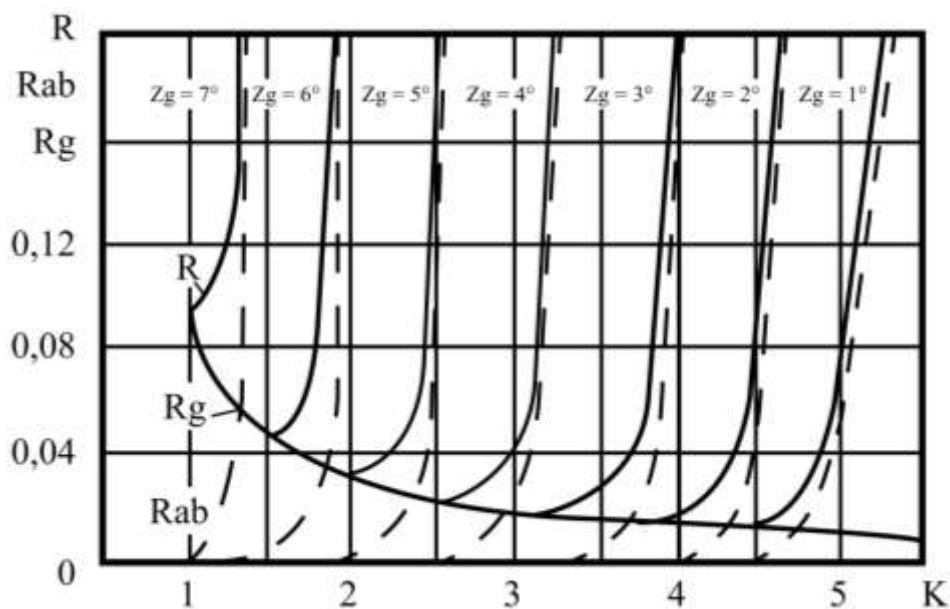


Рисунок 2.9 – Зміна сумарного ризику за різних значень діагностичного параметра

Через їх оптимальні значення наносять графічну залежність кожного агрегату від поточного значення параметрів Z_o . Такі графіки необхідні опе-

раторам-діагностам для прийняття науково обгрунтованого рішення про можливість збільшення періодичності чергового діагностування кожного автомобіля. Як приклад на рис. 2.10 наведено графік для коригування періодичності діагностичних впливів щодо коробки передач, карданної передачі та редуктора заднього моста автомобіля ЗІЛ-130.

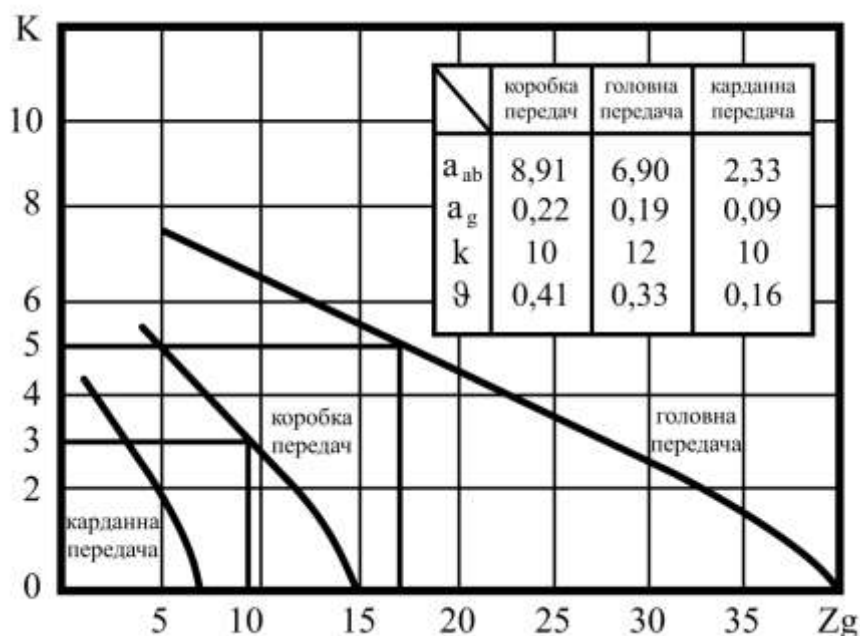


Рисунок 2.10 – Графік визначення гарантованого пропуску діагностичних перевірок

За поточним значенням параметра Z_0 визначається оптимальне значення K^{opt} , за якого $R = min$.

Практичне коригування періодичності діагностування виконується в такій послідовності:

1. На основі загального плану-графіка діагностування та ТО, а також з урахуванням заяви водія про несправності автомобіль після кріпильних, мастильних та очисних робіт надходить на станцію діагностики.

2. Фактичний стан автомобіля визначається згідно з прийнятою технологією діагностування.

3. За результатами вимірювань діагностичних параметрів застосовуються рішення:

- якщо Z_0 не відповідає нормативному значенню, то для відновлення необхідного рівня працездатності з урахуванням результатів діагнозу необхідно провести регулювання або експрес-заміну відмовного елемента;

- якщо $Z_0 < Z_{nd}$, то необхідно за графіком призначити гарантований пропуск діагностичних впливів для цього параметра (наприклад, для коробки передач (див. рис. 2.10) у разі $Z_0 = 9^0$, $K^{opt} = 3$; для головної передачі – за $Z_0 = 17^0$, $K^{opt} = 5$).

4. Результати діагностування і прогноз чергової перевірки автомобіля, а також виконання регулювальних робіт (або експрес-заміни) заносяться в накопичувальні діагностичні карти.

5. Технічна служба за цією картою виключає із загального обсягу робіт роботи, виконані під час діагностування (коригується з урахуванням результату попереднього прогнозу).

6. Діагностичні карти слугують інформаційним джерелом управління працездатністю автомобілів і є підставою для виконання ремонтно-профілактичних робіт по всьому парку АТП. Застосування розробленої методики коригування періодичності перевірок, особливо в централізованих системах підтримки працездатності та діагностування, а також для автомобілів спеціального призначення (наприклад, автокранів, пожежних тощо) знижує витрати на профілактичні заходи та усунення несправностей на 8...11% і дозволяє підтримувати потенціал працездатності автомобільного парку на оптимальному рівні.

3 ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ РОЗРОБКИ НОВИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ЄДИНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРАЦЕЗДАТНІСТЮ АТЗ

3.1 Загальні закономірності поведінки та запропонована концепція управління працездатністю

Роботу такої складної системи, як автомобіль, можна розглядати з погляду загальної структури її поведінки. З позицій системотехніки необхідно розрізнити закони функціонування та закони розвитку машини.

У системі діють одночасно два типи зв'язків, що характеризують, з одного боку, стійкість її працездатності, а з іншого – мінливість стану. Закони функціонування відображають структури, склад і взаємодію її елементів, процеси взаємодії системи з навколишнім середовищем. Закони розвитку системи – це закони якісних перетворень. Їх знання дозволяє визначити шлях якісного перетворення, обґрунтувати прогноз розвитку та правильно організувати управління працездатністю.

Спектральна теорія працездатності автотранспортних засобів (СТПАТЗ) може бути подана у вигляді «Куба теорій АТЗ», вершинами якого є:

- стохастична теорія точності функціонування;
- стохастична теорія надійності та працездатності АТЗ;
- еволюційна динаміка їхнього сталого розвитку;
- синергетика та гомеостатика систем.

У першій вивчаються об'єктивні закономірності процесів функціонування АТЗ, виявляються і кількісно описуються причинно-імовірнісні зв'язки та залежності, що визначають точність їх функціонування.

Будучи приватною теорією СТПАТЗ, ця теорія як об'єкт аксіоматизації використовує матриці розсіювання та інтенсивностей. У цьому випадку використовується спектральна форма математичного опису функціонування АТЗ, що враховує стохастичні особливості поведінки системи та впливу на ці системи технологічних та інших факторів.

Закономірності встановлених причинно-наслідкових зв'язків між процесами на вході та виході системи визначаються когерентністю цих процесів, тобто певними взаємовідносинами випадкових фаз їх коливань на різних частотах функціонування АТЗ (зі збільшенням ступеня синхронізації цих фаз зв'язок зростає). Когерентні зв'язки в АТЗ викликають явище інтерференції похибок виготовлення деталей. Встановлення цього явища дозволяє глибше і точніше визначити реальний механізм утворення похибок функціонування.

Предметом еволюційної динаміки сталого розвитку є вивчення закономірностей зміни стану АТЗ протягом досить тривалого пробігу. Теоретичними методами в ній вивчаються математичні моделі поведінки АТЗ за зміни зовнішніх і внутрішніх умов, що визначають їх стан в поточний момент часу і під час прогнозування працездатності. До практичних методів теорії відносяться методи збору та обробки діагностичної інформації.

Виходячи з означень про функціонування АТЗ, що розвиваються у СТПАТЗ, еволюція цих систем з позиції парадигми сталого розвитку має описуватися з урахуванням таких вимог:

- необхідно враховувати зв'язки між флуктаціями та нестійкістю працездатного стану АТЗ;
- опис поведінки АТЗ має містити як детерміністський, так і статистичний аспекти.

Синергетика АТЗ – це приватна теорія СТПАТЗ, що вивчає кооперативну поведінку елементів, підсистем і систем, що утворюють АТЗ, внаслідок якої формується певний тип працездатної структури і має відповідне цій структурі їх функціонування. Флуктація працездатної структури розглядається як деяка зміна у величині та характері зв'язків між елементами та підсистемами, що утворюють АТЗ.

Формування парку рухомого складу, розвиток та становлення транспортної інфраструктури України за обмеженості матеріальних та енергетичних ресурсів, збереження довкілля зумовили необхідність розробки нової концепції підтримки працездатності транспортних засобів постіндустріальної економіки. Енергетична концепція управління працездатністю АТЗ базується на таких постулатах. Узагальнення теорії та практики сучасного забезпечення надійності в техніці, її енергетичного постулату, аналізу щільності потоку енергії, енергоентропіки дозволяють дійти висновку: основою управління працездатності та ресурсозбереження машин є не вивчення подій (відмов), а дослідження станів. АТЗ як система має набір можливих станів, що змінюються під впливом середовища. Оборотні стани описуються фізичними моделями і класичною термодинамікою; необоротні – нерівноважними. Більш незворотним вважається процес, у якого швидкість зростання ентропії більша. Загальмувати зростання ентропії за відомого спектра навантажень можна застосуванням гомеостатичних принципів управління (наприклад, включенням «причіпок, що чекають» або самоорганізацією у разі тертя беззносності деталей). Однак у будь-якій машині як відкритій системі за рахунок впливів та припливу енергії та речовини (умови експлуатації, навантаження та профілактика) безперервно виникають і руйнуються різні стани.

Управління їх спектром та стійкістю структури машини (агрегату, вузла та механізму) потребує врахування синергетичних ефектів поведінки. Складність збереження стійкості працездатних станів у тому, що вони далекі від термодинамічного рівноваги. В області нелінійної залежності енергетичних і речових струмів від агресивного середовища, наприклад, під час пилової бурі в системі мастила двигуна розігруються принципово нові, несподівані ефекти, які не завжди мають лише кількісний характер. За біфуркаційних значень параметрів відбуваються якісні зміни структури та стрибкоподібна перебудова її організації. Надмірно зростаюча нестійкість веде до утворення позитивного зворотного зв'язку деградаційних процесів із зовнішнім середовищем. Як правило, це закінчується катастрофою механізму стійкості працездатного стану – пиловим зносом двигуна.

Поточні стани визначають безвідмовність і працездатність (ними потрібно навчитися ефективно управляти). Стійкі стани визначають ресурс та довговічність загалом.

Під час діагностування важливо визначати із високою точністю динаміку поточних станів, тобто процес їх зміни (діагностичний тест (I-ДТ) і станів, що встановилися (II-ДТ)).

Енергетична концепція використовує для управління працездатністю автомобілів та ресурсом машин інформаційні моделі, що описують різні стани, а її методологічною основою є інтенсивне індивідуальне керування транспортним засобом та гомеостатом транспортного засобу за діагностичними параметрами та характеристиками (портретами) [12, 18, 28]. Стохастична еволюція станів системи описується строго доцільним (для цієї машини) певним переліком (набором) станів. По кожній системі можна встановити адекватні спектру станів ефективні управління (перелік впливів з певним режимом) [15].

3.2 Розробка єдиної класифікації порушень працездатності та вибір діагностичних моделей

З урахуванням цього проведено аналіз, класифікацію порушень працездатності та вибір діагностичних моделей і тестів для цілей управління. Особливість запропонованої методології управління працездатності полягає в такому.

Нині існує кілька різних методик оцінювання працездатності автомобілів, дорожніх і сільськогосподарських машин як загалом, так і окремих агрегатів і механізмів [28 – 32]. Більшість цих методик дозволяє оцінити працездатність одного автомобіля чи всього АТП наприкінці кварталу чи року, обмежуючись констатацією її фактичного рівня, оперативно не змі-

нюючи їх у разі зниження. Деякі методики як узагальнені характеристики працездатності використовують рівні функціональних показників [12, 28].

У той самий час все більшого поширення набуває розуміння того, що як інтегральні характеристики працездатності кожного агрегату і машини загалом мають виступати не рівні окремих функціональних показників, а ступінь збалансованості взаємодії всіх їхніх систем, механізмів і ланок.

Однак методики, орієнтовані на визначення динамічних інваріантів, що дозволяють оцінювати ступінь збалансованості регулювань, взаємодії та механізму стійкості працездатного стану, дотепер практично не розроблені. Моделі для прогнозування катастрофи гомеостата зубів, що зачеплюються, та аналізу деградаційних процесів у редукторі відсутні. Розроблено таку модель, як наведена на рисунку 3.1.

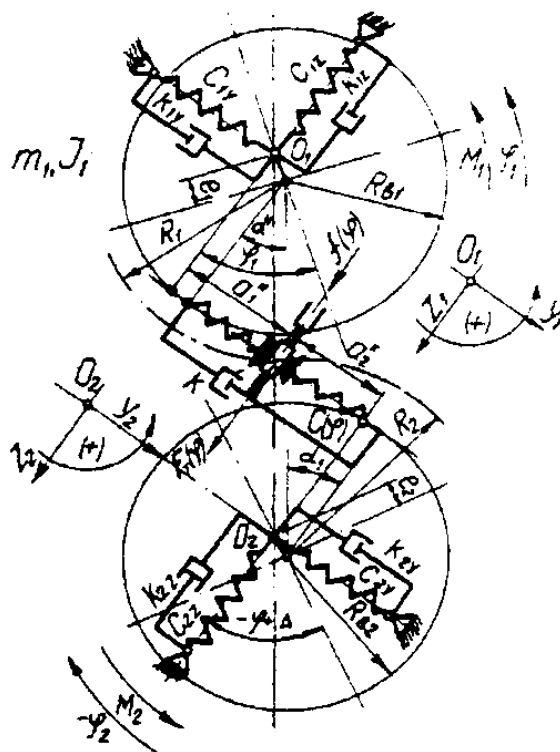


Рисунок 3.1 – Модель для прогнозування катастрофи гомеостату зубів шестерень

Зубчаста передача як динамічна система з шістьма ступенями свободи змодельована з урахуванням зовнішніх крутних моментів $M_1(\varphi)$ та $M_2(\varphi)$. Маса, що обертаються, m_1 і m_2 зубчастих коліс 1 і 2 пружно змонтовані на пружинах C_{11} , 2_{11} і C_{22} , 2_{22} , що моделюють жорсткість підшипників і їх опір, масляної плівки і валів. Колеса з'єднані між собою пружиною $C(\varphi, y(\varphi))$ і амортизатором з коефіцієнтом стиснення K , що моделює жорсткість зубців, які знаходяться в зачепленні. У пружину $C(\varphi, y(\varphi))$ вставлено шаблон, що моделює функції $f_n(\varphi)$ та $F_d(\varphi)$. З погляду фізики – перша функція являє собою величину зносу зубів за товщиною, відхилення кроку, викликані не-

рівномірним зносом зубів. Її періодичність виражається періодичністю експлуатаційного пошкодження одного або декількох зубів, що визначається за один оборот колеса (у цьому випадку її збудлива частота дорівнює кутовій швидкості колеса ω) або за час проходження одного або декількох кроків (кутова частота $\omega_c = \omega (z/k)$, де z – число зубів). Друга функція $F_\partial(\varphi)$ – підсумкова сил опору, що породжуються ушкодженнями зубів (викриванням, сколами і надломами) під час проковзування їх профілів, що зачіплюються. Ця сила є одним із головних факторів, що викликають вібрацію зубів. За характером її величина періодично змінна в часі та за напрямом – залежно від відносних швидкостей проковзування профілів $V_1(\varphi) - V_2(\varphi)$, а також $Z_{1(f)} - Z_{2(\varphi)}$. З достатньою точністю для вирішення поставленого завдання $F_{\partial(\varphi)}$ можна уявити як

$$F_\partial(\varphi) = f^* F \operatorname{sgn}(V_1 - V_2) = f^* P_v(\varphi, y(\varphi)) y(\varphi), \quad (3.1)$$

де $P_v(\varphi, y(\varphi))$ – функція жорсткості зубів;

$y(\varphi)$ – деформація зубів;

f^* – фактичний коефіцієнт тертя ($f^* > f > 0$).

На основі аналізу енергетичного балансу коливань силу F_∂ , створювану ушкодженнями та дефектами, виразимо рівнянням:

$$F_{\partial}(t) = \frac{J(t)_{np}}{R_{B_2}} \left\{ \left(i + \frac{e_1}{R_{B_1/2}} \cos \varphi_1 \right) \frac{M_1(t)}{J_{01}} \pm \left[1 + \frac{e_2}{R_{B_2}} \cos(\Delta - \varphi_2) \right] \frac{M_2(t)}{J_{02}} \right\}, \quad (3.2)$$

де Δ – кут зсуву фаз: інші позначення див. на рисунку 3.1.

Визначальним для динамічного навантаження, а значить і для коливань зубів коліс, є тимчасова зміна відносного руху Y . Тому обмежимося розглядом рішення (3.2) тільки для цього руху. Діяльність щодо функції жорсткості:

$$C(t, \bar{Y}) = C_s(Y) + \frac{1}{2} C(1-\chi) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{4}{\pi n} \operatorname{Sin} n \left[(\varepsilon_v - 2)\pi + \frac{1}{2} \varepsilon_v \bar{Y} \right] \operatorname{Cos} n \omega_c t_c, \quad (3.3)$$

де $\chi = C_{min} \cdot C_{max}^{-1}$;

$C_s(y) = \chi C + \frac{1}{2} C(1-\chi) \left[1 + (2\varepsilon_v - 3) + \frac{1}{2} \varepsilon_v \bar{Y} \right]$ – середня величина жорсткості;

$\omega_c = \omega_1 z_1 = \omega_2 z_2$ – частота зчеплення;

$\varepsilon_v = k_1 k_2 t_g^{-1}$ – коефіцієнт тривалості зчеплення обмежується умовою незаклинювання (тобто $V > 0$).

Для $V < 0$ відбувається роз'єднання зубів на стику. Інтенсивність ударних імпульсів, що виникають у місцях ушкоджень і дефектів, залежить від зміни C_{max} на C_{min} і навпаки (рис. 3.2). Склавши односторонні зв'язки в ортогональному напрямку на траєкторію зачеплення (у напрямку осі Z) і ви-

бравши з рівняння руху моделі систему трьох нелінійних рівнянь (одночасних та неоднорідних) із змінними у часі узагальненими коефіцієнтами типу Хілла, ввели до неї безрозмірну змінну τ^* , тобто $P\tau^* = \omega_c t$ з періодом, що дорівнює ступеню P – періоду частоти ω_c^6 . Далі виконали розрахунки, ввівши співвідношення $q = \omega_c \Omega_0^{-1} \approx 1$, співвідношення частоти збудження і найближчої сусідньої частоти резонансу $q_1 = \Omega \Omega_0^{-1}$, $q_{1,2S} = \Omega_{1,2S} \Omega^1$, $q_{1,2Y} = \Omega_{1,2Y} \Omega^1$ як відношення особистих частот до резонансних частот.

З погляду фізики частота $\Omega = \sqrt{Bm_{np}^{-1}}$ виражає середню особисту частоту, коли $B = C_s - AJ_{np}$, в той час, як $\Omega_{1,2S} = \sqrt{C_s m_{1,2}^{-1}}$ та $\Omega_{1,2Y} = \sqrt{C_{12Y} m_{1,2}^{-1}}$ характеризують середню власну частоту поступального руху системи, що має пошкодження і дефекти або пошкодження.

Замість коефіцієнтів стиснення K введемо відносний тиск:

$$D = \frac{K}{2m_{np}\Omega}; \quad D_{1,2} = \frac{K_{1,2S}}{2m_{1,2}\Omega_{1,2S}}; \quad D_{1,2Y} = \frac{K_{1,2Y}}{2m_{1,2}\Omega_{1,2Y}} \quad \text{та кінцеві коефіцієнти } Y_n, U_n,$$

$n, V_{1,2n}$ замінимо тригонометричними функціями форми:

$$Y_n = \frac{P^2}{\Omega_{0np}^2} \left[\frac{C(1-\chi)}{2} a_n - \frac{A}{\epsilon_0} J_{np} d_n \right], \quad U_n = \frac{P^2 A R_{\epsilon_2}^2}{\Omega_0^2 \epsilon_0} e_n,$$

$$J_n = \frac{R_{\epsilon_2} C (1-\chi) P^2}{4\Omega^2} \left(\frac{i}{J_{01}} Z_1 - \frac{Z_2}{J_{0z}} \right) n a_n, \quad V_{1,2n} = \frac{C(1-\chi) P^2}{2\Omega_0^2 m_{1,2}} a_n.$$

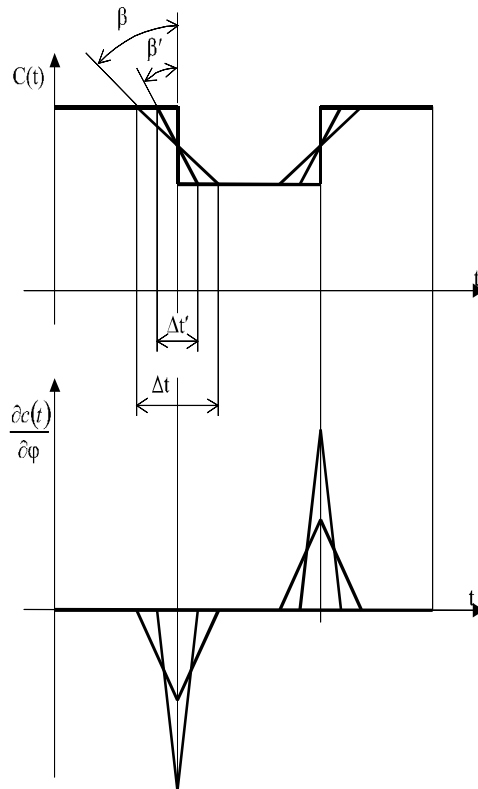


Рисунок 3.2 – Інтенсивність ударних імпульсів

На основі всіх розрахунків і підстановок в рівняння руху зубців, що зачіплюються, з пошкодженнями і введення ще менших варіацій частоти $q = 1 + \alpha$ в околі ω , тобто $\omega_c = (1 + \alpha)\Omega_0$ (α – виключно мале відхилення під час руху) отримали систему виду:

$$\begin{aligned}
 & Y'' + P^2 q_1^2 Y = -\alpha(2 + \alpha)Y'' + (1 + \alpha)^2 (Y_1'' - Y_2'') - (1 + \alpha)2Pq_1 DY' - \\
 & - \sum_{n=1}^{\infty} (Y_n \cos Pn\tau^* - U_n \sin Pn\tau^*) Y + Y^2 \sum_{n=1}^{\infty} J_n \sin Pn\tau^* + G(\tau^*) \equiv \quad (3.4) \\
 & \equiv \Phi(Y''(\tau^*), Y_{1,2}''(\tau^*), Y'(\tau^*), Y(\tau^*), Y^2(\tau^*), \tau^*) \quad ; \\
 & Y_{1,2}'' + P^2 q_{1,2Y} Y_{1,2} = -\alpha(2 + \alpha)Y_{1,2}'' - (1 + \alpha)2Pq_{1,2Y} D_{1,2Y} Y_{1,2}'(\bar{\tau}) \\
 & (\bar{\tau})(1 + \alpha)2Pq_{1,2S} D_{1,2S} Y'(\bar{\tau}), \quad (\bar{\tau}) \left(P^2 q_{1,2S}^2 + \sum_{n=1}^{\infty} V_{1,2n} \cos Pn\tau^* \right) Y \equiv \\
 & \equiv \Phi_{1,2}(Y_{1,2}''(\tau^*), Y_{1,2}'(\tau^*), Y(\tau^*), \tau^*)
 \end{aligned}$$

(верхнє відноситься до індексу 1, нижнє – до індексу 2).

За рівнянням (3.4) розраховуємо функцію $G(\tau^*)$, джерело збудження коливань системи, що породжуються локальними змінами стану і дефектами зубів

$$\begin{aligned}
 G(\tau^*) &= \sum_{j=0}^{\infty} (\bar{a}_j \cos j\tau^* + \bar{b}_j \sin j\tau^*) = \left(\frac{P}{\Omega_0} \right)^2 \frac{F(\tau)}{m_{np}} + q^2 f''(\tau^*) - \\
 & - q^2 e_1 \frac{P^2}{Z_1^2} \sin \frac{P}{Z_1} \tau^2 - q^2 e_2 \frac{P^2}{Z_1^2} \sin \left(\frac{P}{Z_2} \tau - \Delta \right). \quad (3.5)
 \end{aligned}$$

Колівання системи, що породжуються дефектами зубів, враховуються першим і другим членами функції (3.5). Вплив ексцентриситету та кута зсуву фаз Δ обчислюються у третьому та четвертому членах.

Аналіз особливостей системи (3.4) показав, що її параметричні члени коливаються залежно від частоти зачеплення ω_c . Навпаки, частоти членів функції $G(\tau^*)$ породжуються дефектами та пошкодженнями зубів, відрізняються від частоти зачеплення і можуть набувати значень ω_c^{P-1} , де $P > 1$, $P < 1$.

Отже, діагностичними індикаторами прихованих пошкоджень і дефектів зубів коліс є залежності енергії вібрації встановленого частотного діапазону, зміна якої дозволяє однозначно зробити висновки про їх місце, характер і причину. Останнє дуже важливо, оскільки дозволяє управляти працездатністю зубчастої передачі на ранній стадії розвитку пошкоджень. Ефективним для цих цілей є використання діагностичних портретів [17, 28]. Наприклад, діагностичним портретом рульового управління з гідропідсилувачем є функціональна залежність $P_n = f(\varphi)$, $P_{pk} = f(\varphi)$, де P_n – тиск

у напірній магістралі гідропідсилювача, P_{pk} та φ – сила та кут повороту рульового колеса. Така характеристика об'єктивно відображає не тільки стан елементів кермового механізму і привода, але і зниження працездатності як окремих сполучень або вузлів (початок заклинювання кульового зчленування за надмірного затягнення) і кермового управління загалом. Найбільш характерні зміни стану і працездатності однозначно відображаються класифікаційною групою діагностичних портретів рульового управління [28]. Автоматизований запис і комп'ютерний аналіз портретів значно полегшують прийняття рішень під час вибору керівних впливів для відновлення працездатності рульових управлінь.

3.2.1 Залежність втрати працездатності від зміни технічного стану машин у процесі експлуатації

Будь-яка машина являє собою складну систему, сукупність діючих елементів – складальних одиниць і деталей, що забезпечують виконання її функції. Щодо автомобіля – елементами є агрегати, вузли та механізми, а щодо останніх – деталі. Сучасний автомобіль складається з 15–25 тис. деталей, з яких 7–9 тис. втрачають свої первісні властивості під час роботи, причому близько 3–4 тис. деталей мають термін служби менше, ніж автомобіль загалом. З них 80–100 деталей впливають на безпеку роботи, а 150–300 деталей, критичних за надійністю, частіше за інших потребують заміни, обумовлюють найпростіший автомобіль, трудові та матеріальні втрати. Дві останні групи деталей є головним об'єктом уваги технічної експлуатації задля підтримки працездатності автомобілів (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Характеристика стану та працездатності машин

Категорія технічного стану (класи)	Види пошкоджень	Значення параметра	Види технічного стану та рівня працездатності		
			Справність	Працездатність	Функціонування
1	2	3	4	5	6
Хороше (придатне) – ТО та ремонт не потрібні	Відсутнє	Номінальне	Справне – машина відповідає всім вимогам, встановленим НТД	Працездатне значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконати задані функції, відповідає вимогам	Правильне – машина виконує всі алгоритми функціонування
Задовільний (прийнятний, придатний) – призначається подальше діагностування стану або планується ТО чи ремонт (Р)	Несуттєве	Від номінального до гранично допустимого	Справне	Працездатне	Правильне

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6
Незадовільне (допустимо обмеження, обмежено придатне) – признається або проводиться ТО або Р	Істотно є причиною часткового порушення працездатності	Від гранично допустимого до гранично можливого	Несправне – машина не відповідає хоча б одній з вимог	Обмежена втрата; значення хоча б одного параметра не відповідає вимогам	Обмежене
Неприпустиме, аварійне (непридатне, неприпустиме) потрібні негайне зупинення і ТО або ремонт	Відмова повна втрата роботоздатності машини	Від гранично можливого до аварійного	Несправне	Непрацездатне значення параметрів не відповідає вимогам	Неправильне – машина не виконує хоча б один з алгоритмів функціонування

У разі зношування 0,5 кг на тонну сухої маси автомобіля настає повна втрата працездатності. В інших випадках автомобіль може виконувати свої основні функції (тобто рухатися з корисною швидкістю і навантаженням), вважаючись працездатним (хоча і не відповідає всім вимогам технічної документації).

Види технічного стану АТЗ класифікуються, виходячи з можливості здійснення заданих функцій або необхідності проведення контрольно-діагностичних робіт, технічного обслуговування та ремонту. У таблиці 3.1 наведено класифікацію станів та відповідні їм рівні працездатності. Зв'язок несправностей і пошкоджень, що знижують працездатність машини, із законами розподілу параметрів надійності подано в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Моделі розвитку несправності та пошкодження

Види та характер розвитку несправності та пошкодження	Закон розподілу	Щільність розподілу
Раптова відмова агрегату (у разі неконтрольованого розвитку несправності та пошкодження); відмова підсистеми машини з великою кількістю елементів (електроніка, гальмівна система)	Експонентний	$\lambda e^{-\lambda t}$
Втомні пошкодження валів, шестерень, підшипників кочення	Вейбулла	$a b \tau^{b-1} e^{-a \tau^b}$
Поступовий розвиток несправності або пошкодження через зношування, корозію та втому	Усічений нормальний	$\frac{1}{\Phi\left(\frac{a}{b}\right)\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-a)^2}{2a^2}}$
Втомне ушкодження	Логарифмічний нормальний	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\ln(\tau-a^2)}{2a^2}}$

Примітка: λ , a , b , σ - параметри розподілу; τ - заданий інтервал напрацювання.

3.2.2 Швидка і повільна зміна стану агрегату

З огляду на труднощі отримання досить повної інформації про ранню стадію розвитку пошкоджень основних деталей агрегатів проблему управління працездатністю в більшості випадків можна розглядати як стохастичну, тобто формулювати цілі управління станами, розглянутими вище, у термінах ймовірності. Досить повними характеристиками якості процесу управління працездатністю потрібно вважати:

- ймовірність P досягнення цілей, які поставлені технічним персоналом стосовно окремого агрегату (наприклад, двигуна), автомобіля або парку АТЗ;

- середні витрати C пов'язані з управлінням працездатністю.

Залежно від виду несправності або ушкодження, що розвивається, мети управління працездатністю можуть бути сформульовані на основі цих характеристик як умовні функціонали: $\max P$ за $C < C^*$ або $\min C$ за $P < P^*$ (індекс * відноситься до прийнятних значень відповідних величин).

Максимізація або мінімізація P і C проводиться на множинах допустимих тактик профілактики та усунення несправностей. Істотною є оцінка чутливості зазначених функціоналів до варіацій тактик профілактик ремонтів. Практичне застосування функціоналів у конкретних завданнях технічної служби потребує попередньої класифікації зміни станів. Така класифікація може бути виконана по-різному, проте у разі використання методів теорії управління та оптимізаційних процедур надається доцільною класифікація, основана на ознаці швидкості зношування та розвитку пошкоджень. Наприклад, швидкість зростання сумарних зазорів у головній передачі автомобіля на етапі зносу становить $0,32^\circ$ на 1000 км пробігу. У разі порушення регулювань зачеплення зубами шестерень і підшипників ця величина зростає в 2 – 2,5 рази і може досягати $0,8^\circ$. У випадку катастрофічного зносу (початок руйнування цементованого шару робочої поверхні зубів або бігової доріжки підшипників) швидкість зносу може зрости на два порядки. Тому є доцільним розділити стани на два класи: швидко розвиваються і повільно розвиваються. Середні швидкості зношування вузлів дизелів (мм/1000 год) подано в таблиці 3.3.

Їх необхідно знати для вибору методів та періодичності діагностування стану машин. Однак під час вибору тактик управління працездатністю агрегату важливе значення має знання закону розподілу швидкостей. Так, наприклад, швидкості зношування гільзи циліндра та поршневого кілець (зазор у стику) для дизельних двигунів (наприклад, моделей — L-МС/МСЕ фірми «MAN») становлять відповідно: середні $0,04 - 0,05$ та $0,18 - 0,32$; максимальні $0,3 - 0,4$ і $0,6 - 1,8$ мм/1000 год. Їм відповідають швидкості зміни діагностичних параметрів, що характеризують розвиток несправностей і пошкоджень: вібрації активної зони блока циліндрів – $0,005$ (мм/с)/год (справний працездатний стан). Отже, для цілей управління в діагностичні тести мають бути введені швидкості зміни стану та відповідні їм значення

швидкостей зміни діагностичних параметрів (за формою табл. 3.3). Наведений фрагмент діагностичного тесту ілюструє особливість методичного підходу. Розподіл швидкості зростання зазорів у головній передачі автомобіля наведено на рисунку 3.3.

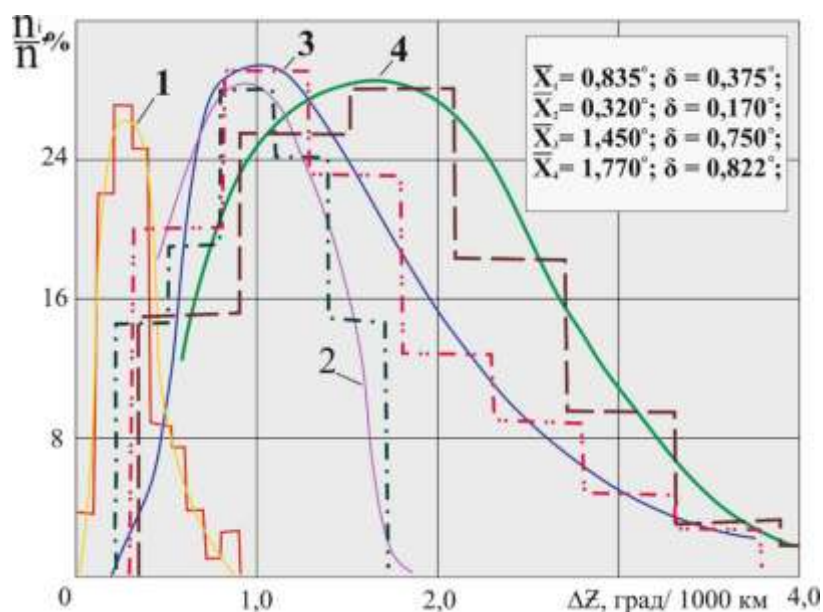


Рисунок 3.3 – Розподіл швидкості зростання зазорів у головній передачі автомобіля ГАЗ-53 за різних станів: 1 – етап нормального експлуатаційного зносу; 2 – етап підробітку; 3 – порушення регулювань та режимів мастила; 4 – етап катастрофічного зносу

Таблиця 3.3 – Швидкості зношування вузлів дизелів за різних станів (мм/1000 год) та діагностичних параметрів (мм/с)/год

Вузол (деталь) двигуна	Зміна стану		Середня швидкість зміни діагностичного параметра
	Повільне	Швидке	
Гільза циліндра	0,01 – 0,1	0,5 – 1,0	0,001/0,025
Поршневі кільця: канавки першого	0,002 – 0,01	0,03 – 1,0	0,002/0,01
перше хромоване наступні	0,15 – 0,30 0,03 – 0,05	0,3 – 0,9	0,001/0,015 0,001/0,02
Напрявні клапанів: всмоктувального випускного	0,03 – 0,05 0,05 – 0,06	0,06 – 0,1 0,08 – 0,1	0,003/0,02
Вкладиші підшипників: шатунних корінних	0,005 – 0,02 0,005 – 0,02	0,01 – 0,05 0,01 – 0,05	0,008/0,015
Шийка колінчастого вала	0,002 – 0,008	0,02 – 0,04	0,009/0,020

Примітка. У чисельнику – за повільної зміни стану; у знаменнику – за швидкої.

4 МЕТОДОЛОГІЯ РОЗРОБКИ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСУ ЗНИЖЕННЯ І ВТРАТИ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ

Проблема прискореного зниження працездатності двигунів в екстремальних умовах і умовах агресивного середовища привертає останнім часом все більшу увагу дослідників. У таких умовах працює більшість унікальних нафтовидобувних комплексів та енергонасичених автотягачів. Ускладнення конструкції останніх, підвищення вимог промислової безпеки їх роботи різко підвищили «ціну» відмов силових установок. Проблема зниження ризику раптової втрати працездатності дорогих двигунів через катастрофічний знос і пошкодження основних деталей агрегатів набула особливого науково-практичного інтересу.

З цієї причини «відмовні моделі», що не відображають зародження і особливо динамічні стрибки деградаційних процесів, практично виявилися непридатними для формалізованого моніторингу – прогнози катастрофи гомеостазу технічних систем та об'єктів. Під час опису процесів зношування зазвичай вважають, що швидкість зношування, якщо навіть змінюється, то незначно і залежить, переважно, від зазорів і режиму мастила. Із збільшенням зазорів зростають ударні навантаження, зменшується площа робочого контакту сполучених поверхонь пошкоджених елементів деталей (наприклад, фарбування цементаційного шару шийки) й інтенсивність зносу зростає. Результат – настає етап катастрофічного зносу і руйнування елементів деталей: внаслідок цього спочатку поступово, а потім різко відбувається втрата працездатності агрегату загалом.

Донині вже накопичено деякий арсенал математичних моделей, що описують хід зношування різних автомобільних агрегатів [23, 25, 29–32]. Однак основані на цих моделях прогнози залишкового ресурсу не завжди досить добре узгоджуються з дійсністю, оскільки дають, особливо для екстремальних умов, неточні результати, дуже далекі від практично підтверджуваних. Одну з причин розкрили багаторічні дослідження [26, 33–34]. Такі моделі враховували те, що в реальних умовах має місце одночасне існування різних типів деградації агрегатів, вузлів та механізмів автомобіля (рис. 4.1).

Для того, щоб адекватно протистояти втраті працездатності, необхідно знати весь спектр закономірностей змін структури агрегату (тобто деградації) з часу всього напрацювання (від початкового пробігу). Як правило, ці закономірності не збігаються з зображеними на рис. 4.1, оскільки, наприклад, локальний знос контактувальних виступів (мікронерівностей) поверхонь викликає спочатку спад значення швидкості зношування (етап приробітку), потім ця швидкість практично може залишатися незмінною на досить великому інтервалі часу (пробігу) – за стабільних умов експлуатації (тобто щадних) і постійних навантажувально-швидкісних режимів. І, навпаки, може не тільки на третьому етапі (період катастрофічного зносу), як прийнято вважати, але в будь-який момент за зміни, наприклад, агресив-

вності середовища (пилова буря) або різкого зростання навантаження швидкість деградації починає зростати (у критичних біфуркаційних точках траєкторії зносу) по експоненті до моменту аварійної відмови, що миттєво настає, тобто, до повного руйнування деталі, вузла чи механізму [35].

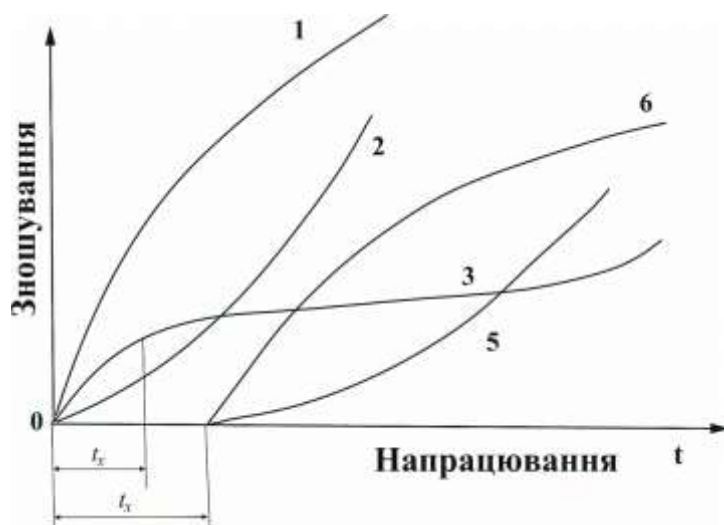


Рисунок 4.1 – Схема характерних процесів зношування вузлів механізмів залежно від часу напрацювання

Крім зазначеної обставини, суттєвим виявилось те, що відомі моделі не брали до уваги захисних властивостей механізмів робочого середовища (мастила), що мають їх завдяки не тільки спеціальним присадкам (зокрема і сподіваним), а й самоорганізації тертя у поєднанні деталей, що забезпечує безвихідність останніх [36]. Такі захисні механізми дозволяють агрегату в екстремальних умовах (наприклад, збільшений навантажувальний режим і нестабільне агресивне середовище) зберігати працездатність (іншими словами, підтримувати гомеостаз технічної системи), тобто, протягом тривалого часу зберігати свою початкову структуру, незважаючи на зростаюче зовнішнє навантаження (і середовища, і режиму експлуатації).

Цей, як підтверджують численні дослідження, брак традиційних моделей позбавляв дослідників можливості проникнути в суть явищ і відношень між підсистемами складного агрегату та середовищем, які можуть бути конкурентними, партнерськими та конфліктними.

За сучасними уявленнями основним і головним захисним механізмом працездатного стану агрегату слугує здатність ряду видів присадкових компонентів мастила саморегулювати рівень конфігураційної ентропії в сервовітній плівці – кількість дислокацій атомів легувальних елементів та інших недосконалостей будови металу деталей [35].

Внаслідок підвищення концентрацій вакансій при вибіркового розчиненні біля поверхні плівки створюється локальна неоднорідність, яка послаблюється шляхом дифузії, що визначає кінетику і механізм перетворення в плівці. Вихід дислокацій, що дифузують у зоні насичення вакансіями,

може здійснюватися незагальмовано. Вільна поверхня над дифузійною зоною є стоком не тільки дислокації, але і надлишкових атомів, що виникають у дифузійній зоні. Це робить всю систему термодинамічно відкритою на відміну від закритої системи граничного тертя.

Для здійснення самоорганізації кібернетичної системи потрібні певні умови [36–37]. Самоорганізація може проявлятися, наприклад, у систем, що мають надмірність структурних елементів і випадковий характер зв'язку між ними, змінюються внаслідок взаємодії системи із зовнішнім середовищем. Що стосується вибіркового – перенесення роль таких структурних елементів відіграють вакансії у захисній плівці, що утворюються в процесі тертя, вибіркового розчинення і осадження атомів металу, нерівноважна концентрація яких зумовлює прискорення дифузії, необхідне для реалізації низького опору зсуву та розрядки дислокацій. Щоб створити уявлення про поведінку в часі нерівноважної системи, відкритої для потоків речовини і енергії, необхідно відзначити таке: у рівноважному стані будь-який потік, спрямований в один бік, компенсується таким самим за величиною потоком у зворотному напрямку. Іншими словами: всякий акт народження врівноважується актом знищення, кожна подія нейтралізується протилежною подією – результат: система залишається в стані, інваріантному щодо поводження часу. Така симетрія відразу порушується, якщо під дією зовнішніх потоків система зміщується в стан, досить далекий від рівноважного, і цей новий стан буде, мабуть, більш упорядкованим, ніж рівноважний.

Відповідно викладеному кооперативні явища в системі вибіркового переносу полягають у тому, що назустріч висхідному потоку дислокацій у сервовітній плівці спрямовується потік нерівноважних вакансій, що сприяють частково виведенню дислокацій на поверхню, а частково – їх анігіляції. Через нестійкість хімпотенціалу системи потік дислокацій має коливальний характер. Накопичуючись дислокації змінюють хімічний потенціал системи, посилюючи вибіркоче розчинення – джерело вакансій. Одночасно розчинення зростає і з підвищенням температури під час тертя по впорядкованій плівці, що і в першому, і в другому випадках веде до зміцнення, а потім знову до накопичення дислокацій. Таким чином, упорядкованість системи є результатом зовнішнього впливу.

Якщо граничні умови залежать від часу, тобто підтримується постійний перепад тисків або інших змінних, то змінні стани асимптотично прагнуть до незалежних від часу величин, і тоді досягається стаціонарний стан. Відповідно, у стаціонарному нерівноважному стані виробництво ентропії мінімальне. Виробництво ентропії в нерівноважних системах з двома узагальненими силами X_1 та X_2 виражається співвідношенням

$$\sigma = I_1 X_1 + I_2 X_2.$$

У нерівноважному стаціонарному стані за фіксованої термодинамічної сили X_I (у нашому випадку градієнт щільності дислокацій), потік I_2 , пов'язаний з градієнтом щільності вакансій, обертається в нуль. Таким чином, з виробництва ентропії зникає другий член, а перший член змінюється так, що досягає мінімуму. Ця теорема відбиває внутрішню стійкість нерівноважних систем.

Математично умова стійкості стаціонарного стану з мінімальним виробництвом ентропії записується у вигляді нерівності $d\sigma/dt \leq 0$. Нерівність означає, що внутрішні нерівноважні процеси завжди діють у напрямі, який зменшує виробництво ентропії. Система, що перебуває у стані з мінімальним виробництвом ентропії, не може мимоволі з нього вийти.

Оскільки умова $d\sigma/dt < 0$ показує, що у напрямі розвивається фізична система у процесі еволюції, то вона називається критерієм еволюції. Мається на увазі спрямований розвиток фізичних систем у стійкий стаціонарний стан як збереження стійкості своєї організації – гомеостазис, що виражається в процесі зворотного зв'язку (з поняття кібернетичної системи [37]).

У вибіркового перенесенні зворотний зв'язок виникає у двох його процесах. Так, наприклад, у міру утворення сервовітної плівки тертя різко знижується і призводить до припинення вибіркового розчинення сплаву, тобто відбувається саморегулювання, оскільки утворення плівки веде до зменшення енергії взаємодії, а останнє уповільнює процес утворення плівки. Управління кібернетичною системою полягає в обміні інформацією по каналах прямого та зворотного зв'язку. У режимі тертя керованим об'єктом є саме тертя, його флуктуації, викликані зовнішніми та іншими причинами, інформацією – опір відносному ковзанню і пов'язана з ним зміна температури. Підвищення температури посилює хемосорбцію і хімічну реакцію розчинення, що знижує тертя в той час, як за граничного мастила з підвищенням температури відбувається десорбція, і тертя зростає. Особливістю вибіркового перенесення є те, що тертя здійснюється всередині сервовітної плівки і як зовнішнє тертя плівки. У зв'язку з процесом хемосорбції, реакції на поверхні набувають характеру зворотного зв'язку.

Підвищення температури зі зростанням швидкості в режимі виборного переносу викликає зменшення тертя в той час, як в режимі граничного мастила – збільшення. Характерною рисою режиму вибіркового перенесення є також нижчі температури тертя.

Розглянемо характер зміни сили тертя у разі раптового додатку навантаження для режиму вибіркового перенесення і режиму граничного мастила. Після зняття додаткового навантаження як вибіркового перенесення тертя різко спадає нижче початкового рівня, поступово наближаючись до нього від менших значень. Реакцію системи на флуктуацію можна розглядати як прояв відомого в хімії принципу, який полягає в тому, що в систе-

мі, яка знаходиться в хімічній рівновазі, у випадку зміни одного з факторів, що керують цією рівновагою, виникають процеси, що прагнуть послабити вплив цієї зміни. Оскільки за граничного мастила хімічної реакції немає, то відповідно і флуктуація відбувається як процес, що посилює відхилення від рівноваги [38 – 41].

Величина тертя, яка за відхилення виявляється нижчою, ніж за режиму, що встановився, свідчить про збільшення впорядкованості на контакті і, отже, про зменшення ентропії під час підвищення температури. Це може бути як ефект виробництва негативної ентропії.

У такому плані потрібно розглядати інверсію залежності зносу від навантаження. Тут також відповідно до принципу Ле Шательє-Брауна збудувальна дія – зростання тиску – приводить до впорядкування та зменшення зносу. Повертаючись до питання самокерованої кібернетичної організації вибіркового перенесення, можна подати такі схеми функціонального зворотного зв'язку (рис. 4.2).

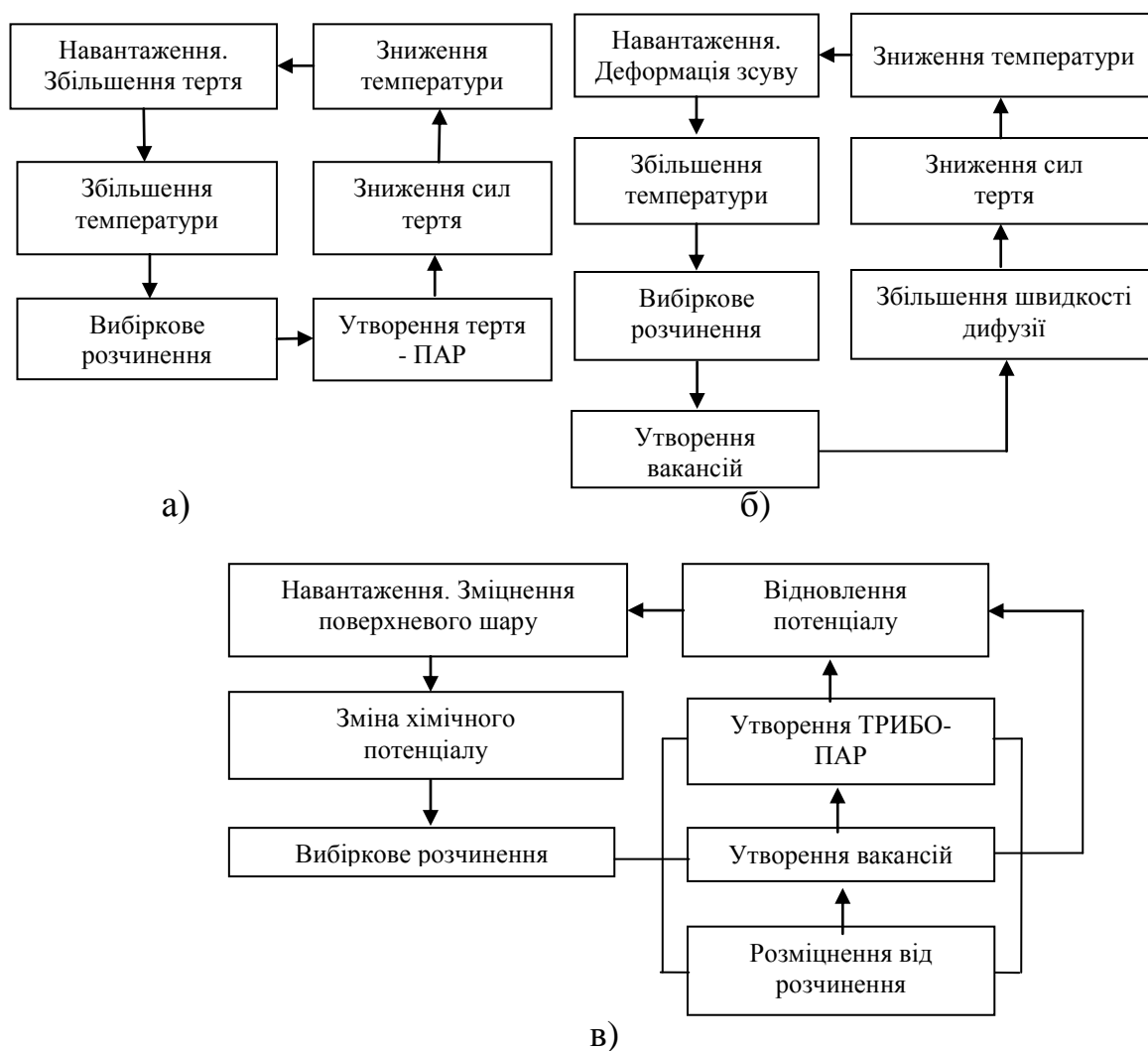


Рисунок 4.2 – Функціональні схеми зворотного зв'язку зі збільшенням тертя та зміною потенціалу поверхневого шару системи

На схемах зображено: збільшення утворення трибо-ПАВ на поверхні тертя, що знижує тертя (рис. 4.2, а); утворення вакансій, що знижують зусилля деформації сервовітної плівки (рис. 4.2, б); відновлення потенціалу на поверхні металу плівки (рис. 4.2, в). Згідно з цими схемами, на поверхні сервовітної плівки підтримуються постійними температура, напружений стан металу та електрохімічний потенціал. Це не суперечить тій обставині, що температура, концентрація вакансій і хімічний потенціал внаслідок нерівноважного процесу має градієнт по товщині плівки.

Вищевикладене переконливо підтверджує, що головний захисний механізм – це здатність сервовітної плівки періодично зношуватися і наростати, компенсуючи знос (рис. 4.3).

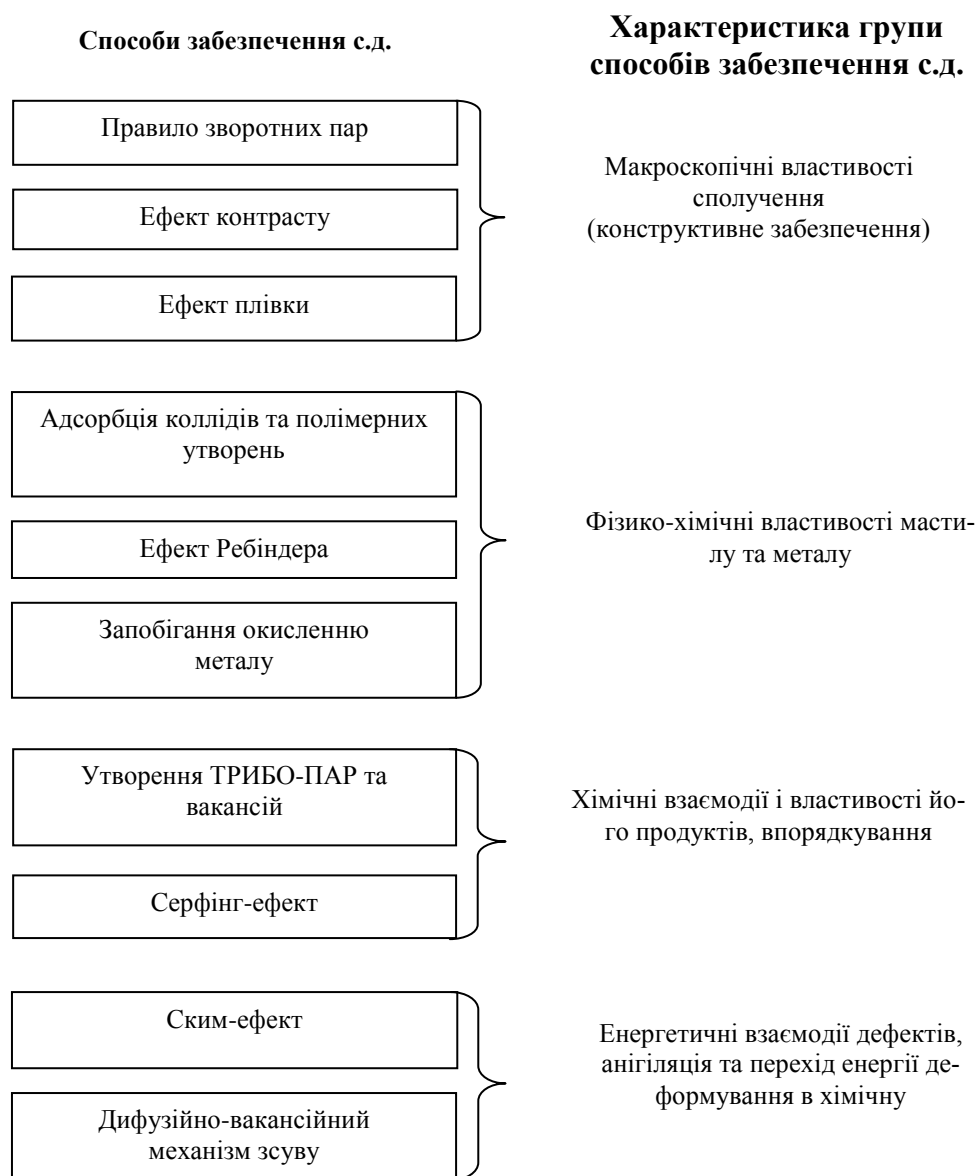


Рисунок 4.3 – Характеристика структури мастильної дії в режимі вибіркового перенесення

Особливість розвитку катастрофічного пошкодження поверхонь, що труться, контактувальних елементів пар деталей у тому, що перехід до передвідмовного стану за різкого зростання агресивності середовища відбувається різко, стрибком.

Існуючі ж моделі, про які згадувалося вище, імітують тривалий процес зношування, типовий для стабільного середовища та навантажувально-швидкісних режимів.

Пропонована модель характеризує хід процесу в агрегатах, де істотна роль наявних в маслі присадок, що організують захисні механізми, тобто підвищують стійкість працездатних станів. Сучасні масла (типу Shell та ін.) акумулюють в собі в 4–5 разів більше присадок, ніж необхідно для нормального тривалого зносу. Однак накопичення має межу, за якої настає насичення робочого середовища присадками. Надалі присадки витрачаються, і ефект захисного механізму знижується та зумовлює потребу в додаванні присадок в масло (або в спеціальних оливах «присадки, що чекають» включаються в роботу), оскільки експлуатація агрегату і виконання ним корисної роботи супроводжується освоєнням присадок (їх поглинанням) конкуруючими продуктами зносу у разі зростання концентрації останніх в маслі.

Можуть також включитися в дію (або постійно діяти) спеціально створені підсистеми активізації захисних механізмів працездатних станів. Нижче ми повернемося до розгляду однієї з них. Подальше надходження в масло продуктів зношення супроводжується освоєнням конкуруючими групами присадок. Під дією агресивного середовища можуть створитися умови для розвитку зношування і переходу процесу в катастрофічний етап. У цьому випадку перехід відбувається відносно швидко, подібно до катастрофи, і має спочатку характер якісного перетворення. Новий, передвідмовний стан як система також має в своєму розпорядженні зброю проти конкурентів – присадок – збільшеною (вищою) концентрацією продуктів зносу. Засобом придушення її у рази може бути тимчасове зменшення навантаження (в розумних межах), необхідне відновлення присадками працездатності середовища змащування.

Схему взаємодій у системі (об'єкті управління), що складається з присадної та зносної підсистем, показано на рис. 4.4. Ця структура добре відома в екології як конкурентний зворотний зв'язок. У тих випадках, коли взаємне придушення підсистем більше, ніж самопригнічення кожної з них (внаслідок внутрішньої міжвидової конкуренції – вибіркового перенесення або введення олово місткої присадки в еталонні оливи), вся система поводиться за типом як перемикач або тригер. Це означає, що для неї стійкі два крайні стани: з максимальним розвитком однієї чи іншої з конкуруючих частин і одночасним «придушенням» протилежної.

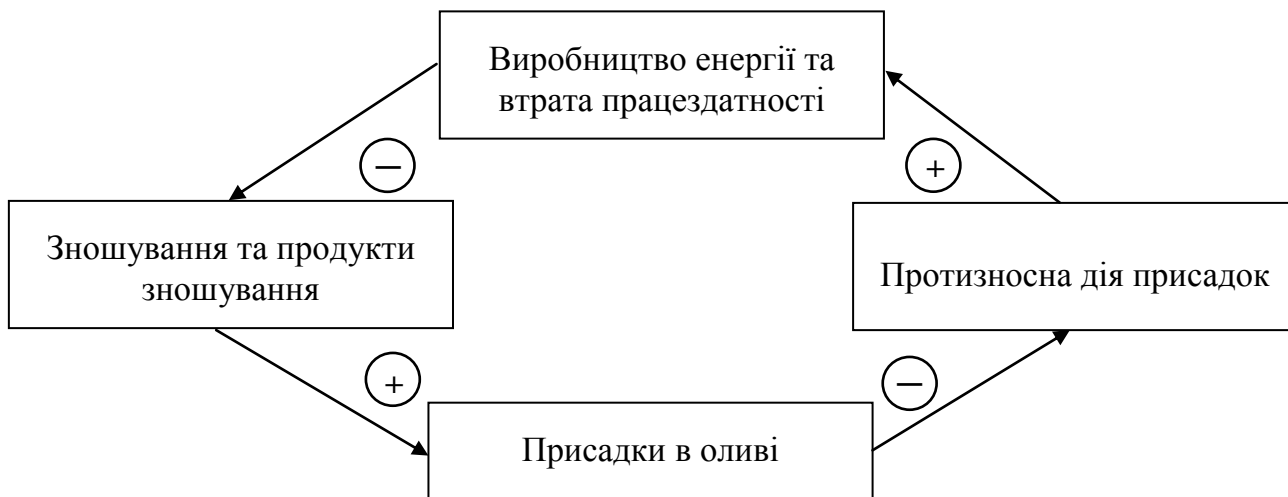


Рисунок 4.4 – Схема конкурентних взаємодій між підсистемами зношування та присадок з протизносними та компенсаційними властивостями (знаки «+» і «-» позначають збільшення або зменшення відповідної змінної величини під впливом факторів)

Перемикання з одного альтернативного стану в інший може відбутися лише під впливом зовнішніх сил (впливу середовища або робочого навантаження). Для початку переходу до ранньої стадії попереджувального стану таким впливом, що переводить агрегат з інтенсивного режиму зношування в нормальний (яке встановився) виявляється надмірний приплив присадок в масло і його тонка фільтрація від продуктів зносу. Чим більше у сполучених деталей площі поверхонь, що труться, перейшли в ранню стадію інтенсивного зносу, тим більший потрібен потік присадок в масло для того, щоб відбулося перемикання (зі стану в стан). Очевидно, зовнішнє зусилля (у вигляді включення присадок підсистеми, присадкових добавок в масло та ін.) необхідно для того, щоб несправний двигун повернути в працездатний стан. Опір переходу системи зовнішньому впливу на неї полягає в тому, щоб для переходу в справний стан ми маємо якимось способом скоротити концентрацію зносу і, активізуючи вибіркоче перенесення добавкою присадок, за якого інтенсивність зносу різко знизиться. Тому траєкторії прямого та зворотного перемикання не збігаються (схематично це гістерезисне явище зображено на рис. 4.5).

Схема дещо спрощує справжню картину. Перехід від інтенсивного до нормального зношування відбувається в агрегаті, що втрачає працездатність, не одним стрибком, а двома. Існує проміжний стан, що також має певну стійкість стану, коли знижується навантаження на агрегат. Це ще дещо відтягує настання етапу інтенсивного зносу, хоча і слугує точною ознакою його наближення. Якщо такий стан зберігається тривалий час, значна частина продуктів зношування може бути відфільтрована.

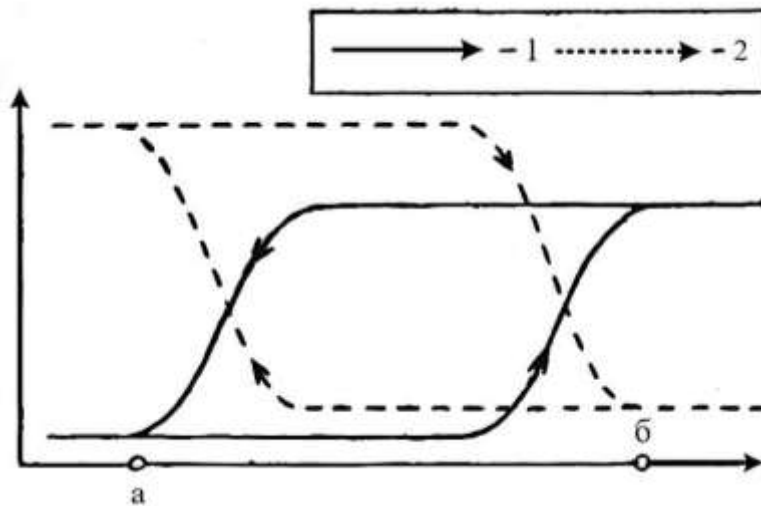
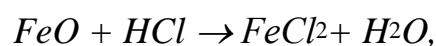
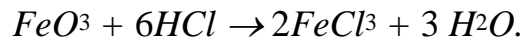


Рисунок 4.5 – Зміна продуктів зносу (1) і кількості присадок (2) в маслі під час переходу від працездатного стану (а) змашувального середовища до непрацездатного (б) і назад

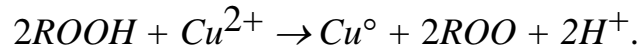
Розглянемо побудову моделі втрати працездатності двигуном, у якому математичний опис відбиває основну схему взаємодії у системі, опускаючи менш істотні деталі. Зокрема модель не відображає стадії формування інкубаційного періоду деградації. Введення її, проте, не внесе у схему чогось принципово нового. Візьмемо масу продуктів зносу M_{nz} як основну змінну, що характеризує стан двигуна за зниження працездатності агрегату. M_{nz} залежить від напрацювання індивідуальних характеристик двигуна і, насамперед, від надходження їх в масло (тобто, інтенсивність зношування та розвитку процесу деградації) – M_1 : від ступеня очищення масла фільтрами (їх кількість, що залишається у фільтрах, позначимо M_2), а також їх чаду разом з оливою – M_3 . Тоді $M_{nz} = M_1 + M_2 + M_3$. Будемо вважати M_{nz} повільною змінною, тому що етап нормального зносу (коли швидкість зношування можна вважати постійною) загалом від напрацювання двигуна до капітального ремонту займає близько 80% (приробітки – 2–3%; решта – етап катастрофічного зносу в стабільних умовах та параметрах навколишнього середовища й постійних навантажувально-швидкісних режимах роботи двигуна).

З двох основних видів протизносних присадок $CaOH$ та йоду лімітує (стримує) розвиток зносу сполучених деталей лише один (згідно з принципом Лібіха). Відповідно до встановлених співвідношень, якщо в маслі відношення концентрації загального луку до концентрації інших присадок 10 : 1 або вище, то лімітувальним елементом є останні (наприклад, метало-плакуючі). Найпростішим, отже і загальним, є перший випадок, який ми й розглянемо. Далі скрізь під протизносними присадками з'являються сполуки, наприклад, хлоридів заліза $FeCl_2$ (захисні шари), які спочатку можуть забезпечити нормальний режим тертя під час фрикційного контакту:





Надалі в процесі руйнування цієї захисної хімічної плівки мідь або олово, що містяться в оливі у вигляді іонів (як продукти зносу), комплексів або сольватованих частинок, в силу електрофоретичного руху переносяться на очищену ювенільну поверхню контакту. Відновлення іонів міді, наприклад, до нейтральних частинок, можливе альдегідами і оксипереносними радикалами, що легко утворюються під час окислення спиртів, що вводяться в масло, а також гідроперекисами – продуктами окислення вуглеводнів оливи:



Введення олововмісної присадки в еталонну оливу за менших значень зносу деталей двигуна скорочує тривалість повного приробітку дизеля до 25 год (більш ніж у 6 разів) [41, 42]. Запас таких присадок в маслі Π природно вважати швидкою змінною – він змінюється зі значно більшою швидкістю, ніж маса продуктів зносу M_{nz} .

Швидкість приросту маси продуктів зносу передбачається пропорційною швидкості зношування основних сполучених деталей двигуна, а їх перенесення (образно кажучи, відмирання або нігіляція) на зношену поверхню однієї з деталей – пропорційним Π^2 .

4.1 Вибір математичного апарату

Математичний опис катастрофи гомеостата працездатного стану має відбивати основну схему взаємодії конкуруючих процесів (тобто їх впливів), не враховуючи істотних явищ, які не вносять у неї чогось принципово нового. Розглянута вище фізико-хімічна суть досліджуваних явищ дозволяє вибрати як математичний апарат теорію катастроф (тобто розгалужених диференціальних рівнянь) [35, 43, 45]. Суть цієї теорії полягає в такому.

Основним завданням, найбільш завершеним, у теорії катастроф є вивчення критичних точок багатопараметричної функції $\varphi: R^n \times R^r \rightarrow R$. Іншими словами, вивчення параметричного рівняння

$$\text{grad}_x \varphi(x, \lambda) = 0, x \in R^n, \lambda \in R^r. \quad (4.1)$$

У найпростіших ситуаціях розв'язком (4.1) слугує деяка функція $x(\lambda)$. Але це швидше виняток, ніж правило. У загальних випадках розв'язки (4.1) будуть розташовані на деяких складних поверхнях у просторі $R^n \times R^r$ (і навіть на незв'язних шматках поверхонь). Причому ці поверхні можуть зовсім не бути графіками будь-яких функцій $x(\lambda)$.

На рис. 4.6 подано приклад такої поверхні для випадку двопараметричного функціоналу (так звана катастрофа складання).

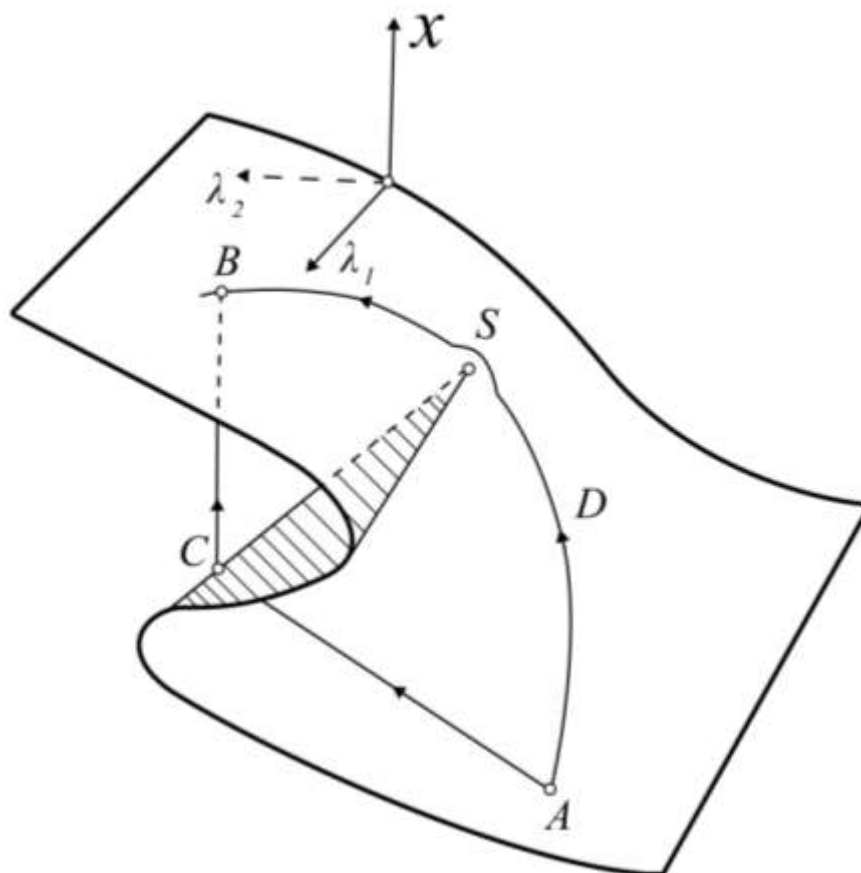


Рисунок 4.6 – Розгалуження траєкторій поведінки та станів системи в критичних точках

Чи можна цю поверхню вважати графіком деякої багатозначної функції $x(\lambda)$? Взагалі кажучи, можна, але насправді тут є щось більше. Наприклад, якщо система в початковий момент знаходиться в точці A і параметр 2 плавно збільшується, стан системи змінюється вздовж ACB , в точці C відбувається стрибок (катастрофа). Під час повернення параметра 2 у вихідне положення стан системи змінюватиметься іншим шляхом (щось на кшталт петлі гістерези). У той самий час за спеціального регулювання керівних параметрів λ^1, λ^2 можливий плавний перехід з A в B (шлях ADB на рис. 4.6). Зрештою, заштрихована частина поверхні відповідає нереалізованим (нестійким, метастабільним) станам системи.

Звичайно, сказане дещо виходить за рамки ідеології, безпосередньо закладеної в рівнянні (4.1) (звідки раптом береться нереалізованість?), але легко обґрунтовується деяким розширенням уявлень. Наприклад, система може прагнути локального мінімуму функціоналу, а заштрихована частина поверхні відповідає локальним максимумам. Стрибок же відбувається ли-

ше в точці C (а не раніше), тому що система під час плавної зміни параметрів відстежує рух того локального мінімуму, в якому вона знаходиться. У точці C цей локальний мінімум зникає, і вже тоді доводиться шукати новий. Між іншим, тут немає жодної необхідності припускати «розумність» системи. Це може бути суто фізичний або технічний об'єкт, стійкі стани якого відповідають локальним мінімумам потенційної енергії.

Зображена на рис. 4.6 поверхня має характерну особливість у районі точки S . За першим враженням різних типів особливостей може бути досить багато. Однак теорія катастроф показує, що в типових (структурно стійких) випадках за наявності лише двох параметрів можуть зустрічатися лише два типи особливостей: катастрофа складання (рис. 4.6) і катастрофа складки (легко здогадатися за змістом, як вона виглядає). У разі трьох (і більше) параметрів різних видів катастроф дещо більше, але й там дається їх повна класифікація. Звісно, це лише генеральна лінія теорії катастроф. Як і в будь-якій теорії тут є маса інших (важливих і супутніх) результатів, які ми намагатимемося використовувати для вирішення поставленого в розділі 4 завдання.

4.2 Побудова моделі катастрофи працездатності агрегату

Для розробки моделі спочатку запишемо рівняння динаміки конкуруючих процесів:

$$\frac{d\Pi}{dt} = \max\{CM^1 \cdot \Pi - \gamma\Pi^2, -\gamma\Pi^2\}, \quad (4.2)$$

де C, γ – деякі сталі.

З наведеного маємо:

$$\begin{aligned} M\omega &= M_{\text{пн}} - M_n - M_m; \\ M_2 &= C_{\text{п}}\Pi, \end{aligned}$$

де стала $C_{\text{п}}$ – це концентрація присадок у оливі;

$M_m C_{\text{max}} V(M)$ – маса оливи;

C_{max} – максимальна концентрація присадок в оливі, а безперервна функція запасу протизносних компонентів $V(M)$ описує насичення ними оливи.

$V(M)$ вибирається так, що $M_m < M$, $V(0)=0$, $V(m) \rightarrow 1$ за $M \rightarrow \infty$; для усіх $M \geq 0$ (рис. 4.7).

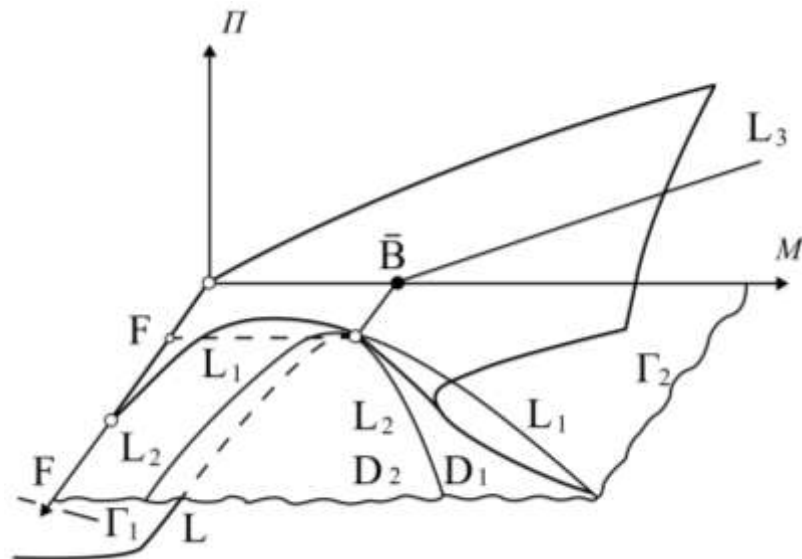


Рисунок 4.7 – Поверхня точок рівноваги $\Gamma = \Gamma_1 \Gamma_2$ працездатних станів системи

M запишемо у вигляді $M = mS^m$, де m – це щільність занурених у оливу присадок (г/м^2), а F – площа їх поширення. Остання, природно, залежить від активності присадок $F^m = S W(\Pi)$, де F – гранично можлива в цьому агрегаті площа поширення присадок. F визначається морфометрією сполучених поверхонь елементів деталей, що труться, і їх числовими характеристиками.

Функція $W(\Pi)$ описує зміну займаної протизносними присадками площі внаслідок розвитку процесу спрямованого перенесення та відповідної зміни властивостей оливи. Для цієї функції передбачається, що $W(0) = 1$, $W(\Pi) \rightarrow 0$ за умови $\Pi \rightarrow \infty$

$$\frac{d\Pi}{dt} = \max \left\{ C_{\Pi} (M_{\text{пн}} - C_f - C_m F V W(\Pi)), -\gamma \Pi^2 \right\} \quad (4.3)$$

для всіх $\Pi \geq 0$ (рис. 4.8).

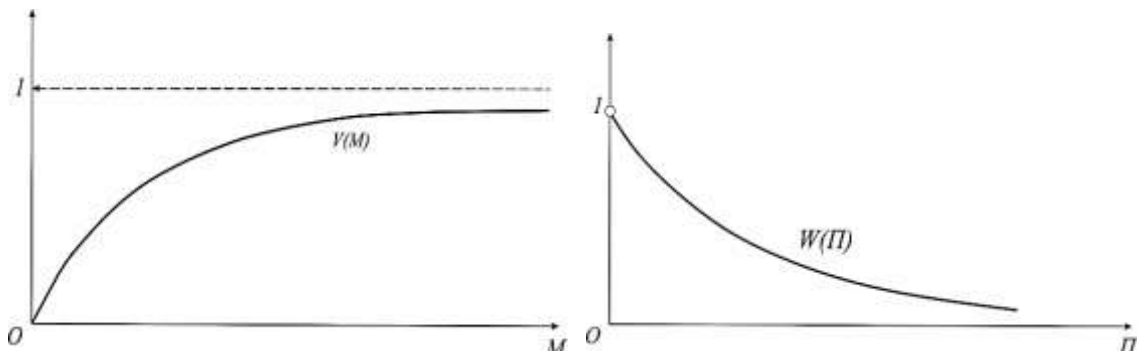


Рисунок 4.8 – Залежності $V(M)$ та $W(\Pi)$

З урахуванням виписаних співвідношень рівняння (4.2) набуває вигляду:

$$\frac{dw}{d\Pi} < 0; \quad \frac{d^2w}{d\Pi^2} > 0,$$

де $C^m = mC^{max}$, $C^f = C^p + \gamma/c$.

Це рівняння враховує як переваги протизносних присадок в конкурентній боротьбі зі зношуванням, так і «придушення» присадок продуктами зносу.

Як зазначалося, Π змінюється дуже швидко порівняно з можливою зміною M . Відносно граничної площі поширення ушкоджень F маса присадок Π – також швидко змінна. Тому можна вважати, що Π завжди знаходиться в деякому стані рівноваги $\Pi_0(M, F)$, що залежить від конкретних значень параметрів Π і F . Далі буде показано, що точки стійкої рівноваги існують за будь-яких $\Pi > 0$, $F, 0$. Стан рівноваги $\Pi_0(M, F)$ є розв'язком рівняння $\frac{d\Pi}{dt} = 0$, в тривимірному просторі з осями M , F і Π це рівняння задає поверхню точок рівноваги Γ (див. рис. 4.7). Нехай тепер M та F повільно змінюються. У цьому випадку точка Π_0 , характеризує стан двигуна, переміщається поверхнею Γ . Технічний смисл – це частина цієї поверхні, де розташовано області $M \geq 0$, $F \geq 0$, $\Pi \geq 0$.

З визначального Γ рівняння

$$\Phi(M, F, \Pi) = c\Pi(M - cf\Pi - c_m FVW) = 0 \quad (4.4)$$

видно, що Γ складається з двох компонент: $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$, де Γ_1 – поверхня, що задається у просторі (M, F, Π) співвідношенням:

$$\Phi(M, F, \Pi) = M - cf\Pi - c_m FVW = 0, \quad (4.5)$$

а Γ_2 – це площина $\Pi=0$ (будь-які M та F). Рівняння лінії перетину L_1 поверхонь Γ_1 і Γ_2 сходиться з (4.4), якому належить $\Pi=0$:

$$F = \frac{M}{C_m V}. \quad (4.6)$$

Можна доказати, що у такому випадку площина $\Pi=0$ поділяється на дві області D_1 і D_2 : над кожною внутрішньою такою областю D_1 лежить по дві точки поверхонь Γ_1 , а над внутрішніми точками області D_2 не лежить ні

однієї точки поверхні Γ_1 . Над кожною точкою граничної лінії $L_2 = D_1 \cap D_2$ лежить по одній точці поверхні Γ_1 . Ця поверхня хіба що утворює дволисну складку над областю D_1 (див. рис. 4.7). Рівняння лінії L_2 (проєкція на Γ_2 , яка лежить на Γ_1 лінії складки L) є винятком Π із системи рівнянь

$$\Phi(M, F, \Pi) = 0; \quad \frac{d\Phi}{d\Pi}(M, F, \Pi), \quad (4.7)$$

де $\Phi(M, F, \Pi)$ береться з рівняння (4.4).

Отримане рівняння має вигляд $F = g(M)$, де $g(M)$ – деяка функція.

У цьому випадку можна довести, що $g(M) \geq \frac{M}{C_m V}$, тобто, що крива L_1 лежить в області D_1 .

Аналогічно рівняння лінії D_3 – проєкції лінії складки 1 на площині $F = 0$ – отримується видаленням F з тієї ж системи (4.7) і має вигляд:

$$M = C_f \left(\Pi - W / \frac{dw}{d\Pi} \right). \quad (4.8)$$

З цього рівняння випливає, що існує єдина точка перетину

$$\bar{M}, \bar{F} = \left(-C_f / \frac{dw}{d\Pi} \right) \Big|_{\Pi=0},$$

де $g(M)$ – лінії складки L з площиною Γ_2 .

Частина лінії складки розташовується в області $\Pi < 0$ (див. рис. 4.7). Далі припускаємо, що функції V, W вибрані таким чином, що $M > M_{min}$, де M_{min} – точка мінімуму функції $F = \frac{M}{C_m V}$, $M \in [0, \infty]$.

Поверхня Γ містить як стійкі, так і нестійкі стани рівноваги. Дослідження стійкості показує, що Γ_2 поділяється лінією L_1 на дві області: за умови $F = \frac{M}{C_m V}$ точки Γ_2 стійкі, за $F < \frac{M}{C_m V}$ – нестійкі. Точки поверхні Γ_1 стійкі за умови $M < C_p \left(\Pi - W / \frac{dw}{d\Pi} \right)$ (верхній лист складки) та нестійкі у протилежному випадку.

На рис. 4.9 зображено області стійкості Γ_1 та Γ_2 .

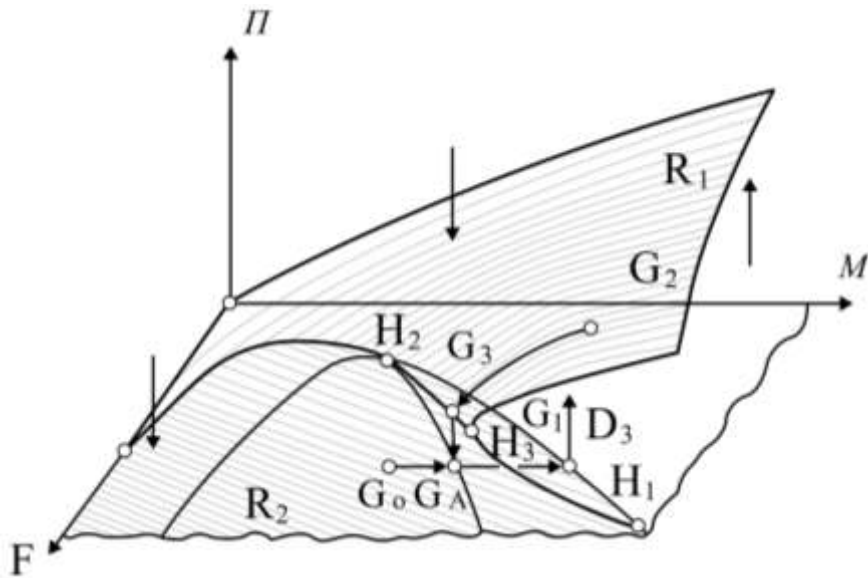


Рисунок 4.9 – Области стійкого стану на поверхні Γ

Стрілки показують напрямок векторного поля $\frac{d\Pi}{dt}$ в різних областях простору (M, F, Π) . Частина H_1, H_2, H_3 поверхні Γ_1 , а також область D_3 у площині Γ_2 , обмежена лінією L_1 і осями M та F , складаються із нестійких точок.

Розглянемо поведінку системи гомеостата працездатного стану двигуна за постійного F і повільно мінливого M . Нехай точка $G = (M, F, \Pi)$, що відображає стан системи, знаходиться на Γ_2 у стійкій її області, $G = G_0 = (M, F, \Pi)$ (рис. 4.9). Нехай $F_0 > F$. Якщо M буде повільно збільшуватися, що відповідає накопиченню в мастилi продуктів зносу, то G буде рухатися на площині Π_2 паралельно осі M . У цьому випадку, як випливає з рівняння (4.6), траєкторія руху обов'язково перетне в деякій точці G_1 лінію L_1 (за значення $\Pi = \Pi_1$), і вийшовши з області стійкості, потрапить в область D_3 . Оскільки реальна система не може залишатися в стані нестійкої рівноваги, то точка G швидко, порівняно з Π , перейде в новий стійкий стан рівноваги G_2 , що знаходиться на верхньому листку складки Γ_1 («спалах» через присадки активності спрямованого переносу продуктів зношування).

Існування точки G_2 впливає з того, що $D_3 \subset D_1$. Якщо $(\tilde{M}, F) \in D_3$, то $C_m \tilde{F} V(\tilde{M}) < \tilde{M}$, тобто $C_m \tilde{F} V(\tilde{M}) = \varepsilon \tilde{M}$ для деякого $\varepsilon \in (0, 1)$. Для неперервної функції $\varphi(\Pi) = \bar{M} - c_f \Pi - C_m \tilde{F} \tilde{V}(\tilde{M}) \chi_w(\Pi) = M(1 - W(\Pi)) - c_f \Pi$ маємо $\varphi(0) = \tilde{M}(1 - \varepsilon) > 0$, $\varphi(\Pi) < 0$ за достатньо великих Π , тому, існує $\tilde{\Pi} > 0$ таке, що $\varphi(\tilde{\Pi}) = 0$. Останнє рівняння визначає, що $(\tilde{M}, \tilde{F}, \tilde{\Pi}) \in \Gamma_1$, тобто $(\tilde{M}, \tilde{F}, \tilde{\Pi}) \in D$. Рух точки G по верхньому листку складки відповідає значній масі продуктів зносу та невисокій активності протизносного змащувально-

го середовища оливи, тобто несправним станам системи (працездатність безперервно знижується). Якщо тепер почати зменшувати запас присадок (тобто не відновлювати їх надходження в мастило, то G буде рухатися по верхньому листу Γ_1 , поки не дійде до лінії складки L в деякій точці G_3 , після чого стрибком переміститься в нову стійку рівновагу G_4 , що лежить на площині Γ_2 . Цей вихід системи з несправного в працездатний стан відбувається за значення $M = M_3$. $M_3 \neq M_1$ (що впливає з $D_3 \subset D_1$), то виникає петля гістерезису $G_4 G_1 G_2 G_3 G_4$: (рис. 4.9).

Розглянемо як приклад правдоподібні та практично важливі залежності

$$V(M) = \frac{M}{M + \xi}, \quad W(\Pi) = e^{-\alpha \Pi} \quad (4.9)$$

де α, ξ – сталі.

Рівняння для L_1, L_2, L_3 набувають такого вигляду:

$$F = \frac{1}{C_m}(M + \xi), \quad (4.10)$$

$$F = \frac{C_f}{\alpha C_m} \left(1 + \frac{\xi}{M} \right) e^{\frac{\alpha}{C_m}(M-1)}, \quad (4.11)$$

$$M = C_f \left(\Pi + \frac{1}{\alpha} \right). \quad (4.12)$$

Ці лінії зображено на рис. 4.10. Координати загальної точки L_1 та L_2 :

$$(\bar{M}, \bar{F}) = \left(\frac{C_f}{\alpha}, \frac{\alpha + C_f}{\alpha C_m} \right).$$

Критичний запас присадок, за якого відбувається стрибок продуктів зносу, в цьому випадку лінійно залежить від F :

$$M_1 = C_m F - \xi. \quad (4.13)$$

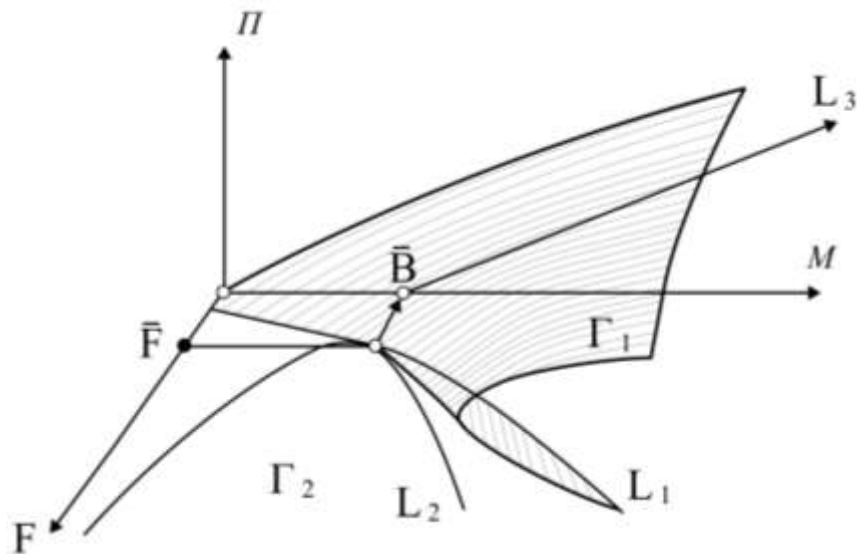


Рисунок 4.10 – Розташування поверхні Γ та ліній L_1, L_2, L_3 для випадку: $V = M/M + \xi, W = e^{-\alpha\Pi}$

Тому F являє собою величину, що визначає стійкість двигуна (його системи гомеостата працездатного стану до навантажень агресивного навколишнього середовища). Величина стрибка інтенсивності зношування під час переходу двигуна в непрацездатний стан визначається з формули (4.4) з урахуванням (4.9) та (4.10). Величина M_3 , за якої двигун виходить з несправного стану, визначається з (4.11). Таким чином, співвідношення (4.9 – 4.13) можуть бути використані для прогнозу стану двигуна за зміни навантаження або дії агресивності навколишнього середовища в ту чи іншу сторону.

За допомогою моделі отримано періодичність діагностування стійких працездатних станів агрегату, визначення моменту стрибка інтенсивності зносу, а також початку ранньої стадії передаварійного стану, коли ще можливо уникнути раптової поломки основних деталей дорогого агрегату та певною мірою врятувати його (відповідно до 4.10, 4.11, 4.12). Визначивши максимально допустиме навантаження на систему за $F = M/C_m V$, судять про схильність агрегату до втрати працездатного стану та ступеня близькості його до критичного стану, тобто катастрофи гомеостата.

Аналогічно і в загальному випадку F характеризує «межу стійкості працездатності» агрегату до експлуатаційних навантажень. У цьому випадку для прогнозу використовують рівняння (4.5-4.7). Звідси впливає можливість застосування моделі з метою моніторингу взаємодії автомобіля з навколишнім середовищем (особливо в регіонах з підвищеною агресивністю, тобто пиловими бурями, високими температурами повітря, значними їх коливаннями, вологості та сонячної радіації). Визначивши максимально допустиме навантаження на автомобіль із рівняння (4.5), можна судити про ступінь близькості системи до критичного стану («спалах» продуктів зносу

через різке збільшення вмісту кварцового пилю в маслі). Отже, в моделі підтверджується достатність спостереження для цих цілей за змінною M_{mi} .

Для використання запропонованої моделі з метою моніторингу необхідна, зрозуміло, подальша конкретизація верифікації моделі. Потрібно зазначити, що для роботи з моделлю потрібно визначити порівняно небагато величин. Найбільші труднощі, ймовірно, становить підбір для цього агрегату залежностей $V(M_{ni})$ і $W(I)$. Для співвідношень (4.8) це зводиться до визначення констант α і ξ . Крім цього, необхідно визначити M_{mi} та F . Для розрахунку змін M_{mi} можуть бути використані інші методи і моделі. Значення $C_f = C_p + \gamma/c$, m залежать від складу присадок та властивостей масла; C_{max} – від складу їх не залежить, і для ряду присадок може бути взято 0,006.

Таким чином, пропонована модель розкриває характер дії механізму стійкості працездатних станів двигуна, його «тригерну» природу. Модель показує, що в певних, досить загальних, умовах у поведінці агрегату та окремих систем (таких, наприклад, як система мащення) можливі явища гістерези. Цим пояснюються труднощі, які виникають практично під час спроб штучно шляхом простих операцій (доливанням оливи тощо) повернути двигун у стійкий працездатний стан. У разі введення необхідної конкретизації модель дозволяє визначати критичні навантаження (зокрема і агресивного середовища), за яких система здійснює перехід від нормально-справного та працездатного стану до нестійкого та непрацездатного і назад. Разом з тим пропонований в цій роботі підхід не перебуває в суперечності з найбільш поширеними зараз новітніми методами дослідження та моделювання триботехнічних систем: ці методи повністю зберігають своє значення для управління працездатністю більшості вузлів і механізмів агрегатів трансмісії та автомобіля загалом.

Вже зроблено перші кроки з практичної реалізації гомеостатичних принципів управління працездатністю змашувального середовища. Підтримання потенціалу працездатності двигуна, наприклад, забезпечується шляхом стабілізації фізико-хімічних властивостей працюючого масла і відновлення втрат від зносу або їх запобігання за рахунок утворення захисних плівок на сполучених деталях. Для реалізації цієї мети розроблено конструкцію фільтр-дозувального пакета для створення постійно діючого трибохімічного режиму в мастильних системах автотракторних двигунів. Фільтр-дозувальний пакет містить лужний реагент, фільтр-дозатор йоду та наповнювач (наприклад, алюміній).

Під час роботи двигуна циркулююча в системі олива після очищення надходить у контактну камеру і взаємодіє з лужним реагентом і наповнювачем, лужний реагент підвищує лужне число масляного середовища. В процесі роботи утворюються дрібнодисперсні частинки на основі олова і частково розчиняється алюмінієвий наповнювач, утворюючи дрібнодисперсні частинки гідроксиду алюмінію і алюмінію натрію, які разом з маслом

проходять через додатковий фільтрувальний елемент і надходять у фільтр-дозатор йоду, де дрібнодисперсні частини алюмінію взаємодіють з йодом, переходять у молекулярний стан і перетворюють властивості модифікаторів тертя. Вони надходять на поверхні, що труться, і відновлюють втрати від зносу, утворюючи на поверхні захисні антифрикційні металоорганічні плівки.

Металеві дрібнодисперсні продукти зносу також надходять з маслом у фільтр-дозатор йоду, вступають з ним у хімічну взаємодію, набуваючи властивостей модифікаторів тертя і відновлюючи знос пар тертя. Вуглецеві відкладення, що надходять в оливу з камери згоряння двигуна, диспергуються лужним реагентом, активуються йодом і утворюють з оливою стійкий колоїд, що покращує мастильні властивості оливи. Частина йоду, постійно розчиняючись в маслі, попередньо обробленому лужним реагентом, надає інгібувальну дію на процес окислення масла.

Розглянута взаємодія картерного моторного масла з елементами фільтрувального пакета забезпечує повну стабілізацію фізико-хімічних властивостей і зменшення зносу сполучених деталей під час роботи двигунів. Тим самим здійснюється управління працездатністю двигуна на основі використання гомеостатичних принципів: самоорганізація та саморегуляція стійкості працездатного стану змащувального середовища.

5 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПЕРІОДИЧНОСТЕЙ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ПРАЦЕЗДАТНІСТЮ АГРЕГАТІВ

Математичну модель, що дозволяє визначити оптимальну періодичність обслуговування та відповідний їй ресурс головної передачі, розробляємо за таких припущень та передумов.

Розглянемо випадок, коли складальна одиниця має один вид ремонту, що відновлює її працездатність, і одну операцію технічного обслуговування, що відновлює паралельну систему, призначенням якої може бути забезпечення, наприклад, середовища тертя. Відмова такої паралельної системи не викликає безпосередньо відмову машини, але призводить до погіршення умов протікання робочих процесів, підвищення швидкості зношування, що знижує ресурс збірних одиниць, ефективність функціонування машин.

Критерієм оптимізації показників надійності складальної одиниці може бути мінімум суми $C(t)$ середніх питомих вартостей її виготовлення C_o , усунення відмов і несправностей (поточні ремонти) C_{npn} , компенсації втрат $C_{кнт}$, обумовлених зносом, підвищення витрати експлуатаційних матеріалів, зниження продуктивності. Ці вартості в середньому питомому обчисленні визначають на одиницю напрацювання $t_{pн}$ за повний ресурс. Для зниження швидкості зношування та забезпечення необхідного рівня ймовірності безвідмовної роботи виконують технічне обслуговування, вартість якого $C_{обі}$ відноситься до періодичності $t_{обі}$ обслуговування.

Обмеженням за такого критерію є постійна продуктивність машини. Крім того, обмеженням є граничний знос I_n , виявлений за критеріями неможливості подальшої експлуатації.

Припущенням є те, що вартість усунення відмови не залежить від напрацювання на відмову та значення допустимого зносу, а вартість технічного обслуговування не залежить від періодичності його виконання. Вважається також, що технічне обслуговування повністю відновлює систему. З урахуванням створених передумов цільова функція (сума $C(t) > min$) має вигляд:

$$C(t) = \frac{C_o + C_{npn} + C_{кнт}}{t_{pn}} + \frac{C_{об}}{t_{об}} \rightarrow \min. \quad (5.1)$$

Приймемо загальний процес відновлення, за якого середнє напрацювання до першої відмови t_p' відрізняється від середнього напрацювання між відмовами t_p'' ; випадкова величина $v(t)$ дорівнює числу відмов, що відбулися за напрацювання t (в такому випадку $t = t_{pn}$). Отже, повний середній ресурс складальної одиниці визначається співвідношенням:

$$t_{pn} = t'_p + t''_p (v(t) - 1) = M \cdot t'_p, \quad (5.2)$$

де

$$M = 1 + K \cdot (v(t) - 1); \quad (5.3)$$

$$K = \frac{t''_p}{t'_p}. \quad (5.4)$$

Перші два члени C_o і C_{npr} цільової функції (5.1) відображають загальну вартість зношування за повний ресурс t_{pn} . Виразимо загальну вартість зношування C_{omn} за допомогою числа (t) періодів експлуатації і врахуємо, що складальна одиниця піддається ремонту $(t) - 1$ раз, оскільки за потреби в ремонті після останнього циклу експлуатації її списують. Отже,

$$C_{o.un} = C_o + C_p \cdot (v(t) - 1). \quad (5.5)$$

У цьому випадку середня загальна вартість зношування, що припадає на одну відмову (цикл експлуатації)

$$C_{o.u} = (C_o + C_p \cdot (v(t) - 1)) / v(t). \quad (5.6)$$

Виявимо вартості компенсації збитків через зноси за повний ресурс за допомогою числа $v(t)$ циклів експлуатації. Під час визначення ресурсів за критерієм ефективності вартості компенсації збитків через зноси C_{kn} будь-який цикл експлуатації має те саме значення. Тоді повна вартість компенсації втрат через зноси C_{knn} за той самий ресурс

$$C_{knn} = v(t) \cdot C_{kn}. \quad (5.7)$$

Перетворимо цільову функцію (5.1) за допомогою отриманих співвідношень (5.3), (5.6), (5.7) і після невеликих перетворень отримаємо:

$$C(t) = \frac{v(t)}{M} \cdot \frac{C_{o.u} + C_{kn}}{t'_p} + \frac{C_{ob}}{t_{ob}} \rightarrow \min. \quad (5.8)$$

Для спрощення розрахунків перетворимо цільову функцію, нехтуючи збитками через знос до граничного значення I_n , визначеного за критерієм неможливості подальшої експлуатації. Отже, візьмемо $C_{kn} = 0$

$$C(t) = \frac{v(t)}{M \cdot t'_p} \cdot C_{o.u} + \frac{C_{ob}}{t_{ob}} \rightarrow \min. \quad (5.9)$$

Отриману залежність (5.9) зобразимо графічно на рис. 5.1.

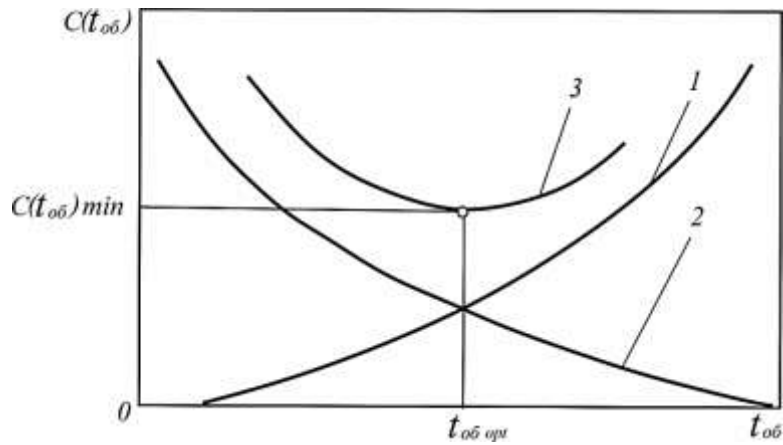


Рисунок 5.1 – Залежність оптимальної періодичності технічного обслуговування від вартості ремонту та ТО: 1 – крива, що відображає перший доданок залежності (5.9); 2 – крива, що відображає другий доданок залежності (5.9); 3 – функція періодичності обслуговування

Наступним завданням є виявлення залежності між ресурсом t_p збірної одиниці та періодичністю $t_{про}$ її обслуговування. Очевидно, можна збільшувати значення ресурсу t_p шляхом зменшення періодичності $t_{об}$. Величину ресурсу можна визначити добутком кількості обслуговувань на періодичність обслуговування. Кількість обслуговувань можна визначити відношенням граничного значення діагностичного параметра Z_n до величини зміни діагностичного параметра за напрацювання $t_{об}$:

$$t_p = \frac{Z_n}{Z_{об}} \cdot t_{об}. \quad (5.10)$$

Цю формулу необхідно уточнити, оскільки величина діагностичного параметра (наприклад, для головної передачі сумарний кутовий зазор) зі збільшенням напрацювання змінюється не від нуля, а від початкового значення. Тоді залежність (5.10) набуде вигляду:

$$t_p = \frac{Z_n - Z_n}{Z_{об} - Z_n} \cdot t_{об}. \quad (5.11)$$

де Z_n – значення діагностичного параметра, що відповідає моменту закінчення опрацювання.

Що стосується головної передачі, то зубчасті зачеплення зазнають динамічних навантажень. Зі збільшенням напрацювання знос зростає, а отже, збільшується зазор у зубчастому зачепленні, що обумовлює збільшення енергії удару зуба об зуб. Тому процес зношування йде більш інтенсивно. Внаслідок експериментів виявлено, що інтенсивність зношування елементів головної передачі має експоненціальний характер. Параметром, що ха-

ра характеризує знос головної передачі, є сумарний кутовий зазор, який можна виразити так:

$$\Delta Z_{o\bar{o}} = a \cdot e^{bt_{o\bar{o}}}, \quad (5.12)$$

де a – початковий сумарний кутовий зазор;

b – інтенсивність (швидкість) зміни сумарного кутового зазору, $^{\circ}/\text{тис.км.}$

Тоді вираз (5.11) перетворюється так:

$$t_p = \frac{Z_n - Z_n}{Z_n \cdot e^{bt_{o\bar{o}}} - Z_n} \cdot t_{o\bar{o}}. \quad (5.13)$$

Таким чином, всі складові цільової функції відомі, і наступним етапом досягнення основної мети (визначення оптимальної періодичності обслуговування і ресурсу головної передачі) є вирішення задачі оптимізації цільової функції, яка полягає в знаходженні першої похідної від цільової функції за $t_{o\bar{o}}$. Прирівнявши похідну до нуля, необхідно визначити періодичність обслуговування, за якої цільова функція (сумарні питомі витрати) матиме мінімальне значення.

Однак наявність експоненційних залежностей ускладнює знаходження похідної, тому це завдання легше вирішити графічним способом (див. рис. 5.1). Визначивши оптимальну періодичність обслуговування, залежно від (5.13) визначаємо оптимальний ресурс (на конкретному прикладі). Вихідні дані до розрахунку: $C_o = 595$ \$; $C_p = 111$ \$; $C_{o\bar{o}} = 1,5$ \$; $K = 0,8$; $(t) = 106$; $Z_n = 10^{\circ}$; $Z_n = 50^{\circ}$.

Знаючи залежність ймовірності безвідмовної роботи від періодичності обслуговування головної передачі, можна визначити рівень працездатності в будь-який момент пробігу:

$$P(t) = \frac{1}{1 + e^{z^{\circ} \left(1 + \frac{1}{n}\right)} \cdot \left[1 - e^{-\frac{1}{2} \cdot \frac{t_{o\bar{o}}}{t_p} (n+1)} \right] \cdot \left[e^{\frac{3}{2} \cdot \frac{t_{o\bar{o}}}{t_{cp}} (n+1)} - 1 \right]},$$

де $n = t_p/t_{o\bar{o}} = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$ – порядковий номер технічного обслуговування (дорівнює пробігу);

z – відносний ступінь зміни діагностичного параметра ($z^{\circ} = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$).

Проаналізувавши формулу (5.13), бачимо, що ресурс складальної одиниці можна збільшити, зменшивши величину початкового зазору і збіль-

шивши значення граничного зазору. Однак це залежить від якості матеріалів, що застосовуються, і технології виготовлення.

Складання цільової функції ґрунтувалося на припущеннях, що відсутня відчутна шкода від зносу до граничного стану, вартість ремонту та обслуговування є постійними величинами. Насправді це не так, але ігнорування зазначених припущень значною мірою ускладнює розрахунок, хоча він є більш точним. Розробку тактики технічного обслуговування та усунення несправностей агрегату розглядатимемо як модель технічного обслуговування з періодичним діагностуванням. Визначивши оптимальну періодичність обслуговування, можна знайти величину зміни параметра за напрацювання $t_{об}$, що є полем допуску за відповідний їй пробіг. Якщо виміряна величина параметра вийшла за межі допуску, головну передачу регулюють, якщо ні, то проводять лише обслуговування (наприклад, доливання або заміна оливи тощо). Прийняття рішення може здійснюватися не тільки з урахуванням величини поля допуску зміни параметра, але і на основі параметричних сімейств працездатності, що допускає можливість пропуску перевірок, якщо рівень надійності виявиться вищим за середнє значення.

6 РЕКОМЕНДАЦІЇ З РОЗРОБКИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРАЦЕЗДАТНІСТЮ АТЗ

6.1 Принципи побудови системи

Система призначена для дослідження та моніторингу процесу зниження працездатності автомобіля, його вузлів та агрегатів за широкого спектру зовнішніх впливів та змін умов експлуатації. Завдяки системі в майбутньому вже на стадії проектування будь-якого агрегату можна буде передбачити та розрахувати прогноз потенціалу його працездатності, виявити в ньому найбільш слабкі ланки, розробити заходи щодо підвищення надійності регулювань окремих елементів, систем та автомобіля загалом (рис. 6.1).

Створення системи аналізу є найбільш складним завданням в силу індивідуальних особливостей кожного агрегату або механізму автомобіля, для опису роботи якого в експлуатаційних умовах необхідно чітко уявляти процеси, що відбуваються в кожному з них. Навіть для однієї, але такої складної системи, як двигун, це можливо далеко не завжди навіть за сучасного досить високого рівня розвитку розрахункових методів математичної фізики, гідродинаміки та ін.

Особливу складність становлять досі слабо вивчені процеси, пов'язані з підтримкою та втратою працездатності. Тому від точності аналізу процесу функціонування агрегату залежить надійність прогнозування поведінки автомобіля (агрегату) і, отже, ефективність управління його працездатністю.

До складу цієї системи мають входити перелічені нижче та коротко охарактеризовані основні блоки спеціальних програм.

6.2 Керівна програма

Керівна програма, що забезпечує можливість встановити взаємозв'язки елементів системи, як головна виробляє їх інформаційну стиковку. У програмі передбачається введення та контроль всіх вихідних даних, а структура генерується під час її постановки та надалі піддається незначним змінам. Програма забезпечує зв'язок розробника з ЕОМ та зв'язок системи аналізу з іншими функціональними елементами. Найважливішою її функцією є захист внутрішніх блоків системи від випадкового руйнування (або стороннього втручання), а також виведення інформації, отриманої внаслідок розрахунку системи управління, та її попередній аналіз.



Рисунок 6.1 – Ієрархічна схема процесу розробки системи управління працездатністю двигуна

6.3 Проблемно-орієнтовані блоки

Проблемно-орієнтовані блоки призначені для розрахунків працездатності окремих елементів системи. Ці блоки, що несуть основне навантаження в процесі аналізу функціонування об'єкта, становлять основу її змісту. Окремі блоки мають наповнюватися інформацією від керівної програми; вона їх підключає до роботи та керує ними. Блоки генеруються на стадії розробки системи, але на відміну від керівної програми, мають менш стаціонарну структуру, в них можна вносити зміни в міру розвитку наших уявлень про явища зміни працездатності і застосовувані розрахункові методи її потенціалу. Уточнення в програму вносять розробники системи, користувачі до них доступу не мають. Виведення інформації, отриманої як результат роботи блоків, здійснюється керівною програмою. У самих блоках має бути передбачено виведення лише контрольної інформації, що дозволяє судити про правильність їх функціонування (причому, тільки за відповідним запитом).

6.4 Програми, що керують роботою проблемно-орієнтованих блоків за завданням користувача

Ці допоміжні програми утворюють розрахункові структури, що дозволяють у разі потреби перераховувати окремі елементи системи (наприклад, повторення розрахунку за усіченою схемою або тестування її нових блоків).

6.5 Пакет прикладних загальнонаукових програм

Розв'язання систем алгебраїчних і нелінійних диференціальних рівнянь (зокрема і розгалужених) великої розмірності, інтерполяція поліномів різного виду, статистична обробка даних експерименту та ін. Склад цього пакета може розширитися в міру розвитку розрахункових методів моделювання процесів зміни працездатності автомобіля загалом і будь-якого агрегату (зокрема двигуна та трансмісії) окремо. Ієрархічну схему процесу розробки системи управління працездатністю двигуна наведено на рисунку 6.1.

6.6 Стандартні програми планування та обробки результатів експерименту

Стандартні програми планування та обробки результатів експерименту призначені для обробки даних, отриманих під час дослідних робіт. До них можна віднести програми обробки діагностичних портретів і характеристик, закономірностей зміни потенціалу працездатності, періодичностей діагностування агрегатів, систем, механізмів, вузлів автомобіля загалом.

Як впливає з вищевикладеного, основними є проблемно-орієнтовані блоки, призначені для моделювання процесів, зниження і відновлення, а

загалом – управління працездатністю систем і агрегатів автомобіля. У повну систему розрахунку оцінок та прогнозування працездатності за попередніми оцінками необхідно об'єднати до 10 – 12 окремих проблемно-орієнтованих блоків.

6.7 Можливий ступінь автоматизації різних етапів прийняття рішень щодо управління працездатністю агрегатів автомобіля

Під час розробки системи управління працездатністю потрібно виходити з того, що ЕОМ на будь-якій стадії свого розвитку залишиться лише інструментом, більш-менш досконалим, що виконує тільки ті функції, які закладено в нього розробником на стадії генерації. Своєї логіки прийняття рішення з управління працездатністю обчислювальна машина виробити не може, це функція управління. Тому для створення логіки машинного управління, яку можна закласти в основу системи автоматизованого управління працездатності автомобіля (САУПА), необхідно назвати та проаналізувати (з погляду можливості автоматизації) всі основні етапи її розробки.

Початком будь-якого процесу розробки є вироблення технічного завдання на створювану систему. Основна мета цього етапу – визначення вимог, які висуваються системі споживачем. Основні параметри, що закладаються в технічне завдання (ТЗ), наведено та перераховано в попередніх розділах роботи.

6.8 Особливості вибору параметрів

Вибір параметрів, які значною мірою визначають тип і структуру системи управління, виконує розробник, тому цей етап підлягає автоматизації. Однак на нижчих рівнях розробки, коли уточнюються технічні завдання на окремі елементи і підсистеми, вимоги до них є наслідком попереднього аналізу системи на вищому рівні. Оскільки цей аналіз може виконуватися і за допомогою ЕОМ, то створюються певні передумови для автоматизації та нульового етапу.

6.9 Основні етапи розробки системи

Наступний етап – вибір підтипу системи, що найбільше відповідає вимогам, сформульованим у ТЗ (наприклад, вимоги підвищеної ефективності або економічності порівняно з існуючими). У нашому випадку є потреба у пошуку принципово нового або такого, що відрізняється істотною новизною, рішення. Під час розробки системи управління працездатністю автомобіля ми не можемо скористатися досвідом розробки систем управління звичайного виду.

Енергетична концепція підтримки працездатності та ресурсозбереження зажадала створення принципово нових моделей, що базуються на дослідженні спектра станів (а не подій – відмов), процесів, що ведуть до катастрофи структури агрегату, що враховують збалансованість і надійність регулювань, і, нарешті, синергетичні та гомеостатичні ефекти динаміки зміни функціонування агрегатів. Подібного роду завдання відносяться до четвертого та п'ятого рівня складності і автоматизації підлягають в процесі розробки лише частково. З урахуванням класу складності завдань, що вирішуються на цьому етапі розробки системи, визначають можливий ступінь автоматизації цього процесу. Зазвичай завдання синтезу третього класу складності – це типові завдання «бібліотечного пошуку» і нині в теорії дискретного математичного програмування розроблено методи їх автоматизованого вирішення (наприклад, метод повного перебору гілок і границь, метод дерева і тощо). Таким чином, етап вибору прототипу системи може бути певною мірою автоматизований. На етапі ескізного опрацювання системи управління працездатності вирішуються завдання її синтезу та аналізу, оскільки необхідно з'ясувати, за якими позиціями вибраний прототип відрізняється від вимог ТЗ. Потім досліджуються варіанти необхідних змін та їх можливі наслідки.

Після завершення етапу ескізного проектування конструкція системи управління загалом відома: вибрано її схему, тип і склад окремих підсистем та елементів, придатні для вирішення приватних завдань моделі та вироблено принципи, фізичний та математичний апарат для створення нових оригінальних моделей управління. Далі розробник і ЕОМ виступають як практично рівні партнери – творчу частину роботи, пов'язану з розробкою нестандартних рішень і оригінальних моделей, бере на себе людина, трудомістка частина, пов'язана з переглядом та аналізом варіантів, вибором стандартизованих рішень, забезпеченням документацією, машинний експеримент, залишається на ЕОМ.

Наступний етап – робоче проектування: на підставі даних попередньої стадії виконується розрахункове та модельне опрацювання основних підсистем та елементів, видається робоча документація на створення дослідного зразка САУРАТЗ. Синтез нових моделей і елементів системи може бути здійснений як самим розробником, так і за допомогою ЕОМ за відповідними алгоритмами. Основною функцією ЕОМ на цьому етапі є аналіз запропонованої системи з допомогою повнорозмірних математичних моделей. Саме це з достатньою мірою достовірності доводить правильність вибору основних рішень щодо управління тощо. Створені моделі розрахунку та прогнозування працездатності мають дозволяти з високим ступенем точності передбачити (описати) поведінку автомобіля або кожного агрегату будь-якої складності за будь-яких режимних впливів. Отже, попередній машинний аналіз новоствореної системи дозволяє різко скоротити кількість помилок, неминучих навіть за найвищої кваліфікації розробників. Це

значно зменшує питому вагу експериментально-довідних робіт у системі управління працездатністю.

Результатом цього етапу є робоча документація на систему для виготовлення дослідного зразка та його доведення. Мета етапу – практична перевірка правильності прийнятих на стадії проєктування та її необхідних характеристик. Очевидно, що після комплектування системи процес виявлення слабких місць та відповідності характеристик розроблюваної системи вимогам ТЗ може бути виконаний тільки ітераційним способом, тобто шляхом послідовного наближення характеристик системи до ТЗ внесенням різних змін. Тим самим, на етапі доведення проводиться послідовне повернення на певні ієрархічні рівні етапів ескізного і робочого проєктування системи. Кількість цих ітерацій повністю визначається ступенем досконалості тих розрахункових методів і моделей, які були використані під час аналізу на стадії розробки системи. Будь-які розрахункові математичні моделі мають похибку, отже, навіть у разі найдокладнішого аналізу системи будуть помилки і досягти 100% точності (тоді б знадобилася одна ітерація) практично не вдається.

Своєрідним зворотним зв'язком між етапами розробки конструкторської документації і доведення системи є дані експериментального дослідження її характеристик. Отримання та обробку цих даних може бути повністю автоматизовано. У цьому випадку ЕОМ використовується як засіб збору, обробки, видачі інформації, і як керівна ланка.

6.10 Загальна характеристика розрахункового блока системи автоматизованої технології управління працездатністю та надійністю

Розрахунковий блок (РБ) системи автоматизованої технології управління працездатністю та надійністю (САТУПН), наприклад, для двигуна передбачає вертикальний та горизонтальний поділ на рівні та напрямки за типом розв'язуваних завдань. Нульовим рівнем РБ САТУПН ДВЗ вважається робота керівної програми. На цьому етапі в розрахунковий блок вводяться з інформаційної системи або від користувача САТУПН дані про ДВЗ, умови роботи та параметри режиму використання (навантаження та швидкість).

На першому рівні аналізується ефективність роботи і характеристики працездатності всього двигуна та підсистем, що забезпечують робочий процес – повітропостачання і паливовіддачу. Основна мета цього розрахунку – визначення тиску, температури та маси робочого тіла залежно від кута повороту колінчастого вала під час протікання робочого циклу в двигуні (це основа подальших розрахунків).

На другому рівні аналізується працездатність окремих систем – охолодження, мащення, живлення, ЦПГ, КШМ. Потім, вже у рамках функціональних підблоків, виконується розрахунок показників працездатності окремих елементів кожного блока. На другому рівні у системі можна виді-

лити кілька основних напрямів із окремих систем двигуна та його характеристик працездатності – двигунів ЦПГ, колінчастого вала і підшипників тощо.

Інший напрямок – аналіз характеристик працездатності двигуна з економічності, витрати палива і масла, димності та токсичності відпрацьованих газів. Ці напрями взаємопов'язані, між ними проводиться обмін інформацією. Так, для розрахунку механічних втрат у двигуні необхідно знати втрати в ЦПГ, підшипниках і сполучення КШМ, а також ГРМ.

Кожен з функціональних блоків системи аналізу працездатності елементів конструкції також є складною розгалуженою системою, що містить в собі блоки різного ієрархічного рівня. Так розрахунок результуючого сажевиділення, чаду оливи, характеристик та параметрів індикаторного процесу в циліндрі можна виконати за допомогою методики, яка використовує стандартну програму розв'язання системи нелінійних диференціальних рівнянь.

Усі розрахунки, виконувані у межах системи, мають ітераційний характер, оскільки їх результати найчастіше задаються вже у вигляді першого наближення на вищих рівнях розрахункової схеми.

Так, для розрахунку параметрів індикаторного процесу необхідно знання температури стінок камери згоряння. Точні значення цих величин виходять тільки на третьому рівні розрахунку (на наступній ітерації за ними уточнюються параметри протікання робочого процесу).

7 МАРКЕТИНГОВА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ СЕРВІСНИХ ПОСЛУГ

У класичному розумінні маркетинг – це підприємницька діяльність, яка керує просуванням товарів чи послуг від виробника до споживача з метою задоволення потреб тих та інших [46, 47, 48]. Метою виробників є максимізація прибутку від своєї діяльності, а споживачів – задоволення потреб у товарах та послугах. Виходячи з цього, маркетинг – це процес узгодження можливостей виробників та потреб споживача за допомогою товарно-грошових відносин.

Рішення, які приймають менеджери фірм, надаючи ринку товари та послуги, визначаються досить великою кількістю чинників, які впливають на виробничі можливості цих фірм. Одним з головних чинників під час прийняття маркетингових рішень є витрати виробництва на одиницю продукції, що випускається. Саме аналіз витрат виробництва, що припадають на одиницю продукції, що випускається, дає ключ до розуміння ролі пропозиції (його обсягу) для фірм, що орієнтуються на максимізацію прибутку. Потрібно зазначити, що у співвідношення «витрати – випуск продукції» істотний вплив надає технологія виробництва (чи реалізації) товарів та послуг.

Розглядаючи як об'єкт дослідження систему підтримки потенціалу працездатності автомобілів (СППА), можна відзначити, що реалізація нових прогресивних технологій надання сервісних послуг з технічного обслуговування (ТО) і ремонту рухомого складу (РС) в замкнених системах призводить до зменшення обсягу послуг, що надаються.

Під замкнутою системою розуміється сформована структура парку РС, яка характеризується певними умовами експлуатації та її інтенсивністю, середнім віком і накопиченим пробігом РС цієї марки на цьому інтервалі часу. Технології технічного змісту РС характеризуються витратами (фінансовими та ресурсними) виробництва з реалізації послуг 1-го типу та якістю послуг. Під якістю продукції розуміється сукупність властивостей, що зумовлюють її придатність задовольняти потреби відповідно до призначення. Виходячи з цього, під якістю сервісних послуг розуміється здатність продукції або виробу зберігати свої споживчі властивості в часі. Стосовно автомобільного транспорту одним із показників якості сервісних послуг виступає експлуатаційна надійність РС, тобто здатність зберігати свої споживчі властивості протягом міжпрофілактичного пробігу із заданим рівнем ймовірності безвідмовної роботи [49 – 51].

Таким чином, якість сервісних послуг залежить від технології їхнього надання. Проте реалізація i -ї сервісної послуги з різних $\{T_j\}$ технологій характеризується різними витратами (тимчасовими, ресурсними та фінансовими) – $\{S_{ij}\}$. Величина S_{ij} надає вирішальний вплив на можливості спожив-

вача скористатися цими послугами. Послуга, оптимальна за одним з показників (наприклад, якість), може бути неприйнятна за іншим показником (наприклад, вартість реалізації i -ї послуги). Саме тому завдання визначення адекватної можливостям споживача, оптимальної за багатьма показниками (S_{ij} , якість послуги і т. д.) T_j технології реалізації сервісних послуг i -го типу, є вельми суттєвою та актуальною. Як зазначалося, технологія технічного змісту покликана зберігати споживчі властивості РС під час заданого рівня експлуатаційної надійності. Водночас надійність, будучи складною властивістю конструкції, містить в собі такі показники: безвідмовність, довговічність, збереження і ремонтпридатність з 25 показників (без урахування тих, що належать до транспортування та зберігання), 17 – показники довговічності, 2 – безвідмовності, інші – комплексні показники експлуатаційної надійності. У табл. 7.1 наведено показники експлуатаційної надійності автомобілів.

Таблиця 7.1 – Основні показники експлуатаційної надійності автомобілів

Показник	Одиниця виміру	Позначення
Середній ресурс до першої відмови	тис. км	L_1
Середній ресурс між i -ю та $i+1$ відмовами	тис. км	$L_{i,i+1}$
Тривалість простою у ремонті	днів	t_{np}
Середній ресурс до КР	тис. км	$L_{кр}$
Питома трудомісткість i -го комплексу робіт	люд.-год	T_i
Коефіцієнт технічної готовності	-	α_{m2}
Питома вартість i -го комплексу робіт	грн/тис. км пробігу	C

Працездатність автомобіля i , отже, рівень технології технічного змісту РС характеризує коефіцієнт технічної готовності (α_{m2}):

$$\alpha_{m2} = \frac{1}{1 + l_{cc} \cdot B_p}, \quad (7.1)$$

де $B_p = \bar{t}_{np} / \bar{x}_{np}$ – простій автомобіля за всіх видів технічних впливів, днів/тис. км;

\bar{t}_{np} – середня тривалість одного простою, днів;

\bar{x}_{np} – середнє напрацювання на відмову, що викликає простій, тис. км.

Обсяг сервісних послуг i -го типу, необхідних для реалізації у цій замкненій системі, визначається з експлуатаційної надійності автомобіля. З аналізу технології ТО та ремонту РС і різних видів відмов впливає, що після відмови деталь, агрегат чи вузол або замінюються повністю на нові,

або ремонтуються. У зв'язку з цим напрацювання на наступні відмови або аналогічні до напрацювання до першої відмови (тобто коефіцієнт відновлення ресурсу дорівнює 1), або відрізняються від неї, але далі постійні (коефіцієнт відновлення ресурсу $const < 1$), або зовсім різні (коефіцієнт відновлення ресурсу – var). Виходячи з цих зауважень, на основі теорії відновлення стосовно автомобільного транспорту розглянемо такі процеси відновлення [52–55]:

- простий – функції розподілу напрацювань до перших і наступних відмов однакові: $F_1(L) \equiv F_i(L) \equiv F_{i+1}(L)$;

- загальний – обмеження на рівність функцій розподілу напрацювань не поширюються на першу з них: $F_1(L), F_i(L) \equiv F_{i+1}(L)$;

- складний – $F_1(L) \neq F_i(L) \neq F_{i+1}(L)$.

Основною характеристикою процесу відновлення є функція відновлення та її диференціальна характеристика – густина відновлення [39]:

$$\Omega(L) = \sum_{n=1}^{\infty} F_n(L), \quad \omega(L) = d\Omega(L)/dL = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(L), \quad (7.2)$$

де $F_n(L), f_n(L)$ – функція та щільність розподілу напрацювання деталей до n -го відмови;

$\Omega(L)$ – провідна функція потоку відмов;

$\omega(L)$ – параметр потоку відмов.

Аналіз роботи показав, що стосовно дослідження надійності агрегатів автомобілів загалом використовується простий і загальний процеси відновлення. Тоді для простого процесу відновлення:

$$\begin{aligned} \Omega_n(L) &= F_n(L) + \int_0^L \Omega_n(L-l) dF_n(l), \\ \omega_n(L) &= f(L) + \int_0^L \omega_n(l) f(L-l) de; \end{aligned} \quad (7.3)$$

для загального процесу відновлення:

$$\begin{aligned} \Omega_0(L) &= F_1(L) + \int_0^L \Omega_0(L-l) dF_n(l), \\ \omega_0(L) &= F_1(L) + \int_0^L \omega_0(l) f(L-l) de. \end{aligned} \quad (7.4)$$

Залежності (7.3) та (7.4) подано в рекурентній формі. Відомо, що функції розподілу напрацювання на випадкову відмову описуються різними законами розподілу і для практичного використання досить складні. Тому

для спрощення розрахунків використовуються асимптотичні залежності.
Для простого процесу відновлення:

$$\Omega_n(L) = L/L_1 + 0,5 \cdot \left[\frac{\sigma_1^2}{L_1^2} - 1 \right]. \quad (7.5)$$

для загального процесу відновлення:

$$\Omega_0(L) = \frac{L - L_1}{L_{1,2}} + 0,5 \cdot \left[\frac{\sigma_{1,2}^2}{L_{1,2}^2} + 1 \right], \quad (7.6)$$

де L – сумарний пробіг, тис. км;

L_1 – ресурс до першої відмови;

σ_1 – середньоквадратичне відхилення ресурсу до першої відмови;

$L_{1,2}$, $\sigma_{1,2}$ – відповідно середній ресурс та середньоквадратичне відхилення ресурсу між відмовами.

Аналізуючи залежності (7.5) та (7.6), визначимо напрацювання (L^*) перехідного періоду, тобто межі використання асимптотичних залежностей. Виходячи з того, що якщо $L < L^*$, отримаємо:

$$L^* = \frac{\left\{ 0,5 \cdot \left[\frac{\sigma_2^2}{L_2^2} - \frac{\sigma_1^2}{L_1^2} + 2 \right] - \frac{L_1}{L_2} \right\} \cdot L_1 \cdot L_2}{L_2 - L_1}. \quad (7.7)$$

Таким чином, L^* – напрацювання перехідного періоду, до настання якого розглядається провідна функція потоку перших відмов, якщо $L \geq L^*$ – розглядається провідна функція потоку k -х відмов.

Виходячи з того, що провідна функція потоку відмов залежить від сумарного пробігу автомобіля та її диференціальна характеристика $\omega(L)$ на різних пробігах варіюється, визначення потрібної кількості технічних впливів (ремонтів) необхідно розглядати за певного фіксованого значення $\omega(L)$, тобто необхідно перейти до розгляду малого інтервалу сумарного пробігу, протягом якого функція параметра потоку відмов інваріантна, тобто $\omega(\Delta L) = \omega_i(L) = const$. Тоді необхідна кількість ремонтів у замкнутій системі по парку з кількістю РС, що дорівнює A_{cn} , визначається як

$$N_{\Sigma}(\Delta L) = \Omega_{\Delta}(L) \cdot A_{cn}, \quad (7.8)$$

де $\Omega_{\Delta}(L) = \Omega_k(L) - \Omega_n(L)$; $\Omega_k(L)$, $\Omega_n(L)$ – відповідно кінцеве і початкове значення провідної функції потоку відмов на розглянутому інтервалі сумарного пробігу ΔL .

Однак, загальний обсяг сервісних послуг i -го типу, що реалізуються за період часу, складається з регламентованих технічних впливів (наприклад, планово-попереджувальні ремонти (ППР) і випадкових ремонтів, тобто

$$N_{\Sigma}(\Delta L) = N_{nl}(\Delta L) + N_{cn}(\Delta L). \quad (7.9)$$

Кількість планових технічних впливів на інтервалі сумарного пробігу визначається, виходячи з періодичності профілактичних впливів (L_{nl}), тобто

$$N_{nl}(\Delta L) = \Delta L / L_{nl} \cdot A_{cn}. \quad (7.10)$$

Кількість випадкових ремонтів визначається із співвідношення (7.11):

$$N_{cn}(\Delta L) = [N_{\Sigma}(\Delta L) - N_{nl}(\Delta L)] \cdot X,$$

де

$$X = \begin{cases} 0, & \text{якщо } N_{nl}(\Delta L) \geq N_{\Sigma}(\Delta L), \\ 1, & \text{якщо } N_{nl}(\Delta L) < N_{\Sigma}(\Delta L). \end{cases} \quad (7.11)$$

Потрібно особливо підкреслити, що розглянуті залежності використовуються строго в замкнутих системах для певного інтервалу сумарного пробігу ΔL . Ілюстрацією цього зауваження є такий приклад.

Не завжди у всіх автомобілів з однією й тією самою віковою групою сумарний пробіг однаковий. Це, як зазначалося, залежить від інтенсивності експлуатації цієї моделі. Наприклад, автобуси, які працюють на внутрішньоміських і приміських сполученнях, маючи різну інтенсивність експлуатації, за однакового середнього віку мають різну величину сумарного пробігу. Ілюстрацію варіації сумарного пробігу L_i для автобусів однієї вікової групи T_i подано на рис. 7.1, де A і B – відповідні підгрупи автобусів, що мають однаковий середній вік, але різний пробіг.

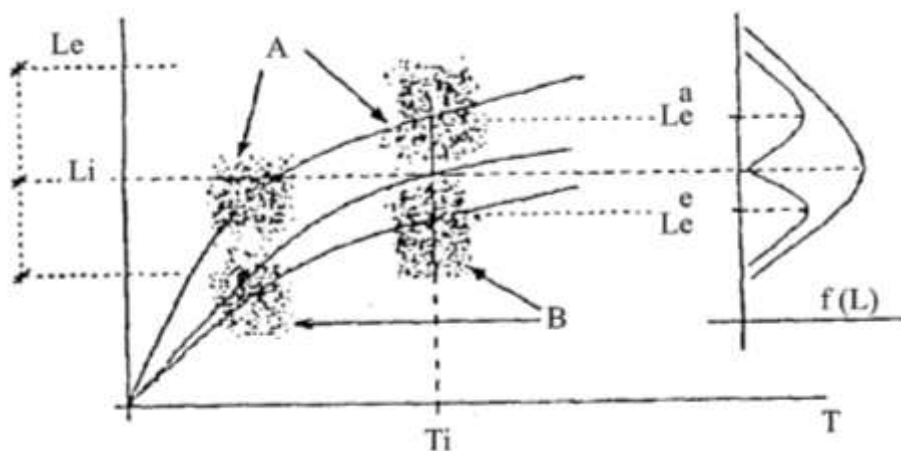


Рисунок 7.1 – Варіації сумарного пробігу L_i автобусів однієї вікової групи T_i

Вирішення зазначеної проблеми у знаходженні L_{Σ}^i здійснюється методами максимальної правдоподібності. Припустимо, що сукупність автобусів середнього віку T_i експлуатується на двох типах маршрутів з різною інтенсивністю. Тоді перший тип маршрутів характеризується щільністю ймовірності розподілу $P(L_{\Sigma}^i, \bar{\theta})$, другий тип маршрутів – $q(L_{\Sigma}^i, \bar{\varphi})$. Величини $\bar{\theta}$ і $\bar{\varphi}$ – невідомі параметри відповідних законів розподілу.

Аналіз літературних джерел [23, 26] показує, що залежності розподілу сумарних пробігів від середнього віку парку автомобілів добре описуються нормальним, логарифмічно нормальним і гамма-законом – законами розподілу випадкових величин. У зв'язку з тим, що на ці залежності діє велика кількість взаємозалежних факторів, розглянемо нормальний закон розподілу випадкової величини. Для вирішення завдання потрібно визначити, реалізацією якої сукупності (A або B) є кожен з елементів генеральної сукупності, тобто кожен автобус з сумарним пробігом L_{Σ}^i буде належати сукупності A або B .

На основі теорії максимальної правдоподібності, використовуючи функцію максимальної правдоподібності, невідомі A , B , O визначаються з рівняння:

$$F(L_{\Sigma}^1, L_{\Sigma}^2, \dots, L_{\Sigma}^n) | \hat{\theta}, \hat{\varphi}, A, B = \prod_{L_{\Sigma}^i \in A} P(L_{\Sigma}^i, \hat{\theta}) \cdot \prod_{L_{\Sigma}^i \in B} q(L_{\Sigma}^i, \hat{\varphi}) = \max. \quad (7.12)$$

Шукані A , B , $\hat{\theta}$ та $\hat{\varphi}$ L_{Σ}^i визначаються, виходячи з алгоритму покоординатної максимізації. Тобто максимізується функція F на кожному кроці кожного невідомого. Оскільки розв'язання задачі максимізації неоднозначне, то з можливої L_{Σ}^i множини оптимальних значень вибирається одне, що дає шукані $\hat{\theta}$ та $\hat{\varphi}$ значну оцінку.

Правило віднесення L_{Σ}^i до сукупності A або B полягає у такому:

$$\begin{aligned} L_{\Sigma}^i \in A, \text{ якщо } P(L_{\Sigma}^i, \hat{\theta}) > q(L_{\Sigma}^i, \hat{\varphi}); \\ L_{\Sigma}^i \in B, \text{ якщо } P(L_{\Sigma}^i, \hat{\theta}) > q(L_{\Sigma}^i, \hat{\varphi}); \end{aligned} \quad (7.13)$$

якщо

$$P(L_{\Sigma}^i, \hat{\theta}) = q(L_{\Sigma}^i, \hat{\varphi}),$$

то

$$L_{\Sigma}^i \in A, \quad L_{\Sigma}^i \in B.$$

Тоді розв'язання задачі подається таким чином.

Довільно розбиваємо генеральну сукупність автобусів на підгрупи A (індекс 1) та B (індекс 2).

Визначаємо середні арифметичні та дисперсії для L_{Σ}^i :

$$L_{\Sigma 1} = \frac{1}{N_1 \cdot L_{\Sigma 1}} \cdot \sum L_{\Sigma}^i, L_{\Sigma 1} \in A,$$

$$L_{\Sigma 2} = \frac{1}{N_2 \cdot L_{\Sigma 2}} \cdot \sum L_{\Sigma}^i, L_{\Sigma 2} \in B,$$

де N_1, N_2 – кількість автобусів по підгрупах A та B .

$$\sigma_1^2 = D_1 = \frac{\sum (L_{\Sigma}^i - L_{\Sigma 1})^2}{N_1 \cdot L_{\Sigma 1}},$$

$$\sigma_2^2 = D_2 = \frac{\sum (L_{\Sigma}^i - L_{\Sigma 2})^2}{N_2 \cdot L_{\Sigma 2}}.$$

Визначаємо належність L_{Σ}^i до підгруп A і B на основі (7.13), тобто $L_{\Sigma}^i \in A$, якщо $r > 1$ або $\varphi > 1$; $L_{\Sigma}^i \in B$, якщо $r < 1$ чи $\varphi < 1$; причому:

$$r = \frac{P(L_{\Sigma}, L_{\Sigma 1}, \sigma_1)}{q(L_{\Sigma}, L_{\Sigma 2}, \sigma_2)} = \frac{\sigma_2 \cdot \exp\left[-\frac{(L_{\Sigma} - L_{\Sigma 1})^2}{2 \cdot \sigma_1^2}\right]}{\sigma_1 \cdot \exp\left[-\frac{(L_{\Sigma} - L_{\Sigma 2})^2}{2 \cdot \sigma_2^2}\right]}.$$

$$\varphi = 2 \cdot \ln r.$$

Якщо $\varphi = 0$, то L_{Σ}^i залишається у тій самій підгрупі, де знаходилося на попередньому кроці.

Якщо $D_1 \approx D_2$, то у підгрупі A будуть знаходитися всі L_{Σ}^i , близькі до $L_{\Sigma 1}$, а в підгрупі B – всі L_{Σ}^i , близькі до $L_{\Sigma 2}$.

Таким чином, середній сумарний пробіг всього парку автобусів (L_{σ}) середнього віку T_j відмінний від величин середнього сумарного пробігу підгрупами A і B .

Значення функції правдоподібності (7.12) для нормального закону розподілу випадкових величин набуде вигляду:

$$F = (2 \cdot \pi \cdot e)^{-\frac{N_{\Sigma}}{2}} \cdot \sigma_1^{-N_1} \cdot \sigma_2^{-N_2},$$

де $N_{\Sigma} = N_1 + N_2$ – загальна кількість автобусів в обох підгрупах.

Тому ця функція досягає свого максимуму за умови максимуму добу-
тку $\sigma_1^{-N_1} \cdot \sigma_2^{-N_2}$.

Таким чином, цей приклад показує, що більш точне визначення кілько-
сті планових і непланових ремонтів (7.10, 7.11) необхідно визначати дифе-
ренційовано по підгрупах автомобілів з однаковим значенням сумарних
пробігів (L_j^i). Результативність функціонування виробництва за T_j техноло-
гії технічного вмісту рухомого складу з погляду економічних критеріїв
може бути виражена за допомогою питомих (диференціальних) витрат на
проведення одного i -го виду технічного обслуговування або ремонту на
міжпрофілактичному пробігу або сумарних витрат протягом розглянутого
інтервалу часу і протягом якого пробіг автомобіля становить ΔL . Тим са-
мим питомі витрати відображають якість виконуваної i -ої сервісної послуги
за реалізації T_j технології, а сумарні витрати – вартість реалізації зада-
ного рівня якості в рамках цього рівня T_j технології на розглянутому інтер-
валі пробігу ΔL . Таким чином, є взаємозв'язок економічних показників з
показниками експлуатаційної надійності агрегату або автомобіля загалом.

Зі свого боку, питомі (диференціальні) витрати на вид i -х технічних
впливів на міжпрофілактичному пробігу можуть бути подані таким чином
(індекс (L_{ni}) у складових простоти сприйняття опускаємо):

$$S_d = C_{pk} + C_{fm}, \quad (7.14)$$

де C_{pk} – вартість замінного ремкомплекту та матеріалів, що витрачаються
під час технічних впливів, тис. грн;

C_{fm} – вартість функціонування T_j технології (виробничі площі, облад-
нання, персонал тощо), тис. грн.

Сумарні витрати за розглянутий інтервал часу, протягом якого пробіг
автомобіля становить ΔL , подамо в вигляді:

$$S^\Sigma = \sum_{n=1}^n S_n, \quad (7.15)$$

де n – загальна кількість технічних впливів на аналізованому інтервалі су-
марного пробігу.

Однак, враховуючи виникнення на міжпрофілактичному пробігу не-
планових (випадкових) відмов, сумарні витрати за аналізований інтервал
часу будуть складатися з витрат на усунення як планових, так і непланових
відмов, тобто

$$S^\Sigma = \sum_{n'=1}^n S_D^{n'l} + \sum_{n''=1}^n S_D^{cn}, \quad (7.16)$$

де $S_D^{n'l}, S_D^{cn}$ – відповідно питомі витрати на один вид технічних впливів під
час планових та випадкових ремонтів, тис. грн;

n' , n'' – відповідно кількість планових і випадкових ремонтів, здійснених за аналізований період часу, протягом якого пробіг становив ΔL .

Знаючи загальні витрати на інтервалі накопиченого пробігу (ΔL), визначимо витрати, що припадають на 1000 км цього інтервалу пробігу за реалізації відповідної T_j технології ТО та ремонту:

$$S_{Дкм}^{T_j} = S^\Sigma / \Delta L . \quad (7.17)$$

Перша складова сумарних витрат (7.16) визначається з урахуванням (7.10) як:

$$\sum_{n=1}^n S_{Д}^{n,l} = S_{Д}^{n,l} \cdot N_{n,l}(L) . \quad (7.18)$$

Диференційовано за складовими, згідно (7.14), значення $S_{Д}^{n,l}$ визначається досить просто, виходячи з того, що під час проведення планових технічних впливів кількість операцій, їх трудомісткість і вартість є відомими величинами. Визначення другої складової формули (7.16) $S_{Д}^{cn}$ диференційовано за складовими витрат з урахуванням (7.14) являє собою складний механізм розрахунку.

Відомо [56, 57], що питомі витрати на ремкомплект (запасні частини) $C_{рк}$ під час усунення випадкових відмов і несправностей можуть бути описані такими залежностями:

$$C_{рк}^{cn}(\bar{L}_\Sigma) = C_o \cdot \exp(b \cdot L_i) \quad (7.19)$$

або

$$C_{рк}(\bar{L}_\Sigma) = C_o \cdot b \cdot L^M , \quad (7.20)$$

де C – витрати на запасні частини, що наведено до початку експлуатації;

b і M – коефіцієнти, що характеризують зміну витрат залежно від зміни сумарного пробігу L_i .

Тоді витрати на ремкомплект у разі випадкових (непланових) ремонтів у нашому випадку на розглянутому інтервалі пробігу ΔL будуть визначатися аналогічно залежності (7.18), але з відповідними компонентами, в яких витрати, що припадають на запасні частини під час реалізації одного ремонту, матимуть такі залежності:

для залежності (7.19)

$$C_{рк}(\Delta L) = C_j \cdot 0.5 \cdot (\exp(b \cdot L_n) + \exp(b \cdot L_k)); \quad (7.21)$$

для залежності (7.20)

$$C_{pk}(\Delta L) = Cj \cdot 0.5 \cdot (b \cdot L_H + b \cdot L_K); \quad (7.22)$$

де L_H і L_K – відповідно початкове і кінцеве значення аналізованого інтервалу сумарного пробігу ΔL .

Однак залежності (7.21) і (7.22) дають досить наближені значення, оскільки їх точність залежить від тангенса кута нахилу дотичної до функцій (7.19) і (7.20) в точках, тобто від коефіцієнтів b і M .

Ілюстрацію цього зауваження залежно від витрат на ремкомплект від інтервалу накопиченого пробігу подано на рис. 7.2 а), б). Наочно видно, що чим більша швидкість збільшення витрат (більше кривизна функції), тим неприйнятнішим стає використання залежностей (7.21) та (7.22).

Так, на рис. 7.2, а) подано варіант, за якого $|C(L_K)C(L_{cp})| = |C(L_{cp})C(L_H)|$, а на рис. 7.2, б) варіант, за якого $|C(L_K)C(L_{cp})| \neq |C(L_{cp})C(L_H)|$, за умови того, що в обох варіантах $|L_H L_{cp}| = |L_{cp} L_K|$.

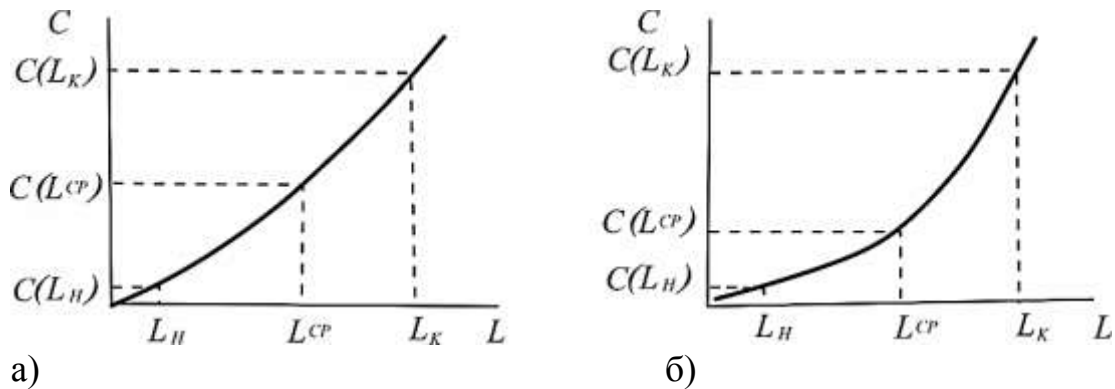


Рисунок 7.2 – Залежності витрат на ремкомплект від інтервалу пробігу

Для точного розрахунку необхідно скористатися інтегральними залежностями, кінцевий вид яких (для залежності (7.19) та (7.20) записується таким чином:

- для залежності (7.19)

$$C_{pk}^{cl}(\Delta L) = \frac{\exp(b \cdot L_i) \cdot \left(\frac{L_i}{b} - \frac{1}{b^2} \right) \cdot L_K}{\frac{1}{b} \cdot \exp(b \cdot L_i) L_H}; \quad (7.23)$$

- для залежності (7.20)

$$C_{pk}^{cl}(\Delta L) = \frac{(M+1) \cdot (L_K^{M+2} - L_H^{M+2})}{(M+2) \cdot (L_K^{M+1} - L_H^{M+1})}; \quad (7.24)$$

Для подальшого аналізу компонентів (7.14) другої складової залежності (7.16) перейдемо до визначення витрат на функціонування технології

($C_{\text{фм}}$). Цей вид витрат складається із сукупності витрат трудових ресурсів ($C_{\text{фм}}^{\text{тр}}$) та витрат на використання основних виробничих фондів ($C_{\text{фм}}^{\text{овф}}$).

Відомо (17, 26, 31), що під час прогнозування трудомісткості усунення випадкових відмов ці трудовитрати описуються залежностями, аналогічними залежностям (7.19, 7.20) і (7.23, 7.24), тільки з відповідними значеннями коефіцієнтів b і M та константи C_0 .

Визначення значення компонентів витрат на використання основних виробничих фондів ($C_{\text{фм}}^{\text{овф}}$) як під час визначення першої складової (7.16) у разі планових ремонтів, так і під час визначення другої у випадку випадкових ремонтів, визначається досить просто. Визначивши за викладеною вище методикою кількість замінного ремкомплекту, трудомісткість виконання робіт і, як наслідок, необхідне для цього обладнання та інвентар, знаючи вартість нормо-години роботи персоналу та ОВФ, ми можемо розрахувати $C_{\text{фм}}^{\text{тр}}$ та $C_{\text{фм}}^{\text{овф}}$.

Таким чином, коли виражено всі складові витрат на підтримку працездатності агрегату або автомобіля загалом (залежність (7.16)), перейдемо до статистичного моделювання варіації економічних показників діяльності виробництв з надання сервісних послуг за різних технологій їх реалізації та різних зовнішніх впливних факторів, а саме:

- рентабельність виробництва: $R = \text{const}$ або $R = \text{var}$;
- ресурсне (фінансове) обмеження можливостей клієнтури;
- сталість вартості реалізації послуг тощо.

Для зіставлення діяльності виробництв з надання сервісних послуг i -го типу у разі реалізації T_j технології необхідно вказати такі обмеження:

- рентабельність виробництва за T_{j+1} технології має бути не менше рентабельності за технології T_j ;
- річна собівартість продукції, тобто річні витрати за T_{j+1} технології, не мають перевищувати річних витрат за технології T_j .

Такі обмеження запроваджено з погляду доцільності функціонування T_{j+1} (інноваційної) технології як споживача сервісних послуг (за його витратами на i -ті послуги і якість послуг), так самої фірми, що надає ці послуги (рентабельність виробництва).

Використовуючи загальноприйняті поняття рентабельності виробництва та розглянуті вище складові витрат, промодельємо варіацію економічних показників залежно від якості послуг (періодичності профілактичних впливів – L) у разі двох технологій (T_1 і T_2) реалізації сервісних послуг i -го типу (на прикладі обслуговування двигуна RABA-MAN). Ілюстрацію результатів моделювання з урахуванням викладених принципів подано на графіках (рис. 7.3). На рис. 7.3, а) подано залежність абсолютних і питомих (на один автобус) витрат на обслуговування від якості проведення цього обслуговування.

На рис. 7.3, б) подано залежність рентабельності виробництва за незмінності вартості обслуговування ($C=const$). На аналізованих рисунках прийнято такі позначення:

- S_s – абсолютні витрати на обслуговування;
- S_{num} – питомі (у перерахунку на один транспортний засіб) витрати на обслуговування;
- R – рентабельність виробництва.

На рис. 7.3, в) подано варіацію вартості одного технічного обслуговування (ремонт) за постійної рентабельності обслуговуючого виробництва. Тут прийнято такі позначення: C^* – допустимий рівень цін на обслуговування, який можливий для рентабельності обслуговуючого виробництва, C – рівень цін, можливий для клієнтури за рівнем їх платоспроможності. Тоді, $\{C; B\} \equiv C^* \leq C$; $\{D; A\} \equiv C^* \leq C$ – відповідно допустимі множини можливих вартостей одного ремонту за T_1 та T_2 технологій реалізації сервісних послуг i -го типу $\{1; 2\}$ і $\{3; 4\}$ – відповідно множини оптимальних періодичностей планових технічних впливів за реалізації технологій T_1 і T_2 .

З урахуванням прийнятих раніше позначень (рис. 7.3, а), б), в) варіацію сукупних витрат клієнтури (власників рухомого складу, що користуються послугами цього обслуговуючого виробництва) у разі зміни якості обслуговування (за реалізації різних технологій T_1 і T_2) за умови $R = const$, подано на рис. 7.3, г).

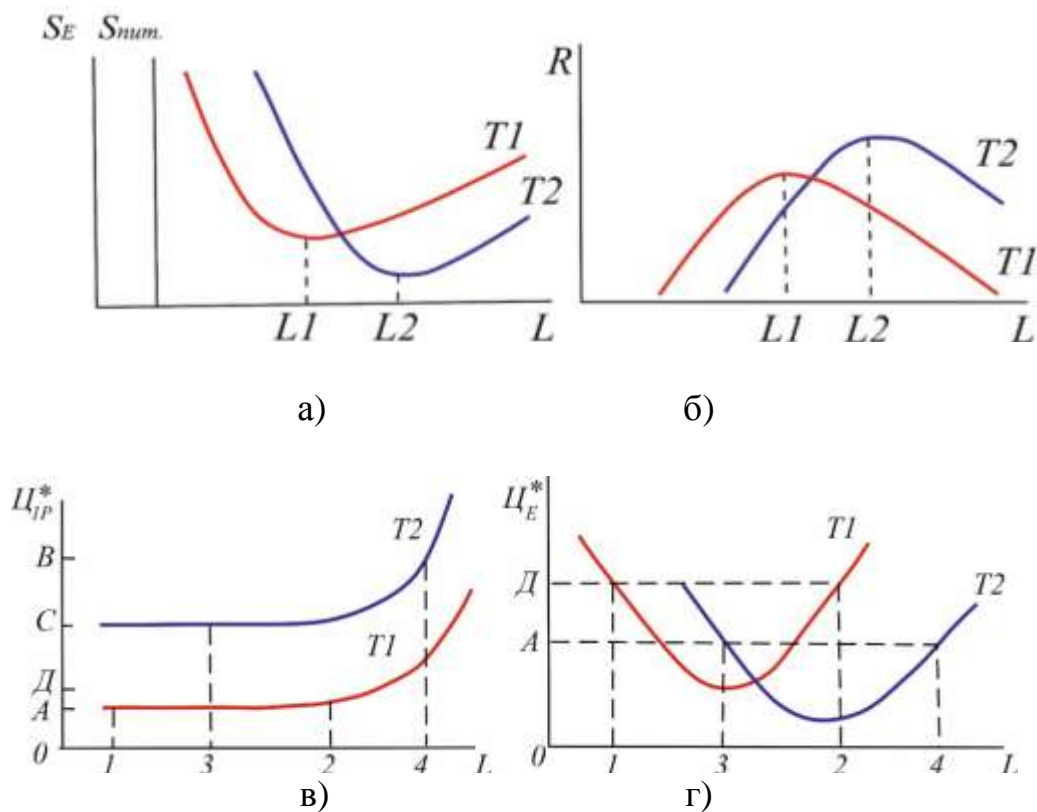


Рисунок 7.3 – Результати моделювання з урахуванням наведених принципів

Тоді сукупні витрати клієнтури будуть базуватися в таких межах:

$$\{O; D\} \equiv \Pi^* \leq \Pi; \{O; A\} \equiv \Pi^* \leq \Pi.$$

Множини допустимих цін технічних впливів (у разі виконання одного ремонту) відповідно за реалізації T_1 і T_2 технологій надання сервісних послуг i -го типу у випадку невід'ємної рентабельності обслуговуючих виробництв (рис. 7.4) матимуть вигляд:

$$\{A; B\} \equiv R \geq 0; \{C; D\} \equiv R \geq 0.$$

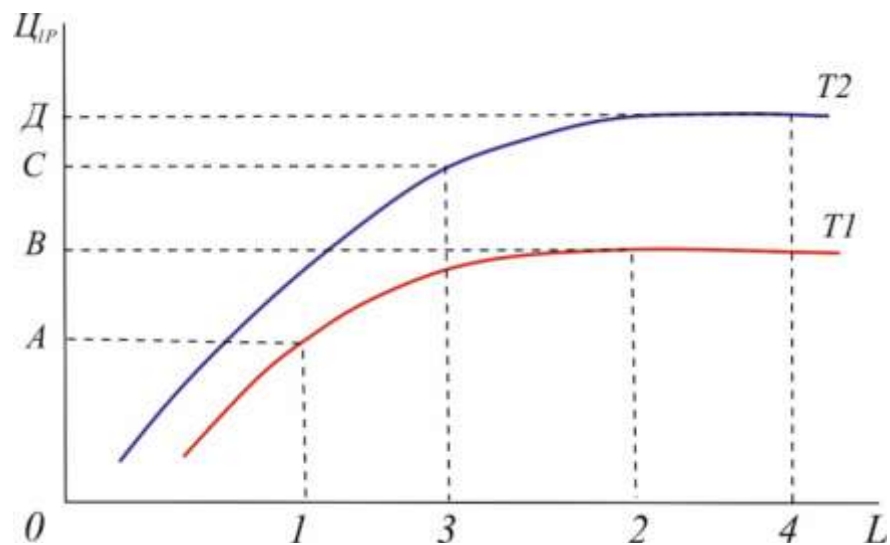


Рисунок 7.4 – Можливі вартості технічних впливів за T_1 і T_2 технологій з невід'ємною рентабельністю виробництв

Отже, результат цих досліджень – розроблено маркетингову методику визначення оптимальних діапазонів (як для клієнтури, так і для самих обслуговуючих виробництв) економічних показників за їх взаємозв'язку з показниками якості обслуговування залежно від технологій реалізації сервісних послуг i -го типу. Таким чином, у роботі запропоновано можливе вирішення задачі визначення оптимальної за багатьма показниками (витрат і якості послуг) як для клієнтури, так і для обслуговуючих виробництв, певної T_j технології реалізації сервісних послуг i -го типу.

8 МОДЕЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ ПРАЦЕЗДАТНІСТЮ АВТОМОБІЛЯ

Вирішення питання оперативного управління працездатністю АТЗ зустрічає значні труднощі, пов'язані не стільки із забезпеченням достовірності діагностування фактичного стану, скільки з відсутністю розрахункових методів для вибору оптимальних тактик відновлення. Без розробки формалізованих правил прийняття регламентних та оперативних рішень не можливе переведення технічної експлуатації на новий модельний рівень управління працездатністю. Ці труднощі можуть бути успішно подолані, якщо проблему розглядати як стохастичну, тобто формулювати цілі та завдання управління, а також використовувати характеристики у ймовірнісних термінах.

Нині розроблено безліч спеціалізованих програмних продуктів, що дозволяють вирішувати завдання підвищення ефективності автотранспортної галузі. На прикладі Сховища даних [53], в якому аналітична частина є багатовимірною структурою (MOLAP, ROLAP, HOLAP), дані не редагуються, а лише додаються і накопичуються за хронологією. Враховуючи стохастичність процесів [26], що відбуваються на автомобільному транспорті, зі структурою унітарних та корпоративних систем, які є складними активними системами [55], потрібні адекватні методології формалізації та конструктивних методів вирішення.

Розглядається клас систем, структура яких визначається парою (зацікавлений суб'єкт – об'єкт інтересів). Зацікавленість суб'єкта породжує його активність, а інтереси визначають мотивацію дій і рішень. Об'єкт інтересів є засобом реалізації інтересів суб'єкта. Як об'єкт інтересів може розглядатися будь-яка система, відмінна від самого суб'єкта. Подібні системи називаються активними, мотивованими інтересами. Виділяються і розглядається клас активних систем, в яких об'єкт інтересів є стохастичною динамічною системою.

За будь-якого конкретного змісту інтересів їх реалізація допускає природну інтерпретацію, яка полягає в «витягу корисності» для реалізації інтересів з використанням заданого об'єкта. Формальним засобом вираження «корисності» слугує функція корисності [53], що подає на числовій осі перевагу альтернативних дій з погляду їх «користі» для реалізації інтересів. Звідси виникає проблема управління процесом «витягу корисності», суть якої полягає в послідовному виборі «найбільш корисних» для реалізації інтересів керівних дій і рішень. Однак, оскільки об'єкт інтересів є стохастичним, то результати вибору неоднозначні та випадкові. У деяких випадках вибір керівних рішень може мати катастрофічні наслідки. Це породжує проблему послідовного прийняття рішень в умовах ризику, сенс якої зводиться до побудови стійкого компромісу між прагненням витягти «максимальну корисність» і досягти «мінімального ризику».

Методологія та методи прийняття рішень мають бути адекватні умовам структури активних систем та умовам середовища, в якому вони існують.

ють. Це потребує конкретизації класу систем. Тому обмежуємось двома досить загальними класами систем зі структурою типу корпоративних та унітарних систем.

На змістовному рівні структура корпоративних систем визначається набором суб'єктів з індивідуальними інтересами, для яких існує загальний домінуючий аспект інтересів, що об'єднує суб'єктів в єдиний колектив з індивідуальними інтересами, і зобов'язує їх колективно приймати рішення. Системи унітарного типу є особливим випадком корпоративних систем за умов, коли суб'єкт єдиний, а його інтереси багатоаспектні. Через відносну простоту систем унітарного типу методологію та методи прийняття керівних рішень зручно викладати спочатку для систем цього типу.

Умови та аксіоматика прийняття рішень. Методологія формалізації проблеми визначається умовами та аксіоматикою прийняття рішень, які формулюються спільно такими постулатами.

1. Об'єкт є деградуючою (старіючою) системою в тому сенсі, що безліч станів S містять поглинальний стан $\mathcal{G} \in S$, а її еволюція завершується попаданням у поглинальний стан, званий «відмовою».

2. Можливості «витягу корисності» визначаються множиною Y керівних альтернатив і множиною G загальносистемних альтернатив. Керівні альтернативи $y \in Y$ орієнтовані на зміну стану об'єкта. Множина G системних альтернатив визначається похідною $G = \Theta \times T$, де Θ – множина структурних альтернатив, T – множина альтернативних значень кроку прийняття рішень.

3. Умовою вибору керівної альтернативи $y \in Y$ є стан $s \in S$, що спостерігається до вибору, результатом – стан $\xi \in S$, що спостерігається після вибору.

4. Результати вибору випадкові і описуються сімейством умовних розподілів $q^s(S/S \times Y)$, званих перехідною функцією.

5. «Витяг корисності» можливий лише за відсутності відмови. Потрапляння у відмову супроводжується катастрофічними наслідками.

6. Априорна перевага альтернатив $y \in Y$ у станах $s \in S$ визначається функцією корисності $u^s(S \times Y)$, яка передбачається заданою.

7. Суб'єкт характеризує стани з погляду загрози потрапляння у відмову. Для цього він вводить «рівні» загрози, які формально є унарними відношеннями на множині S . У цьому випадку він може задати лише шкалу X найменувань рівнів загрози. Межі ж розбиття множини S на класи еквівалентності $S_x \subset S$, що відповідають рівням загроз $x \in X$, він задати не може. Це породжує необхідність апостеріорної побудови розбиття множини S на класи еквівалентності $S_x \subset S$, $x \in X$.

8. Найменування $x \in X$ рівнів загрози є ситуаціями прийняття рішень. Побудова розбиття множини S на класи еквівалентності $S_x \subset S$, $x \in X$ називається діагностикою ситуацій.

9. Переваги ситуацій $x \in X$ у станах $s \in S$ під час їх діагностики визначаються функцією ризику $r^s(S \times X \times Y)$, яка передбачається заданою.

10. Остаточний вибір керівних альтернатив здійснюється залежно від ситуацій $x \in X$ з урахуванням заданих обмежень $Y_x \subset Y$ на їх допустимість у ситуаціях $x \in X$.

11. Вибір на множині системних альтернатив $G = \Theta \times T$ здійснюється незалежно від станів і ситуацій як загальносистемний параметр.

База апріорної інформації. Постулати прийняття рішень визначають базу апріорної інформації про умови прийняття рішень, що задається набором об'єктів [53]:

$$I = \langle S, X, Y, [Y_x \subset Y, x \in X], G, w^s(S \times Y), r^s(S \times X \times Y), q^s(S|S \times Y), g \in G \rangle,$$

де S – множина станів,

X – множина ситуацій,

Y – множина керівних альтернатив,

$[Y_x \subset Y, x \in X]$ – обмеження на допустимість альтернатив залежно від ситуацій,

G – множина загальносистемних альтернатив,

$w^s(S \times Y)$ – функція корисності,

$r^s(S \times X \times Y)$ – функція ризику,

$q^s(S|S \times Y)$ – перехідна функція.

Для старіючих систем, що деградують, отримано у явному вигляді перехідну функцію $q^s(S|S \times Y)$, функцію корисності та функцію ризику [26].

Особливості розробленої методології щодо автомобільного транспорту дивись у [53].

8.1 Вибір та структура моделей

Автомобіль розглядається як динамічна система, стохастична еволюція якої описується керованим марківським процесом з кінцевою множиною станів і управлінь. Для синтезу оптимальної стратегії управління працездатністю автомобіля використовуємо моделі та оптимізаційні методи послідовних наближень у марківських процесах рішень [58].

Модель управління працездатністю автомобіля містить множини станів E , управлінь Y , періодичностей діагностування θ , перехідну функцію Q на $E \times Y \times \theta \times E$ і функцію корисностей W на $E \times Y \times \theta$.

Умовимося, якщо в деякий момент $t \in [0, \infty]$ значення $Z_t = 1$, то відбувається відмова автомобіля, яка виявляється, і стає відомим значення Z_t параметра працездатності. Індикаторна функція відмови

$$I_t = \begin{cases} 1, & \xi \leq t \\ 0, & \xi > t, \end{cases}$$

де ξ – випадкова величина пробігу автомобіля до відмови.

Тоді новий процес $\{x_t, t \in [0, \infty)\}$ буде характеризувати траєкторії $x_t = (Z, I)$. Пара $x = (Z, I)$ – стан об'єкта; множину станів визначимо як $E = [0,1] \times \{0,1\}$. Позначимо через E_0 множину пар вигляду $\{(Z,0); Z \in [0,1]\}$, а $E_1 = \{(Z,1); Z \in [0,1]\}$. Тоді $E = E_0 \cup E_1$; $E_0 \cap E_1 = O$.

Нехай $\sigma_k, k = 0,1$ – момент діагностування станів; припустимо, що $\sigma_k = \sigma_{k+1} + \xi_k$, де $\xi_k \sim \text{min}(\xi, \tau)$, τ – періодичність діагностування.

У кожний момент σ_k за результатами діагностування приймається одне з рішень, що вибирається з множини

$$Y = Y_0 \cup Y_1, \quad Y_0 = \{y_0, y_1, \dots, y_n\}, \quad Y_1 = \{(y_i, y_p)\}; y \in Y_0 \},$$

де Y_0 – визнати автомобіль працездатним та не обслуговувати;

Y_i – визнати автомобіль непрацездатним та виконати i -ту дію ($i=1, N$) (регулювання, заміну елементів, тощо відповідно до результатів діагностування);

Y_p – зробити ремонт з метою усунення відмови агрегату.

Припускаючи, що θ містить кінцеве число допустимих значень періодичності діагностування, перехідну функцію Q на $E \times Y \times \theta \times E$ поставимо таким чином. Множину станів E розіб'єм на кінцеве число підмножин: відрізок $[0,1]$ 2^n напівпереміщених інтервалів. Нижні межі елементів розбиття позначимо $z_k, k = 0,1, \dots, 2^n-1$; позначимо $K_n = \{0,1, \dots, 2^n-1\}$, розглядаючи напівінтервали $v_k = [z_k, z_{k+1}]$, $k \in K_n$. Далі, утворивши кінцеву множину

$$\hat{E} = \{(v_k, 0) | k \in K_n, I = 0,1\},$$

використовуємо її як нову кінцеву множину станів. Позначимо

$\hat{E}_0 = \{(v_k, 0), k \in K_n\}$, $\hat{E}_1 = \{(v_k, 1), k \in K_n\}$. Визначимо перехідні ймовірності на

$\hat{E} \times Y \times \theta \times \hat{E}$ таким способом і позначимо

$$f(t/u, z) = e^{-\frac{\beta(1-u)}{u-z} - \frac{\alpha}{1-z}}, \quad (8.1)$$

$$\gamma(u, z) = \frac{\alpha(u-z)}{\beta(1-u)(1-z) + \alpha(u-z)}, \quad (8.2)$$

де $\alpha > 0, \beta > 0$ – параметри функції.

Нехай $x_j \in \hat{E}_0, x_i \in E_0$ і $Y = Y_0$. Тоді

$$Q(x_j/x_i, y, \tau) = \Sigma \left[f(\tau/Z_{j+1}, Z_k) - f(\tau/Z_j, Z_k) \right] \times \frac{\mu(y)(Z_{i+1}-Z_{k+1})}{Z_{k+1}} - e \frac{\mu(y)(Z_{i+1}-Z_k)}{Z_k}, \quad (8.3)$$

$$\{K : Z_k \leq \min\{Z_j, Z_i\},$$

де $\mu(y) > 0$ – параметр, що залежить від $Y \in Y$.

Якщо $x_j \in \hat{E}_i$, $x_i \in \hat{E}_0$, $Y \neq Y_0$, $Y \neq Y_p$, то

$$\begin{aligned} \theta(x_j/x_i, y, \tau) = & E \left\{ \gamma(Z_{j+1}, Z_k) [1 - f(\tau/Z_{j+1}, Z_k)] - \gamma(Z_i, Z_k) [1 - f(\tau/Z_j, Z_k)] I \right\} \times \\ & \times \{K : Z_k \leq \min\{Z_j, Z_i\}\} \times \\ & \times e \frac{\mu(y)(Z_{i+1}-Z_{k+1})}{Z_{k+1}} - e \frac{\mu(y)(Z_{i+1}-Z_k)}{Z_k}. \end{aligned} \quad (8.4)$$

Якщо $x_i \in \hat{E}_1$, то

$$Q(x_j, y, \tau) = \begin{cases} 1, & V_j = V_i, I_j = 0; \\ 0, & I_j = 1. \end{cases} \quad (8.5)$$

8.2 Формування функції корисностей

Функцію корисностей $W(x, y, \tau)$ визначимо як вектор з двома компонентами – $W^1(x, y, \tau)$ і $W^2(x, y, \tau)$, що відбивають відповідно інтереси технічної та комерційної служб. В умовах ринку комерційна служба є замовником на справні автомобілі, технічна служба – підрядником, що забезпечує працездатність кожного з них. Використання автомобіля за цільовим призначенням (для перевезення вантажів або пасажирів) приносить комерційній службі дохід з інтенсивністю V грн/км.

Відновлення працездатності, навпаки, приносить дохід технічній службі – $C_1(x, y)$, який виплачується із доходів комерційної служби. Іншими словами, $C_1(x, y)$ є, за суттю, штрафом. Штрафом будемо для неї вважати втрату доходу $a_1(x, y)$ за час простоїв автомобіля на відновлення працездатності.

За виникнення відмови на пробігу τ технічній службі нараховується штраф $C_2^1(x)$. Одночасно нараховується штраф $C_2^2(x)$ на комерційну службу за невиконання транспортної роботи. За виконання діагностування те-

хнічній службі нараховується дохід C_0^1 , а комерційній – штраф $C_0^2 = C_0^1 + d_0$, де d_0 – втрати доходу під час простою автомобіля на діагностуванні.

З розглянутої структури штрафів і доходів випливає, що функція корисностей технічної служби подається різницею між доходом за вплив та математичним сподіванням штрафу за відмову автомобіля на пробігу τ , тобто

$$W^1(x, y, \tau) = C_0^1 + C_1(x, y) - M\{C_2^1 / x, y, \tau\}. \quad (8.6)$$

Функція корисностей комерційної служби – це різниця між математичним сподіванням доходу на пробігу τ і штрафом за відновлення, відмову та простої, тобто вона має структуру

$$W^2(x, y, z) = \nu M\{\xi(x, y, \tau)\} - C_0^2 - C_1(x, y) - \alpha_1(x, y) - M\{C_2^2 / x, y, \tau\}, \quad (8.7)$$

де $\xi(x, y, \tau) = \min\{\tau, \zeta(x, y)\}$.

Для задання зазначених компонентів у явному вигляді уточнимо такі елементи:

$$\begin{aligned} M\{C_2 / x_i, y, \tau\} &= \sum_{u \in E_1} C_2 \text{ у } Q \text{ у } / x_i, y, \tau, \quad x \in \hat{E}_0; \\ M\{\xi(Z, \tau)\} &= \frac{1-Z}{\alpha} \left(1 - e^{-\frac{\alpha\tau}{1-\alpha}}\right); \\ M\{\{\xi(x_i, y, \tau)\}\} &= \sum_{k=0}^i \frac{1-Z_k}{\alpha} \left(1 - e^{-\frac{\alpha\tau}{1-Z_k}}\right) \times \\ &\times \left(e^{-\frac{\mu(y)(Z_{i+1} - Z_{k+1})}{Z_{k+1}}} - e^{-\frac{\mu(y)(Z_{i+1} - Z_k)}{Z_k}}\right) \end{aligned} \quad (8.8)$$

Цим визначаються всі елементи базисної моделі управління працездатністю підсистем автомобіля. Якщо розглядати систему загалом, то модель управління працездатністю відрізнятиметься лише тим, що в цьому випадку допустимі лише два рішення: визнати систему працездатною чи непрацездатною.

8.3 Приклад моделі для причепа

Формування вихідних передумов і даних для моделі проводиться у такій самій послідовності. На підставі аналізу несправностей і відмов причепів вважаємо, що система (підсистема, елемент) може перебувати в станах: E_1 – справному і працездатному; E_2 – несправному, але працездатному; E_3 – несправному та непрацездатному; E_4 – передвідмовному; E_5 – відмовному. Вони утворюють множину станів E системи. Для відновлення працездатності системи будемо використовувати такі управління Y . Y_1 – не проводити профілактики або ремонту; Y_2 – провести підтяжку елементів; Y_3 – відрегулювати окремі елементи (гальмівні механізми, наприклад); Y_4 – провести діагностичне настроювання; Y_5 – замінити елемент (вузол, елемент або деталь, що відмовила).

Динаміку зниження працездатності будемо оцінювати за діагностичними параметрами, які адекватно відображають зміни технічного стану сполучення, і узагальненими діагностичними характеристиками оцінки якості функціонування причепа.

Методичний аспект завдання полягає в тому, що під час оцінювання працездатності причіп як складна система умовно розчленовується за вісьмома ієрархічними рівнями. На найвищому рівні (нульовому) розташовується причіп як система управління працездатністю. Далі йдуть рівні: перший – підсистеми причепа (наприклад, ходова частина); другий – механізми (гальмівні); третій – вузли; четвертий – сполучення та зчленування деталей; п'ятий – окремі деталі; шостий – посадкові місця; сьомий – елементи деталей (шліци тощо).

Залежно від розв'язуваної задачі модель дозволяє розглядати різні рівні ієрархії. Еволюція стану систем, підсистем і елементів причепа описується рівняннями

$$x_{l+1} = Q(x_l, y_l), \quad l = 0, 1, \dots,$$

де Q – відображення $(E \times Y) \rightarrow P(E)$;

$P(E)$ – сімейство ймовірнісних мір на E , що визначає закон еволюції системи;

Q – задається сімейством умовних розподілів $Q(E \times Y)$ на E , що залежать від умов $(X, Y) \in E \in Y$.

Сімейство таких розподілів – перехідна функція, що оцінює ймовірність переходу несправного стану в справний під впливом управлінь.

Процес втрати працездатності системою на підставі численних експериментальних даних [26, 58, 59] можна вважати випадковим процесом $\{Z_l, l \in [0, \infty)\}$, якщо виконуються чотири умови: траєкторії z_l є незменшувальними функціями пробігу, тобто

$$P\{Z_{l+\tau} \geq Z_l\} = 1, \quad v_\tau > 0;$$

траєкторії $\{z_t\}$ можуть обриватися; момент обриву є відмовою системи (визначається за узагальненою діагностичною характеристикою або оптимальним діагностичним тестом причепа), підсистеми (за сукупністю діагностичних параметрів), елементи (діагностичний параметр стану сполучення або зчленування):

$$P\{l + \xi \leq l + \Delta l / Z_0^l, Z_l = Z, \xi > l\} = \lambda(Z, l)\Delta l + o(\Delta l), \quad (8.9)$$

де $\lambda(Z, l)$ – не зменшується за Z і за l ;

$Z_0^l = \{Z_s, 0 \leq s \leq t\}$ – функція $\lambda(z, t)$ не зменшується за Z і за l .

Ця функція $\lambda(z, t)$ відображає небезпеку відмови залежно від значення зносу Z . Умова означає, що процес $\{z_t\}$ є марківським. Тоді для його однозначного опису достатньо задати перехідну функцію $q(t)$ та умовну функцію розподілу відмов $F(t/Z)$, що залежить від значення траєкторії як від параметра і задається у вигляді

$$F_\xi(t/z) = 1 - e^{-\alpha q(z)t}, \quad (8.10)$$

де α – початкове значення інтенсивності відмов за $Z=0$; функція $q(z)$ описує зростання інтенсивності відмов залежно від зміни значення Z .

8.3.1 Процедура управління працездатністю причепа

Процес зносу деталей причепа, як правило, недоступний безпосередньому спостереженню. У той самий час завжди існують діагностичні параметри, що характеризують ступінь зносу, доступні спостереженню та вимірюванню приладами. Тому вважаємо, що за допомогою засобів діагностування процес зниження працездатності причепа доступний для вимірювання без розбирання механізму, вузла і сполучення деталей. Зазначені чотири умови визначають параметр зміни працездатності (втрату або відновлення), придатний для управління.

Модель управління працездатністю побудовано в припущенні (без обмеження спільності), що нормативний параметр працездатності набуває значення з одиничного відрізка $S=[0,1]$ і описується множиною станів $E \equiv S \times \{0,1\}$, де 0 – відмови немає, 1 – відмова є.

Оскільки безперервне діагностування станів причепа практично неможливе і організаційно недоцільне, то будемо контролювати ступінь його працездатності з періодичністю τ [26]. Суть управління працездатністю полягатиме в такому. Якщо в моменти діагностування виявляється тенденція зниження або небезпечний ступінь її втрати (передвідмовний стан), то

рівень працездатності підвищується шляхом застосування відповідних впливів Y (тобто y_1, y_2, \dots, y_6). Впливи наперед визначені дослідно-експериментальним шляхом.

Оскільки процес втрати працездатності стохастичний, то результати застосування управлінь $Y \in Y$, аналізовані в наступний момент діагностування, неоднозначні, випадкові і можуть бути описані сімейством умовних розподілів.

$$Q(dx/x, Y\tau), \quad x \in E, \quad Y \in Y, \quad \tau \in \theta, \quad (8.11)$$

де θ – параметр середовища (умови експлуатації: дорожньо-транспортні, атмосферно-кліматичні та культура експлуатації).

Для однозначного задання перехідної функції Q використовуємо модель керованого процесу втрати працездатності складної системи [58].

Застосування впливів $Y \in Y$ у стані $x \in E$ супроводжується доходом (функціонал W). Для практичних цілей вважатимемо, що $W(x, y, \tau)$ – дохід, який отримується внаслідок застосування управління $Y \in Y$ у стані $x \in E$. Корисність управлінь працездатністю причепа описується таким чином:

$$W(x, y, \tau) = \begin{cases} v \bar{\xi}(x, y, \tau) - [C_0 + C_1(x, y)], & x \in E_0; \\ -[C_0 + C_1(x+y) + C_2(x)], & x \in E_1, \end{cases} \quad (8.12)$$

де E_0 – множина станів без відмови (E_1, \dots, E_3);

E_1 – множина станів за наявності відмови (E_4, E_5);

v – інтенсивність доходу;

C_0 – вартість діагностування;

$C_1(x, y)$ – вартість застосування впливу;

$C_2(x)$ – штраф (втрати, витрати) через відмову;

$\xi(x, y, \tau) = M\{\xi(x, y, \tau) \mid \xi = \min(\xi, \tau) \dots$ – середній пробіг до відмови за умови впливу з періодичністю τ .

Композиція отриманих об'єктів $\{E, Y, Q, \theta, W\}$ визначає модель керування працездатністю причепа. І, нарешті, введемо правило π вибору керівних впливів $y \in Y$ як відображення $E \rightarrow Y$. Це є стратегією управління працездатністю причепа. З математичного погляду – відображення $\pi: E \rightarrow Y$ – вирішальна функція, послідовність (π_0, π) – стратегія, що визначає правило вибору управлінь у кожний момент пробігу $l = 0, 1, \dots$

Стратегія π в період τ визначає середній виграш, що розглядається на досить великому проміжку пробігу L (π^∞ – стаціонарна стратегія):

$$V(\pi^\infty)(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} M(\pi, \tau) \sum_{l=0}^{n-1} (X_l, Y_l, \tau), \quad x \in E. \quad (8.13)$$

8.3.2 Координація задач діагностування та управління

Практичне рішення та координація завдань діагностування та управління працездатністю причепа мають такі особливості [26, 59]. Формально завдання зводиться до пошуку пари $(\pi^\infty, \tau^\infty$ или π^*, τ^*), яка максимізує критерій V , тобто $V'(\pi^*, \tau^*) \geq V(\pi, \tau)$ (вище у формулі $x \in E$ – початковий стан, а математичне сподівання береться в міру, що породжується перехідною функцією $Q(\cdot / x, \pi(x))$). Вважатимемо, що за будь-якої стратегії π – ця множина утворює ергодичний клас відновлюваних станів. Це відповідає найпоширенішому та найважливішому класу практичних завдань технічної служби підприємств автотранспорту з підтримки працездатності рухомого та причіпного складів.

Для практичної можливості реалізації ефективного управління працездатністю АТЗ відзначимо ту їхню особливість, що наявність державної мети функціонування та інтересів АТП дозволяє вводити укрупнені агреговані стани, що відповідають таким самим рішенням з погляду кінцевих результатів та глобальних інтересів галузі.

Дійсно, оскільки глобальні інтереси національного господарювання країни спрямовані на максимізацію ефекту від комерційної експлуатації рухомого складу, який досягається тільки в його працездатному стані, то з погляду цих інтересів має практичний сенс розглядати два найбільш важливі агреговані стани: працездатний і непрацездатний. Інтуїтивно ці поняття досить зрозумілі; формальне ж їх введення якраз і становить основний зміст і мету прийняття рішень у проблемі підтримання працездатності.

Визначення та віднесення складної системи внаслідок діагностування до працездатної або непрацездатної є лише першим етапом вирішення проблеми. Дійсно, діагноз – «непрацездатна» – ще не дає однозначних рекомендацій про те, який конкретний вплив необхідно застосувати для відновлення працездатності. Це завдання потребує декомпозицій, наприклад, причепа на підсистеми з їхньої важливості та поетапного вирішення відповідно до рівня його ієрархічної структури. Процес завершується за досягнення нижнього рівня ієрархії. Для сполучень і деталей встановлення факту їхнього зносу або пошкодження практично визначає конкретні впливи на відновлення їх працездатності.

Таким чином, ефективне вирішення проблеми управління працездатністю АТЗ базується на системній методології, методах оптимальних рішень і моделях оптимальних стратегій, що забезпечують вибір оптимальних режимів відновлення найбільш важливої для виконання плану переве-

зень АТП їх комплексної характеристики, орієнтованої на гарантоване досягнення кінцевого результату.

8.4 Особливості накопичення інформації для цілей управління працездатністю

Методика збору та обробки статистичних даних про напрацювання значень діагностичних параметрів (вузлів, механізмів причепа) та керівних впливів має такі особливості. Необхідну діагностичну та статистичну інформацію отримують зі спостережень параметрів працездатності Z_{l_k} , $k = 1, 2$ кожної підсистеми через однакові проміжки пробігу i в моменти відмов ξ_k , $k = 1, 2, \dots$

Для зручності збирання інформації доцільно позначити

$$l_k = \begin{cases} 0 & \text{якщо відмови немає в момент перевірки;} \\ 1 & \text{в іншому випадку} \end{cases}$$

де Z_k^1 – значення параметра працездатності у момент перевірки t_k ;

Y_k – використане керування в момент t_k ;

Z_k – значення параметра працездатності після застосування Y_k в момент t_k .

Всю отриману за n спостережень інформацію описують масивом даних

$$I = \{(t_k, l_k Z_k', Y_k, Z_k), k = 1, \dots, n\}.$$

Для організації систематичного збору інформацію зручно фіксувати в табличній формі (табл. 8.1).

Таблиця 8.1 – Форма збору інформації

k	t_k	l_k	Z_k	Y_k	Z_k
1	2	3	4	5	6

Використовуючи дані табл. 8.1, оцінення параметрів β , α та μ виконують за методикою, описаною в [58].

Щільність розподілу функції $F(t)$ має вигляд

$$\frac{dF}{dV} \begin{cases} \frac{\beta t(1-z)}{V^2} \cdot e^{-\left(\frac{\beta t(1-z)}{V}-1\right)}, & V \\ 0. & \end{cases}$$

Таким чином, функція розподілу E_n має один параметр $\beta > 0$, оцінку якого отримують за допомогою методу максимальної правдоподібності. З

цією метою, взявши $t = T$ для кожного фіксованого $Z = Z_k^1$, із табл. 8.1 вибирають ті дані, які відповідають збільшенню параметра за час T за умови фіксованого $Z = Z_k^1$. Зрозуміло, необхідні спостереження розташовуються в табл. 8.1 у тих рядках, де $l=0$ та $Z_k^1 = Z$.

Отримані дані зручно розташовувати у формі табл. 8.2. Тут $0 \vee 1 \Leftrightarrow 0$ або 1 : m – кількість спостережень таких, що

$$Z_k^1 = Z, \quad \kappa = 1, \dots, m.$$

Далі розраховуються величини

$$V_i = V_i(Z) = Z_k; \quad +1 - z, \quad i=1, m.$$

Набір таких величин $\{V_i, i=1, \dots, m\}$ утворює вибірку незалежних спостережень обсягу m . Skorиставшись методом максимальної правдоподібності, обчислюють оцінку параметра β . З цією метою необхідно утворити логарифмічну функцію правдоподібності.

Таблиця 8.2 – Результати обробки даних спостережень

K	Z_k	l_i
1	2	3
k_1	Z	0
$k_1 + 1$	$z_{k_1} + 1$	$0 \vee 1$
k_2	z	0
$k_2 + 1$	$z_{k_2} + 1$	$0 \vee 1$
.	.	.
.	.	.
.	.	.
k_m	z	0
$k_m + 1$	$z_{k_m} + 1$	$0 \vee 1$

$$\ln L(\beta/V_1, \dots, V_m) = \sum_{i=1}^m \ln \left\{ \frac{\beta T(1-z)}{V_i^2} e^{-\beta T \left(\frac{1-z}{V_i} - 1 \right)} \right\} =$$

$$m \ln(\beta T(1-z)) - z E \ln V_i - \beta T(1-z) \sum_{i=1}^m \frac{1}{V_i} + \beta T_m. \quad (8.14)$$

Оцінка $\hat{\beta}(z)$ для β отримується за умови

$$\frac{d \ln L}{d \beta} = \frac{m}{\beta T} - (1-z) \sum_{i=1}^m \frac{1}{V_i} + m = 0. \quad (8.15)$$

Необхідна оцінка має вигляд

$$\hat{\beta}(z) = \frac{m}{T \left\{ (1-z) \sum_{i=1}^m \frac{1}{V_i} - m \right\}},$$

де $V_i = V_i(z)$.

Отримана оцінка $\hat{\beta}(z)$ не залежить від z і залежить від вибраного значення t . З метою усунення зазначеної залежності оцінки від вибору z потрібно вчинити так. Отримують оцінку $\beta(z)$ зазначеним способом для всіх різних значень, наявних в табл. 8.1. Якщо є M таких значень z , то як остаточну оцінку параметра β використовують середньоарифметичне отриманих оцінок.

Для будь-якої машини методика обробки статистичної та діагностичної інформації повністю збігається з описаною, за винятком способу складання табл. 8.1. Якщо табл. 8.1 для пар та деталей складається за результатами безпосередніх спостережень, то для об'єкта загалом вона складається з таких самих таблиць елементів. Основна вимога полягає лише у тому, щоб звести дані для підсистем в одну табл. 8.1 так, щоб вони розташувалися в послідовні моменти його діагностування, що не викликає труднощів.

8.5 Програма для управління працездатністю АТЗ

Розробка та реалізація програмного забезпечення оперативного управління працездатністю АТЗ ведеться у послідовності:

- складання та відпрацювання програм для обчислення оптимальних стратегій управління працездатністю АТЗ (системи, підсистем та елементів);
- чисельне вирішення завдань синтезу оптимальних режимів управління працездатністю систем, підсистем та елементів АТЗ.

Основні відомості про програми, блок-схеми, алгоритми наведено в додатку А. Нижче розглянуто приклад вибору оптимальної стратегії управління працездатністю автомобіля КамАЗ-5320 з причепом ГКБ-8350.

8.6 Оптимізація режимів профілактичного відновлення працездатності

Для розрахунку оптимальних режимів підтримки працездатності причепів за методикою, описаною в п. 8.4, була зібрана, сформована, оброблена та проаналізована діагностична інформація. Отримано параметри перехідної функції Q ($\alpha = 0,0057$; $\beta = 0,0031$; $\lambda_2 = 2$; $\lambda_3 = 1,5$; $\lambda_4 = 1,3$; $\lambda_5 = 1,0$; $\lambda_6 = 0,3$) і параметри функції корисності, грн ($c_0 = 25$; $c_1 = 140$; $c_2 = 730$; $\nu = 2400$) для періодичності діагностування 30 тис. км (табл. 8.3).

Таблиця 8.3 – Фрагмент масиву інформації

Підсистема	Кутовий зазор, φ °	Керівний вплив
1	За відсутності відмови	
	6 – 8	Профілактику не проводити
	9 – 48	Регулювати підшипники та зчеплення шестерень
2	За наявності відмови	
	5 – 6	Замінити підшипник, що відмовив
	7 – 48	Замінити вузол, що відмовив, з подальшим регулюванням

Дослідно-виробнича перевірка ефективності різних стратегій управління здійснювалася за трьома контрольними групами автомобілів КамАЗ, що працюють з причепами на перевезеннях будівельних вантажів. Автомобілі першої групи (автоколона у відриві від основної бази) практично не обслуговувалась (рис. 8.1, крива 4). В інтервалі від 90 до 110 тис. км п'ять ведучих мостів з восьми відмовили внаслідок аварійних поломок деталей редукторів (підшипників, зубів ведучої та веденої шестерень, хрестовин диференціалів тощо). Для відновлення працездатності агрегатів замінили диференціали, пари шестерень, підшипники і зробили значний обсяг регулювань. Це знизило значення параметра працездатності сумарного кутового зазору до 13 – 15°. Проте витрати на запасні частини перевищили нормативи (на 100 тис. км пробігу) від 150 до 200%.

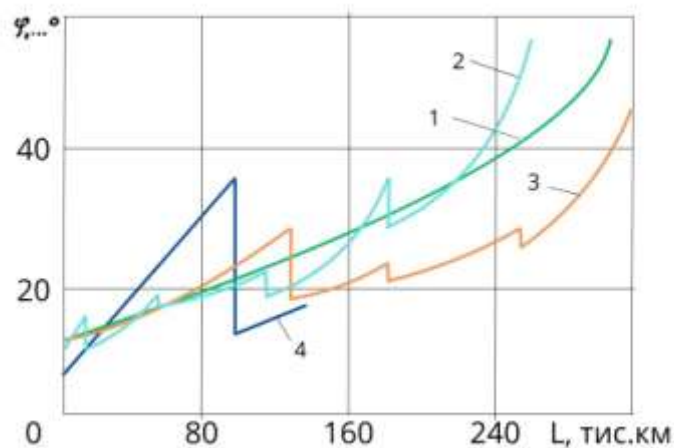


Рисунок 8.1 – Ефективність різних стратегій управління працездатністю ведучих мостів автомобілів: 1 – розрахункова траєкторія динаміки параметра працездатності агрегату; 2 – зміна параметра під час обслуговування агрегату існуючими методами; 3 – керування параметром пропонованої моделі; 4 – катастрофічне зростання параметра за відсутності обслуговування

Друга група автомобілів (рис. 8.1, крива 2) обслуговувалась за традиційною системою ТО та ПР. Діагностика ведучих мостів проводилася з періодичністю, кратною середньодобовому пробігу і такою, що дорівнює

32 тис. км пробігу. Причому, через кожні 64 тис. км пробігу проводили тільки кріпильні роботи, регулювання підшипників, а за необхідності замінювали (або доливали) мастило. Під час першого регулювання ($L = 64$ тис. км) величину зазору знизили порівняно з розрахунковою (див. рис. 8.1, крива 1) на 2° . Далі регулювання підшипників виконувались на пробігу 130 і 190 тис. км (відповідно зменшення зазору порівняно з розрахунковим на 6° і 3°). Проте вже на пробігу 220 тис. км зазори в агрегатах почали швидко збільшуватися, а регулювання не дали очікуваного ефекту. Як показали контрольні розбирання, на пробігу 260 тис. км всі агрегати вимагали заміни головних пар та підшипників.

Працездатністю третьої групи ведучих мостів керували за стратегією, вибраною на модельній основі. Її відмінна риса – діагностичне налаштування агрегату (доведення до нормативних значень натягу підшипників, заміна мастила з промиванням картерів) на пробігу $\tau_1 = 8$ тис. км з наступним переплануванням періодичностей діагностування ($\tau_2 = 24$, $\tau_3 = 96$, $\tau_4 = 160$ тис. км). Потрібно зазначити, що з другої і третьої перевірок значення діагностичного параметра мало відрізнялося від розрахункового. На пробігу 160 тис. км внаслідок зносу підшипників значення параметрів зросло порівняно з розрахунковим на 8° . Під час регулювання зазор не зменшився. Тому підшипники замінили, що дозволило зменшити зазор (порівняно з розрахунковим) на 10° , а сумарне значення діагностичного параметра по агрегату стало дорівнювати 20° . Далі згідно з оптимальною стратегією управління працездатністю підшипники моста регулювали на пробігу 190 і 259 тис. км. Перевірка показала, що навіть на пробігу 320 тис. км значення зазору не перевищувало 35° і було значно нижчим від гранично допустимого. Модельне управління працездатністю дозволило збільшити ресурс ведучих мостів третьої групи автомобілів порівняно з другою на 28 %.

Паралельно проводився збір інформації даних щодо напрацювань причепів і було отримано режими регулювання підшипників коліс: параметри перехідної функції Q - $\alpha = 0,0063$; $\beta = 0,004$; $\lambda_2 = 2,1$; $\lambda_3 = 1,6$; $\lambda_4 = 1,4$; $\lambda_5 = 1,2$; $\lambda_6 = 0,28$; параметри функції корисності, грн – $C_0 = 12,0$; $C_1 = 5,0$; $C_2 = 40,0$; $C_3 = 1500$. Оптимальна стратегія підтримки працездатності підшипників коліс, обчислена з урахуванням нормативної періодичності діагностування – 16 тис. км, полягає в такому. Перше регулювання зазору у підшипниках необхідно виконувати через 1200 км. Протягом зазначеного пробігу гайки кріплення коліс підтягуються щодня в кінці робочої зміни. Далі повністю необхідно замінити мастило, попередньо промивши підшипники для видалення продуктів зносу їх приробітку. Потім до пробігу 80 – 100 тис. км достатньо через нормативний пробіг проводити тільки підтяжку підшипників. Однак після пробігу 100 тис. км доцільно їх регулювання і контроль стану мастила проводити з періодичністю, що дорівнює 8 тис. км. Крім того, необхідно в обов'язковому порядку виконувати діагностичне налаштування їх регулюванням на стенді з біговими барабанами, домагаючись мінімальної витрати потужності на повертання коліс зі

швидкістю 50 км/год. Різке зростання втрат на опір прокручування коліс (в 1,5 – 2 рази) свідчить про початок пошкодження бігових доріжок кілець і роликів. Щоб уникнути пошкодження різьблення цапф осей керованих коліс за такої діагностичної ознаки підшипники потрібно демонтувати (за ОР-2 причепа), промити і ретельно оглянути бігові доріжки та ролики. Пошкоджені підшипники замінюються, а з допустимим зносом – використовують далі, але з обов'язковою заміною мастила і періодичним регулюванням через 6 тис. км. Така тактика підтримки працездатності підшипників забезпечує збільшення їх ресурсу на 15 ... 20%.

Управління ефективністю дії гальм має особливості та коригується з урахуванням конструкції гальмівної системи та наявності антиблокувальних пристроїв [60]. Для управління працездатністю рульового управління з гідروпідсилювачем автомобілів доцільно використовувати діагностичні портрети (рис. 8.2), що зберігаються в пам'яті ЕОМ [28].

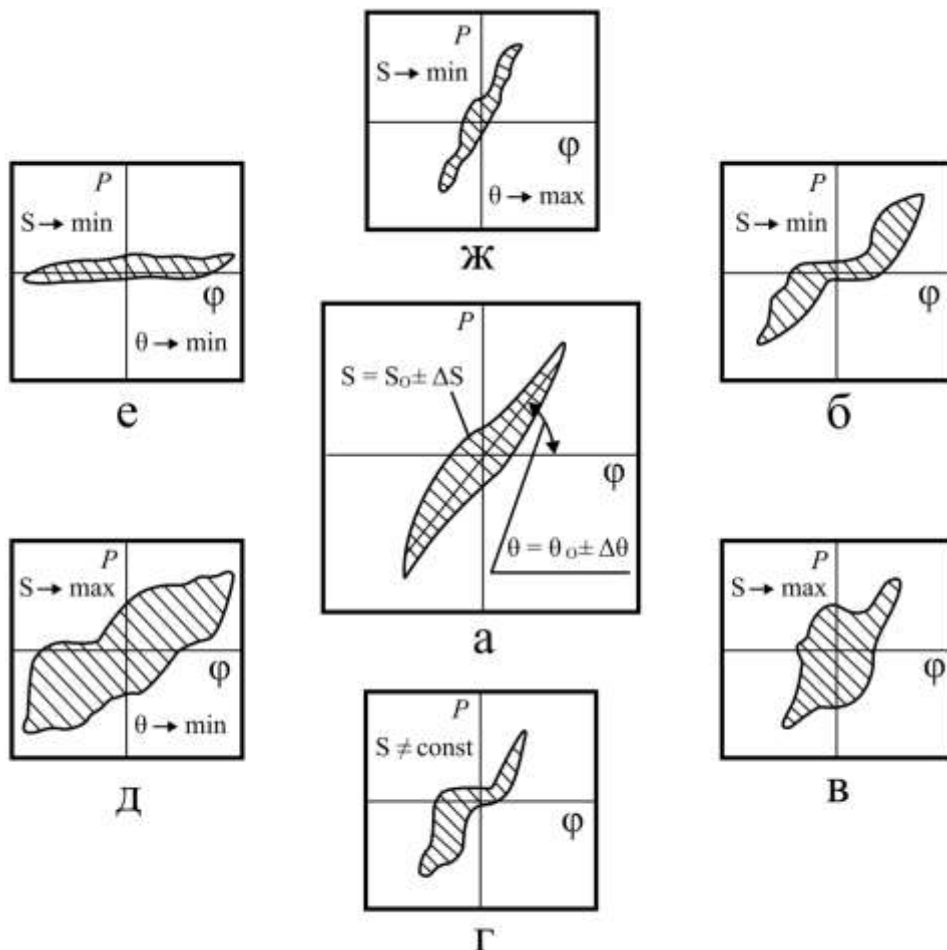


Рисунок 8.2 – Еволюція працездатності рульового управління у фазовому просторі станів: а – справний та працездатний стан; б – збільшені зазори в карданній передачі (або рульовому механізмі); в – збільшені зазори в зчленуваннях кермового механізму і поздовжньої тяги; г – несправність гідропідсилювача; д – збільшені зазори в елементах поперечної тяги; е – відмовний стан (розрив кінематичного ланцюга); ж – заклинювання кермового механізму

8.7 Централізована система забезпечення діагностичної інформації

Для ефективного використання модельного управління працездатністю АТЗ необхідно створення централізованих систем підтримання працездатності. Такі системи призначені для активного діагностування (з індивідуальними регулюваннями та експрес-замінами елементів та вузлів) АТЗ незалежно від їх належності. Їхньою основою є регіональні діагностичні комплекси (РДК) великих автотранспортних підприємств [60].

На РДК виконують активне діагностування рухомого складу великих промислових і сільськогосподарських регіонів, 65% якого зосереджено в дрібних автогосподарствах, що не мають засобів інтенсивної технології профілактики та усунення несправностей.

Централізована діагностична система має створюватися на основі діючих діагностичних комплексів, обладнання яких нині завантажено всього на 45%. Високий рівень їхньої технологічної дисципліни забезпечує необхідну якість і об'єктивність перевірок. Це найбільш економічний шлях створення прогресивної технології управління працездатністю із застосуванням високопродуктивних стендів і точних приладів.

Оптимальний радіус дії РДК – 15 км; раціональний – до 45 км; кількість обслуговуваного парку дрібних автогосподарств та підрозділів – понад 1500 автомобілів та автопоїздів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Levitt T. Marketing immaterieller producte und produkteelgenschaften. Die Macht des Kreativen Marketing. Duesseldorf, BRD, 1986. p. 117–232.
2. Levitt T. The Industrialization of Servise // Harvard Business Review. 1976.
3. Кондратьєва Н. А. Дорогий гарант. *Бізнес*. 2006. № 1 – 2. С. 89 – 92.
4. Автомобільний транспорт України: Стан, проблеми, перспективи розвитку : монографія / за заг. ред. А. М. Редзюка. К. : ДП «ДержавтотрансНДІпроект», 2005. 400 с.
5. Дяченко Г. В., Верітельник Е. А., Дуда Д. В., Кравченко О. П. Дослідження можливості побудови автосервісних підприємств на транспортному коридорі. *Вісник СНУ ім. В. Даля. Технічні науки. Серія транспорт*. 2006. Ч. 2. № 8(102). С. 150–152
6. Дяченко Г. В., Кравченко О. П. Формування ефективної фірмової автосервісної системи у регіоні. *Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту*. 2006. № 2–3. С. 8–11.
7. Гогайзель А. В., Кравченко О. П., Леснічевський А. О., Глайборода О. А., Чайкін А. І., Малик В. Р. Системний аналіз и вибір методів і засобів формування, прогнозування та управління працездатністю автопоїздів. *Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту і експлуатації автомобілів*. 2003. Вип. 16. С. 91 – 96.
8. Матейчик В. П., Марков О. Д. Системний аналіз автосервісу. *LXXIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету* : тези доповідей. Київ : НТУ, 2017. С. 69–70
9. Марков О. Д., Веретельникова Н. В., Степаненко П. В., Ямцун П. Д. Незалежний автосервіс України. *Вісник Національного транспортного університету*. 2012. № 26(1). С. 596–600. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vntu_2012_26\(1\)_121](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vntu_2012_26(1)_121).
10. Марков О. Д., Матейчик В. П., Волков В. П. Інжиніринг систем автосервісу. Харків : Видавництво ХНАДУ, 2021. 508 с.
11. Марков О. Д. Організація автосервісу. Львів : Оріяна-Нова, 1998. 332 с.
12. Campos D. F., Belhot R. V. Gestão de manutenção de frotas de veículos: uma revisão. *Gestão & Produção*, v. 1, n. 2, 1994. p. 171–188.
13. Леснічевський А. О., Кравченко О. П., Пекерман М. В. Досвід створення та функціонування підприємства міжнародних перевезень / XXIII научно-техніческа конференция с международно участие. Сборник доклади. 2004. Варна : Издателство ТУ-Варна. С. 341 – 345.
14. Howard D. Structural changes in Public Transport – Regionalisation Deregulation Franchising Application to Central Europe, Budapest, 1992.
15. Kundendienst Der Zukunft. *Autohaus*. 1991. №18. p. 216–230.

16. Kim Chong – Tae. Corporate performance 1993 (Top 20 Sales & profit Leaders). *Korea Economic Report*. 1994. Т 4. р. 56–68.
17. Sorting It Out. *DES*. 1991. № 6 (June). р. 61–70.
18. Kundendienst – Potential – Analyse. *Autohaus*. 1991. №14/15. р. 22–25.
19. Rocter M. Firm Volvo offers efficient auto service: the number of scheduled brochures is decreasing. Kharkiv department, № 5481/6 – 4 с. // *International Transport Review*. 1981. 20, № 10. р. 479–480.
20. Zeitzen F. Volvo's predictive maintenance and repair system. VPZ-N-L-15208-8 с. // *Lastauto Omnibus &*. 1985. № 3. р. 20–21.
21. Mathe H. Field Service Management. *International Journal of Physical Distribution and Materials Management*. 1986. № 7. р. 13–21.
22. Методи системного аналізу властивостей автомобільної техніки : навч. посіб. / М. Ф. Дмитриченко та ін. К. : НТУ, 2014. 168 с.
23. Канарчук В. Є., Полянський С. К., Дмитрієв М. М. Надійність машин : підручник. К. : Либідь, 2003. 424 с.
24. Гіхман Й. І., Скороход А. В., Ядренко М. В. Теорія імовірностей і математична статистика. Київ : Вища школа, 1988. 436 с.
25. Гогайзель А. В. Ігрове моделювання систем забезпечення працездатністю автотранспортних засобів. К. : УМК ВО, 1998. 88 с.
26. Бажинов О. В., Кравченко О. П. Надійність автомобільних поїздів : монографія. Луганськ : Вид-во «Ноулідж», 2009. 412 с.
27. Mun J. Modeling risk. 2nd ed. Wiley, 2010. 214 с.
28. Кравченко О. П. Дослідження та розробка класифікаційних характеристик працездатності агрегатів автомобіля для діагностичного робота. *Автомобільний транспорт*. Респ. межвід. наук.-техн. зб. Вип. 25. Харків, 1989. С. 72–78.
29. Варфоломеев В. М. Наукові основи побудови і реалізації технології підтримання автомобілів в працездатному стані на базі діагностичної інформації. Дис. ... доктора техн. наук: 05.22.10, ХГАДТУ. Харків, 1994. 362 с.
30. Лудченко О. А. Технічне обслуговування та ремонт автомобілів : підручник. К. : Знання-Прес, 2011. 511 с.
31. Левінсон Б. В., Гарнер В. С. Посібник з діагностування технічного стану автомобілів. Київ : Техніка, 1979. 84 с.
32. Практика діагностування автомобілів : навч. посіб. / Юрченко А. М. та ін. К. : УМК ВО, 1993. 216 с.
33. Триботехнічні характеристики мастильних матеріалів в умовах експлуатації машин і механізмів : монографія / Дмитриченко М. Ф. та ін. – К. : НТУ, 2016. 121 с.
34. Підвищення надійності транспортних засобів шляхом застосування модифікаторів тертя: Монографія / Дмитриченко М. Ф. та ін. К. : НТУ, 2017. 104 с.

35. Вербицький В. Г., Лобас Л. Г. Біфуркації стаціонарних станів в системах з коченням при постійних силових збуреннях. *Прикл. механіка*. 1994. Т. 58. № 5. С. 165 – 170.
36. Гедзюк Т. В. Аналіз процесів самоорганізації в умовах граничного тертя. *Проблеми трибології (Problems of Tribology)*. 2011. № 4. С. 72–75.
37. Говорущенко М. Я., Варфоломеев В. М. Технічна кібернетика транспорту. Харків : ХДАДТУ, 2001. 271 с.
38. Dovhal A. H., Biliakovych O. M., Pryimak L. B. Lifetime improvement of contact brush units of automotive power machines. Part 1. *Problems of Tribology*. V. 30. No 1/115-2025,6-11
39. Haile J. M. *Molecular Dynamics Simulation: Elementary methods*. J. Wiley&Sons, 1997. 489 p.
40. Келле В. В., Крагельський І. В., Гітіс Н. В. Розрахункова оцінка умов «плівкового голодування» у вузлах тертя при адсорбційному та хемосорбційному механізмі відновлення плівок. *Проблеми тертя та зношування*. Київ., 1982. Вип. 21. С. 3–10.
41. Дмитриченко М. Ф., Міланенко О. А. *Мастильна дія оливо в умовах еластогідродинамічного мащення : монографія*. К. : Укравтодор, 2009. 184 с.
42. Говорущенко М. Я. Туренко А. М. Системотехніка транспорту (на прикладі автомобільного транспорту). Харків : ХДАДТУ, 1998. 468 с.
43. Лобас Л. Г., Вербицький В. Г. Якісні та аналітичні методи в динаміці колісних машин. Київ : Наукова думка, 1990. 232 с.
44. Автомобілі. Стійкість : монографія / Вербицький В. Г. та ін. Луганськ : Вид-во «Ноулідж», 2013. 176 с.
45. A. Kravchenko, V. Verbitskii, V. Khrebet, N. Velmagina Steerability and stability of automobile non-linear model / ТЕКА, SOMMISSION OF ENERGETICS IN AGRICULTURE/ AN INTERNATIONAL ON MOTORIZATION, VEHICLE OPERATION, ENERGY EFFICIENCY AND MECHANICAL ENGINEERING. Vol. 12. No 3. Lublin, Poland, 2012, p. 77 – 83.
46. Philip Kotler *Marketing essentials (The Prentice - Hall series in marketing)*. Prentice – Hall, 1984. 556 с.
47. Власенко Я. О., Карпенко С. В. *Основи сучасного маркетингу : навч. посібник*. Київ : Інкос, 2011. 328 с.
48. Сенишин О. С., Кривешко О. В. *Маркетинг : навч. посібник*. Львів : Львівський національний університет імені Івана Франка, 2020. 347 с.
49. Баранов В. В., Кравченко О. П. *Методологія прийняття рішень у задачах експлуатації автотранспортних систем. Автомобільний транспорт: проблеми та перспективи: Матеріали XVI – міжнародної науково – технічної конференції*. Севастополь : СевНТУ, 2013. С. 4 – 7.
50. Кравченко О. П., Баранов В. В., Дроздов В. А., Кравченко К. О. *Прийняття рішень у задачах експлуатації транспортних систем. «Наукові*

нотатки» Луцького національного технічного університету, Міжвузівський збірник. Луцьк, 2010. С. 46 – 51

51. Баранов В. В., Кравченко О. П. Теоретичні передумови ефективності методології прийняття рішень в задачах використання діагностики при забезпеченні працездатності автомобілів. *Логістика промислових регіонів : матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції, Донецьк-Святогірськ, 23 – 25 квітня 2012.* Донецьк, 2012. С. 147 – 150.

52. Баранов В. В., Кравченко О. П. Прийняття ефективних рішень у системах автомобільного транспорту. *Логістика промислових регіонів : матеріали третьої Міжнародної науково-практичної конференції, Донецьк-Святогірськ, 6 – 9 квітня 2011р.* Збірник наукових праць. Донецьк, 2011, С. 229 – 233.

53. Баранов В. В., Кравченко О. П. Управління в стохастичних активних системах. *Вісник СевНТУ. Збірник наукових праць. Серія: Машинобудування та транспорт.* Випуск 121. Севастополь, 2011. С. 72 – 75.

54. Баранов В. В., Кравченко О. П., Кравченко К. О. Методологія рішення задач підвищення ефективності транспортних систем використанням методів теорії прийняття рішень. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету.* Випуск 23. Кіровоград, 2010. С. 168 – 172.

55. Kravchenko O. P., Dizo J., Gorbunov M. I., Kravchenko K. O. Methodology of increasing the efficiency of transport systems using decision-making methods / *ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING AND TRANSPORT. SCIENTIFIC JOURNAL* *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал.* № 1(12), 2019. Луцьк, ЛНТУ, С. 9–13.

56. Кравченко О. П., Верітельник Є. А. Моніторинг витрат запасних частин автомобілів-тягачів VOLVO FH 1242. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ».* № 9(1052). Харків, 2014. С. 33–37.

57. Кравченко О. П., Верітельник Є. А. Підвищення ефективності роботи автотранспортного підприємства шляхом прогнозування потреби в запасних частинах. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту : матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції, 21 – 23 жовтня 2013, Вінниця.* Збірник наукових праць. Вінниця, 2013. С. 120 – 121.

58. Баранов В. В. Рекурентні методи оптимальних рішень у стохастичних системах. Харків : Вища школа, 1981. 145 с.

59. Баранов В. В., Кравченко О. П. Моделі і методи прийняття рішень у проблемі діагностики, ефективності і безпеки автотранспортних систем. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.* Науковий журнал. № 7(125). Ч. 2. 2008. С. 45 – 48.

60. Кравченко О. П., Гогайзель А. В., Малик В. Р. Методи інтенсивного забезпечення працездатності автомобільних причепів : навчальний посібник. К. : УМК ВО, 1990. 116 с.

Додаток А

ОПИС ПРОГРАМИ ВИБОРУ СТРАТЕГІЇ УПРАВЛІННЯ ПРАЦЕЗДАТНІСТЮ АВТОМОБІЛЯ

Розв'язання задачі вибору оптимальної стратегії управління працездатністю підсистеми (елемента) містить програми: PERQ, W, FEL, UTL, SCAL. Програми PERQ для заданого стану JS , управління JUPR та періоду T слугує обчислення вектора перехідних ймовірностей. Число компонент цього вектора дорівнює числу всіх станів NS . В програмі W обчислюється значення безпосередньої корисності управління JUPR, застосовуваного у стані JS .

В підпрограмі-функції FTL розраховуються значення JS -ї компоненти допоміжного вектора $F(V)$ г. Індифікатором управління U прийнято JUPR, а вектор $r \rightarrow R$.

Підпрограма UEL використовується для вибору покращеного управління NUPR у стані JS .

Підпрограма-функція SCAL обчислює скалярний добуток двох векторів розмірності NS .

Щоб скористатися підпрограмою, необхідно задати ϵ -точність обчислення оптимальної стратегії та оцінити за зібраними даними параметри L, β, μ_2, μ_3 .

В програмі використано такі індикатори вказаних величин:

$EPS - \epsilon$; $AL - \alpha$; $BETA - \beta$; $PARL2 - \mu_2$; $PARL3 - \mu_3$.

Для обчислення корисності управління задаються такі величини (підсистема W):

SUN – дохід від експлуатації АТЗ на одиницю пробігу;

C – середня вартість відновлення працездатності підсистеми;

C_3 – середній додатковий штраф (витрати на заміну системи, що відмовила);

$F(JS)$ – вартість ремонту чи усунення несправностей.

Результатом вирішення задачі є ϵ – оптимальна стратегія управління працездатністю, що визначається вектором $\{NU(JS), JS = 1, \overline{NS}\}$. Для кожного стану JS у момент контролю стратегія визначає управління $V = NU(JS)$. Приклади блок-схеми алгоритму програм наведено на рисунках А.1 та А.2.

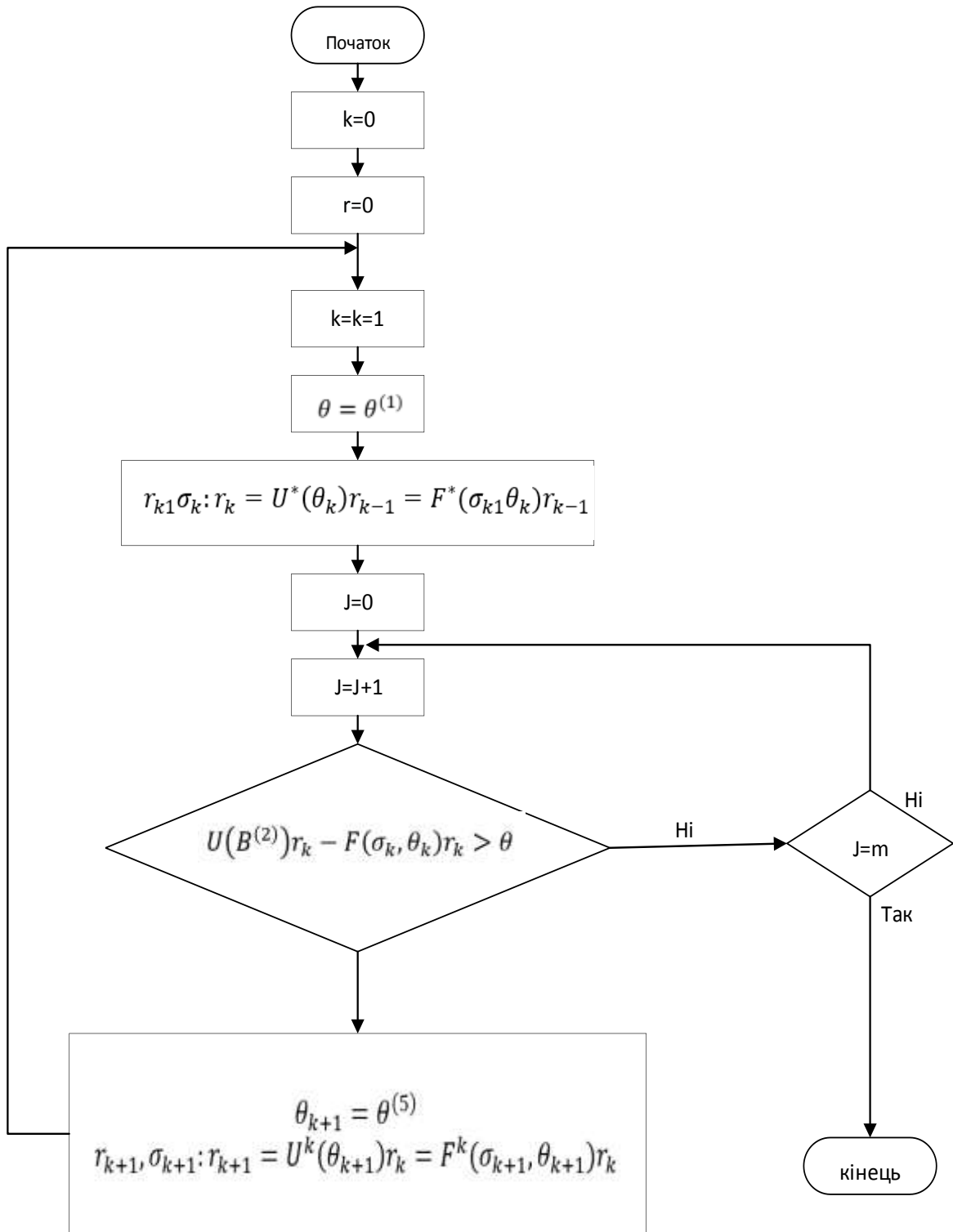


Рисунок А.1 – Блок-схема програми обчислення оптимальної стратегії управління працездатністю причепа

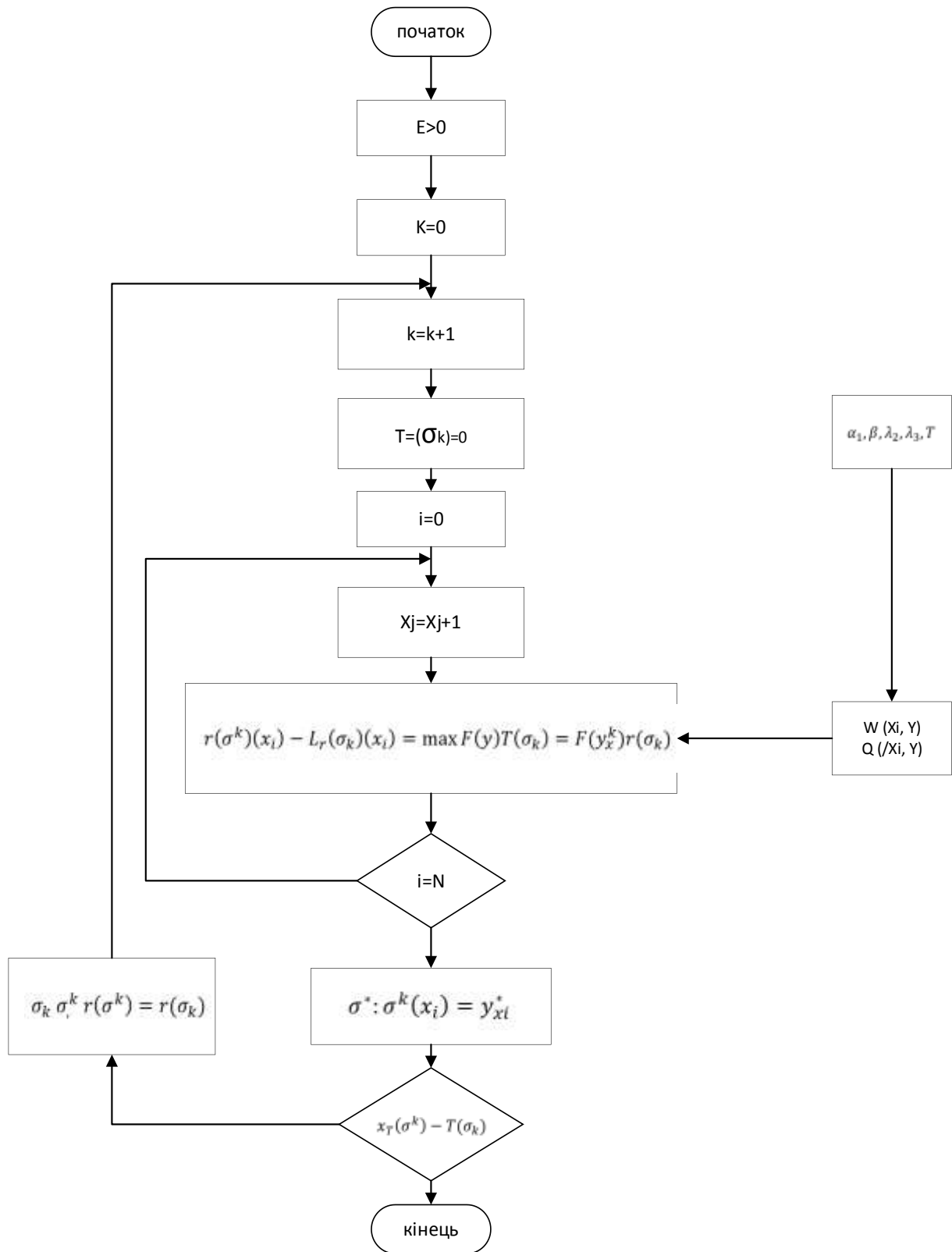


Рисунок А.2 – Блок-схема програми обчислення оптимальної стратегії управління працездатністю сполучення

Електронне навчальне видання

**Олександр Петрович Кравченко,
Юрай Герліці,
Володимир Андрійович Макаров,
Тамара Володимирівна Макарова**

Ефективне управління працездатністю транспортних засобів

Рукопис оформила Т. Макарова

Редактор Т. Старічек

Оригінал-макет виготовила Т. Старічек

Підписано до видання 14.10.2025 р.
Гарнітура Times New Roman.
Зам. № P2025-139.

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
Редакційно-видавничий відділ.
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Хмельницьке шосе, 95,
м. Вінниця, 21021.
press.vntu.edu.ua;
Email: irvc.vntu@gmail.com

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.