

УДК 629.083

DOI: 10.15587/1729-4061.2018.125349

# ОБҐРУНТУВАННЯ ДІАГНОСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АГРЕГАТУ ТРАНСМІСІЇ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛІВ

**В. В. Аулін**

Доктор технічних наук, професор\*

E-mail: AulinVV@gmail.com

**А. В. Гриньків**

Асистент\*

E-mail: AVGrinkiv@gmail.com

**О. В. Диха**

Доктор технічних наук, професор

Кафедра зносостійкості машин

Хмельницький національний університет

вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, Україна, 29016

E-mail: Znm@khnu.km.ua

**М. І. Черновол**

Доктор технічних наук, професор\*

E-mail: rector@knty.kr.ua

**О. Л. Ляшук**

Доктор технічних наук, доцент

Кафедра автомобілів

Тернопільський національний технічний

університет імені Івана Пулюя

вул. Руська, 56, м. Тернопіль, Україна, 46001

E-mail: Kafam@tu.edu.te.ua

**С. В. Лисенко**

Кандидат технічних наук, доцент\*

E-mail: SV07091976@gmail.com

\*Кафедра експлуатації та ремонту машин

Центральноукраїнський національний технічний університет  
пр. Університетський, 8, м. Кропивницький, Україна, 25006

*Проведено теоретичне та експериментальне дослідження контрольних параметрів агрегату трансмісії засобів транспорту. Виявлено, що для адаптації їх технічної експлуатації необхідно формувати діагностичну базу даних агрегату для подальшого аналізу і управління. Визначено, що критерій відносної чутливості дозволяє формувати діагностичну базу з подальшим контролем та управлінням технічним станом коробки переключення передач*

*Ключові слова: діагностичний параметр, показник надійності, відносна чутливість, засіб транспорту, агрегат трансмісії*

*Проведено теоретическое и экспериментальное исследование контрольных параметров агрегата трансмиссии средств транспорта. Выведено, что для адаптации их технической эксплуатации необходимо формировать диагностическую базу данных агрегата для дальнейшего анализа и управления. Определено, что критерий относительной чувствительности дает возможность формировать диагностическую базу с последующим контролем и управлением техническим состоянием коробки переключения передач*

*Ключевые слова: диагностический параметр, показатель надежности, относительная чувствительность, средство транспорта, агрегат трансмиссии*

## 1. Вступ

Найбільш трудомістким процесом при експлуатації засобів транспорту є процес діагностування систем та агрегатів. Важко піддається автоматизації комплекс операцій процесу діагностування технічного стану засобів транспорту в цілому. Важливе значення при контролі та управлінні технічним станом має розвиток засобів теоретичної та інформаційної підтримки, що забезпечують формування необхідної діагностичної інформації для

спеціалістів сервісу та експлуатації. Ретроспективний аналіз практики експлуатації засобів транспорту в різних умовах показує, що середній час підтримання та відновлення технічного стану систем та агрегатів засобів транспорту значно перевищує заявлений в нормативно-технічній документації. Використання системи управління технічним станом на основі статистичної та діагностичної інформації сприяє скороченню часу обслуговування засобів транспорту. Це в свою чергу призводить до підвищення комплексних експлуатаційних показників, таких

як коефіцієнти технічної готовності та використання. Основний час технічного обслуговування систем та агрегатів засобів транспорту займає виконання операцій технічного діагностування. Цей факт необхідно враховувати при формуванні діагностичної бази даних технічного стану. Зазначене підтверджує важливе практичне значення досліджень, спрямованих на скорочення часу технічного обслуговування за рахунок вдосконалення методів формування та обробки діагностичної бази даних, що є актуальним науково-технічним завданням.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Вдосконалення експрес-методів діагностики спряжень вузлів та агрегатів, а також вирішення питання застосування контролю неруйнівних методів редукторів конвеєрних стрічок як засобу транспорту висвітлено в роботі [1]. Особливу увагу автори роботи приділяли таким типам діагностики технічного стану, як тепловий контроль та аналіз стану мастильних матеріалів. Актуальність здійснення типів неруйнівного контролю, представлених у роботі, визначається підвищенням енергоефективності транспортних систем у важких умовах експлуатації, зокрема, редукторів конвеєрів. Періодичні глибинна спектрально-емісійної діагностики та моніторинг температурного режиму експлуатації робочої оливи при роботі контрольного обладнання та його технічного стану дозволяє контролювати фактичний технічний стан коробки передач засобу транспорту. Але виявлення і формування необхідної діагностичної інформації та її періодичності авторами так і не вирішилось. Дослідження технічного стану автоматичної трансмісії 4R за допомогою установки датчиків та формування їх можливих комбінацій розташування проводиться для контролю їх ефективності та виявлення несправності [2]. В даній роботі не сформовані операції узгодження діагностичної інформації з показниками надійності, що складно дає змогу оцінити дані комбінації датчиків. Виявлено, що в транспортних засобах 30...33 % паливної енергії використовується для подолання сил тертя в трансмісії, двигуні та інших системах та агрегатах. У загальній складності близько 32...44 % паливної енергії використовується для переміщення автомобіля. Решта витрачається на паразитичні фрикційні втрати, які складають 23...32 % паливної енергії засобів транспорту, що пов'язані з несправностями їх систем та агрегатів під час експлуатації [3]. Проведені дослідження встановлення ефективності витрати паливної енергії дають змогу сформувати перелік трибоспряжень засобів транспорту, що найбільше втрачають свої працездатні функції під час експлуатації. Але автори роботи не вирішили питання їх раціонального контролю.

Реалізацію формування діагностичної бази та можливість прогнозування технічного стану зубчастих передач розглядали [4], ґрунтуючись на спектральній емісії, але перебір діагностичної інформації під час їх напрацювання авторами не виконано. Дослідження зміни діагностичних параметрів трансмісій з формуванням Байєсівської чутливості розглянуто в роботі [5], але чутливість в роботі розглядалась абсолютною, з використанням якої виникли проблеми розмірності, які додатково необхідно вирішувати. Обґрунтування системи діагностики трансмісій автомобілів з використанням теорії нечітких множин

з врахуванням меж діагностичних параметрів проведено в роботі [6]. В даній роботі використовувався математичний апарат нечіткої логіки, що дає змогу варіювати межами зміни діагностичних параметрів, але перебір їх на різних інтервалах пробігу даний апарат не дав вирішити цю проблему.

В роботі [7] розглянуто вдосконалення та формування наступних напрямків використання теорії чутливості, а саме: визначення ступеня невизначеності у вхідних даних аналізу, формування вибірки бази даних за допомогою аналізу, подолання невизначеності у базі даних. Особлива увага авторів спрямована на результати аналізу чутливості з описами та ілюстраціями, наведеними для наступних процедур: кореляційного та регресійного аналізу, двомірного тесту Колмогорова-Смірнова, збіг коефіцієнту зверху вниз. Вирішення питань для розглянутих процедур виконувалось на основі використання абсолютної чутливості і практичної реалізації для дослідження технічного стану агрегатів трансмісій авторами не отримано.

Загальну увагу аналізу чутливості приділили автори роботи [8], в якій сформували шкалу збурень досліджуваних параметрів, яка може бути визначена як заданий розмір сусідньої області чутливості навколо параметрів. Автори зазначають, що масштаби збурень властиві будь-якому локальному та глобальному аналізу чутливості. Показано, як підходи на основі похідних (метод Морріса) зосереджується на дрібних збуреннях, а підходи на основі варіацій (метод Соболя) зосереджуються на масштабних збуреннях. Запропонований аналіз з різними реальними моделями досліджуваних процесів демонструє суттєві наслідки суб'єктивності у виборі масштабів збурень та необхідність розробки стратегій для вирішення цих проблем. Також автори однозначно охарактеризували залежність масштабів збурень та розробили процедури, які охоплюють всю базу даних, але стосовно відносної чутливості параметрів у повному спектрі масштабів збурень автори не вирішили.

Подальшого розвитку теорія чутливості набула у вигляді теорії відносної чутливості функцій (сенситивів), відображеної в роботі [9]. Теорію сенситивів використано при вирішенні завдань оцінки точності математичних моделей процесів тертя та зношування і вимірювання триботехнічних характеристик [10]. Проведений аналіз теорії відносної чутливості функцій виявив істотні переваги і широкі аспекти її застосування у порівнянні з абсолютною чутливістю. В розглянутих роботах автори не сформували опису зміни діагностичної інформації відносно показників надійності, а тільки запропонували оцінку ентропії трибоспряжень.

Використання теорії відносної чутливості дає змогу вирішити завдання технічної експлуатації. Розв'язання потребують завдання: оцінка технічного стану та еволюція його розвитку, визначення показників надійності систем і агрегатів засобів транспорту за діагностичною інформацією та зв'язків між ними. Математичний апарат для дослідження та формування діагностичних параметрів на сьогодні використано не в повній мірі. Основними методами, якими користуються, є: методи теорії надійності, інформації, теорії похибок, автоматичного керування та інші. В той час, якісну зміну та взаємозв'язок між показниками надійності та діагностичними параметрами так і не сформовано. Формування цього взаємозв'язку дозволяють методи теорії відносної чутливості.

### 3. Мета та задачі дослідження

Проведені дослідження ставили за мету визначити та сформулювати характер зміни досліджуваних показників надійності і діагностичних параметрів технічного стану агрегату трансмісії засобів транспорту. Ґрунтуючись на них можливо розробити процес формування раціональної діагностичної бази з формуванням теоретичного апарату вибору інформативно значущих діагностичних параметрів.

Для реалізації поставленої мети вирішували наступні завдання:

- розробити теоретичні передумови опису технічного стану агрегату за діагностичними параметрами на основі теорії відносної чутливості;
- сформулювати зв'язок між діагностичними параметрами та показниками надійності систем та агрегатів засобів транспорту;
- запропонувати критерій вибору діагностичних параметрів для формування раціональної діагностичної бази даних.

### 4. Матеріали і методи дослідження технічного стану коробки переключення передач вантажного автомобіля

Спостереження в умовах експлуатації є процесом, що забезпечує отримання достовірної інформації про технічний стан досліджуваних систем та агрегатів засобів транспорту. При плануванні спостережень визначається необхідний об'єм інформації для отримання оцінок показників надійності із заданою точністю і достовірністю. Дослідження ймовірності появи відмов передбачає число об'єктів спостережень  $N$ .

В якості початкових даних розрахунку мінімального об'єму спостережень використано: довірчу ймовірність  $\gamma$ , тобто ймовірність того, що довірчий інтервал охоплює дійсне значення параметра за вибірковими даними, яка вибирається з ряду 0,80; 0,90; 0,95; 0,99 і є характеристикою надійності показника; гранична відносна похибка  $\delta$ , що характеризує інтервал, який із заданою ймовірністю охоплює невідоме значення оцінки параметру, яка вибирається з ряду 0,05, 0,10, 0,15, 0,20 і є мірою точності оцінки показника.

При цьому довірчим інтервалом  $I_\gamma$  є інтервал, який покриває невідомий діагностичний параметр із заданою надійністю  $\gamma$ .

За відомим законом розподілу випадкової величини (ймовірність появи відмов), а також задаючи граничну відносну похибку  $\delta=0,15$  і довірчу ймовірність  $\gamma=0,8$  при коефіцієнтах варіації 0,3; 0,6; 1 (план NUn) визначається кількість об'єктів спостережень. При цьому для нормального закону розподілу необхідно досліджувати не менше п'яти об'єктів спостережень; для експоненціального закону – не менше п'ятнадцяти, а для розподілу Вейбулла-Гнеденка – не менше сорока. Число об'єктів спостережень для експоненціального закону розподілу встановлюється по таблицях [11] і при  $P(L)=0,9$  з довірчою ймовірністю  $\gamma=0,8$  дорівнюватиме  $N \geq 12$ , тому було прийнято, що мінімальний об'єм вибірки  $N=12$ .

В ході проведення досліджень визначали діагностичні параметри проб свіжої і робочої трансмісійної оливи різної міри забрудненості з часом напрацювання. Під час експлуатації засобів транспорту використовували марку

трансмісійну оливу марки Агринол ТСП-15К, яка за міжнародними класифікаціями відповідає API GL-3; SAE 90. Відбір проб оливи відбувався через кожні 2000 км. пробігу засобів транспорту, об'єм проби складав 600 мл робочої трансмісійної оливи, що необхідно для п'яти повторень визначення досліджуваних діагностичних параметрів при кожному відборі проб.

Діагностичні параметри трансмісійної оливи визначали методами, встановленими в ДСТУ: лужне число – ДСТУ 5094:2008, вміст механічних домішок – ДСТУ ГОСТ 6370-83 (діє в Україні).

Отримані значення діагностичних параметрів і отриманих показників порівнювали з гранично-допустимими значеннями. Окрім оцінки фізико-хімічних характеристик і властивостей, згідно ДСТУ, проводили і експрес-аналіз з використанням EgaSpec Oil, мікроскопу «Біолам Р-11». Мікрофото зйомки проводили при налаштуванні роздільної здатності мікроскопу на збільшення  $\times 500$  на зразках проб в умовах хімічної лабораторії. Дисперсний склад робочої трансмісійної оливи, за допомогою персонального комп'ютера, з використанням цифрових фотографій, здійснювали за допомогою мікроскопу. Робоча трансмісійна олива з часом темнішає за рахунок утворення дрібно дисперсних та інших забруднюючих включень. Визначили відсоток цих включень за допомогою пакету програмного забезпечення Adobe Photoshop CC 2016 та обробки і аналізу цифрових фотографій на ПК. За допомогою даного пакету програмного забезпечення можливе дослідження відсоткового співвідношення включень, які затемнюють колір оливи. Це проводили на відібраних пробах оливи цифрових фотографій. Цифрову інформацію додають у середовище графічних редакторів, що підтримують функцію гістограмного розподілу кольорів. Після цього необхідно переконвертувати у чорно-білу гаму та відібрати розподіл від 0...132 гамми кольорів. Внаслідок цього на даному інтервалі отримуємо значення відсоткового включення, кількості забруднюючих та спрацьовуючих частинок в трансмісійній оливі.

Діелектричну проникність трансмісійної оливи в роботі вимірювали за ємністю конденсаторів методом вольтметра – амперметра (рис. 1), який застосовують для виміру порівняно великих ємностей.

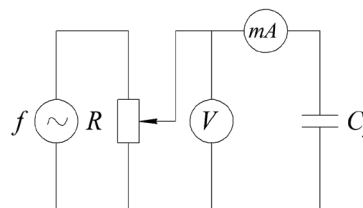


Рис. 1. Схеми вимірювання діелектричної проникності оливи методом вольтметра-амперметра

Живлення вимірювальної схеми зазвичай здійснювалось від джерела струму низької частоти:  $f=50\text{...}1000$  Гц, а тому нехтували активними втратами в конденсаторах та впливом реактивних параметрів вимірювальних приладів і шкідливими зв'язками.

Конденсатор  $C_x$ , що перевіряється, включається в ланцюг змінного електричного струму відомої частоти  $f$ , і реостатом (чи потенціометром)  $R$  встановлюють потрібне, за умовами випробування, або зручне для відліку значення струму  $I$  або напруги  $U$ . За показниками

приладів змінного струму розраховували повний опір конденсатора:

$$Z = (R^2 + X^2)^{1/2} = U / I, \tag{1}$$

де  $R$  і  $X_C = (2\pi f C_x)^{-1}$  – відповідно активна і реактивна складові його опору. Якщо втрати не значні, тобто  $R \ll X_C$ , то вимірювальна ємність визначається формулою:

$$C_x = (2\pi f U)^{-1}. \tag{2}$$

При цьому послідовно з джерелом змінного струму частоти  $f$  включається джерело постійного струму, напруга, на електроконтактах якого  $U_0$ , повинна перевищувати амплітуду змінної напруги. Тоді в ланцюзі діятиме пульсуюча напруга, безпечна для конденсатора за умови правильної полярності його включення в схему. Пульсуючу напругу можна також отримати при послідовному включенні у вимірювальну схему діоду. Зазначимо, що в усіх випадках вольтметр  $V$  і міліамперметр  $mA$  повинні вимірювати лише зміну складових напруги і струму. Цим можна пояснити закритість схеми входу. Для даного методу вимірювання використовувати мультиметр і ємнісну комірку. Мультиметр лабораторний MASTECH MS8040 відіграє роль вимірювального приладу, а ємнісна комірка відображає конденсатор з діелектричним середовищем, в якості якого слугує робоча трансмісійна олива. Ємнісна комірка представляє собою два електроди, що з'єднані між собою діелектриком та мають порожнину для заповнення робочою оливою.

Методику дослідження технічного стану коробки переключення передач сформовано та розроблено, спираючись на діючі ДСТУ (ГОСТ) та технічні умови на експлуатацію вантажних автомобілів. До досліджуваного парку входили вантажні автомобілі: КамАЗ 4310 (5 шт), КамАЗ 43105 (6 шт), КамАЗ 43114 (4 шт).

### 5. Результати дослідження та формування раціональної діагностичної бази даних технічного стану трансмісій засобів транспорту

В процесі експлуатації з виконанням певної роботи відбувається зміна діагностичних параметрів систем і агрегатів засобів транспорту. Важливим завданням технічної експлуатації є врахування розвитку або закономірностей зміни. Вектори параметрів, що характеризують засоби транспорту як технічну систему в експлуатації, відображено у вигляді функціональної схеми взаємозв'язку (рис. 2).

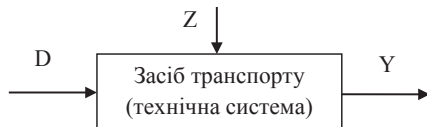


Рис. 2. Функціональна схема взаємозв'язку сукупностей параметрів засобів транспорту:

$D$  – сукупність внутрішніх (діагностичних) параметрів,  $Z = Z_1 + Z_2$  – сукупність параметрів умов експлуатації  $Z_1$  та технічних впливів  $Z_2$ ,  $Y$  – сукупність параметрів функціонального призначення спряжень деталей, систем і агрегатів засобів транспорту

Складний взаємозв'язок сукупностей різномірних параметрів в функціональній схемі потребує математичної інтерпретації та узагальнення можливих зв'язків, а також більш якісного проведення контролю та моніторингу технічного стану засобів транспорту [12]. Виявлено, що узагальнені функціональні залежності параметрів математичних моделей систем і агрегатів можна подати у вигляді функцій сукупностей прямих зв'язків:

$$y_i = f(D_i, \alpha_i, z_i, \delta_i), \quad i = \overline{1, n}, \tag{3}$$

а також сукупностей зворотних зв'язків, пов'язаних з певним рівнем надійності та проведенням операцій технічних обслуговувань:

$$y_i = f(D_i, \beta_i, \tilde{z}_i, \gamma_i), \quad i = \overline{1, n}, \tag{4}$$

де  $D_i$  – сукупність діагностичних параметрів технічного стану систем і агрегатів ЗТ,  $\tilde{z}_i$  – збурення параметрів керування технічним станом при зворотному зв'язку,  $\gamma_i$  – параметри прийняття рішень, стосовно технічної експлуатації.

За умов фіксованих математичних моделей (3), (4) технічний стан визначається вибором сукупності діагностичних параметрів –  $\alpha_i$ , параметрів умов експлуатації –  $\beta_i$ , похибки вимірювання діагностичних параметрів –  $\delta_i$ , параметрів прийняття рішень –  $\gamma_i$ .

Сукупність технічних та експлуатаційних параметрів, а також сукупність функціональних станів засобів транспорту, можна звести в один вектор  $\bar{Y}$ . За різних умов експлуатації технічний стан буде визначатися складною векторною функцією:

$$\bar{Y} = (\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \bar{\gamma}, \bar{\delta}). \tag{5}$$

Умову нормального функціонування ЗТ, з урахуванням цієї векторної функції (5), можливо відобразити у вигляді співвідношення множин:

$$R(\bar{Y}) \subset M_y, \tag{6}$$

де  $R(\bar{Y})$  – простір векторів значень технічного стану  $\bar{Y}$  спряжень деталей, систем і агрегатів та засобів транспорту в цілому, які вони можуть набувати під час експлуатації;  $M_y$  – множина працездатних станів. Співвідношення (6) свідчить, що для забезпечення працездатного стану засобів транспорту необхідно постійно контролювати параметри, які описують технічний стан систем і агрегатів засобу транспорту в даних умовах експлуатації. Здійснювати контроль умов експлуатації засобів транспорту, враховувати і контролювати динамічну зміну технічного стану важко та енергозатратно. Визначено, що системи та агрегати засобів транспорту можуть на певному проміжку напрацювання знаходитись в різних експлуатаційних умовах [11]. Значення похибки діагностичного параметру є також немаловажливим фактором, що впливає на технічне обслуговування систем і агрегатів засобів транспорту. В зв'язку з цим прийняття рішень та використання стратегій відновлення працездатного стану засобів транспорту потребують теоретичного обґрунтування. В зв'язку з цим зазначаються опис та враховуються фактори, що істотно впливають під час експлуатації на характеру зміни технічного стану систем, агрегатів і засобів транспорту в цілому.



Експлуатацію засобів транспорту, з теоретичної точки зору, доцільно відображати як математичну модель причинно-наслідкових зв'язків між сукупністю факторів та параметрів, що відображають причину, та цільовою функцією, яка характеризує наслідок. Зазначимо, що при цьому велика кількість елементів систем і агрегатів засобів транспорту взаємодіють як між собою, так із зовнішнім середовищем.

Інформацію про процеси, які протікають в них під час експлуатації, та технічний стан отримують різними фізичними методами. Для ефективної обробки отриманої бази даних пропонується використання методів узагальненої теорії графів та теорії чутливості функції. Дослідження зміни функції технічного стану від зміни істотних факторів та параметрів за допомогою критерію відносної чутливості (сенситиву) має істотні переваги у порівнянні з методами абсолютної чутливості, в основі яких покладено зміст похідної. В першу чергу це те, що критерій відносної чутливості є безрозмірною величиною і має ряд інших характерних властивостей [7], яких слід дотримуватись та використовувати при аналізі бази даних про технічний стан систем і агрегатів та засобів транспорту в цілому.

Математична сутність критерію полягає у побудові відношення відносного приросту цільової функції стану до відносного приросту фактору:

$$sen y_i(x) = \frac{dy_i(x)}{y_i(x)} \cdot \frac{x}{dx} = \frac{dy_i(x)}{dx} \cdot \frac{x}{y_i(x)} \quad (7)$$

Цю форму представлення критерію відносної чутливості (сенситиву) пропонується використовувати для оптимальної оцінки будь-якого діагностичного параметру, який необхідно піддавати контролю при визначенні технічного стану систем і агрегатів засобів транспорту. Взявши за основу вираз (7), критерій відносної чутливості кожного діагностичного параметру відносно ідеалізовано представленої функції технічного стану засобів транспорту має вигляд:

$$sen D_i(\alpha_i) = \frac{D'_i(\alpha_i)}{D_i} \cdot \alpha_i = f'_{\alpha_i}(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i) \cdot \frac{\alpha_i}{f(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i)} \quad (8)$$

де  $D_i(\alpha_i)$  – значення діагностичних параметрів систем та агрегатів засобів транспорту;  $\alpha_i$  – ідеалізація всієї сукупності діагностичних параметрів;  $\beta_i$  – ідеалізація параметрів умов експлуатації засобів транспорту;  $\delta_i$  – ідеалізація похибки вимірювання діагностичних параметрів;  $\gamma_i$  – ідеалізація параметрів прийняття рішень в технічній експлуатації засобів транспорту;  $f'_{\alpha_i}(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i)$  – функція технічного стану засобу транспорту на основі сформованих параметрів.

Основну увагу зосереджено на загальний характер дослідження функцій технічного стану систем, агрегатів і засобів транспорту в цілому і закономірності її відносної зміни. При цьому відносна зміна приросту функції від відносного приросту сукупності діагностичних параметрів відображає зміну відносної чутливості функції стану з напрацюванням. Будеться необхідний математичний апарат з використанням властивостей абсолютної і відносної чутливостей функції технічного стану. Найбільш поширеною мірою абсолютної чутливості функцій стану

до зміни факторів та діагностичних параметрів є їх кінцевий приріст або диференціал. Для функції стану  $S(D)$  одного фактору (діагностичного параметру)  $D$ , маємо:

$$dS(D) = \frac{dS(D)}{dD} dD \quad (9)$$

Абсолютна чутливість функції стану, тобто похідна від функції стану, як правило має розмірність абсолютної чутливості діагностичного параметру:

$$\frac{dS(D)}{dD} = S'(D) \quad (10)$$

Якщо функція стану залежить від вектора діагностичних параметрів  $\vec{D} = (D_1, D_2, \dots, D_n)$ , то розрізняють цілу систему часткових абсолютних чутливостей функції стану:

$$\begin{aligned} \frac{dS(D_1, D_2, \dots, D_n)}{dD_1} &= S'_{D_1}(D_1, D_2, \dots, D_n); \\ \frac{dS(D_1, D_2, \dots, D_n)}{dD_2} &= S'_{D_2}(D_1, D_2, \dots, D_n); \dots; \\ \frac{dS(D_1, D_2, \dots, D_n)}{dD_n} &= S'_{D_n}(D_1, D_2, \dots, D_n). \end{aligned} \quad (11)$$

Критерій відносної чутливості цільової функції технічного стану  $S(D)$  дорівнює:

$$sen S(D) = S^s(D) = \frac{dS(D)}{S(D)} \bigg/ \frac{dD}{D} = S'(D) \cdot \frac{D}{S(D)} \quad (12)$$

де  $dS(D)/S(D)$ ,  $dD/D$  – відносні прирости цільової функції і діагностичного параметру.

У разі залежності функції стану від вектора діагностичних параметрів, часткові критерії відносної чутливості (сенситиви) дорівнюють:

$$\begin{aligned} Sen S_{D_1}(D_i) &= S'_{D_1}(D_i) \cdot \frac{D_1}{S_{D_1}(D_i)}; \\ Sen S_{D_2}(D_i) &= S'_{D_2}(D_i) \cdot \frac{D_2}{S_{D_2}(D_i)}; \dots; \\ Sen S_{D_n}(D_i) &= S'_{D_n}(D_i) \cdot \frac{D_i}{S_{D_n}(D_i)}. \end{aligned} \quad (13)$$

При графічному відображенні залежності критерію корисним є застосування правила диференціювання логарифмічної функції:

$$\begin{aligned} sen S(D) = S^s(D) &= \\ &= \frac{d(\ln S(D))}{d \ln D} = \frac{(\ln S(D))' S(D)}{(\ln D)' D}. \end{aligned} \quad (14)$$

В такому представленні критерій подається як відношення похідної (частинної похідної) від логарифму функції стану до похідної логарифму діагностичних параметрів. Зазначимо, що на практиці має сенс використання абсолютної та відносної чутливості першого і другого порядків. Абсолютна чутливість першого порядку від функції стану – це швидкість зміни приросту функції стану від

зміни значень діагностичних параметрів. Абсолютна чутливість другого порядку – це швидкість швидкості зміни функції стану або прискорення зміни приросту функції зі зміною приросту діагностичного параметру. Абсолютну чутливість другого і більш високих порядків можна використовувати для аналізу сходження розрахункових алгоритмів. Оскільки відносна чутливості першого і другого порядку функції стану від діагностичних параметрів є безрозмірними, то ефективно можна використовувати як критерій відносної чутливості при аналізі бази даних інформаційних технологій і методів обробки на ПК.

При розгляді сукупності діагностичних параметрів критерій відносної чутливості узагальнюється на випадок довільного числа суми або різниці функцій зміни діагностичних параметрів, що складають функцію стану систем та агрегатів засобів транспорту:

$$S(D) = U_1(D) + U_2(D) + U_3(D) + U_4(D) + U_5(D) + \dots = \sum_{i=1}^n U_i(D); \quad (15)$$

$$\begin{aligned} Sen(S(D)) = Sen(S(U_1(D))) \frac{U_1(D)}{\sum U_i(D)} + \\ + Sen(S(U_2(D))) \frac{U_2(D)}{\sum U_i(D)} + \\ + Sen(S(U_3(D))) \frac{U_3(D)}{\sum U_i(D)} + \dots + \\ + Sen(S(U_5(D))) \frac{U_5(D)}{\sum U_i(D)} + \dots \end{aligned} \quad (16)$$

де  $Sen(S(D))$  – загальний критерій відносної чутливості функції стану від діагностичних параметрів  $D$ ;  $Sen(S(U_i))$  – часткові критерії відносної чутливості;  $U_i(D)$ ,  $i=1, N$  – функції зміни відповідного діагностичного параметру для різних систем і агрегатів засобів транспорту.

Використовуючи методику реалізації аналізу теорії чутливості функцій стану можливо отримати частинні критерії відносної чутливості по кожному з діагностичних параметрів на різних періодах пробігу. При цьому функцію діагностичного параметру та загальну функцію надійності (ймовірність безвідмовної роботи) засобів транспорту або його систем і агрегатів можна вважати параметрично заданими:

$$\begin{cases} x_i = D_j(L), \\ y_i = P_i(L), \end{cases} \quad (17)$$

де  $i$  – індекс системи, або агрегату,  $j$  – індекс діагностичного параметру технічного стану систем і агрегатів,  $P_i$  – ймовірність їх безвідмовної роботи.

Використовуючи правила знаходження критерію відносної чутливості та його властивості відносно надійності систем або агрегату та засобу транспорту в цілому, можна отримати критерій відносної чутливості діагностичного параметру як функції пробігу ЗТ:

$$sen D_j(L) = \frac{P_i(L)'}{D_j(L)'} \cdot \frac{D_j(L)}{P_i(L)} = \frac{dP_i}{dL} \cdot \frac{D_j(L)}{dD_j \cdot P_i(L)}. \quad (18)$$

Зазначимо, що рівняння (18) описує залежності відносної чутливості діагностичних параметрів від функції надійності систем і агрегатів та засобів транспорту в цілому, але потребує уточнення тенденції зміни функції діагностичного параметру  $D_j(L)$  від пробігу. Відомо [5], що для цього використовуються методи екстраполяції, які є найдоступнішими методами серед всієї сукупності при формуванні досліджуваних функцій діагностичних параметрів. Використання екстраполяції має у своїй основі припущення про те, що даний процес зміни діагностичного параметра є поєднанням двох складових: регулярної і випадкової:

$$D_j(L) = D_j(\bar{a}, L) + d_j(L). \quad (19)$$

Вважається, що регулярна складова діагностичного параметра  $D(\bar{a}, L)$  представляє собою функцію від пробігу, що описується вектором параметрів  $\bar{a}$ , які зберігають свої значення на екстраполяційний період. Ця складова є трендом або тенденцією. При цьому існує інтуїтивне уявлення про очищену від випадкових впливів шуму, перешкод, що впливають на сутність процесу зміни діагностичного параметру. В той час для більшості технічних, природних процесів не можна однозначно відокремити тенденцію від випадкових впливів, оскільки випадкова складова  $d_j(L)$  зазвичай вважається некорельованим процесом з нульовим математичним очікуванням. Оцінка складової потрібна для подальшого визначення точності отриманої функції діагностичного параметру  $D_j(L)$ . Екстраполяційні методи ґрунтуються на виділенні найкращої в деякому розумінні опису тенденції і на визначенні досліджуваних значень діагностичних параметрів шляхом екстраполяції.

Специфічними рисами екстраполяції можна назвати методи попередньої обробки наявної бази даних. Мета перетворення зведення до більш зручного виду застосування для аналізу логіки і фізики процесів зміни діагностичних параметрів. Це впливає на вибір виду екстраполяційної функції, та визначення меж зміни параметрів.

Таким чином, дослідження функції технічного стану систем, агрегатів і засобів транспорту в цілому, що ґрунтуються на основі ряду діагностичних параметрів, можливе за рахунок використання теорії відносної чутливості. Перевагою використання критерію відносної чутливості в аналізі технічного стану є його безрозмірність. Крім цього, він відображує фактичну відносну зміну діагностичного параметру та показника надійності (ймовірності безвідмовної роботи) систем, агрегатів і засобів транспорту в цілому з пробігом.

В процесі обробки бази даних визначали статистичну ймовірність безвідмовної роботи  $P_j$  коробки переключення передач вантажних автомобілів сімейства КамАЗ, модельний ряд та їх відповідна кількість зазначена в п. 4. Умови експлуатації, тип та модифікація досліджуваного агрегату засобів транспорту однакові у всього розглянутого парку вантажних автомобілів. Мінімальний об'єм вибірки дослідження технічного стану коробки переключення передач з довірчою ймовірністю 0,9, довірчим інтервалом 10 %, генеральної сукупності парку засобів транспорту 15, що зазначено в п. 4, склала 12 шт. Розрахунок статистичної ймовірності досліджуваного агрегату на інтервалах пробігу проводився з використанням експлуатаційних спрощень. Дослідженню підлягали 8 основних спряжень коробки переключенню передач, таких

як зубчасті зачеплення, синхронізатори, підшипники. Загальна кількість спряжень на досліджуваній вибірці склала 96 шт. Поява признаку несправності спряжень в досліджуваних агрегатах на інтервалі пробігу фіксували як відмову. Статистична ймовірність безвідмовної роботи розраховувалась як протилежна подія відмови, за таких умов можливо використати формулу:

$$P_j = 1 - \frac{n_b}{N_C}, \tag{20}$$

де  $n_b$  – кількість відмов на певному інтервалі пробігу;  $N_C$  – загальна кількість спряжень досліджуваних агрегатів.

Кількість відмов, що мали місце на інтервалі пробігу 0...60 тис. км, і ряд розподілу показника  $P_j$  для досліджуваного агрегату представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Розподіли кількості відмов та ймовірності безвідмовної роботи коробки переключення передач в залежності від пробігу засобів транспорту

Кількість відмов та ймовірність безвідмовної роботи	Інтервали пробігу, тис. км.				
	0...12	12...24	24...36	36...48	48...60
Коробка переключення передач					
$N$	1	2	11	12	14
$P$	0,989	0,979	0,885	0,875	0,854

Зведені дані табл. 1 дають можливість більш детально провести аналіз надійності агрегату трансмісії. На основі даних ймовірності безвідмовної роботи побудована математична модель у вигляді рівняння регресії:

$$P_{\text{кпп}}(L) = 7,26 \cdot 10^{-15} \cdot L^3 - 7,094 \cdot 10^{-10} \cdot L^2 + 1,64 \cdot 10^{-5} \cdot L + 0,8839, \tag{21}$$

де  $P_{\text{кпп}}(L)$  – статистична ймовірність безвідмовної роботи коробки переключення передач залежно від пробігу засобу транспорту.

Графічна інтерпретація цієї моделі дана на рис. 3.

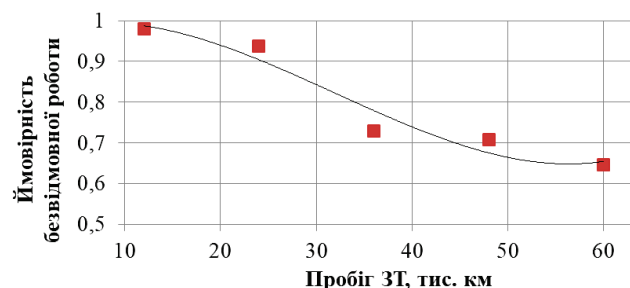


Рис. 3. Зміна ймовірності безвідмовної роботи коробки переключення передач від пробігу ЗТ

Мінімальний об'єм вибірки дослідження технічного стану коробки переключення передач з довірчою ймовірністю 0,9, довірчим інтервалом 10 %, генеральної сукупності парку засобів транспорту 15, що зазначено в п. 4, склала 12 шт. Генеральна сукупність вибірки на кожному інтервалі пробігу, для кожного діагностичного

параметру складав 30, виходячи з методики дослідження діагностичних параметрів оливи, що зазначено в п. 4. Мінімальний об'єм вибірки діагностичних параметрів коробки переключення передач з довірчою ймовірністю 0,9, довірчим інтервалом 10 %, генеральної сукупності 30, склала 21 шт. Середні значення даних експрес дослідження фактичного технічного стану коробки переключення передач наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Зміна діагностичних показників трансмісійної оливи від пробігу засобів транспорту

Параметр	Інтервали пробігу, тис. км				
	0...12	12...24	24...36	36...48	48...60
Вміст механічних домішок, %	0,1	0,3	0,8	1,2	1,9
Діелектрична проникність оливи	2,47	2,50	2,54	2,57	2,61
Лужне число оливи, мг КОН /г	0,02	0,12	0,27	0,32	0,4

Результати цифрових зображень проб трансмісійної оливи на різних пробігах засобу транспорту подано на рис. 4. Графічна інтерпретація залежності вмісту механічних домішок в трансмісійній оливі з пробігом засобів транспорту наведені на рис. 5.

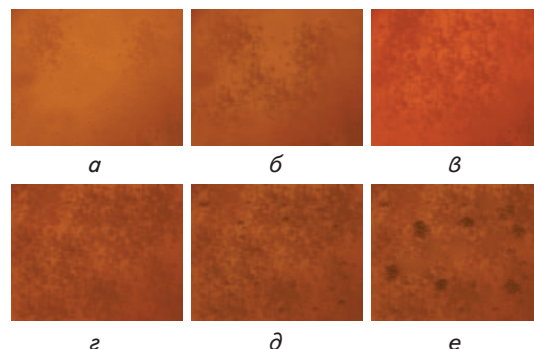


Рис. 4. Цифрові фотографії дослідження проб трансмісійної оливи на вміст механічних домішок в залежності від пробігу засобів транспорту: а – свіжа олива; б – напрацювання 12 тис. км; в – напрацювання 24 тис. км; г – напрацювання 36 тис. км; д – напрацювання 48 тис. км; е – напрацювання 60 тис. км

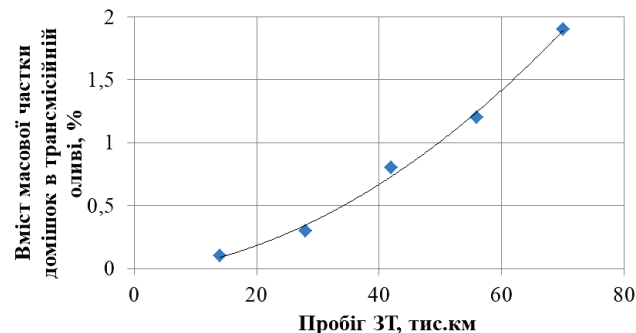


Рис. 5. Середні значення зміни вмісту домішок в трансмісійній оливі залежно від пробігу засобу транспорту

Можна бачити нелінійний характер зазначеної залежності. Це свідчить про інтенсифікацію процесів тертя і зношування важконавантажених деталей коробки переключення передач. Крім цього, частинки зношування можуть виконувати роль абразивних частинок, які локалізують навантаження на робочі поверхні зубчастих передач, що в свою чергу призводить до зношування та руйнування підчас експлуатації деталей та спрацювання трансмісійної оливи.

Зміну значень діелектричної проникненості трансмісійної оливи з пробігом засобів транспорту відображена на рис. 6.

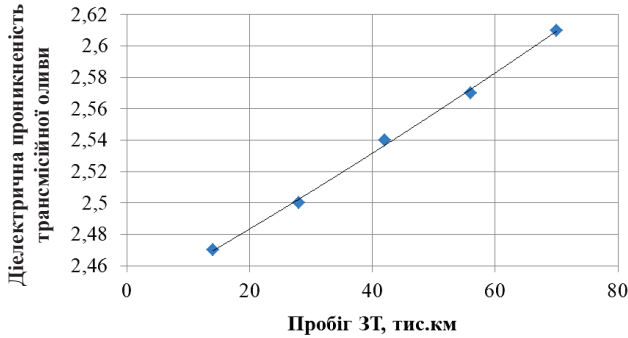


Рис. 6. Зміна середніх значень діелектричної проникненості трансмісійної оливи від пробігу засобу транспорту

Спостерігається практично лінійний характер залежності зміни середнього значення діелектричної проникненості трансмісійної оливи від пробігу засобу транспорту. Зазначимо, що діелектрична проникність відображає процес надходження електропровідних частинок металу підчас зношування деталей коробки переключення передач в процесі експлуатації.

Характер зміни лужного числа трансмісійної оливи з пробігом засобу транспорту наведено на рис. 7.

Фіксується нелінійний характер, залежності величини лужного числа трансмісійної оливи від пробігу. Діагностичний параметр у цьому випадку відображає рівень збереження властивостей оливи, які підчас зношування захищають деталі агрегатів трансмісії підчас експлуатації.

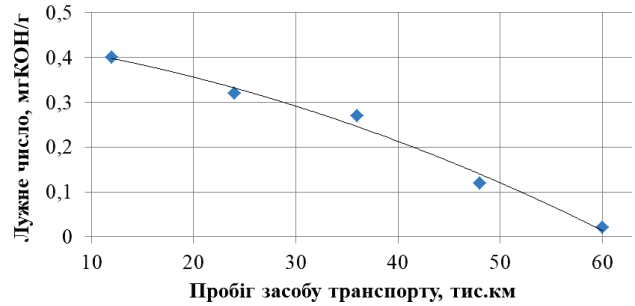


Рис. 7. Зміна значень лужного числа трансмісійної оливи від пробігу засобів транспорту

За даними експериментальних досліджень діагностичних параметрів трансмісійної оливи отримано регресійні моделі їх зміни від пробігу засобів транспорту, які зведені до табл. 3.

Таблиця 3

Регресійні математичні моделі зміни діагностичних параметрів трансмісійної оливи, з пробігом засобу транспорту

Вміст механічних домішок	
$D_{ВМДТО}(L) = 3,28 \cdot 10^{-10} L^2 + 4,59 \cdot 10^{-6} L - 0,04, \%$	(22)
Діелектрична проникність	
$D_{ДПТО}(L) = 3,64 \cdot 10^{-12} L^2 + 2,19 \cdot 10^{-6} L + 2,438$	(23)
Лужне число	
$D_{ЛЧТО}(L) = -5,1 \cdot 10^{-11} L^2 + 1,12 \cdot 10^{-5} L - 0,132, \text{ мгКОН/г}$	(24)

Використано пакет програми Mathcad 14, в якому на основі формули (19) замість виразу  $P(L)$  підставляємо залежність  $P_{КПП}(L)$ , а замість виразу  $D_j(L)$ , почергово підставляємо  $D_{ВМДТО}(L)$ ,  $D_{ДПТО}(L)$ ,  $D_{ЛЧТО}(L)$ , для отримання відповідних залежностей їх відносної чутливості. Отримані залежності відносної чутливості (сенситивів) експрес значимих діагностичних параметрів коробки переключення передач засобів транспорту, зведені до табл. 4.

Таблиця 4

Математичні моделі відносної чутливості інформативно значущих діагностичних параметрів досліджуваного агрегату

Коробка переключення передач	
Вміст механічних домішок трансмісійної оливи	
$senD_{ВМДТО}(L) = \frac{(4,59 \cdot 10^{-6} L + 3,28 \cdot 10^{-10} L^2 - 0,04)(-1,04 \cdot 10^{-9} L + 1,37 \cdot 10^{-14} L^2 + 14,1 \cdot 10^{-6})}{(6,56 \cdot 10^{-10} L + 45,9 \cdot 10^{-7})(1,14 \cdot 10^{-5} L - 5,21 \cdot 10^{-10} L^2 + 4,57 \cdot 10^{-15} L^3 + 0,884)}$	(25)
Діелектрична проникність трансмісійної оливи	
$senD_{ДПТО}(L) = \frac{(-1,042 \cdot 10^{-9} L + 1,37 \cdot 10^{-14} L^2 + 14,1 \cdot 10^{-6})(2,19 \cdot 10^{-6} L + 3,64 \cdot 10^{-12} L^2 + 2,44)}{(7,28 \cdot 10^{-12} L + 21,9 \cdot 10^{-7})(1,41 \cdot 10^{-5} L - 5,21 \cdot 10^{-10} L^2 + 4,57 \cdot 10^{-15} L^3 + 0,884)}$	(26)
Лужне число трансмісійної оливи	
$senD_{ЛЧТО}(L) = \frac{(1,11 \cdot 10^{-5} L - 5,1 \cdot 10^{-11} L^2 - 0,132)(-1,04 \cdot 10^{-9} L + 1,37 \cdot 10^{-14} L^2 + 14,1 \cdot 10^{-6})}{(-1,02 \cdot 10^{-10} L + 1,11 \cdot 10^{-6})(1,41 \cdot 10^{-5} L - 5,21 \cdot 10^{-10} L^2 + 4,57 \cdot 10^{-15} L^3 + 0,884)}$	(27)



Базуючись на математичних моделях відносної чутливості (сенситивів) інформативно значущих діагностичних параметрів, можливо отримати конкретні значення на діапазонах пробігу засобів транспорту. Значення критерію відносної чутливості дозволяє встановити залежність між діагностичними параметрами та показниками надійності. Зазначимо, що критерій володіє відсутністю одиниць вимірювання. Ця перевага використана при дослідженні різнорідних діагностичних параметрів. Математичний апарат теорії відносної чутливості є ефективним інструментом розв'язання прикладних технічних завдань.

Подальший розрахунок значення відносної чутливості діагностичних параметрів проводиться з використанням пакету програми Mathcad 14. Для їх обчислення сформуємо вектор напрацювань засобів транспорту від 0 до 60 тис. км. пробігу через 12 тис. км та підставляємо його в отримані залежності (25)–(27). Розраховані значення відносної чутливості діагностичних параметрів технічного стану коробки переключення передач засобів транспорту наведені в табл. 5.

Таблиця 5

Оцінка відносної чутливості інформативно значущих діагностичних параметрів агрегату трансмісії з пробігом ЗТ

Пробіг, тис. км	Сенситив вмісту механічних домішок в оливі	Сенситив діелектричної проникності оливи	Сенситив лужного числа оливи
0	-0.139	-0.013	-0.046
12	0.014	-0.018	0.037
24	-0.067	-0.101	0.106
36	-0.139	-0.17	-0.098
48	-0.045	-0.103	-0.035
60	0.352	0.223	0.076

Можна бачити, використовуючи дані табл. 5, критерій відносної чутливості на різних інтервалах пробігу має різні значення, що можливо використовувати в подальшому аналізі та відбору інформативних значень діагностичних параметрів.

**6. Обговорення результатів досліджень діагностичних параметрів технічного стану коробки переключення передач**

Зміна знаку критерію відносної чутливості відображає залежність між досліджуваними показниками надійності коробки переключення передач та діагностичними параметрами технічного стану. Формування критерію відносної чутливості та проведення подальшого аналізу за ним дає змогу досліджувати та контролювати, а також обґрунтовувати необхідні діагностичні параметри й визначати момент проведення контролю підчас експлуатації за певних умов. Виявлено, що позитивне значення критерію відносної чутливості відображає істотність залежності, а від'ємне значення – незначимість показників надійності та діагностичних параметрів. Крім цього, критерій у свою чергу дає можливість автоматизації служби технічної експлуатації засобів транспорту в різних умовах.

Аналізуючи отримані значення критерію відносної чутливості інформативно значущих діагностичних параметрів технічного стану агрегатів трансмісії на пробігах засобів транспорту, визначено можливість формування таких діапазонів пробігу, на яких слід здійснювати контроль діагностичних параметрів. Проведеними дослідженнями виявлено, що контроль вмісту механічних домішок в трансмісійній оливі бажано проводити на інтервалах 0...12 та 48...60 тис.км пробігу засобів транспорту, а діелектричної проникності оливи – 48...60 тис. км. Що стосується контролю лужного числа трансмісійної оливи, то його потрібно проводити на інтервалах 12...24 та 48...60 тис. км пробігу засобів транспорту.

На основі розроблених методик аналізу та формування діагностичної бази даних можливо встановлювати необхідні контрольні операції технічного стану досліджуваних агрегатів засобів транспорту. Впровадження розроблених методик в технічну експлуатацію засобів транспорту зменшить час на проведення контрольних робіт, а також більш ретельно визначити їх несправний технічний стан.

Перевагою дослідження в порівнянні з аналогами визначення технічного стану можливо визначити те, що розроблений метод володіє гнучким апаратом аналізу діагностичних параметрів та дає можливість автоматизації формування діагностичної інформації в технічній експлуатації вантажних автомобілів. Запропоновані рішення дають змогу це забезпечити за рахунок об'єднання двох критеріїв таких, як значення діагностичного параметра та статистичної ймовірності безвідмовної роботи агрегатів засобів транспорту в критерій їх відносної чутливості. Однією з головних переваг використання критерію відносної чутливості є також відсутність розмірності, що робить його універсальним в технічній експлуатації. Недоліком дослідження є період формування статистичної інформації, а також обов'язковість використання комп'ютерної техніки та прикладних програм для розрахунків, що не завжди є у відкритому доступі. Перспектива розвитку даного дослідження – це аналіз, відбір діагностичної інформації та на її основі прогнозування технічного стану систем та агрегатів засобів транспорту. Оскільки підчас прогнозування технічного стану кожна діагностична інформація вносить значні корективи у визначення майбутнього технічного стану засобів транспорту, то формування її раціональної кількості є обов'язковим етапом.

**7. Висновки**

1. Обґрунтовано використання критерію відносної чутливості, для аналізу діагностичних параметрів, на основі параметричного зв'язку між показником безвідмовної роботи систем та агрегатів засобів транспорту та діагностичними параметрами, які описують фактичний технічний стан.

2. Проведено експериментальні дослідження, які дозволили встановити зміну показника безвідмовної роботи коробки переключення передач та діагностичних параметрів від пробігу засобів транспорту. Зміна показника надійності за 60 тис. км пробігу змінилася на 0,135. Досліджувані діагностичні параметри за якістю робочої оливи коробки переключення передач вантажних автомобілів на протязі 60 тис. км пробігу змінювалися: вміст механіч-

них домішок в оливі 0,1...1,9 %, діелектрична проникність оливи 2,47...2,61, лужне число 0,02...0,4 мгКОН/г.

3. Спираючись на експериментальні дані та аналіз показника відносної чутливості сформовано раціональну діагностичну базу даних дослідження технічного стану коробки переключення передач. Тому контроль вмісту

механічних домішок в трансмісійній оливи бажано проводити на інтервалах 0...12 та 48...60 тис. км пробігу, а діелектричну проникність оливи проводити на 48...60 тис. км пробігу, лужне числа трансмісійної оливи проводити на інтервалах 12...24 та 48...60 тис. км пробігу засобів транспорту.

#### Література

1. Shalkov A., Mamaeva M. Estimation of Energy Efficiency of Means of Transport According to the Results of Technical Diagnostics // E3S Web of Conferences. 2017. P. 03013. doi: 10.1051/e3sconf/20172103013
2. Sensors Installation Guide to Monitor Automatic Transmission Performance / Ahmed Q., Arasu M., Zhang J., Rizzoni G. // IFAC-PapersOnLine. 2016. Vol. 49, Issue 11. P. 736–741. doi: 10.1016/j.ifacol.2016.08.107
3. Global energy consumption due to friction in trucks and buses / Holmberg K., Andersson P., Nylund N.-O., Mäkelä K., Erdemir A. // Tribology International. 2014. Vol. 78. P. 94–114. doi: 10.1016/j.triboint.2014.05.004
4. Tan C. K., Irving P., Mba D. A comparative experimental study on the diagnostic and prognostic capabilities of acoustics emission, vibration and spectrometric oil analysis for spur gears // Mechanical Systems and Signal Processing. 2007. Vol. 21, Issue 1. P. 208–233. doi: 10.1016/j.ymsp.2005.09.015
5. Jin L., Qihua M., Yiping L. Analysis of the Automatic Transmission Fault Diagnosis Based on Bayesian Network Sensitivity // American Journal of Networks and Communications. 2014. Vol. 3, Issue 2. P. 25–28. doi: 10.11648/j.ajnc.20140302.12
6. Wei S., Wang D., Zhang Z. Automotive automatic transmission based on the theory of fuzzy fault diagnosis system // Mechanical design and manufacturing. 2011. Issue 1. P. 230–232.
7. Monte Carlo evaluation of derivative-based global sensitivity measures / Kucherenko S., Rodriguez-Fernandez M., Pantelides C., Shah N. // Reliability Engineering & System Safety. 2009. Vol. 94, Issue 7. P. 1135–1148. doi: 10.1016/j.res.2008.05.006
8. Haghnegahdar A., Razavi S. Insights into sensitivity analysis of Earth and environmental systems models: On the impact of parameter perturbation scale // Environmental Modelling & Software. 2017. Vol. 95. P. 115–131. doi: 10.1016/j.envsoft.2017.03.031
9. Кузьменко А. Г. Развитие методов контактной трибомеханики // Проблемы трибологии. 2011. № 2. С. 117–135.
10. Determining the characteristics of viscous friction in the sliding supports using the method of pendulum / Dykha A., Aulin V., Makovkin O., Posonskiy S. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 3, Issue 7 (87). P. 4–10. doi: 10.15587/1729-4061.2017.99823
11. Черновол М. І., Аулін А. В., Гриньків А. В. Узгодження зміни технічного стану з раціональним вибором об'єкту діагностування // Вісник Інженерної академії України. 2015. № 2. С. 182–189.
12. Аулін В. В., Гриньків А. В. Визначення найбільш інформативніших діагностичних параметрів за чутливістю функції стану агрегатів транспортних засобів // Зб. тез доповідей X Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих науковців «Підвищення надійності машин і обладнання». Кіровоград: КНТУ, 2016. С. 53–55.