

**Аулін В.В.,
Гриньків А.В.,
Лисенко С.В.,
Чернай А.Є.,
Замота Т.М.**

Центральноукраїнський національний
технічний університет,
м. Кропивницький, Україна
E-mail: AulinVV@gmail.com

**ОБҐРУНТУВАННЯ КРИТЕРІЇВ
ІНФОРМАТИВНОСТІ І ВІДНОСНОЇ
ЧУТЛИВОСТІ ДІАГНОСТИЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ
ТРИБОСИСТЕМ АГРЕГАТІВ
ТРАНСПОРТНИХ МАШИН**

УДК 621.891:629.083

DOI:10.31891/2079-1372-2018-89-3-23-32

Розглянуто використання методів теорії інформації та теорії чутливості для оцінки закономірностей зміни технічного стану трибосистем агрегатів транспортних машин. Для вибору раціональної сукупності діагностичних параметрів запропоновано і теоретично обґрунтовано критерії інформативності і відносної чутливості, а також наведено зв'язок діагностичних параметрів технічного стану трибосистем та показників їх надійності. Інформацію для даного діагностичного параметру пропонується подавати у вигляді функціонального часового ряду з урахуванням регуляторної і випадкової складових.

Ключові слова: трибосистема, технічний стан, діагностичний параметр, надійність, критерій інформативності, критерій відносної чутливості.

Вступ

При забезпеченні належного рівня надійності, особливо при використанні транспортних машин (ТМ) в важких умовах експлуатації, є потреба в розробці ефективних систем діагностування технічного стану трибосистем їх агрегатів.

Достовірність постановки діагнозу визначається повнотою оцінкою технічного стану трибосистем агрегатів ТМ [1 - 4], яка залежить від сутності та числа його параметрів. Повний опис стану об'єкту діагностування [5] можливий за множиною незалежних між собою параметрів, що характеризують відхилення структури або його функцій від нормальних значень. На практиці доцільно здійснювати вибір раціональної сукупності діагностичних параметрів. При цьому досліджують їх інформативність і вибирають ті, які мають найбільші значення і відповідають поставленому завданню.

Питанню вибору діагностичних параметрів оцінки технічного стану трибосистема присвячено велике число досліджень [6 - 7]. Проте до теперішнього часу немає регламентованого переліку діагностичних параметрів, за якими однозначно визначають їх технічний стан. Це питання вимагає розробки нових підходів і подальших досліджень. У загальному випадку діагностичний параметр, визначаючи інформаційну сторону однієї або декількох фізичних величин, є кількісною мірою оцінки технічного стану об'єкту, що підлягає контролю [8]. Його значущість і придатність в цілому обумовлені комплексом вимог.

При цьому доцільно керуватися принципами можливості і достатності. Перший з них базується на наявних засобах триботехнічного діагностування або створенні розробки необхідних технічних станів, за допомогою яких можна з необхідною точністю визначити поточне значення діагностичного параметра. Другий принцип зумовлює раціональність номенклатури діагностичних параметрів, що дозволяють об'єктивно оцінити технічний стан контрольованої трибосистеми агрегату або машини в цілому.

Аналіз досліджень у цьому напрямі свідчить, що зазначене є достатньо складним технічним завданням, рішення якого не можливе без детального вивчення існуючих підходів. У науковій літературі значне місце займають методи відбору параметрів для контролю зовнішніми засобами триботехнічного діагностування на основі побудови і аналізу функціональних і логічних моделей булевої алгебри [9]. Основними недоліками є обмеженість можливостей рівневого представлення трибосистем, визначення вхідних і вихідних параметрів, а також складність визначення міри і характеру взаємодії між ними. Крім того, методи математичної логіки не враховують ймовірність появи відмов в досліджуваних трибосистемах. Ефективним є застосування методу побудови граф-моделей [10], які не вимагають кількісних залежностей між параметрами, але дозволяють враховувати топологічні особливості структури трибосистем та їх зв'язок із зовнішнім середовищем. В той час метод вимагає попереднього опису повної сукупності можливих несправностей і їх ознак, що ускладнює аналіз. Відомі також методи, що ґрунтуються на визначенні ентропії складної події. Сутність їх полягає в тому, що значення деякого трибодіагностичного параметра знімає частину невизначеності про технічний стан. Проте ймовірність знаходження трибосистеми в різних станах приймається однаковою.

Для вибору параметрів, в роботі [11] використано метод оптимізації на основі мінімізації витрат на трибодіагностування і забезпечення заданого рівня надійності агрегату P_0 . При цьому, для вектору контролю рівня надійності P_{y_i} і витрат $B(y_c)$ виконуються умови:

$$P_{y_i} \geq P_0, \quad B(y_i) \geq B_0, \quad (1)$$

де B_0 – заданий рівень витрат на здійснення контролю.

Проте цей метод викликає труднощі під час отримання початкової інформації за витратами на трибодіагностування, а оцінку доцільності контролю трибосистем агрегатів в цілому, запропоновано комплексний показник:

$$y_k = \frac{\Phi}{L} \cdot H_1 \cdot H_2 \cdot H_3 \cdot H_4, \quad (2)$$

де Φ – бальна оцінка витрат на експлуатацію транспортних засобів в зв'язку з несправністю;

\bar{L} – середнє напрацювання на відмову (пошкодження);

$H_1 \dots H_4$ – коефіцієнти, що враховують альтернативні умови виявлення і усунення відмови.

Проте цей показник недостатньо обґрунтований через відсутність методик отримання коефіцієнтів, їх вибору, та використання експертних оцінок складових втрат від експлуатації. Зміну чутливості станів систем і агрегатів машин ініційовано появою монографій [12, 13] югославських вчених Р. Томовіча і М. Вукобратовіча. Найбільшого поширення теорія чутливості знайшла в робототехніці [14], де її беруть на озброєння фахівці в області надійності, контролю, діагностики та випробувань робототехнічних систем. Функції і коефіцієнти чутливості, що розглядаються в теорії чутливості, можна використати для ідентифікації, контролю, випробувань, встановлення та розподілу допусків на параметри елементів трибосистем: аналізу точності систем керування і апаратури з урахуванням розкиду параметрів; аналізу стійкості; для вирішення завдань оптимального та адаптивного управління; ідентифікації, випробування та налаштування трибосистем, і т.д. Класифікацію таких завдань наведена на рис. 1.

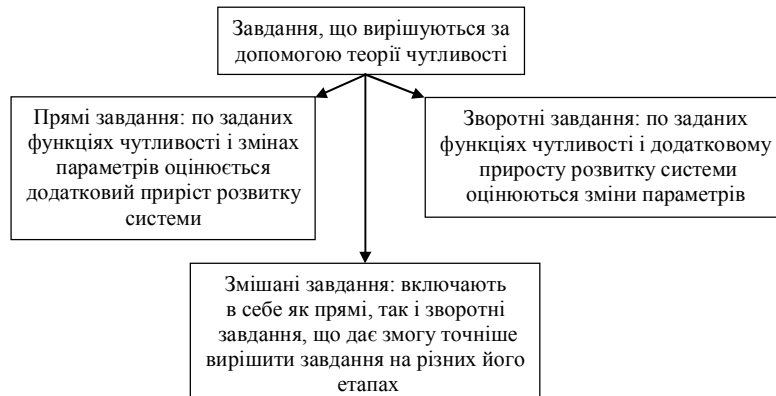


Рис. 1 – Класифікація вирішуваної групи завдань за допомогою методів теорії чутливості

Зазначені групи завдань і методи використання теорії чутливості, при їх розв'язанні, мають універсальний характер. Однак при ідентифікації станів трибосистем агрегатів може мати місце невисока швидкість сходження, яка при інших рівних умовах спадає з ростом кількості контролюючих параметрів. Метод ідентифікації, що базується на теорії чутливості і стосується досліджень динамічних об'єктів, розглянуто в роботах А.І. Рубана [15]. При цьому важливою проблемою є рівень чутливості [16 - 18]. Широкий спектр завдань теорії управління системами з використанням теорії чутливості відображено в роботі Б.М. Петрова і П.Д. Крутька [19]. Автори вирішують завдання підбору невідомих параметрів диференціальних рівнянь адаптивного управління та з'ясовують можливість ідентифікації нестационарних параметрів. Активізація використання теорії чутливості на широкий клас завдань управління та досліджень систем і агрегатів машин відображено і в роботах Р.М. Юсупова, Ф.М. Захаріна, В.І. Городецького, Е.Н. Розенвассера, К. Спіді, Р. Брауна, Дж. Гудвіна, Ю.Я. Остова і А.І. Рубана та ін. Подальшого розвитку теорія чутливості набула у вигляді теорії відносної чутливості функцій (сенситивів), відображеної в роботах А.Г. Кузьменка [20] та В.В. Ауліна [21, 22]. Теорію сенситивів використано при вирішенні завдань оцінки точності математичних моделей процесів тертя та зношування і вимірювання триботехнічних характеристик. Проведений аналіз теорії сенситивів виявив її істотні переваги і широкі аспекти застосування у порівнянні з абсолютною чутливістю функцій,

нагального розв'язання потребують ряд питань важливих технічних проблем і завдань: оцінка технічного стану трибосистем та еволюція його розвитку; визначення показників надійності систем і агрегатів ТМ за діагностичною інформацією; уточнення зв'язків між діагностичними параметрами і показниками надійності систем і агрегатів ТМ.

Постановка проблеми

Метою роботи є, використовуючи методи теорії інформації та теорії чутливості, побудувати та обґрунтувати критерії інформативності і відносної чутливості діагностичного параметру технічного стану трибосистем агрегатів транспортних машин.

Результати дослідження

Технічний стан трибосистем агрегатів ТМ в процесі експлуатації характеризується певною невизначеністю, а його зміну можливо контролювати діагностичними параметрами. Контроль кожного параметра знімає частину цієї невизначеності. Діагностичні параметри повинні формувати максимум інформації і адекватно відображати реальний технічний стан трибосистем з урахуванням ймовірнісних характеристик відмов при експлуатації. Завдання вибору контрольованих параметрів для визначення технічного стану ставиться наступним чином: для виявленого переліку об'єктів контролю, що характеризуються кінцевою множиною контрольованих діагностичних параметрів та показників надійності, необхідно обґрунтувати їх сукупність, що мають найбільшу інформативність. Для вирішення цього завдання будують інформаційну модель об'єкту і розраховують ймовірнісні характеристики його знаходження в справному і несправних станах внаслідок відмови елементів трибосистем. Потім розраховують кількість інформації, що вноситься діагностичним параметром, на підставі чого визначають їх сукупність, що підлягає триботехнічному діагностуванню та визначенню технічного стану трибосистем агрегатів ТМ.

Інформаційна модель включає структурно-наслідкову модель і матрицю технічних станів. Структурно-наслідкова модель будується на основі вивчення експлуатаційної надійності і дозволяє виділити взаємозв'язки між трибосистемами, їх елементами та контрольованими параметрами. На основі цієї моделі будується діагностична матриця технічних станів, рядки якої відповідають множині контрольованих параметрів D_i , де $i=1,2,\dots,M$, а стовпці – стану відмов елементів трибосистем агрегатів, включаючи їх працездатний стан. Загальне число можливих станів трибосистем, враховуючи їх N функціональних елементів і двоальтернативність результату діагностування, становить $2^N - 1$. Зазначимо, що в теорії експлуатації відмови елементів трибосистем вважають несумісними подіями і на практиці припускають, що одночасно можлива відмова лише одного елемента. Число можливих станів трибосистем агрегатів ТМ дорівнює $C_N^1 = N$.

Враховуючи теорему про асимптотичну еквівалентність нерівноймовірних подій рівноймовірними [155], є підстави прийняти усі можливі стани трибосистем рівноймовірними. Разом з тим забезпечити рівну надійність та міцність всіх елементів в експлуатації неможливо. Для усунення цього недоліку необхідно розглянути множину відмов трибосистем, як ймовірнісну систему з кінцевою множиною станів, рівною числу його складових елементів, що відмовили, поява кожного з яких характеризується певною ймовірністю. Для визначення ймовірностей безвідмовної роботи скористаємося отриманою базою статистичних даних про відмови трибосистем агрегатів ТМ на даному пробігу і відомими оцінками апріорної ймовірності з теорії надійності. При цьому потрібно мати на увазі, що трибосистемами агрегатів ТМ можуть знаходитися в одному з N спільних станів повної групи подій:

$$\sum_{j=0}^N P(S_j) = 1, \quad (3)$$

де $P(S_j)$ – ймовірність S_j -го стану;

N – кількість можливих станів

Для врахування рівноймовірних станів трибосистем агрегатів ТМ пропонується використання фізико-інформаційного підходу [23], основою якого є залучення до обґрунтування надійності їх технічного стану інформаційної ентропії. При розрахунку інформативності діагностичних параметрів, використовували основні властивості інформаційної ентропії, як міри невизначеності. Апріорна інформаційна ентропія [24], як кількісна характеристика невизначеності технічних станів трибосистем агрегатів ТМ, перед початком діагностування розраховується за формулою:

$$H_0 = - \sum_{j=0}^N P(S_j) \log_2 P(S_j). \quad (4)$$

Невизначеність технічних станів трибосистем агрегатів ТМ, що залишається після діагностування D_φ -го параметра, оцінюються за формулою:

$$H_\varphi(D_\varphi) = P(D_\varphi)H(D_\varphi) + P(\bar{D}_\varphi)H(\bar{D}_\varphi), \quad (5)$$

де $H_\varphi(D_\varphi)$ – апостеріорна ентропія трибосистем після діагностування D_φ -го параметру;
 $P(D_\varphi)$, $P(\bar{D}_\varphi)$ – ймовірності знаходження D_φ параметру в межах та поза поля допуску;
 $H(D_\varphi)$, $H(\bar{D}_\varphi)$ – відповідні значення ентропії.

Використовуючи матрицю станів, можливо оцінити ймовірність знаходження D_φ -го параметру в межах і поза межами допуску:

$$P(D_\varphi) = \sum_{j \in \Omega_\varphi} P(S_j); \quad P(\bar{D}_\varphi) = \sum_{j \in \bar{\Omega}_\varphi} P(S_j), \quad (6)$$

де $\Omega_\varphi = \{j, V_{\varphi j} = 1\}$ – множина цілочисельних індексів матриці станів, позначена номерами j -х стовпців, у яких на перетині з φ -м рядком розташовуються символи 1, а у множині $\bar{\Omega}_\varphi = \{j, V_{\varphi j} = 0\}$ – символи 0.

Після діагностування ентропія $H(D_\varphi)$ трибосистем агрегатів ТМ дорівнює:

$$H(D_\varphi) = - \sum_{j \in \Omega_\varphi} P(S_j / D_\varphi) \log_2 P(S_j / D_\varphi); \quad (7)$$

$$H(\bar{D}_\varphi) = - \sum_{j \in \bar{\Omega}_\varphi} P(S_j / \bar{D}_\varphi) \log_2 P(S_j / \bar{D}_\varphi), \quad (8)$$

де $P(S_j / D_\varphi)$, $P(S_j / \bar{D}_\varphi)$ – ймовірність знаходження трибосистеми в S_j - ому технічному стані при умові, що D_φ має значення в межах поля допуску, або поза ними.

При цьому умовна ймовірність визначається за формулами Байєса:

$$P(S_j / D_\varphi) = \frac{P(S_j)}{\sum_{j \in \Omega_\varphi} P(S_j)}; \quad P(S_j / \bar{D}_\varphi) = \frac{P(S_j)}{\sum_{j \in \bar{\Omega}_\varphi} P(S_j)}. \quad (9)$$

Враховуючи (6) - (9) в (5), маємо:

$$H_\varphi(D_\varphi) = \sum_{j \in \Omega_\varphi} P(S_j) \left[- \sum_{j \in \Omega_\varphi} \frac{P(S_j)}{\sum_{j \in \Omega_\varphi} P(S_j)} \log_2 \frac{P(S_j)}{\sum_{j \in \Omega_\varphi} P(S_j)} \right] + \sum_{j \in \bar{\Omega}_\varphi} P(S_j) \left[- \sum_{j \in \bar{\Omega}_\varphi} \frac{P(S_j)}{\sum_{j \in \bar{\Omega}_\varphi} P(S_j)} \log_2 \frac{P(S_j)}{\sum_{j \in \bar{\Omega}_\varphi} P(S_j)} \right]. \quad (10)$$

Кількість інформації, отриманої в результаті діагностування параметра D_φ , визначається за критерієм його інформативності:

$$I(D_\varphi) = H_0 - H_\varphi(D_\varphi). \quad (11)$$

Результати розрахунків D_φ , дають можливість визначити для якого з них у момент контролю критерій інформативності набуває максимального значення:

$$I(D_\varphi) \Rightarrow \max_{1 \leq \varphi \leq M} I(D_\varphi). \quad (12)$$

Після цього для визначення діагностичних параметрів D_φ трибосистем необхідно проводити ранжирування його значень за інформаційною значимістю. У разі однакової кількості інформації в подальших розрахунках вибирають лише один з них у відповідності до логічної операції "або". На кожному кроці процесу визначається умовна ентропія, що характеризує технічний стан трибосистеми в результаті контролю одного з діагностичних параметрів. При цьому отримуємо впорядковану по

кількості внесеної інформації сукупність контрольованих параметрів. Значний перелік ранжируваного ряду діагностичних параметрів вносить певний ступінь невизначеності та збільшує розрахункову завантаженість системи баз даних. Запропонований фізико-інформаційний підхід дає можливість визначити необхідну найбільш інформативну кількість діагностичних параметрів.

В процесі експлуатації ТМ відбувається зміна технічного стану і діагностичних параметрів її трибосистем. Важливим завданням при цьому є врахування розвитку або закономірностей цих змін з певними функціональними зв'язками елементів. Складний взаємозв'язок сукупностей різнорідних параметрів трибосистеми потребує їх математичної інтерпретації та узагальнення і на практиці більш якісного проведення контролю та моніторингу технічного стану. При цьому узагальнені функціональні залежності параметрів математичних моделей трибосистем можна подати у вигляді функцій сукупностей прямих зв'язків:

$$y_i = f(D_i, \alpha_i, z_i, \delta_i), i = \overline{1, n}, \quad (13)$$

а також зворотних зв'язків, пов'язаних з надійністю:

$$y_i = f(D_i, \beta_i, \tilde{z}_i, \gamma_i), i = \overline{1, n}, \quad (14)$$

де D_i – сукупність діагностичних параметрів технічного стану трибосистем;

\tilde{z}_i – збурення параметрів керування технічним станом при зворотному зв'язку;

γ_i – параметри прийняття рішень, стосовно експлуатації.

За умов фіксованих математичних моделей (13), (14) технічний стан визначається вибором сукупності діагностичних параметрів – α_i , умов експлуатації – β_i , похибки вимірювання – δ_i , прийняття рішень – γ_i . Сукупності технічних і експлуатаційних параметрів – функціональних станів трибосистем ТМ можна звести в один вектор \vec{Y} :

$$\vec{Y} = (\vec{\alpha}, \vec{\beta}, \vec{\gamma}, \vec{\delta}). \quad (15)$$

Умовою нормального функціонування трибосистем агрегатів ТМ, з урахуванням функції (15), є:

$$R(\vec{Y}) \subset M_y, \quad (16)$$

де $R(\vec{Y})$ – простір векторів значень функціоналу технічного стану \vec{Y} трибосистем;

M_y – множина працездатних станів.

Співвідношення (16) свідчить, що для забезпечення працездатного стану трибосистем необхідно постійно контролювати параметри їх технічного стану в даних умовах експлуатації. Контролювати і враховувати динамічну зміну технічного стану важко і енергозатратно через те, що трибосистеми агрегатів ТМ можуть на певному проміжку напрацювання знаходитись в різних експлуатаційних умовах. Значення похибки діагностичного параметру є також немаловажливим фактором. В зв'язку з цим прийняття рішень та використання стратегій відновлення працездатного стану трибосистем потребують теоретичного обґрунтування з описом та врахуванням усіх факторів, які істотно впливають під час експлуатації та характеру зміни технічного стану трибосистем з побудовою математичної моделі причинно-наслідкових зв'язків між сукупністю факторів і параметрів. Зазначимо, що при цьому велика кількість елементів трибосистем агрегатів ТМ 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. Ефективно обробляти отриману базу даних можна, використавши методи 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 [25], яких можна дотримуватись та використовувати при аналізі бази даних про технічний стан трибосистем агрегатів та ТМ в цілому.

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

$$\text{senu}_i(x) = \frac{dy_i(x)}{y_i(x)} \cdot \frac{x}{dx} = \frac{dy_i(x)}{dx} \cdot \frac{x}{y_i(x)}. \quad (17)$$

Цю форму представлення критерію відносної чутливості (сенситиву) пропонується використовувати для оптимальної оцінки будь-якого діагностичного параметру, який необхідно піддавати контролю при визначенні технічного стану трибосистем. Взв'язавши за основу вираз (17), критерій відносної чутливості кожного діагностичного параметру, має вигляд:

$$\text{sen}D_i(\alpha_i) = \frac{D_i'(\alpha_i)}{D_i} \cdot \alpha_i = f'_{\alpha_i}(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i) \cdot \frac{\alpha_i}{f(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i)}. \quad (18)$$

Найбільш поширеною мірою абсолютної чутливості функцій стану $S(D)$ до зміни факторів та діагностичних параметрів D є їх кінцевий приріст або диференціал:

$$dS(D) = \frac{dS(D)}{dD} dD. \quad (19)$$

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

$$\frac{dS(D)}{dD} = S'(D). \quad (20)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial S(D_1, D_2, \dots, D_n)}{\partial D_1} &= S'_{D_1}(D_1, D_2, \dots, D_n); \quad \frac{\partial S(D_1, D_2, \dots, D_n)}{\partial D_2} = \\ &= S'_{D_2}(D_1, D_2, \dots, D_n); \dots; \quad \frac{\partial S(D_1, D_2, \dots, D_n)}{\partial D_n} = S'_{D_n}(D_1, D_2, \dots, D_n). \end{aligned} \quad (21)$$

Критерій відносної чутливості функції технічного стану $S(D)$ трибосистеми є безрозмірною величиною і дорівнює:

$$\text{sen}S(D) = \frac{dS(D)}{S(D)} \bigg/ \frac{dD}{D} = S'(D) \cdot \frac{D}{S(D)}, \quad (22)$$

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

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

$$\text{Sen}S_{D_1}(D_i) = S'_{D_1}(D_i) \cdot \frac{D_1}{S_{D_1}(D_i)}; \quad \text{Sen}S_{D_2}(D_i) = S'_{D_2}(D_i) \cdot \frac{D_2}{S_{D_2}(D_i)}; \dots; \quad \text{Sen}S_{D_n}(D_i) = S'_{D_n}(D_i) \cdot \frac{D_i}{S_{D_n}(D_i)}. \quad (23)$$

Корисним при застосуванні критерію відносної чутливості є правило диференціювання логарифмічної функції:

$$\text{sen}S(D) = S^s(D) = \frac{d(\ln S(D))}{d \ln D} = \frac{(\ln S(D))' S(D)}{(\ln D)' D}. \quad (24)$$

При розгляді сукупності діагностичних параметрів критерій відносної чутливості узагальнюється:

$$S(D) = U_1(D) + U_2(D) + U_3(D) + U_4(D) + U_5(D) + \dots = \sum_{i=1}^n U_i(D); \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \text{Sen}(S(D)) &= \text{Sen}(S(U_1(D))) \frac{U_1(D)}{\sum U_i(D)} + \text{Sen}(S(U_2(D))) \frac{U_2(D)}{\sum U_i(D)} + \\ &+ \text{Sen}(S(U_3(D))) \frac{U_3(D)}{\sum U_i(D)} + \dots + \text{Sen}(S(U_5(D))) \frac{U_5(D)}{\sum U_i(D)} + \dots, \end{aligned} \quad (26)$$

де $\text{Sen}(S(D))$, $\text{Sen}(S(U_i))$ – загальний та часткові критерії відносної чутливості функції стану від діагностичних параметрів D ;

$U_i(D)$, $i = \overline{1, N}$ – функції їх зміни для різних трибосистем агрегатів ТМ.

Використовуючи методику реалізації аналізу теорії чутливості функцій технічного стану трибосистем можливо отримати частинні критерії відносної чутливості по кожному з діагностичних параметрів на різних періодах пробігу ТМ. При цьому функцію діагностичного параметру та загальну функцію надійності можна вважати параметрично заданими:

$$\left. \begin{aligned} x_i &= D_j(L); \\ y_i &= P_i(L), \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

де i – індекс трибосистеми агрегату;

j – індекс діагностичного параметру $D_j(L)$ технічного стану трибосистем;

$P_i(L)$ – функція ймовірності їх безвідмовної роботи.

Враховуючи до виразу (27) метод знаходження критерію відносної чутливості отримаємо критерій відносної чутливості діагностичного параметру як функції пробігу ТМ, з урахуванням функції надійності:

$$\text{sen}D_j(L) = \frac{P_i(L)'}{D_j(L)'} \cdot \frac{D_j(L)}{P_i(L)} = \frac{\frac{dP_i}{dL} \cdot D_j(L)}{\frac{dD_j}{dL} \cdot P_i(L)}. \quad (28)$$

Зазначимо, що рівняння (28) описує залежності відносної чутливості діагностичних параметрів від функції надійності трибосистем агрегатів, але потребують уточнення тенденції зміни функції діагностичного параметру $D_j(L)$ від пробігу. Для цього використовуються методи екстраполяції [26], з припущенням про те, що процес зміни діагностичного параметра є поєднанням двох складових регулярної і випадкової:

$$D_j(L) = D_j(\bar{a}, L) + d_j(L). \quad (29)$$

Вважається, що регулярна складова діагностичного параметра $D(\bar{a}, L)$ це функція від пробігу, що описується вектором параметрів \bar{a} , якими зберігає 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 не можна однозначно відокремити тенденцію від випадкових впливів, оскільки випадкова складова $d_j(L)$ описує некорельовані процеси з нульовим математичним очікуванням. Її оцінка потрібна для подальшого визначення точності отриманої функції діагностичного параметру $D_j(L)$ трибосистеми, який можна подати як функціональний ряд.

Висновки

1. Теоретично показано, що для опису функції технічного стану трибосистем агрегатів ТМ, можливе використання методів теорії інформації і теорії чутливості.
2. З'ясовано сутність критеріїв інформативності та відносної чутливості діагностичних параметрів технічного стану трибосистем.
3. Виявлено, що перевагою використання критерію відносної чутливості в аналізі технічного стану є те, що він є безрозмірною величиною.
4. Використовуючи критерій відносної чутливості функції технічного стану, встановлено зв'язок зміни діагностичних параметрів з показниками надійності трибосистем агрегатів ТМ.

Література

1. Аулін В.В., Гриньків А.В. Розробка методики вибору інформативних систем і агрегатів засобів транспорту та діагностичних параметрів їх технічного стану. Зб. тез доповідей XIII Міжнар. наук. конф. "Рациональне використання енергії в техніці" з нагоди 86-ї річниці від дня народження Момонтенка Миколи Петровича (1931-1981) TechEnergy 2017. 17-19 травня 2017р Національний університет біоресурсів і природокористування України. – К.: НУБіПУ. – 2017. – С. 57-59.
2. Кудряшов Е.А., Озорнин С.П., Леонтьев И.В. Методология и технология формирования системы управления техническим состоянием машин в эксплуатации // Труды дальневосточного государственного технического университета. – Владивосток : ДВГТУ. – Выпуск 133. – 2003. – С. 153-155.
3. Konchits V.V., Korotcevic S.V., Kim C.K. Formation and friction riderties of boundary lubricating and surface modified layers at elevated temperatures. 12 th Int.Col "Tribology 2000 - plus", Esslingen, January 11-13. 2000. 123-129.

4. Повышение готовности к использованию по назначению мобильной сельскохозяйственной техники совершенствованием системы диагностирования / Н.В. Бышов, С.Н. Борычев, И.А. Успенский и др. – Рязань: РГАТУ. – 2013. – 172 с.
5. Технический сервис машин сельскохозяйственного назначения / В.В. Варнаков, В.В. Стрельцов, В.Н. Попов, В.Ф. Карпенков. – М.: Колос. – 2000. – 256 с.
6. Голубев И.Г., Фадеев А.Ю., Макуев В.А. Оценка качества технического сервиса тракторов. Техника и оборудование для села. – 2010. – № 7. – С. 40 - 41.
7. Голубев И.Г. Организация сервисного обслуживания сельскохозяйственной техники зарубежными фирмами на российском рынке. Техника и оборудование для села. – 2013. – № 6. – С. 36 -38.
8. Дидманидзе О.Н., Варнаков Д.В. Прогнозирование параметрической надежности двигателей автотранспортных средств в нормальном и специальном эксплуатационных режимах // Международный технико-экономический журнал. – 2013. – №3. – С. 94 - 98.
9. Диагностика технических устройств / Г. А. Бигус, Ю. Ф. Даниев, Н. А. Быстрова, Д. И. Галкин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2014. – 615с.
10. Цвид С.В., Харазов А.М., Махновский Е.Е. Оптимизация номенклатуры диагностических параметров, контролируемых бортовыми контрольно-диагностическими системами. Расчет и исследование систем электрооборудования автомобилей и дорожно-строительных машин. – М.: Олимп. – 1997. – 195 с.
11. Ямпольский В.И., Белоконь Н.И., Пилипосян В.Н. Контроль и диагностирование гражданской авиационной техники. – М.: Транспорт. – 1990. – 347 с.
12. Tomovich R. Sensitivity analyses of dynamic systems. New York.: Mc.Graw. Hill. 1963. 313с.
13. Томович Р., Вукобратович М. Общая теория чувствительности. – М.: Советское радио. – 1972. – 240 с.
14. Агафонов Е.Д., Кирик Е.С. Об учете начальных условий в задаче непараметрической идентификации нелинейных динамических процессов с использованием метода линеаризации. Идентификация систем и задачи управления // Труды III международной конференции. 28 - 30 января 2004. – М. – 2004. – С. 845 - 856.
15. Рубан А.И. Идентификация нелинейных динамических объектов на основе алгоритма чувствительности. – Томск: Издательство ТУ. – 1975. – 271 с.
16. Городецкий В.К., Захарин Ф.М., Розенвассе Е.Н. Методы теории чувствительности в автоматическом управлении. – Л.: Энергия. – 1971. – 179 с.
17. Гусев В.П., Рубан А.М. Идентификация линейных динамических объектов на основе алгоритма чувствительности. – Л.: Системы управления. – 1975. – 320 с.
18. Goodwin G.C. The application of curvature methods to parameter and state estimation. London: Proc. HE. 1990. 116 p.
19. Петров Б.Н., Крутько П.Д. Применение теории чувствительности в задачах автоматического управления // Техническая кибернетика. – 1970. – №2. – С. 134 - 140.
20. Теоретическая и экспериментальная трибология. Надежность узлов трения по прочности и износу: монография В 12т. / гол. ред. А.Г. Кузьменко. – Хмельницкий: ХНУ. – 2011. – Т.7. – 391 с.
21. Аулін В.В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах: Монографія. – Кіровоград: Видавець Лисенко В.Ф. – 2014. – 370 с.
22. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лівіцький О.М. Математичний апарат для оцінки діагностичних параметрів та визначення оптимальної їх кількості. Зб. матеріалів IV Міжнар. наук.-техн. інтернет-конф. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології 17-19 листопада 2015 р. – Харків: ХНАДУ, 2015. – С. 126-129.
23. Аулін В.В., Гриньків А.В. Теоретичне обґрунтування методів контролю технічного стану систем і агрегатів засобів транспорту. Науковий журнал "Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів"// ХНТУСГ ім. П.Василенка. – 2017. – № 8. – С. 9-20.
24. Williams B. Defining organization entropy. Posted business process management. The Merchant Stand. 2010. Vol.2(49). С.18-25.
25. Аулін В.В., Гриньків А.В. Теоретичний аналіз діагностичних параметрів технічного стану систем та агрегатів засобів транспорту за допомогою методів теорії чутливості // Науковий вісник НУБіПУ. Серія: техніка та енергетика АПК. – 2017. – Вип. 262. – С. 227 - 239.
26. Аулін В.В., Гриньків А.В. Визначення найбільш інформативніших діагностичних параметрів за чутливістю функції стану агрегатів транспортних засобів // Зб. тез доповідей X Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих науковців "Підвищення надійності машин і обладнання". 20-22 квітня 2016р. – Кіровоград: КНТУ. – 2016. – С. 53-55.

Поступила в редакцію 24.09.2018

Aulin V.V., Hrynkiv A.V., Lysenko S.V., Chernai A.E., Zamota T.M. **Justification of informativity criteria and relative sensitivity of the diagnostic parameters of the technical condition of the tribosystem of units of transport machines.**

The analysis of an estimation of a technical condition of tribosystems of aggregates of transport machines is given. It was found that when choosing a rational list of diagnostic parameters, it is reasonable to be guided by the principles of possibility and sufficiency.

The use of methods of information theory and sensitivity theory to evaluate the regularities of the change in the technical state of tribosystems of aggregates of transport machines is considered. To select a rational set of diagnostic parameters, the criteria of informativeness and relative sensitivity are proposed and theoretically justified, and the connection between the diagnostic parameters of the technical state of tribosystems and the indices of their reliability is given. Information for this diagnostic parameter is proposed to be presented in the form of a functional time series, taking into account the regulatory and random components.

Classification of problems that can be solved by methods of the theory of sensitivity is given. The advantages of the theory of relative sensitivity are revealed, especially for the dimensionlessness of sensitivities.

The information entropy of tribosystems, its relation to the function of the technical state, reliability indicators and diagnostic parameters are considered. It is shown that the value of the information criterion directly depends on the received diagnostic information. The properties of the technical state function of tribosystems are clarified as a function of the dependence on diagnostic parameters.

An expression is obtained for estimating the relative sensitivity of the diagnostic parameter as a function of the mileage of transport machines, taking into account the reliability function. In this case, it is advisable to feed the function of the diagnostic parameter from the run as a functional time series.

In the time series, two components are combined: regular and random. They should also be considered as a function of the mileage of the transport machine when describing the change in the diagnostic parameter for the extrapolation period.

Key words: tribosystem, technical condition, diagnostic parameter, reliability, the criterion of information, the criterion of relative sensitivity.

References

1. Aulin V.V., Hrynkiv A.V. Rozrobka metodyky vyboru informatyvnykh system i ahrehativ zasobiv transportu ta diahnostychnykh parametrov yikh tekhnichnoho stanu. Zb. tez dopovidei XIII Mizhnar. nauk. konf. "Ratsionalne vykorystannia enerhii v tekhnitsi" z nahody 86-yi richnytsi vid dnia narodzhennia Momontenka My-koly Petrovycha (1931-1981) TechEnergy 2017. 17-19 travnia 2017r Natsionalnyi universytet bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. m.Kyiv. K.:NUBiPU. 2017. S.57-59.
2. Kudryashov E.A., Ozornin S.P., Leontev I.V. Metodologiya i tehnologiya formirovaniya sistemyi upravleniya tehnikeskim sostoyaniem mashin v ekspluatatsii. Trudyi dalnevostochnogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta: Vyipusk 133. Vladivostok. DVGTU, 2003. S. 153-155.
3. Konchits V.V., Korotcevh S.V., Kim C.K. Formation and friction riderties of boundary lubricating and surface modified layers at elevated temperatures. 12 th Int.Col "Tribology 2000 - plus", Esslingen, January 11-13. 2000. 123-129.
4. Povyshenie gotovnosti k ispolzovaniyu po naznacheniyu mobilnoy selskohozyaystvennoy te-hniki sovershenstvovaniem sistemyi diagnostirovaniya. N.V. Byishov, S.N. Boryichev, I.A. Uspenskiy i dr. Ryazan: RGATU. 2013. 172 s.
5. Tehnikeskyy servis mashin selskohozyaystvennogo naznacheniya. V.V. Varnakov, V.V. Streltsov, V.N. Popov, V.F. Karpenkov. M. Kolos. 2000. 256s.
6. Golubev I.G., Fadeev A.Yu., Makuev V.A. Otsenka kachestva tehnikeskogo servisa traktorov. Tehnika i oborudovanie dlya sela. 2010. #7. S. 40-41.
7. Golubev I.G. Organizatsiya servisnogo obsluzhivaniya selskohozyaystvennoy tehniky zarubezh-nyimi firmami na rossiyskom rynke. Tehnika i oborudovanie dlya sela. 2013. #6. S. 36 -38.
8. Didmanidze O.N., Varnakov D.V. Prгноzirovanie parametricheskoy nadezhnosti dvigateley avtotransportnykh sredstv v normalnom i spetsialnom ekspluatatsionnykh rezhimakh. Mezhdunarodnyiy tehniko-ekonomicheskyy zhurnal. 2013. #3. S. 94-98.
9. Diagnostika tehnikeskikh ustroystv. G. A. Bigus, Yu. F. Daniev, N. A. Byistrova, D. I. Galkin M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana. 2014. 615s.
10. Tsvit S.V., Harazov A.M., Mahnovskiy E.E. Optimizatsiya nomenklaturyi diagnosticheskikh parametrov, kontroliruemyykh bortovymi kontrolno-diaagnosticheskimi sistemami. Raschet i issledovanie sistem elektrooborudovaniya avtomobiley i dorozhno-stroitelnykh mashin. M., Olimp. 1997. 195 s.
11. Yampolskiy V.I., Belokon N.I., Piliposyan V.N. Kontrol i diagnostirovanie grazhdanskoй aviatsionnoy tehniky. M. Transport, 1990. 347 s.
12. Tomovich R. Sensitivity analyses of dynamic systems. New York.: Mc.Graw. Hill. 1963. 313c.

13. Tomovich R., Vukobratovich M. *Obschaya teoriya chuvstvitelnosti* M.: Sovetskoe radio. 1972. 240s.
14. Agafonov E.D., Kirik E.S. *Ob uchete nachalnykh usloviy v zadache neparаметricheskoy identifikatsii nelineynykh dinamicheskikh protsessov s ispolzovaniem metoda linearizatsii. Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya: Trudy III mezhdunarodnoy konferentsii. 28 - 30 yanvarya 2004. M., 2004.-S. 845-856.*
15. Ruban A.I. *Identifikatsiya nelineynykh dinamicheskikh ob'ektov na osnove algoritma chuvstvitelnosti.* Tomsk: Izdatelstvo TU. 1975. 271 s.
16. Gorodetskiy V.K., Zaharin F.M., Rozenvasse E.N. *Metody teorii chuvstvitelnosti v avtomaticheskoy upravlenii.* Leningrad: Energiya. 1971. 179 s.
17. Gusev V.P., Ruban A.M. *Identifikatsiya lineynykh dinamicheskikh ob'ektov na osnove algoritma chuvstvitelnosti.* Leningrad: Sistemy upravleniya. 1975. 320 s.
18. Goodwin G.C. *The application of curvature methods to parameter and state estimation.* London: Proc. HE. 1990. 116 p.
19. Petrov B.N., Krutko P.D. *Primenenie teorii chuvstvitelnosti v zadachah avtomaticheskogo upravleniya. Tehnicheskaya kibernetika. 1970. #2. S.134 - 140.*
20. *Teoreticheskaya i eksperimentalnaya tribologiya. Nadezhnost uzlov treniya po prochnosti i iznosu: monografiya V 12t. / gol. red. A.G. Kuzmenko Hmelniyskiy: HNU. 2011. T.7. 391s.*
21. Aulin V.V. *Fizychni osnovy protsesiv i staniv samoorhanizatsii v trybotekhnichnykh systemakh: Mo-nohrafiia.* Kirovohrad: Vydavets Lysenko V.F. 2014. 370s.
22. Aulin V.V., Hrynkiv A.V., Livitskiy O.M. *Matematychnyi aparat dlia otsinky diahnostychnykh parametrov ta vyznachennia optymalnoi yikh kilkosty. Zb. materialiv IV Mizhnar. nauk.-tekh. internet-konf. Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnolohii 17-19 lystopada 2015 r., m. Kharkiv: KhNADU, 2015. S.126-129.*
23. Aulin V.V., Hrynkiv A.V. *Teoretychne obgruntuvannia metodiv kontroliu tekhnichnoho stanu system i ahreativ zasobiv transportu. Naukovyi zhurnal "Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv", KhNTUSH im. P.Vasylenka. 2017. №8. S.9-20.*
24. Williams B. *Defining organization entropy. Posted business process management. The Merchant Stand. 2010. Vol.2(49). C.18-25.*
25. Aulin V.V., Hrynkiv A.V. *Teoretychnyi analiz diahnostychnykh parametrov tekhnichnoho stanu system ta ahreativ zasobiv transportu za dopomohoiu metodiv teorii chutlyvosti. Naukovyi visnyk NUBiPU. Serii: tekhnika ta enerhetyka APK. 2017. Vyp. 262. S.227-239.*
26. Aulin V.V., Hrynkiv A.V. *Vyznachennia naibilsh informatyvnishykh diahnostychnykh parametrov za chutlyvisti u funktsii stanu ahreativ transportnykh zasobiv. Zb. tez dopovidei Kh Vseukr. nauk.-prakt. konf. studentiv, aspirantiv ta molodykh naukovtsiv "Pidvyshchennia nadiinosti mashyn i obladnannia" 20-22 kvitnia 2016r. Kirovohrad: KNTU. 2016. S.53-55.*