

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 656

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.299-310](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.299-310)**В.В. Аулін**, проф., д-р техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: AulinVV@gmail.com*

Використання методів теорії сенситивів при розв'язанні завдань технічних, транспортних і виробничих систем і процесів

На прикладі функції технічного стану систем і агрегатів машин як функції діагностичних параметрів побудовано критерій її відносної чутливості (сенситив). Розглянуто відносний критерій чутливості (сенситив) і для кожного діагностичного параметру і функції стану від вагомих факторів та від напруження. Використовуючи властивості сенситивів та методику реалізації теорії чутливості функцій, отримано частинні критерії відносної чутливості. Розглядаючи сукупність функцій діагностичних параметрів і функції надійності, як функції ймовірності безвідмовної роботи від напруження, показано, що вони параметрично задані. Встановлено зв'язок сенситивів діагностичних параметрів з рівнем надійності систем, агрегатів і машин в цілому. Розроблено блок-схему методу визначення характеру динамічного розвитку діагностичних параметрів та показників надійності технічного стану систем і агрегатів машин. На основі даних експериментальних досліджень побудовано математичні моделі відносної чутливості (сенситиву) для найбільш інформативно значущих діагностичних параметрів силових агрегатів та трансмісій. Показано, що математичні моделі сенситивів діагностичних параметрів дають можливість визначити локальні значення сенситиву на діапазонах напруження і є ефективним інструментом для відбору діапазонів напруження, на яких варто контролювати певні діагностичні параметри щоб забезпечити належний рівень надійності систем, агрегатів та машини в цілому.

сенситив, технічна система, технічний стан, діагностичний параметр, функція надійності, силовий агрегат, трансмісія

Постановка проблеми. Коефіцієнти і функції чутливості, що розглядаються в теорії чутливості, можливо використати при розв'язанні наступних завдань: для ідентифікації, контролю, випробувань, встановлення та розподілу допусків на параметри елементів технічних, транспортних і виробничих систем; аналізу точності систем управління і обладнання з урахуванням розкиду параметрів, аналізу стійкості; для вирішення завдань оптимального та адаптивного управління, ідентифікації об'єктів, випробування і налаштування технічних, транспортних і виробничих і т.д. та прогнозування їх станів і процесів з визначенням рівня надійності. В одних завданнях, при заданих функціях чутливості, досліджуються додаткові зміни параметрів, а в інших – оцінки цих змін поєднуються із знаходженням змін самих параметрів [1-3].

Зазначені групи завдань і методи використання теорії чутливості, при їх розв'язанні, мають універсальний характер. Однак при ідентифікації станів систем і агрегатів машин може мати місце невисока швидкість сходження, яка при інших рівних умовах спадає з ростом кількості контролюючих параметрів.

Серед зазначених завдань на увагу заслуговує діагностування систем і агрегатів машин, яка характеризується певною невизначеністю їх технічного стану в процесі експлуатації, а його зміну можливо контролювати діагностичними параметрами.

Контроль кожного параметра знімає частину невизначеності технічного стану систем і агрегатів машин. У свою чергу, параметри, що діагностуються, повинні формувати максимум інформації про технічний стан об'єкту і адекватно відображати реальний стан з урахуванням ймовірнісних характеристик його відмов при експлуатації [4].

Завдання вибору контрольованих параметрів для визначення технічного стану систем і агрегатів машин 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 [5]. Для вирішення цього завдання будують інформаційну модель об'єкту і розраховують ймовірнісні характеристики його знаходження в справному і несправних станах внаслідок відмови складових частин. Потім розраховують кількість інформації, що вноситься діагностичним параметром, на підставі чого визначають сукупність параметрів, що підлягає технічному діагностуванню та визначенню технічного стану систем та агрегатів і машин в цілому.

Інформацію про процеси, які протікають в них під час експлуатації, і технічний стан систем і агрегатів машин отримують різними фізичними методами. Ефективно обробляти отриману базу даних, використовуючи методи узагальненої теорії графів та теорії чутливості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання, що стосується чутливостей функцій було сформульовано в роботі Г. Боде [1] при дослідженні властивостей лінійних систем зі зворотним зв'язком. Більш детально вони розглянуті у зв'язку з необхідністю розв'язання проблеми точності розрахунково-обчислювальних пристроїв [58]. Формування теорії чутливості як самостійного наукового напрямку набуло в технічній кібернетиці в зв'язку з бурхливим використанням адаптивних (самоналагоджувальних) систем управління, створюваних для ефективної роботи різномірних систем при параметричних впливах [3, 6].

Зміну чутливості станів систем і агрегатів технічних та технологічних машин ініційовано появою монографій [7,8] югославських вчених Р. Томовіча і М. Вукобратовіча. Найбільшого поширення теорія чутливості знайшла в робототехніці [9], де її беруть на озброєння фахівці в області надійності, контролю, діагностики та випробувань робототехнічних систем.

Метод ідентифікації, що базується на теорії чутливості і стосується досліджень динамічних об'єктів, розглянуто в роботах А.І. Рубана [10]. При цьому важливою проблемою є рівень чутливості. Широкий спектр завдань теорії управління системами з використанням теорії чутливості відображено в роботі Б.М. Петрова і П.Д. Крутька [11]. Автори вирішують завдання підбору невідомих параметрів диференціальних рівнянь адаптивного управління та з'ясовують можливість ідентифікації нестационарних параметрів.

Активізації використання теорії чутливості на широкий клас завдань управління та досліджень систем і агрегатів машин дано і в роботах Р.М. Юсупова, Ф.М. Захаріна [12], В.І. Городецького, Е.Н. Розенвассера [13], К. Спіді, Р. Брауна, Дж. Гудвіна [14], Ю.Я. Остова [15] і А.І. Рубана [16] та інші. В роботі Р.М. Юсупова і Ф.М. Захаріна [12] з'ясовано умови ідентифікованості невідомих параметрів диференціального рівняння управління систем, що відповідають впливам початкових умов, та розглянуто питання поліпшення коректності зворотних завдань управління. Зазначимо, що при експлуатаційному управлінні системами і агрегатами часто використовується метод послідовної оптимізації та виявляються можливості вирішення завдань ідентифікації постійних і змінних параметрів. Р.М. Юсупов, Ю.Я. Остов [15] і А.І. Рубан [16] на основі теорії чутливості визначають одночасно параметри звичайних диференціальних

рівнянь із врахуванням збурюючих впливів і початкових умов керування складними системами, розглянуто параметри лінійних однопараметричних об'єктів. При цьому розглянуто наступні варіанти підстроювання параметрів: початкові умови відомі і модель має структуру, яка збігається з об'єктом; початкові умови невідомі, але модель має структуру, яка збігається з об'єктом; початкові умови відомі і модель має структуру, яка не збігається з об'єктом.

Питання оптимізації регуляторів на основі теорії чутливості дано в роботі Б.М. Петрова і П.Д. Крутька [11], К. Спіді, Р. Браун і Дж. Гудвін [14] запропонували варіант застосування зв'язаних рівнянь для розрахунку складових градієнта функції якості за параметрами диференціального рівняння. Оскільки цю процедуру за початковими умовами реалізувати неможливо, звертаються до теорії чутливості.

Подальшого розвитку теорія чутливості набула у вигляді теорії відносної чутливості функцій (сенситивів), відображеної в роботах А.Г. Кузьменка [73] та В.В. Ауліна [18, 19]. 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 та еволюція його розвитку; визначення показників надійності систем і агрегатів машин за діагностичною інформацією; уточнення зв'язків між діагностичними параметрами і показниками надійності систем і агрегатів машин.

Постановка завдання. Метою даної роботи є виявити можливості теорії чутливості функцій на конкретному прикладі дослідження зміни функції технічного стану систем і агрегатів машин за допомогою критерію відносної чутливості (сенситиву).

Виклад основного матеріалу. Дослідження зміни функції технічного стану від зміни істотних факторів та параметрів за допомогою критерію відносної чутливості (сенситиву) має специфічний фізичний, геометричний та економічний зміст, а також істотні переваги у порівнянні з методами абсолютної чутливості, в основі яких покладено зміст похідної. В першу чергу істотною перевагою є те, що критерій відносної чутливості безрозмірна величина, яка має ряд інших характерних властивостей [20], яких можна дотримуватись та використовувати при аналізі бази даних про технічний стан систем і агрегатів та машин в цілому.

Математична сутність критерію чутливості будь-якої цільової функції полягає у побудові відношення відносного приросту цільової функції $f(x)$ стану до відносного приросту фактору або параметру:

$$\text{sen } f(x) = \frac{df(x)}{f(x)} \cdot \frac{x}{dx} = \frac{df(x)}{dx} \cdot \frac{x}{f(x)} = f'(x) \cdot \frac{x}{f(x)}. \quad (1)$$

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 машин. Взявши за основу вираз (1), критерій відносної чутливості кожного діагностичного параметру від факторів $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i$, має вигляд:

$$\text{sen } D_i(\alpha_i) = \frac{D'_i(\alpha_i)}{D_i(\alpha_i)} \cdot \alpha_i = f'_{\alpha_i}(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i) \cdot \frac{\alpha_i}{f(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i)}; \quad (2)$$

$$\text{sen } D_i(\beta_i) = \frac{D'_i(\beta_i)}{D_i(\beta_i)} \cdot \beta_i = f'_{\beta_i}(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i) \cdot \frac{\beta_i}{f(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i)}; \quad (3)$$

$$\text{sen} D_i(\gamma_i) = \frac{D_i'(\gamma_i)}{D_i(\gamma_i)} \cdot \gamma_i = f'_{\gamma_i}(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i) \cdot \frac{\gamma_i}{f(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i)}; \quad (4)$$

$$\text{sen} D_i(\delta_i) = \frac{D_i'(\delta_i)}{D_i(\delta_i)} \cdot \delta_i = f'_{\delta_i}(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i) \cdot \frac{\delta_i}{f(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i)}. \quad (5)$$

Зосередимо увагу на тому факті, що крім загального характеру дослідження функцій технічного стану систем, агрегатів і машин в цілому, встановлюється закономірність відносної зміни їх приросту від відносного приросту сукупності діагностичних параметрів. При цьому спостерігають закономірності зміни відносної чутливості функцій стану з напрацюванням. На цій основі будується необхідний математичний апарат з використанням властивостей абсолютної і відносної чутливостей функції технічного стану $S(D)$, як функції діагностичних параметрів, які є також функціями від напрацювання $D(t)$. Найбільш поширеною мірою абсолютної чутливості функцій стану до зміни факторів та функцій діагностичних параметрів $D(t)$ є їх кінцевий приріст або диференціал:

$$dS(D(t)) = \frac{dS(D(t))}{dD(t)} dD(t). \quad (6)$$

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

$$\frac{dS(D(t))}{dD(t)} = S'(D(t)). \quad (7)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial S(D_1(t), D_2(t), \dots, D_n(t))}{\partial D_1(t)} &= S'_{D_1}(D_1(t), D_2(t), \dots, D_n(t)); \frac{\partial S(D_1(t), D_2(t), \dots, D_n(t))}{\partial D_2(t)} = \\ &= S'_{D_2}(D_1(t), D_2(t), \dots, D_n(t)); \dots; \frac{\partial S(D_1(t), D_2(t), \dots, D_n(t))}{\partial D_n(t)} = S'_{D_n}(D_1(t), D_2(t), \dots, D_n(t)). \end{aligned} \quad (8)$$

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

$$\text{sen} S(D(t)) = \frac{dS(D(t))}{S(D(t))} \bigg/ \frac{dD(t)}{D(t)} = S'(D(t)) \cdot \frac{D(t)}{S(D(t))}, \quad (9)$$

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

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

$$\begin{aligned} \text{Sen} S_{D_1}(D_1(t)) &= S'_{D_1}(D_1(t)) \cdot \frac{D_1(t)}{S_{D_1}(D_1(t))}; \text{Sen} S_{D_2}(D_1(t)) = S'_{D_2}(D_1(t)) \cdot \frac{D_2(t)}{S_{D_2}(D_1(t))}; \dots; \\ \text{Sen} S_{D_n}(D_1(t)) &= S'_{D_n}(D_1(t)) \cdot \frac{D_i(t)}{S_{D_n}(D_i(t))}. \end{aligned} \quad (10)$$

Корисним при застосуванні критерію відносної чутливості є правило диференціювання логарифмічної функції стану технічного об'єкта:

$$\text{sen} S(D(t)) = \frac{d(\ln S(D(t)))}{d \ln D(t)} = \frac{(\ln S(D(t)))' S(D(t))}{(\ln D)' D(t)}. \quad (11)$$

В такому представленні критерій чутливості 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 визначає швидкість зміни приросту функції стану від зміни значень діагностичних параметрів, а абсолютна чутливість другого порядку від функції стану – швидкість швидкості зміни функції стану або прискорення зміни приросту функції стану 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 їх ефективно можна використовувати як критерії відносної чутливості при аналізі бази даних інформаційних технологій і методів обробки на ПК.

Корисним при розв'язанні технічних завдань є використання властивостей сенситивів (критеріїв відносної чутливості). При розгляді сукупності діагностичних параметрів технічного стану систем і агрегатів машин критерій відносної чутливості узагальнюється:

– функція технічного стану:

$$S(D(t)) = U_1(D(t)) + U_2(D(t)) + U_3(D(t)) + U_4(D(t)) + U_5(D(t)) + \dots = \sum_{i=1}^n U_i(D(t)); \quad (12)$$

– відносна чутливість функції технічного стану:

$$\begin{aligned} Sen(S(D(t))) = Sen(S(U_1(D(t)))) \frac{U_1(D(t))}{\sum U_i(D(t))} + Sen(S(U_2(D(t)))) \frac{U_2(D(t))}{\sum U_i(D(t))} + \\ + Sen(S(U_3(D(t)))) \frac{U_3(D(t))}{\sum U_i(D(t))} + \dots + Sen(S(U_5(D(t)))) \frac{U_5(D(t))}{\sum U_i(D(t))} + \dots, \end{aligned} \quad (13)$$

де $Sen(S(D(t)))$, $Sen(S(U_i(t)))$ – загальний та часткові відносна чутливості функції стану від діагностичних параметрів $D(t)$;

$U_i(D(t))$, $i = \overline{1, N}$ – функції їх зміни для різних систем і агрегатів машин.

Використовуючи методику реалізації теорії чутливості функцій технічного стану можливо отримати частинні критерії відносної чутливості по кожному з діагностичних параметрів при різному напрацюванні. При цьому функцію діагностичного параметру та загальну функцію надійності (ймовірність безвідмовної роботи) машин або систем і агрегатів можна вважати параметрично заданими:

$$\left. \begin{aligned} x_i &= D_i(t) \\ y_j &= P_j(t) \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

де i – індекс діагностичного параметру $D_i(t)$ технічного стану систем і агрегатів;

j – індекс системи або агрегату P_j – ймовірність їх безвідмовної роботи.

Використовуючи правила знаходження критерію відносної чутливості та його властивості, використовуючи параметричні рівняння (14) можна отримати критерій відносної чутливості діагностичного параметру як функції напрацювання:

$$sen D_i(t) = \frac{P_j(t)'}{D_i(t)'} \cdot \frac{D_i(t)}{P_j(t)} = \frac{\frac{dP_j(t)}{dt} \cdot D_i(t)}{\frac{dD_i(t)}{dt} \cdot P_j(t)}. \quad (15)$$

Рівняння (15) описує залежність відносної чутливості діагностичних параметрів від функції надійності агрегатів, систем або машин в цілому. Разом з тим необхідно зазначити уточнення тенденції зміни функції діагностичного параметру $D_i(t)$ від напрацювання. Для цього використаємо метод екстраполяції, який у своїй основі має припущення про те, що процес зміни діагностичного параметра є поєднанням двох складових регулярної і випадкової:

$$D_i(t) = D_i(\bar{a}, t) + d_i(t). \quad (16)$$

Вважається, що регулярна складова діагностичного параметра $D(\bar{a}, t)$ – це функція від напрацювання, 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 функцію, 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 $d_i(t)$ описує некорельовані процеси з нульовим математичним очікуванням. Її оцінка потрібна для подальшого визначення точності отриманої функції діагностичного параметру $D_i(t)$. Екстраполяційні методи дають можливість виділити найкращу тенденцію і при визначенні досліджуваних значень діагностичних параметрів шляхом їх екстраполяції. Попередня обробка наявних даних проводиться з метою перетворення їх до більш зручного виду для аналізу логіки і фізики процесу зміни діагностичного параметру. Це впливатиме на вибір виду екстраполюючої функції діагностичного параметру, а також і на визначення меж його зміни.

Отже, дослідження функції технічного стану систем, агрегатів і машин в цілому, ґрунтуються на основі дослідження діагностичних параметрів можливе за рахунок використання теорії відносної чутливості. Перевагою використання критерію відносної чутливості в аналізі технічного стану є те, що він є безрозмірною величиною і відображає фактичну відносну зміну діагностичного параметру відносно досліджуваної величини напрацювання та показника надійності систем, агрегатів і машин в цілому.

Виявлення напрямку розвитку технічного стану систем і агрегатів машин базується на використанні зазначеної методики та методів теорії чутливості й обчисленні критерію відносної чутливості (сенситив) з напрацюванням. Зміна кожного діагностичного параметра не є постійною величиною через те, що машини експлуатуються в різних умовах та режимах.

Аналіз динамічного розвитку діагностичних параметрів як функції напрацювання дав можливість запропонувати метод застосування її сенситиву і представити його у вигляді блок-схеми (рис.1).

Оскільки інтегральною характеристикою і оцінкою ресурсних показників машин є ймовірність безвідмовної роботи їх систем та агрегатів, то для того, щоб визначити напрямки розвитку інтегрального показника надійності, доцільно представити функцію надійності відносно діагностичних параметрів у параметричній формі (14). До даного представлення доцільно застосувати методи чутливості і визначити критерій відносної чутливості діагностичного параметру. Критерій не має розмірності і відображає характер розвитку диференціального діагностичного параметра системи і агрегатів машин відносно такого інтегрального показника як ймовірність безвідмовної роботи.

Можна бачити, що вирішення проблеми визначення розвитку технічного стану систем, агрегатів та машин в цілому за допомогою методів теорії чутливості і відповідного критерію відносної чутливості дає можливість розв'язати науково-технічної завдання удосконалення експлуатації машин.

Критерій відносної чутливості (синситив) діагностичних параметрів систем і агрегатів, спряжень їх деталей та машин в цілому відображає взаємозв'язок між показниками їх надійності та діагностичними параметрами технічного стану [21]. Враховуючи показники надійності систем і агрегатів машин та інформаційну базу значущих діагностичних параметрів, отримано залежності сенситивів досліджуваних діагностичних параметрів від напрацювання машин. Обробку даних проводили за допомогою пакетів прикладних програм на ПК. Отримані залежності сенситивів

діагностичних параметрів ЦПГ та системи мащення двигуна машин, що експлуатуються в умовах агропромислового виробництва, зведено в таблицю 1.

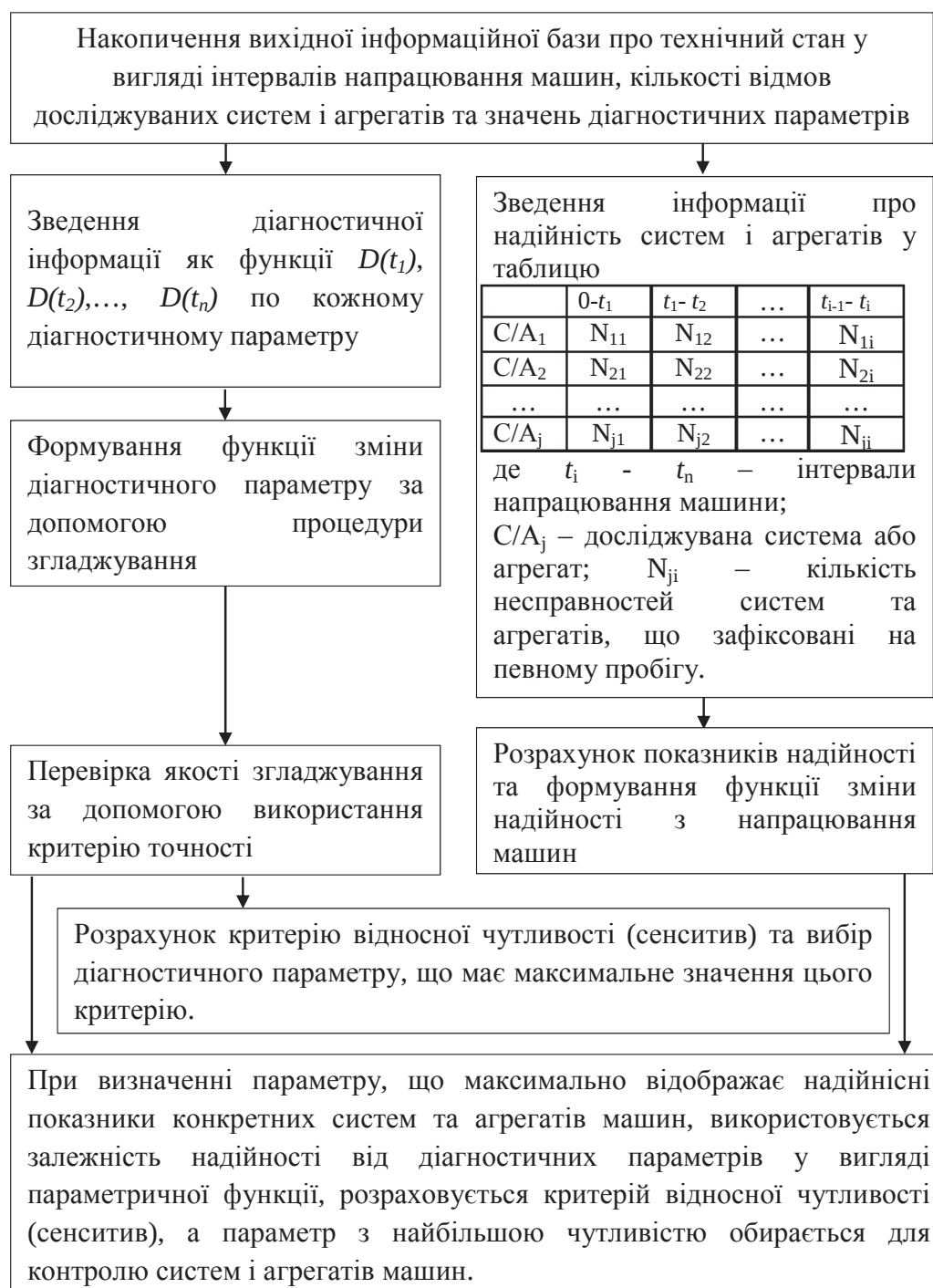


Рисунок 1 – Блок-схема методу визначення характеру динамічного розвитку діагностичних параметрів та показників надійності технічного стану систем і агрегатів машин

Джерело: розроблено автором

Таблиця 1 – Математичні моделі відносної чутливості (сенситивів) інформативно значущих діагностичних параметрів силових агрегатів машин з напрацювання

Циліндро-поршнева група	
Компресії в циліндрах силового агрегату	
КамАЗ-740	
$senD(t)_{КЦД.К740} = \frac{(-5,5 \cdot 10^{-11}t + 1,3 \cdot 10^{-6})(-2,4 \cdot 10^{-5}t - 1,47 \cdot 10^{-10}t^2 + 29,91)}{(-2,94 \cdot 10^{-10}t - 2,4 \cdot 10^{-5})(1,31 \cdot 10^{-6}t - 2,75 \cdot 10^{-11}t^2 + 0,987)}$	1
ЯМЗ-236	
$senD(t)_{КЦД.Я236} = \frac{(-5,5 \cdot 10^{-11}t + 1,3 \cdot 10^{-6})(-4,6 \cdot 10^{-2}t - 3,31 \cdot 10^{-6}t^2 + 28,89)}{(-6,62 \cdot 10^{-6}t - 4,6 \cdot 10^{-2})(1,31 \cdot 10^{-6}t - 2,75 \cdot 10^{-11}t^2 + 0,987)}$	2
Система мащення силового агрегату	
Масова частка механічних домішок в моторній оливі	
$senD(t)_{ДОД} = \frac{(1,3 \cdot 10^{-4}t - 8,5 \cdot 10^{-10}t^2 - 0,63)(-3,98 \cdot 10^{-10}t + 5,85 \cdot 10^{-15}t^2 + 21,9 \cdot 10^{-7})}{(-1,71 \cdot 10^{-9}t - 1,3 \cdot 10^{-4})(2,19 \cdot 10^{-6}t - 1,99 \cdot 10^{-10}t^2 + 1,95 \cdot 10^{-15}t^3 + 0,998)}$	3
Діелектрична проникність моторної оливи	
$senD(t)_{ДПОД} = \frac{(-3,98 \cdot 10^{-10}t + 5,85 \cdot 10^{-15}t^2 + 21,9 \cdot 10^{-7})(-3,78 \cdot 10^{-4}t + 1,14 \cdot 10^{-10}t^2 - 2,23)}{(2,28 \cdot 10^{-10}t + 3,78 \cdot 10^{-4})(2,19 \cdot 10^{-6}t - 1,99 \cdot 10^{-10}t^2 + 1,95 \cdot 10^{-15}t^3 + 0,998)}$	4
Температура спалаху моторної оливи	
$senD(t)_{СОД} = \frac{(-3,98 \cdot 10^{-10}t + 5,85 \cdot 10^{-15}t^2 + 21,9 \cdot 10^{-7})(-2,0 \cdot 10^{-5}t - 2,29 \cdot 10^{-8}t^2 - 223,4)}{(-4,58 \cdot 10^{-8}t - 2,0 \cdot 10^{-5})(2,19 \cdot 10^{-6}t - 1,99 \cdot 10^{-10}t^2 + 1,95 \cdot 10^{-15}t^3 + 0,998)}$	5
Лужне число моторної оливи	
$senD(t)_{ЛОД} = \frac{(-3,98 \cdot 10^{-10}t + 5,85 \cdot 10^{-15}t^2 + 21,9 \cdot 10^{-7})(-2,0 \cdot 10^{-5}t - 2,29 \cdot 10^{-8}t^2 - 223,4)}{(-4,58 \cdot 10^{-8}t - 2,0 \cdot 10^{-5})(2,19 \cdot 10^{-6}t - 1,99 \cdot 10^{-10}t^2 + 1,95 \cdot 10^{-15}t^3 + 0,998)}$	6

Джерело: розроблено автором

Отримані залежності відносної чутливості (сенситивів) діагностичних параметрів трансмісії машин, зведено в таблицю 2.

Таблиця 2 – Математичні моделі відносної чутливості (сенситивів) інформативно значущих діагностичних параметрів трансмісії машин з напрацюванням

Коробка переключення передач, головна передача	
Масова частка механічних домішок в трансмісійній оливі	
$senD(t)_{ДПОТ} = \frac{(4,59 \cdot 10^{-6}t + 3,28 \cdot 10^{-10}t^2 - 0,04)(-1,04 \cdot 10^{-9}t + 1,37 \cdot 10^{-14}t^2 + 14,1 \cdot 10^{-6})}{(6,56 \cdot 10^{-10}t + 45,9 \cdot 10^{-7})(1,14 \cdot 10^{-5}t - 5,21 \cdot 10^{-10}t^2 + 4,57 \cdot 10^{-15}t^3 + 0,884)}$	1
Діелектрична проникність трансмісійної оливи	
$senD(t)_{ДПОТ} = \frac{(-1,042 \cdot 10^{-9}t + 1,37 \cdot 10^{-14}t^2 + 14,1 \cdot 10^{-6})(2,19 \cdot 10^{-6}t + 3,64 \cdot 10^{-12}t^2 + 2,44)}{(7,28 \cdot 10^{-12}t + 21,9 \cdot 10^{-7})(1,41 \cdot 10^{-5}t - 5,21 \cdot 10^{-10}t^2 + 4,57 \cdot 10^{-15}t^3 + 0,884)}$	2
Лужне число трансмісійної оливи	
$senD(t)_{ЛОТ} = \frac{(1,11 \cdot 10^{-5}t - 5,1 \cdot 10^{-11}t^2 - 0,132)(-1,04 \cdot 10^{-9}t + 1,37 \cdot 10^{-14}t^2 + 14,1 \cdot 10^{-6})}{(-1,02 \cdot 10^{-10}t + 1,11 \cdot 10^{-6})(1,41 \cdot 10^{-5}t - 5,21 \cdot 10^{-10}t^2 + 4,57 \cdot 10^{-15}t^3 + 0,884)}$	3

Джерело: розроблено автором

Спираючись на математичні моделі відносної чутливості (сенситивів) інформативно значущих діагностичних параметрів (таблиці 1-2), отримаємо їх значення на діапазонах напрацювання машин. Оскільки значення сенситивів відображають відносну залежність і відсутність одиниць вимірювання, то це свідчить про можливість дослідження різнорідних діагностичних параметрів. Математичний апарат теорії відносної чутливості (сенситивів) у цьому напрямі є ефективним інструментом розв'язання прикладних технічних завдань.

Значення відносної чутливості (сенситивів) найбільш інформативних діагностичних параметрів технічного стану силового агрегату машин наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Оцінка локальних значень сенситивів інформативно значущих діагностичних параметрів систем та агрегатів машин

Напрацювання, тис.км	Сенситив компресії в циліндрах двигуна		Сенситив масової частки механічних домішок оливи	Сенситив діелектричної проникності оливи	Сенситив температури спалаху	Сенситив лужного числа оливи
	КамАЗ-740	ЯМЗ-236				
0	-1.654	$-8.335 \cdot 10^{-4}$	-0.011	-0.013	-24.516	-0.046
12	-0.567	$4.921 \cdot 10^{-3}$	-0.022	-0.018	0.743	0.037
24	0.207	$-3.823 \cdot 10^{-3}$	-0.131	-0.101	0.726	0.106
36	0.793	-0.024	-0.272	-0.17	0.446	-0.098
48	1.262	-0.056	-0.241	-0.103	0.122	-0.035
60	1.66	-0.103	1.455	0.223	-0.121	0.076

Джерело: розроблено автором

Аналіз отриманих значень відносної чутливості (сенситивів) діагностичних параметрів дав можливість оцінити та відібрати ті напрацювання, які за критерієм відносної чутливості, який є позитивним, на яких варто контролювати певні діагностичні параметри. Зазначимо, що розглядаються напрацювання машин, при значному впливі діагностичних параметрів на їх технічний стан. Проведеними дослідженнями виявлено, що при експлуатації силових агрегатів КамАЗ-740 компресію необхідно контролювати на діапазоні напрацювання 24...48 тис.км., а для ЯМЗ-236 – контрольне напрацювання буде на 12 тис.км. Контроль механічних домішок у моторній оливи та її діелектричну проникність варто проводити на 60 тис.км. Визначено, що температуру спалаху моторної оливи необхідно контролювати на інтервалі напрацювання 12...48 тис.км пробігу, а її лужне число – на 12...24 та 60 тис.км. Критерій відносної чутливості (сенситив) діагностичних параметрів силових агрегатів дає можливість виявити напрацювання, де планово-попереджувальна стратегія ТО не підтримує у своїх межах експлуатаційну надійність машин, але при цьому спостерігаються найбільші зміни технічного стану їх систем, агрегатів та машин в цілому.

Отримані значення сенситивів діагностичних параметрів технічного стану трансмісії ТМ наведені в таблиці 4.

Таблиця 4 – Оцінка відносної чутливості інформативно значущих діагностичних параметрів трансмісії з напрацюванням машин

Напрацювання, тис.км	Сенситив масової частки 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

Джерело: розроблено автором

Аналізуючи отримані значення відносної чутливості (сенситивів) інформативно значущих діагностичних параметрів технічного стану трансмісії, можливо формувати такі діапазони напрацювань, на яких слід здійснювати контроль досліджуваних діагностичних параметрів. Проведеними дослідженнями виявлено, що контроль масової частки механічних домішок в трансмісійній оливи слід проводити на інтервалах напрацювання 0...12 та 48...60 тис.км, а її діелектричної проникності оливи на 48...60 тис.км. Що стосується контролю лужного числа трансмісійної оливи, то його потрібно проводити на інтервалі 12...24 та 48...60 тис. км.

Висновки.

1. Розроблений підхід дослідження і контролю технічного стану систем і агрегатів та машин в цілому, який полягає в тому, що використовуючи взаємозв'язок діагностичних параметрів і показників надійності та, визначаючи відносні чутливості (сенситиви), є реальна можливість виявлення і усунення слабких місць в планово-попереджувальній стратегії технічного обслуговування та ремонту.

2. Показано, що за критерієм відносної чутливості інформативно значущих діагностичних параметрів можливо визначити діапазони напрацювань, на який доцільно проводити контроль та регулювання технічного стану машин, на яких слід проводити відповідні технічні дії по його покращенню.

3. Отримані результати дають підстави стверджувати, що впровадження критеріїв відносної чутливості (сенситиву) в теорію експлуатаційної надійності машин сприяє її подальшому розвитку.

4. Запропонований підхід визначення критеріїв відносної чутливості (сенситиву) інформативнозначущих діагностичних параметрів силового агрегату та трансмісії машин є ефективним в подальшому розвитку теорії їх експлуатаційної надійності та удосконаленні системи технічного обслуговування та ремонту машин.

Список літератури

1. Бодэ Г. Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью. М., Издательство иностр. лит, 1948. 112 с.
2. Бурков В.И., Егорышева А.В., Каргин Ю.Ф. Оптические и хиротропические свойства кристаллов со структурой силленита. *Кристаллография*. 2001. Т.46. № 2. С 356 - 380.
3. Гехер К. Теория чувствительности и допусков электронных цепей. М.: Сов. радио, 1973. 245 с.
4. Гриньків А.В., Аулін В.В., Лисенко С.В., Голуб Д.В., Мартиненко О.Д. Теоретико-фізичний підхід до діагностичної інформації про технічний стан агрегатів мобільної сільськогосподарської техніки. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. 2015. № 158. С. 252-262.
5. Кальянов В.П. Перспективный двигатель для транспортного средства. *Межвузовский научный сборник "Актуальные проблемы транспорта и пути их решения"*, Саратов, 2001. С.61-69.
6. Молодан А.А. Повышение надежности элементов трактора методами уравнивания их чувствительностей. *Вісник ХНАДУ*, 2005. С.95-100.
7. Tomovich R. Sensitivity analyses of dynamic systems. New York.: Mc.Graw. Hill. 1963. 313с.
8. Томович Р., Вукобратович М. Общая теория чувствительности М.: Советское радио, 1972. 240с.
9. 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.
10. Рубан А.И. Идентификация нелинейных динамических объектов на основе алгоритма чувствительности. Томск: Издательство ТУ, 1975. 271 с.
11. Петров Б.Н., Крутько П.Д. Применение теории чувствительности в задачах автоматического управления. *Техническая кибернетика*. 1970. №2. С.134 - 140.
12. Юсупов Р.М., Захарин Ф.М. Методы теории чувствительности в задачах идентификации динамических систем. Теория и применение адаптивных систем, 1971. С.145-158.
13. Городецкий В.К., Захарин Ф.М., Розенвассе Е.Н. Методы теории чувствительности в автоматическом управлении. Ленинград: Энергия, 1971. 179 с.
14. Спиди К., Браун Р., Гудвин Дж. Теория управления. М.: Мир, 1973. 248с.
15. Остов Ю.Я., Юсупов Р.М. Решение задачи наблюдения и идентификации возмущающих

- воздействий методом инверсной чувствительности. Вопросы кибернетики; Адаптивные системы, 1971. С. 175 - 186.
16. Рубан А.И. Идентификация распределенных динамических объектов на основе алгоритма чувствительности. Техническая кибернетика. Киев. АН СССР. 1971. №6. С.191-196.
 17. Теоретическая и экспериментальная трибология. Надежность узлов трения по прочности и износу: монография В 12т. / гол. ред. А.Г. Кузьменко Хмельницкий: ХНУ. 2011. Т.7. 391с.
 18. Аулін В.В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах: Монографія. Кіровоград: Видавець Лисенко В.Ф. 2014. 370с.
 19. 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., м. Харків: ХНАДУ, 2015. С.126-129.
 20. 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.
 21. Аулін В.В., Гриньків А.В. Методика вибору діагностичних параметрів технічного стану транспортних засобів на основі теорії сенситивів. *Науковий журнал "Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів"*. 2016. №5. С.109-117.

References

1. Bode, G. (1948). *Teoriya tsepey i proektirovanie usiliteley s obratnoy svyazu [Circuit theory and feedback amplifier design]*. M., Izdatelstvo inostr. lit. [in Russian].
2. Burkov, V.I., Egoryisheva, A.V. & Kargin, Yu.F. (2001). Opticheskie i hirotropicheskie svoystva kristallov so strukturoy sillenita [Optical and chirotopic properties of crystals with a sillenite structure]. *Kristallografiya - Crystallography, Vol.46, 2*, 356-380. [in Russian].
3. Geher, K. (1973). *Teoriya chuvstvitelnosti i dopuskov elektronnyih tsepey [Theory of sensitivity and tolerances of electronic circuits]*. Moscow : Sov. radio [in Russian].
4. Hryniv, A.V., Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Holub, D.V. & Martynenko, O.D. (2015) *Teoretyko-fizychnyi pidkhid do diahnostychnoi informatsii pro tekhnichniy stan ahrehativ mobilnoi silskohospodarskoi tekhniki [Theoretical and physical approach to diagnostic information about the technical camp of aggregates in mobile agricultural equipment]*. *Visnyk KhNTUSH im. P. Vasilenka - Bulletin of KhNTUSG im. P. Vasilenka*, 158, 252-262 [in Ukrainian].
5. Kalyanov, V.P. (2001). *Perspektivnyi dvigatel dlya transportnogo sredstva [A promising engine for a vehicle]*. *Mezhvuzovskiy nauchnyy sbornik "Aktualnyie problemy transporta i puti ih resheniya" - Interuniversity scientific collection "Actual problems of transport and ways to solve them"*, Saratov, 61-69 [in Russian].
6. Molodan, A.A. (2005). *Povyishenie nadezhnosti elementov traktora metodami uravneniya ih chuvstvitelnostey [Improving the reliability of tractor elements by methods of equating their sensitivities]*. *Visnik HNADU - Bulletin of the KhNADU*, 95-100 [in Russian].
7. Tomovich R. (1963). *Sensitivity analyses of dynamic systems*. New York.: Mc.Graw. Hill. [in English].
8. Tomovich, R. & Vukobratovich, M. (1972). *Obschaya teoriya chuvstvitelnosti [General theory of sensitivity]*. Moskwa: Sovetskoe radio [in Russian].
9. Agafonov, E.D. & Kirik, E.S. (2004). *Ob uchete nachalnyih usloviy v zadache neparametriceskoy identifikatsii nelineynyih dinamicheskikh protsessov s ispolzovaniem metoda linearizatsii [On taking into account the initial conditions in the problem of non-parametric identification of nonlinear dynamic processes using the linearization method]*. *Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya: Trudy III mezhdunarodnoy konferentsii - Identification of systems and control tasks: Proceedings of the III international conference*. 28 - 30 yanvarya 2004. M., S. 845-856 [in Russian].
10. Ruban, A.I. (1975). *Identifikatsiya nelineynyih dinamicheskikh ob'ektov na osnove algoritma chuvstvitelnosti [Identification of non-linear dynamic objects based on the sensitivity algorithm]*. Tomsk: Izdatelstvo TU [in Russian].
11. Petrov, B.N. & Krutko, P.D. (1970). *Primenenie teorii chuvstvitelnosti v zadachah avtomaticheskogo upravleniya [Application of sensitivity theory in automatic control problems]*. *Tekhnicheskaya kibernetika - Technical cybernetics*. №2. S.134-140 [in Russian].
12. Yusupov, P.M. & Zaharin, F.M. (1971). *Metodyi teorii chuvstvitelnosti v zadachah identifikatsii dinamicheskikh sistem [Methods of sensitivity theory in problems of identification of dynamical systems]*. *Teoriya i primeneniye adaptivnyih sistem - Theory and application of adaptive systems*, 145-158 [in Russian].
13. Gorodetskiy, V.K., Zaharin, F.M. & Rozenvasse, E.N. (1971). *Metodyi teorii chuvstvitelnosti v avtomaticheskoy upravlenii [Methods of sensitivity theory in automatic control]*. Leningrad: Energiya [in

- Russian].
14. Spidi, K., Braun, R. & Gudvin, Dzh. (1973). *Teoriya upravleniya [Control Theory]*. Moskva: Mir [in Russian].
 15. Ostov, Yu.Ya. & Yusupov, P.M. (1971). Reshenie zadachi nablyudeniya i identifikatsii vozmushchayushchih vozdeystviy metodom inversnoy chuvstvitelnosti [Solution of the problem of observation and identification of disturbing influences by the method of inverse sensitivity]. *Voprosy kibernetiki. Adaptivnyie sistemy - Questions of cybernetics; adaptive systems*, 175-186 [in Russian].
 16. Ruban, A.I. (1971). Identifikatsiya raspredelennykh dinamicheskikh ob'ektov na osnove algoritma chuvstvitelnosti [Identification of distributed dynamic objects based on sensitivity algorithm]. *Tekhnicheskaya kibernetika - Technical cybernetics*, 6, 191-196 [in Russian].
 17. Kuzmenko, A.G. (2011). Teoreticheskaya i eksperimentalnaya tribologiya. Nadezhnost uzlov treniya po prochnosti i iznosu: monografiya [Theoretical and experimental tribology. Reliability of friction units in terms of strength and wear: monograph]. (Vols 12). A.G. Kuzmenko (Eds.). Hmel'nytskiy: HNU. Vol.7, 391 [in Russian].
 18. Aulin, V.V. (2014). *Fizychni osnovy protsesiv i staniv samoorhanizatsii v trybotekhnichnykh systemakh: Monografiya [Physical bases of processes and states of self-organization in tribotechnical systems: Monograph]*. Kirovohrad: Vydavets Lysenko V.F. [in Ukrainian].
 19. Aulin, V.V., Hrynkiv, A.V. & Livitskiy, O.M. (2015) Matematychnyi aparat dlia otsinky diahnostychnykh parametriv ta vyznachennia optymalnoi yikh kilkosti [Mathematical apparatus for estimating diagnostic parameters and determining their optimal number]. *Zb. materialiv IV Mizhnar. nauk.-tekhn. internet-konf. Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnologii - Coll. materials IV International. scientific and technical internet conference Car and electronics. Modern technologies*, 17-19 lystopada 2015 r., m. Kharkiv: KhNADU, 2015. S.126-129 [in Ukrainian].
 20. Aulin, V.V. & Hrynkiv, A.V. (2017). Teoretychnyi analiz diahnostychnykh parametriv tekhnichnoho stanu system ta ahrehativ zasobiv transportu za dopomohoiu metodiv teorii chutlyvosti [Theoretical analysis of diagnostic parameters of technical condition of systems and units of vehicles using the methods of sensitivity theory]. *Naukovyi visnyk NUBiPU. Seriya: tekhnika ta enerhetyka APK - Scientific Bulletin of NULES. Series: machinery and energy of agro-industrial complex*, Issue. 262, 227-239 [in Ukrainian].
 21. Aulin, V.V. & Hrynkiv, A.V. (2016). Metodyka vyboru diahnostychnykh parametriv tekhnichnoho stanu transportnykh zasobiv na osnovi teorii sensytyviv [Methods of choosing diagnostic parameters of technical condition of vehicles based on the theory of sensitivities]. *Naukovyi zhurnal "Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv" – Scientific journal "Technical service of agro-industrial, forest and transport complexes"*, 5, 109-117 [in Ukrainian].

Viktor Aulin, Prof., DSc.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

The Use of Methods of Theory of Sensitivities in Solving Problems of Technical, Transport and Production Systems and Processes

The criterion of its relative sensitivity (sensitivity) is constructed on the example of the function of technical condition of systems and units of machines as a function of diagnostic parameters. The relative criterion of sensitivity (sensitivity) for each diagnostic parameter and function of the state of weighting factors and operating time is considered.

Using the properties of sensitivities and the method of realization of the theory of sensitivity of functions, partial criteria of relative sensitivity are obtained. Considering the set of functions of diagnostic parameters and reliability functions as functions of probability of trouble-free operation, it is shown that they are parametrically set. The connection of sensitivities of diagnostic parameters with the level of reliability of systems, units and machines in general is established.

The block diagram of a method of definition of character of dynamic development of diagnostic parameters and indicators of reliability of a technical condition of systems and units of cars is developed. Mathematical models of relative sensitivity (sensitivity) for the most informatively significant diagnostic parameters of power units and transmissions are built on the basis of experimental research data.

It is shown that mathematical models of sensitivity of diagnostic parameters allow to determine local values of sensitivity on operating ranges and are an effective tool for selection of operating ranges on which certain diagnostic parameters should be controlled to ensure proper reliability of systems, units and machines as a whole.

sensitivity, technical system, technical condition, diagnostic parameter, reliability function, power unit, transmission

Одержано (Received) 09.02.2022

Прорецензовано (Reviewed) 16.02.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022