



**МАШИНИ І ЗАСОБИ МЕХАНІЗАЦІЇ**  
**СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА**

УДК 621.436: 534

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ  
ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МЕХАНІЗМІВ  
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ**

**Войтюк В. Д., д.т.н.,**

**Тітова Л. Л.,**

**Надточій О. В., к.т.н.,**

**Роговський І. Л., к.т.н.**

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

e-mail: rogovskii@yandex.ua

**Анотація** - розглянуто модель розпізнавання образу справно-го і несправно-го станів циліндро-поршневої групи (далі – ЦПГ) при віброакустичному діагностуванні сільськогосподарської техніки. Для моделі використані дані відносної амплітуди та фази виникнення удару в ЦПГ. Моделювання проводилось в пакеті **Mathcad 15**.

**Ключові слова:** образ, розпізнавання, спектр, амплітуда, баланс енергії, правдоподібність, прецедент.

*Постановка проблеми.* Методи розпізнавання образів являють собою найбільш математизований розділ теорії штучного інтелекту, в якому вирішуються задачі, пов'язані з класифікацією об'єктів довільної природи [1]. Розпізнавання образів одна з тих задач, які постійно в щоденному житті вирішує «природний» інтелект. Зусилля ж вчених вже на протязі півстоліття направлені на розробку методів і алгоритмів «автоматичного» вирішення цієї задачі [2]. Стосовно питань віброакустичного діагностування навіть отримавши цілком достовірні дані, головним питанням стає питання класифікації. Куди віднести ці дані, до якого класу (образу)? Визначення ступеню зношеності з'єднання «поршень-гільза» при віброакустичному діагностуванні здійснюється шляхом отримання ряду непрямих (побічних) параметрів: амплітуда, потужність, спектр, фаза тощо [3]. Отримання одноз-

начного діагнозу (класифікація) є досить актуальним завданням, особливо з позиції автоматизації прийняття рішення.

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* Стан системи описується множиною параметрів, які його визначають [4]. Розпізнавання стану системи можливе за рахунок віднесення її до одного із всіх класів (діагнозів) [5]. Число діагнозів (класів, типових станів, еталонів) залежить від особливостей задачі і мети дослідження [6, 7].

Стосовно віброакустичного діагностування ЦПГ найбільш інформаційними параметрами можуть виступати максимальна енергія віброударного посилання від перекладки поршня в зазорі  $x_1$  та фаза його виникнення  $x_2$  (рис. 1, а). Найбільш просто адаптуються (трансформуються) на багатомірні системи методи мінімального ризику та метод найбільшої правдоподібності [8, 9]. У випадках, коли в методі статистичного рішення потрібно визначити межі області прийняття рішення, розрахункова сторона задачі суттєво ускладнюється [10]. Тому для спрощення розглянемо процес розпізнавання при наявності одного діагностичного параметру –  $x$  фази виникнення віброударного посилання (рис. 1, б).

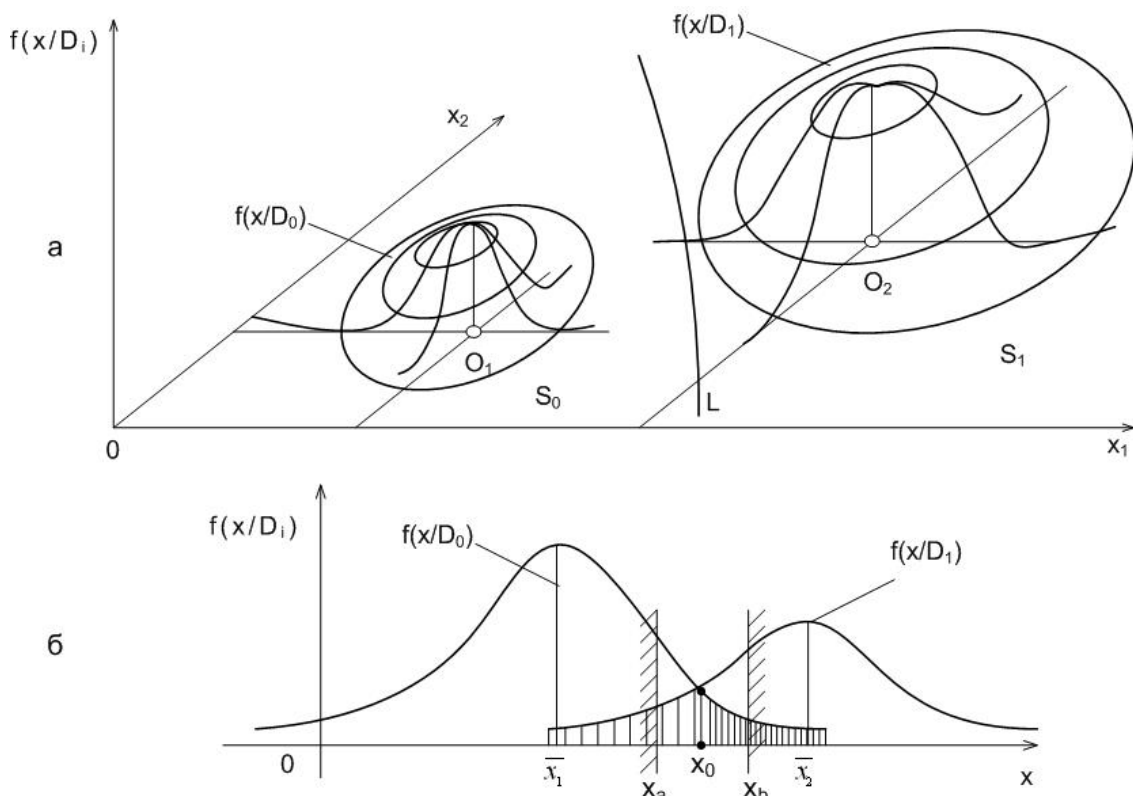


Рис. 1. Схема статистичного розподілу  $D_0$  – роботоздатного та  $D_1$  – нероботоздатного станів ЦПГ: а – для двох діагностичних ознак.; б – для однієї діагностичної ознаки.

*Виклад основного матеріалу дослідження.* Задача полягає у встановленні для з'єднання “поршень – гільза” одного з діагнозів “справне” чи “не справне”. Сукупність послідовних дій у процесі розпізнавання і є потрібним алгоритмом розпізнавання. Суттєвою частиною процесу розпізнавання є вибір параметрів роботи алгоритмів, які б повністю описували і виявляли зміну стану системи. Дані ж параметри повинні бути досить інформативними, щоб при вибраному числі діагнозів існувала можливість процесу розділення. Фактично ж стосовно даної задачі завдання полягає у виборі значення  $x_0$  параметра  $x$  таким чином, що при  $x > x_0$  слід приймати рішення про зняття двигуна з експлуатації, а при  $x_0 < x$  продовжувати подальшу його експлуатацію. Так як стан системи характеризуватимемо одним параметром, то система матиме одинірний простір (матрицю-вектор) ознак. Розділення проводиться на два класи (образи стану). Умовимося вважати:  $D_0$  – образ справного стану і  $D_1$  – образ несправного стану. Тоді стан системи може бути описаний таким виразом:

при 
$$\begin{cases} x < x_0 & x \in D_0 \\ x > x_0 & x \in D_1 \end{cases}, \quad (1)$$

Фаза виникнення віброударного посилення неоднозначно характеризує стан ЦПГ дизельного двигуна (нерівномірна подача палива, спрацювання газорозподільчого механізму тощо (рис. 2).

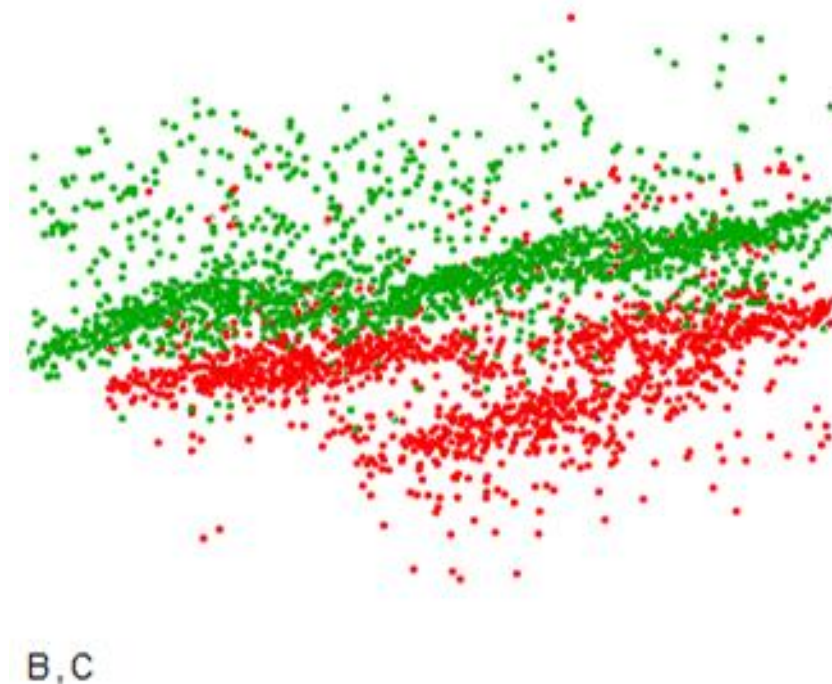


Рис. 2. Реальний розподіл фази удару в ЦПГ з відповідними зонами справного (зелений) і несправного (червоний) станів з'єднання.



У залежності від зазначених факторів закон розподілу фази  $x$  відповідно для справного і несправного стану системи “циліндр–поршень” може мати вигляд показаний на рис. 1, б. Суттєво те, що області справного і несправного (дефектного) станів пересікаються і тому в спільній зоні принципово неможливо вибрати значення  $x_0$ , при якому правило (1) не давало б помилкових рішень.

Розглянемо для початку можливі помилки при прийнятті рішень стану системи. Хибна тривога (помилка першого виду  $\alpha$ ) – випадок, коли приймається рішення про несправний стан системи, хоча в дійсності вона перебуває в справному стані, тобто замість  $D_0$  приймається  $D_1$ .

Пропуск дефекту (помилка другого виду  $\beta$ ) – прийняття рішення про справний стан, тоді як система є несправною (замість  $D_1$  приймається  $D_0$ ).

Вирішальне правило у відповідності з яким приймається рішення про діагноз за методом Байєса полягає у порівнянні ознаки  $x$  з рівнем розпізнавання  $P_i$  для діагнозу  $D$ . При цьому вірогідність найближчого конкуруючого діагнозу не вище  $1-P_i$ .

Для виявлення дійсного стану системи позначимо через  $\Pi_{i,j}$  ( $i=0,1; j=0,1$ ) можливі рішення за правилом (1) ( $i$ –індекс прийнятого діагнозу,  $j$  – індекс дійсного стану). Тоді  $\Pi_{0,1}$  – пропуск дефекту, а  $\Pi_{1,0}$  – хибна тривога;  $\Pi_{0,0}, \Pi_{1,1}$ – правильні рішення.

Розглянемо вірогідність хибної тривоги  $P(\Pi_{1,0})$  при використанні правила (1). Площа під кривою щільності вірогідності справного стану, яка відповідає  $x > x_0$ , виражає умовну вірогідність ситуації  $x > x_0$  для справної системи

$$P(x > x_0 / D_0) = \int_{x_0}^{\infty} W\left(\frac{x}{D_0}\right) dx \quad (2)$$

Вірогідність хибної тривоги визначається, як добуток двох подій: наявність справного стану і значення  $x > x_0$ . Тоді

$$P(\Pi_{1,0}) = P(D_0) \cdot P(x > x_0 / D_0) = P_0 \int_{x_0}^{\infty} W\left(\frac{x}{D_0}\right) dx, \quad (3)$$

де  $P_0$  – апіорна вірогідність діагнозу  $D_0$ .

Подібним чином знаходимо вірогідність пропуску дефекту

$$P(\Pi_{0,1}) = P(D_1) \cdot P(x < x_0 / D_1) = P_1 \int_{-\infty}^{x_0} W\left(\frac{x}{D_1}\right) dx, \quad (4)$$

У більшості випадків при віброакустичному діагностуванні рішення про віднесення ознаки  $x$  діагностування до класу  $D_0$  чи  $D_1$  мо-



жна пов'язати з величиною відношення правдоподібності  $L(\vec{x})$  (відношення щільності вірогідності розподілу  $x$  при двох станах)

$$L(\vec{x}) = \frac{W(\vec{x}/D_1)}{W(\vec{x}/D_0)}, \quad (5)$$

де  $W(\vec{x}/D_0)$  – щільність вірогідності розподілу  $x$  при справному стані;

$W(\vec{x}/D_1)$  – щільність вірогідності розподілу  $x$  при несправному стані.

У відповідності з правилом (1) за методом мінімального ризику приймається наступне рішення про стан об'єкта, який має дане значення параметра  $x$ .

$$x \in D_0 \quad \text{якщо} \quad \frac{W(\vec{x}/D_1)}{W(\vec{x}/D_0)} > \frac{(\Pi_{0,1} - \Pi_{1,1}) \cdot P_1}{(\Pi_{1,0} - \Pi_{0,0}) \cdot P_0}, \quad (6)$$

$$x \in D_1 \quad \text{якщо} \quad \frac{W(\vec{x}/D_1)}{W(\vec{x}/D_0)} < \frac{(\Pi_{0,1} - \Pi_{1,1}) \cdot P_1}{(\Pi_{1,0} - \Pi_{0,0}) \cdot P_0}$$

де  $\frac{(\Pi_{0,1} - \Pi_{1,1}) \cdot P_1}{(\Pi_{1,0} - \Pi_{0,0}) \cdot P_0}$  – заздалегідь вибраний рівень розпізнавання (зазвичай  $\geq 0,9$ ).

Таким чином, використовуючи залежності (5), (6) для прийняття рішення не потрібне визначення значення параметру  $x_0$ .

Відношення правдоподібності несе всю статистичну інформацію, яка міститься в векторі діагностичних ознак. Хоча на практиці буває дещо зручніше розглядати не відношення правдоподібності, а логарифм цього відношення. Це не змінює результату, так як логарифмічна функція монотонно зростає разом із своїм аргументом, але для нормального і деяких інших законів розподілу використання логарифму відношення правдоподібності є дещо простішим.

Тоді:



$$\begin{aligned}
 x \in D_0 \quad \text{якщо} \quad \ln L\left(\overset{\rightarrow}{x}\right) &> \ln \left[ \frac{(\Pi_{0,1} - \Pi_{1,1}) \cdot P_1}{(\Pi_{1,0} - \Pi_{0,0}) \cdot P_0} \right], \\
 x \in D_1 \quad \text{якщо} \quad \ln L\left(\overset{\rightarrow}{x}\right) &< \ln \left[ \frac{(\Pi_{0,1} - \Pi_{1,1}) \cdot P_1}{(\Pi_{1,0} - \Pi_{0,0}) \cdot P_0} \right]
 \end{aligned} \tag{7}$$

Слід також зважати на те, що оцінки вартості помилок першого  $\alpha$  та другого виду  $\beta$  часто бувають невідомі, а їх достовірне визначення пов'язане із значним ускладненням. Тому бажано завжди при певному рівні однієї із помилок (частіше першого виду) мінімізувати значення іншої. В практиці для попередніх розрахунків значення цих помилок приймають  $\alpha = \beta = 0.05$ . Після прийняття рішення про стан системи відповідні значення помилок потребують уточнення. Для цього використовуються залежності:

$$\left\{ \begin{aligned}
 \alpha &= \frac{N_{\Pi_{1,0}}}{N_{\Pi_{0,0}} + N_{\Pi_{1,0}}} \\
 \beta &= \frac{N_{\Pi_{0,1}}}{N_{\Pi_{1,1}} + N_{\Pi_{0,1}}}
 \end{aligned} \right. , \tag{8}$$

де  $N_{\Pi_{1,0}}$ ,  $N_{\Pi_{0,1}}$  – кількість неправильних рішень відповідно для справного і несправного станів системи;

$N_{\Pi_{0,0}}$ ,  $N_{\Pi_{1,1}}$  – кількість правильних рішень відповідно для справного і несправного станів.

Хоча метод Байєса займає особливе місце серед методів технічної діагностики, йому притаманні деякі недоліки: великий об'єм попередньої інформації, “пригнічення” діагнозів, які рідко зустрічаються та наявність одного рівня порівняння, що в решті решт створює перешкоди при використанні, при наявності спільної зони законів розподілу діагностичної ознаки  $x$  для справного і несправного станів.

Тому для двокласової задачі розпізнавання оптимальним є послідовний метод, який визначається наступними нерівностями:

При прийнятті рішення  $D_0$ :

$$\begin{cases}
 \ln C_0 < \ln L(x_1 \dots x_{n-1}) < \ln C_1, \\
 \ln C_0 \geq \ln L(x_1 \dots x_n)
 \end{cases} , \tag{9}$$

При прийнятті рішення  $D_1$ :





$$\begin{cases} \ln C_0 < \ln L(x_1 \dots x_{n-1}) < \ln C_1, \\ \ln L(x_1 \dots x_n) \geq \ln C_1 \end{cases}, \quad (10)$$

де  $C_0$  і  $C_1$  – пороги відповідно для справного і несправного станів.

Пороги  $C_0$  і  $C_1$  визначаються за формулами:

$$C_1 = \frac{1 - \beta_{зад}}{\alpha_{зад}} \quad C_0 = \frac{\beta_{зад}}{1 - \alpha_{зад}} \quad (11)$$

де  $\alpha_{зад}$  і  $\beta_{зад}$  – задані вірогідності помилок першого та другого виду.

В даному випадку, коли потрібна висока надійність розпізнавання, доцільно ввести зону невизначеності (зону відмови від розпізнавання). Правило прийняття рішення в цьому випадку буде мати вигляд (рис. 2):

$$\begin{cases} \text{при } x < x_a & x \in D_0 \\ \text{при } x > x_b & x \in D_1 \\ \text{при } x_a < x < x_b & x \notin D_0, D_1 \end{cases}, \quad (12)$$

Коли виконується умова  $x_a < x < x_b$  настає відмова від розпізнавання.

Відмова від розпізнавання свідчить, що наявної інформації недостатньо для прийняття рішення і потрібні додаткові дані.

При попаданні в зону невизначеності слід використовувати зрізаний метод.

Він полягає в тому, що при досягненні встановленої кількості накоплені значення логарифму відношення правдоподібності порівнюються тільки з одним порогом  $C$  при  $n_i = n_{max}$ . Найчастіше  $C = 1$ .

Тобто:

$$\begin{cases} \ln C_0 < \ln L(x_1 \dots x_{n_{max}}) \Rightarrow (x_1 \dots x_{n_{max}}) \in D_0 \\ \ln C_0 < \ln L(x_1 \dots x_{n_{max}}) < \ln C_1 \Rightarrow \ln L(x_1 \dots x_{n_{max}}) \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \ln C, \\ \ln C_1 < \ln L(x_1 \dots x_{n_{max}}) \Rightarrow (x_1 \dots x_{n_{max}}) \in D_1 \end{cases} \quad (13)$$

При використанні цього методу вірогідність помилок  $\alpha_{зріз}$  і  $\beta_{зріз}$  стає

більшою ніж  $\alpha_{\text{зад}}$  і  $\beta_{\text{зад}}$ , так як помилкові рішення можливо і не з'явилися б при продовженні діагностування за послідовною схемою.

Аналіз даних методів свідчить, що для адаптивного непараметричного синтезу оптимальних методів в умовах апріорної не обумовленості необхідно визначити наступні дані:

– закони розподілу віброакустичної ознаки  $W(\vec{x}/D_1)$  і  $W(\vec{x}/D_0)$

для класів;

– значення помилок першого і другого виду  $\alpha$  і  $\beta$ ;

– максимальну кількість діагностичних ознак  $n_{\text{max}}$  для штучного зрізування;

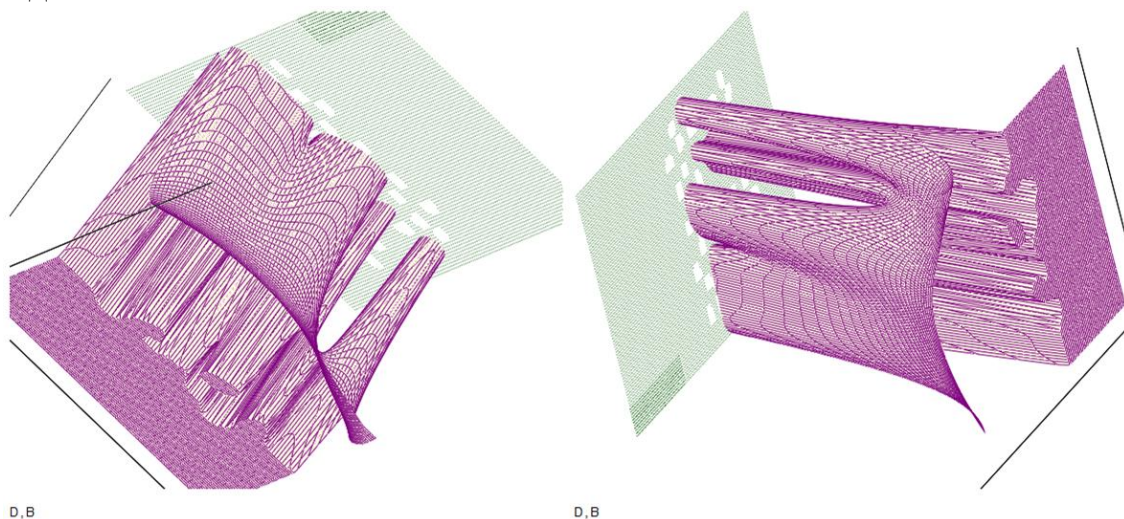
– величину порогів  $C$ ,  $C_0$  та  $C_1$ .

Наведені теоретичні залежності алгоритму були використані нами для розробки комп'ютерної програми прийняття рішення (Mathcad 15), при діагностуванні ЦПГ дизельних двигунів за діагностичною ознакою – фазою виникнення віброакустичного посилення від перекладки поршня.

Була знайдена дискримінантна функція по прецедентах методом потенціальних функцій (рис. 3).

Результатом роботи програми було створення гістограм розподілу щільності вірогідності векторів діагностичних ознак по навчальній вибірці.

Наведені закономірності розподілу щільності вірогідності та відповідних логарифмів відношення правдоподібності приведені на рис. 4 для  $1000 \text{ хв}^{-1}$ .



D, B

D, B

Рис. 3. Візуалізація дискримінантної функції і прецедентів.



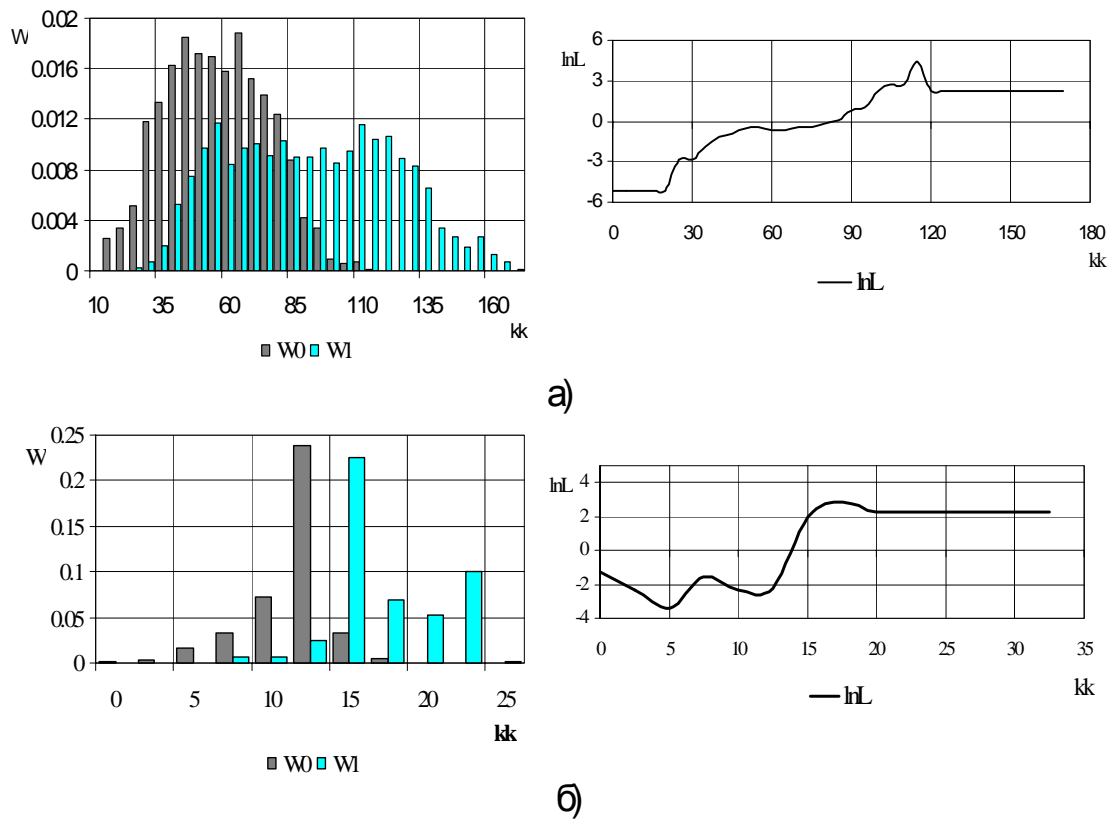


Рис. 4. Гістограми розподілу щільності вірогідності векторів діагностичних ознак та логарифмів відношення правдоподібності при  $1000 \text{ хв}^{-1}$  (а – відносна амплітуда, б – фаза).

Аналіз приведених закономірностей показує, що характеристика розподілу фази є одномодальною, тоді як амплітуда має двомодальний характер (“двогорбий”). Як видно з графіків області справного  $D_0$  і несправного  $D_1$  станів перетинаються. Величина зони невизначеності значно більша у амплітудного параметру і становить –18 комірок (величина комірки 5). Зона невизначеності для фазового параметру становить 5 комірок (величина комірки 2.5). Однак, порівнюючи величини щільностей вірогідності векторів фази в зоні перекриття, можна відмітити значну різницю між векторами справного і несправного станів, що свідчить про добру роздільність цих станів.

*Висновки.* Проведений розрахунок показує, що достатньо адекватне розпізнавання стану з’єднання “поршень – гільза” системи ЦПГ дизельного двигуна сільськогосподарської техніки можливе для діагностичної ознаки – фази виникнення віброакустичного імпульсу викликаного перекладкою поршня при  $1000 \text{ хв}^{-1}$ .

При цьому значення хибної тривоги не перевищить 7 випадків на 1000 об’єктів діагностування, а значення пропуску дефекту 20 випадки на 1000. Ці дані певною мірою можуть характеризувати точність постановки діагнозу про дійсний стан ЦПГ.

*Література*

1. Войтюк В. Д. Якість, стандартизація, метрологія та сертифікація сільськогосподарської техніки / [В. Д. Войтюк, М. І. Денисенко, О. С. Дев'ятко та ін.]. – Полтава : Крюков Ю. С., 2014. – 287 с.
2. Войтюк В. Д. Модель системи показників якості формувань технічного обслуговування при їх сертифікації / В. Д. Войтюк // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – К., 2014. – Вип. 196, ч. 1. – С. 31–40.
3. Биргер И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
4. Балицкий М. Л. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / М. Л. Балицкий, М. А. Иванова, А. Г. Соколова., В. Б. Соколинский. – М.: Машиностроение, 1984. – 216 с.
5. Гилл Ф. Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт. – М.: Мир, 1985. – 340 с.
6. Дуда Р. Распознавание образов и анализ сцен / Р. Дуда, П. Харт. – М.: Мир, 1976. – 246 с.
7. Горбань А. Н. Нейринформатика / А. Н. Горбань, Д. А. Россиев, А. Н. Кирдин. – Новосибирск: Наука, 1998. – 304 с.
8. Демко О. А. Визначення залишкової потужності і коефіцієнта завантаження двигуна в залежності від експлуатаційних показників і технічного стану / О. А. Демко, А. А. Демко, О. В. Надточій // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – К., 2014. – Вип. 196, ч. 1. – С. 101–112.
9. Надточій О. В. Теоретичні спектри віброакустичних сигналів ЦПГ і їх зв'язок з тривалістю ударів / О. В. Надточій, Л. Л. Тітова // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – К., 2015. – Вип. 241. – С. 151–159.
10. Роговский Иван. Стохастические модели обеспечения работоспособности сельскохозяйственных машин / Иван Роговский // Motrol: Motorization and power industry in agriculture. – 2014. – Том 16, №3. – Р. 296–302.



## **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕХАНИЗМОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ**

*В. Д. Войтюк, Л. Л. Титова, А. В. Надточий, И. Л. Роговский*

**Аннотация** - рассмотрена модель распознавания образа исправного и неисправного состояний ЦПГ при виброакустическом диагностировании. Для модели использованы данные относительной амплитуды и фазы возникновения удара в ЦПГ. Моделирование проводилось в пакете Mathcad 15.

## **AUTOMATED RECOGNITION SYSTEM OF PARAMETERS OF TECHNICAL CONDITIONS MECHANISMS AGRICULTURAL MACHINERY**

*V. Voytyuk, L. Titova, O. Nadtochy, I. Rogovskii*

### ***Summary***

**The model of recognition of the image of the healthy and faulty States at CPG wmrootmenu the diagnosis. For the model used data from the relative amplitude and phase of emergence of a kick in the CPG Modeling was carried out in MathCAD 15.**