

## ОБҐРУНТУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДІАГНОСТУВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ СТОЯКОВИХ ПІДШИПНИКІВ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ

*Ярослав Марущак, д. т. н., Іван Дробот, Дмитро Гречин, к. т. н.*  
*Львівський національний університет природокористування,*  
*вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,*  
*e-mail: ya.marushchak@gmail.com; dim39.2017@gmail.com, hrechynd@ukr.net*

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.105-111>

### **Марущак Я., Дробот І., Гречин Д. Обґрунтування характеристик діагностування експлуатаційних показників стоякових підшипників турбогенераторів**

Виявленню та усуненню несправностей потужних турбогенераторів (ТГ) присвячена значна кількість робіт. Слід відзначити, що суттєвий вплив на ефективну роботу ТГ мають його стоякові підшипники. Значна кількість аварій ротора зумовлена відмовами саме стоякових підшипників. Тому наше дослідження присвячене аналізу інформаційного забезпечення діагностування стоякових підшипників, яке надалі слугуватиме ухваленню рішення про їх стан ще до настання аварійної ситуації.

Відомо, що до стоякових підшипників мастило подається під тиском. Очевидно, що під час роботи ТГ відбувається потрапляння металевих включень у мастило підшипника, які опосередковано вказують на погіршення стану поверхні вкладишів підшипника. Крім того, порушення конструкції підшипникового вузла ТГ може проявлятися збільшенням вібрації. За їх величиною також опосередковано можна судити про стан цього вузла.

Отже, аналізуючи конструктивні особливості підшипників ТГ, а також фізичні процеси, що в них відбуваються, можна зробити висновок про можливість використання інформації про вміст металевих включень у мастилi та величину вібрації стояка підшипника ТГ для розпізнавання стану стоякового підшипника. З іншого боку, не має об'єктивної оцінки, вираженої у числовому представленні, того, що ці дві діагностичні ознаки дійсно є інформативними для розпізнавання станів стоякових підшипників ТГ.

Дана праця присвячена обґрунтуванню інформаційного забезпечення процедури діагностування стану підшипникових вузлів ТГ. Це можна вирішити за допомогою розрахунку величини інформації, яка відображає взаємозв'язок вибраних діагностичних ознак з технічним станом стоякових підшипників ТГ.

Величини інформації, які розраховані за результатами обстежень мастила і вібрації стоякового підшипника ТГ, показали, що обидві ці діагностичні ознаки є інформативними щодо його станів. Слід відзначити високі рівні інформації про непрацездатний стан стоякових підшипників, якщо проводиться обстеження за цими двома діагностичними ознаками. Таким чином, отримано об'єктивні підтвердження рекомендацій щодо обстеження стоякових підшипників ТГ за станом мастила та величиною вібрації корпусу стояка у числовому представленні.

**Ключові слова:** турбогенератор, стояковий підшипник, діагностична ознака, ентропія, величина інформації, працездатний стан, непрацездатний стан.

### **Marushchak Ya., Drobot I., Hrechyn D. Justification of the characteristics of diagnosing operational indicators of turbine generator standoff bearings**

A significant amount of research has focused on detecting and eliminating malfunctions in powerful turbogenerators (TG). One important aspect to consider is the impact of standoff bearings on the effective operation of the TG. Failures in these bearings are responsible for a substantial number of rotor accidents. Therefore, this work analyzes the information support necessary for diagnosing standoff bearings, which will aid in assessing their condition before any emergencies arise.

It is known that grease is supplied to the standoff bearings under pressure. During the operation of the TG, metal inclusions can enter the bearing grease, indicating deterioration in the surface condition of the bearing liners. Additionally, any alterations to the design of the TG bearing assembly may also be reflected by an increase in vibration. This vibration can provide further insight into the assembly's condition.

By examining the design features of TG bearings and the physical processes at play, we can deduce that information regarding the presence of metal inclusions in the lubricant, alongside the vibration levels of the TG standoff bearing, can be used to assess its condition. However, there is currently no objective assessment, in numerical form, demonstrating that these two diagnostic features are indeed effective for evaluating the state of TG standoff bearings.

This work aims to justify the information support for the procedure used to diagnose the condition of TG bearing assemblies. This can be achieved by calculating the amount of information that reflects the relationship between the chosen diagnostic features and the technical condition of the TG standoff bearings.

The information derived from inspections of the lubricant and vibration of the TG bearing stands indicates that both diagnostic features are informative concerning their condition. Notably, high levels of information regarding the inoperable state of the standoff bearings are obtained when inspections focus on these two parameters. Thus, it is the objective confirmation of the

recommendation to inspect TG standoff bearings based on the condition of the lubricant and the magnitude of the housing vibration, represented in numerical terms.

**Keywords:** turbogenerator, standoff bearing, diagnostic feature, entropy, amount of information, working conditions, inoperable state.

**Постановка проблеми.** Процес вироблення електроенергії тепловими й атомними електростанціями передбачає декілька перетворень різних видів енергії, зокрема перетворення теплової енергії пари в механічну енергію обертання турбіни та ротора генератора, а також перетворення механічної енергії в електричну [3; 8–9; 11]. Ці два процеси відбуваються в турбогенераторах (ТГ). Тому ТГ є ключовими елементами в технологічному процесі відповідних електростанцій.

Провідним виробником ТГ в Україні є завод «Електроважмаш». На ньому виробляють ТГ широкого спектра, зокрема: турбогенератори ТГВ-200-2П потужністю 220 МВт, призначені для роботи в режимах пікових навантажень; турбогенератори ТА-6-2, ТА-12-2, ТА-15-2 потужністю 6, 12 і 15 МВт відповідно, призначені для автономних електростанцій, а також більш потужні агрегати для теплових та атомних електростанцій.

Турбогенератор складається з двох базових компонентів – статора і ротора. Ротор є обертовою частиною генератора і на нього впливають динамічні механічні навантаження, а також електромагнітні та теплові навантаження. Статор, хоча є стаціонарною частиною турбогенератора, також піддається значним динамічним навантаженням. Все ж таки визначальними впливами на нього є електромагнітні, термічні та високовольтні впливи. Таким чином, стан ТГ залежить від електричних і механічних властивостей його конструктивних частин.

Для потужних ТГ використовують стоякові підшипники ковзання. Основними елементами підшипникового вузла ТГ є рухомий вал, цапфа і нерухомий вкладиш підшипника. Вкладиш сталевий, а його внутрішня поверхня, яка є поверхнею тертя, виготовлена з набагато м'якшого матеріалу – бабіту. Змащення підшипника примусове. Мастило подається під тиском. Очевидно, що під час роботи ТГ відбувається потрапляння металевих включень у мастило підшипника, які опосередковано вказують на стан поверхні вкладишів підшипника. Візуальний контроль зливу мастила здійснюється через скло на оглядовому патрубку зливу. Тим самим періодичний доступ до візуального аналізу мастила нескладно реалізувати.

Порушення конструкції підшипникового вузла ТГ може проявлятися і збільшенням вібрації [14]. Ці вібрації передаються на стояк підшипника.

За їх величиною також опосередковано можна судити про його стан.

Аналізуючи конструктивні особливості підшипників ТГ, а також фізичні процеси, що в них відбуваються, можна дійти висновку про можливість використання інформації про вміст металевих включень у мастилi та величину вібрації стояка підшипника ТГ для розпізнавання стану вкладишів підшипника. З погляду технічної діагностики ці характеристики називаються діагностичними ознаками [2].

З іншого боку, немає об'єктивної оцінки, вираженої у числовому представленні, того, що ці дві діагностичні ознаки дійсно є інформативними для розпізнавання станів стоякових підшипників ТГ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Виявленню та усуненню несправностей ТГ присвячена значна кількість робіт. Вони охоплюють проблеми, які виникають у конструкціях механічного обладнання [1; 6; 12–15], конструктивних струмопровідних елементах [10], пневмо- та гідросистемах [7] тощо. У працях [7; 10] проаналізовано найбільш характерні відмови вузлів ТГ в процесі їх тривалої експлуатації. На основі статистичного аналізу даних було встановлено, що в цілому по ТГ на статор припадає 23 % аварій, на масляне ущільнення вала – 21 %, на систему збудження – 18 %, на ротор і щітково-контактний вузол – по 14 % відповідно, а на газоохолоджувач припадає 10 % аварійний відмов. Кожен із цих чинників потребує детального аналізу для виявлення технічного стану як окремих конструктивних елементів, так і ТГ загалом. Особливо важливим є вирішення проблеми своєчасного виявлення тенденції переходу із працездатного стану до непрацездатного ще до настання аварійної ситуації. Слід зауважити, що ухвалення рішення про їх стан відбувається в умовах обмеженої інформації через складність, а часто навіть неможливість проводити відповідні вимірювання під час роботи ТГ.

Своєю чергою, у праці [8] показано, що значний вплив на роботу ТГ мають стоякові підшипники, які забезпечують функціонування ротора. Вище відзначено, що кількість аварій ротора перебуває на четвертому місці серед усіх аварій ТГ. Серед них значна кількість зумовлена відмовами саме стоякових підшипників. Тому наша праця

присвячена аналізу інформаційного забезпечення діагностування стоякових підшипників, яке надалі слугуватиме ухваленню рішення про їх стан ще до настання аварійної ситуації.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є обґрунтування інформаційного забезпечення процедури діагностування стану підшипникових вузлів ТГ. Це можна вирішити за допомогою розрахунку величини інформації, яка відображає взаємозв'язок вибраних діагностичних ознак з технічним станом стоякових підшипників ТГ.

**Виклад основного матеріалу.** Для обґрунтування можливості використання інформації про вміст металевих включень у мастилi та величину вібрації стояка підшипника ТГ (діагностичних ознак) використаємо деякі положення з теорії інформації, зокрема поняття ентропії.

Це поняття обґрунтоване в працях Вінера і Шеннона. Ентропія отримала застосування і в інших галузях науки як загальна теорія зв'язку стохастичних систем [4; 5].

Ентропія характеризує ступінь невизначеності системи. Нехай розглядається система  $A$ , яка може мати  $n$  випадкових станів  $A_1, A_2, \dots, A_n$  з ймовірностями  $P(A_1), P(A_2), \dots, P(A_n)$ . Якщо один із станів системи обов'язково реалізується, а два стани одночасно неможливі (повна група несумісних подій), то:

$$\sum_{i=1}^n P(A_i) = 1. \quad (1)$$

Саме такі системи і розглядаються в подальшому для аналізу станів стоякових підшипників.

У теорії інформації ступінь невизначеності системи  $A$ , яка має  $n$  можливих станів з ймовірностями  $P(A_1), P(A_2), \dots, P(A_n)$ , розраховується, як

$$H(A) = \sum_{i=1}^n P(A_i) \log \frac{1}{P(A_i)} = -\sum_{i=1}^n P(A_i) \log P(A_i). \quad (2)$$

Величина  $H(A)$  введена Шенноном і називається ентропією системи. Позначення  $H(A)$  не є позначенням функції.  $H(A)$  означає, що ентропія  $H$  відноситься до стохастичної системи  $A$ . Оскільки ймовірності станів системи  $0 \leq P(A_i) \leq 1$ , то значення ентропії є додатною величиною.

У формулі (2) логарифм може бути взятий при будь-якій основі. Зміна основи логарифма приводить тільки до появи множника, тобто до зміни значення одиниці вимірювання.

Ентропію системи зручно визначати за допомогою двійкових логарифмів, тобто

$$H(A) = -\sum_{i=1}^n P(A_i) \log_2 P(A_i). \quad (3)$$

Якщо прийняти  $P(A_i) = 1$ , то ймовірності решти станів будуть нульовими (система

детермінована). Очевидно, що такій системі не властива невизначеність, що й підтверджується значенням  $H(A) = 0$ , розрахованим з використанням виразу (3).

Розрахуємо ентропію для випадку:  $P(A) = 0,6$ ;  $P(A_2) = 0,4$ . Тут уже йдеться про стохастичну систему. Отже,

$$H(A) = -P(A_1) \log_2 P(A_1) - P(A_2) \log_2 P(A_2) = -\frac{3}{5} \log_2 \frac{3}{5} - \frac{2}{5} \log_2 \frac{2}{5} = 0,97.$$

Якщо розглянути ентропію системи, що має два рівномірні стани, тобто  $P(A_1) = P(A_2) = 0,5$ , то згідно з виразом (3) отримаємо

$$H(A) = -P(A_1) \log_2 P(A_1) - P(A_2) \log_2 P(A_2) = -\frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2} = 1.$$

Ступінь невизначеності такої системи характеризується ентропією, рівною одиниці (для цього й використовуються двійкові логарифми). Тому одиницею ентропії є величина, що характеризує ступінь невизначеності системи, яка має два можливих, рівномірних значення. Її називають бітом (binary digit). Легко показати, для  $n$  рівномірних станів ентропія може розрахуватися як  $H(A) = \log_2 n$ .

Дуже часто інформація про систему  $A$  отримується за результатами спостереження за іншою системою  $B$ , яка пов'язана з  $A$ . Якщо прийняти, що система  $B$  є системою сигналів, котрі відображають стан основної системи  $A$ , то середнє значення інформації (інформативність системи  $B$  відносно системи  $A$ ) можна розрахувати так:

$$J_A(B) = H(A) - H(A/B). \quad (4)$$

У правій частині цього виразу є різниця початкової ентропії  $H(A)$  системи  $A$  і її ентропії  $H(A/B)$  після отримання даних про стан системи сигналів  $B$ .

Пояснимо цей вираз на простому прикладі. Нехай якийсь об'єкт може перебувати у двох станах: працездатному і непрацездатному. Його обстежують за двома діагностичними ознаками: зміна його температури та тиск всередині об'єкта. Якщо надходить інформація про те, що у випадку зміни його температури нижче якогось порогового значення, то ймовірність перебування його в працездатному стані становить 0,5. У випадку отримання інформації про перевищення тиском свого порогового значення можна стверджувати (ймовірність рівна одиниці), що об'єкт перебуває в працездатному стані. Очевидно, що друге повідомлення несе більше інформації тому, що воно повністю усуває невизначеність стану об'єкта. Перевіримо це з використанням виразу (4). Знайдемо значення початкової ентропії  $H(A)$  системи (об'єкта) та

ентропію системи за умови отримання інформації про величину тиску  $H(A/B)$ :

$$H(A) = -(0,5\log_2 0,5 + 0,5\log_2 0,5) = 1,$$

$$H(A/B) = -(1\log_2 1 + 0\log_2 0) = 0.$$

Тоді значення внесеної інформації  $J_A(B) = 1$  біт. Тим самим отримали підтвердження твердження, що друге повідомлення несе більше інформації про стан об'єкта.

З урахуванням виразу ймовірності добутку двох залежних подій, вираз (4) можна представити так:

$$J_A(B) = H(A) + H(B) - H(AB). \quad (5)$$

Підставивши вирази ентропії у (5), після нескладних перетворень отримано загальну формулу [2] для розрахунку інформації, яку несе система сигналів  $B$  відносно стану системи  $A$ :

$$J_A(B) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P(A_i B_j) \log_2 \frac{P(A_i B_j)}{P(A_i)P(B_j)}. \quad (6)$$

Тут прийнято, що система  $A$  (стан об'єкта) може перебувати в  $n$  станах, а система сигналів  $B$  характеризується  $m$  станами (кількість сигналів різної фізичної природи).

Для наочності та зручності розрахунку інформації на основі виразу (6), яку надалі можна буде використовувати для діагностики ТГ, дещо змінимо позначення величин цього виразу. Тим самим приведемо позначення величин у відповідність до усталених у технічній діагностиці позначень.

Систему  $A$  позначимо літерою  $D$  (діагноз об'єкта). Дуже часто розглядається два стани (діагнози) технічної системи:  $D_1$  – працездатний стан;  $D_2$  – непрацездатний стан. Тоді має місце рівність  $n=2$ . У загальному випадку кількість станів може бути більшою, ніж два, і вони зумовлені особливостями функціонуванням об'єкта.

Систему сигналів  $B$  надалі позначатимемо літерою  $k$  (діагностична ознака), якщо йдеться про

один сигнал, за яким здійснюється обстеження об'єкта. Можливі діапазони значень (розряди діагностичної ознаки) позначаються  $k_1 k_2 \dots k_j \dots k_m$ . Якщо діагностичних ознак є кілька, то вони утворюють вектор  $k$ .

Тепер формула (6) набуде такого вигляду:

$$J_D(k) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P(D_i k_j) \log_2 \frac{P(D_i k_j)}{P(D_i)P(k_j)}. \quad (7)$$

Щоб скористатися виразом (7), необхідні статистичні дані попередніх обстежень цього об'єкта.

Стосовно вкладишів стоякових підшипників ТГ позначимо:  $D_1$  – працездатний стан підшипника;  $D_2$  – непрацездатний стан підшипника.

Спочатку проаналізуємо діагностичну ознаку  $k_1$  – вміст металевих включень у мастилi підшипника. Тоді її розряди (можливі діапазони значень) позначатимемо, як  $k_{11}, k_{12}, \dots, k_{1j}$ .

За результатами попередньо проведених 50 обстежень ( $N$ ) ТГ типу ТГВ 200 на Бурштинській ТЕС, було встановлено, що у 34 обстеженнях ( $N_1$ ) стояковий підшипник був працездатним (стан  $D_1$ ), а у 16 випадках ( $N_2$ ) він був непрацездатним (стан  $D_2$ ). Контроль діагностичної ознаки (вміст металевих включень у мастилi встановлювався за висновками експертів візуально через оглядове віконце, а після зупинки ТГ – у лабораторії) здійснювався за трьома розрядами, а саме:  $k_{11}$  – відповідає умові (0÷5) г/т (грам металевих включень на тонну мастила);  $k_{12}$  – відповідає умові (4÷8) г/т;  $k_{13}$  – відповідає умові > 8 г/т. У працездатних станах була виявлена ознака  $k_{11}$  20 разів. Ознака  $k_{12}$  зустрічалася у 10 випадках, а ознака  $k_{13}$  – у 4 випадках. Непрацездатні стани супроводжувалися ознакою  $k_{12}$  у 4 випадках, а ознака  $k_{13}$  зустрічалася у 12 випадках. Ознака  $k_{11}$  не була виявлена.

Представимо цю апіорну інформацію в табл. 1.

**Таблиця 1.** Апіорна інформація обстежень стоякового підшипника ТГ

**Table 1.** A priori information of TG standoff bearing surveys

Діагностична ознака	Працездатний стан ( $D_1$ )	Непрацездатний стан ( $D_2$ )
$k_{11}$	20	0
$k_{12}$	10	4
$k_{13}$	4	12

**Таблиця 2.** Діагностична матриця обстеження мастила стоякового підшипника ТГ

**Table 2.** TG standoff bearing lubrication inspection diagnostic matrix

$D_i$	$k_j$			$P(D_i)$
	$P(D_i k_{11})$	$P(D_i k_{12})$	$P(D_i k_{13})$	
$D_1$	0,40	0,20	0,08	0,68
$D_2$	0	0,08	0,24	0,32
$P(k_{1j})$	0,40	0,28	0,32	

На підставі даних, представлених у табл. 1, розрахуємо значення складових виразу (7). Так,  $P(D_1) = N_1/N = 34/50 = 0,68$ ;  $P(D_2) = N_2/N = 16/50 = 0,32$ . Ймовірності виявлення відповідних розрядів діагностичної ознаки матимуть такі значення:  $P(k_{11}) = 20/50 = 0,40$ ;  $P(k_{12}) = 14/50 = 0,28$ ;  $P(k_{13}) = 16/50 = 0,32$ . Тепер розрахуємо значення ймовірностей одночасної появи кожного зі станів разом з відповідним розрядом діагностичної ознаки (добуток двох подій):  $P(D_1, k_{11}) = 20/50 = 0,40$ ;  $P(D_1, k_{12}) = 10/50 = 0,20$ ;  $P(D_1, k_{13}) = 4/50 = 0,08$ ;  $P(D_2, k_{11}) = 0/50 = 0$ ;  $P(D_2, k_{12}) = 4/50 = 0,08$ ;  $P(D_2, k_{13}) = 12/50 = 0,24$ . Зведемо отримані результати в табл. 2, яку ще називають [2] діагностичною матрицею.

Використовуючи дані, наведені в табл. 2, розрахуємо значення інформації, яка відображає вміст металевих включень у мастилi, для аналізу стану стоякових підшипників ТГ. Для зручності виконання обчислень згідно з виразом (7) перетворимо його до вигляду, в якому фігурують десяткові логарифми. Використавши властивість логарифмів переходу до іншої основи, перепишемо вираз (7) стосовно інформації обстеження стоякового підшипника:

$$J_D(k_1) = \frac{1}{\lg 2} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 P(D_i k_{1j}) \lg \frac{P(D_i k_{1j})}{P(D_i)P(k_{1j})} = \\ = \frac{1}{\lg 2} \left[ 0.4 \lg \frac{0.4}{0.68 \cdot 0.4} + 0.2 \lg \frac{0.2}{0.68 \cdot 0.28} + \right. \\ \left. + 0.08 \lg \frac{0.08}{0.68 \cdot 0.32} + 0 \lg \frac{0}{0.32 \cdot 0.4} + 0.08 \lg \frac{0.08}{0.32 \cdot 0.28} + \right. \\ \left. + 0.24 \lg \frac{0.24}{0.32 \cdot 0.32} \right] = 0.40.$$

Використовуючи формулу (7), можна розрахувати величину інформації відносно працездатного  $J_{D1}(k_1)$  чи непрацездатного  $J_{D2}(k_1)$  станів, яка міститься у даних про стан мастила:

$$J_{D1}(k_1) = \frac{1}{\lg 2} \sum_{j=1}^3 P(k_{1j}/D_1) \lg \frac{P(D_1 k_{1j})}{P(D_1)P(k_{1j})}, \\ J_{D2}(k_1) = \frac{1}{\lg 2} \sum_{j=1}^3 P(k_{1j}/D_2) \lg \frac{P(D_2 k_{1j})}{P(D_2)P(k_{1j})}.$$

Значення умовної ймовірності  $P(k_{1j}/D_i)$ , котра є у цих виразах, може бути знайдене з виразу ймовірності добутку двох залежних подій:  $P(D_i k_{1j}) = P(D_i) P(k_{1j}/D_i)$ .

Проведені розрахунки показали, що  $J_{D1}(k_1) = 0.18$ ,  $J_{D2}(k_1) = 0.88$ . Порівнюючи отримані результати, можна стверджувати, що обстеження мастила стоякового підшипника ТГ є інформативним щодо його стану. Особливо це стосується непрацездатного стану, для якого величина інформації за цією діагностичною ознакою є найбільшою. Тим самим отримано підтвердження

доцільності аналізу вмісту металевих включень у мастилi для аналізу стану вкладишів стоякового підшипника.

Розрахуємо тепер величину інформації, яку вносять дослідження вібрації корпусу стоякового підшипника ТГ. Позначимо цю діагностичну ознаку  $k_2$ .

Скористаємося з отриманих раніше результатів обстеження 50 ТГ. Одночасно з аналізом мастила проводився аналіз величини вібрацій корпусу стоякового підшипника, виміряних вбудованим у ТГ давачем вібрації (діагностична ознака  $k_2$ ). Розряди  $k_2$  позначимо  $k_{21}$ ,  $k_{22}$ , ...,  $k_{2j}$  ... Діапазон зміни вібрацій стояка підшипника розділимо на три інтервали. Це дає можливість скористатися виразами, які були отримані під час аналізу інформації за ознакою  $k_1$ , яка також мала три розряди. Прийmemo, що  $k_{21}$  відповідає вібрації  $\leq 1.0$  g,  $k_{22}$  відповідає значенням вібрації, що лежать у межах  $(1.0 \div 2.0)$  g,  $k_{23}$  відповідає значенням вібрації  $> 2.0$  g (тут g – прискорення сили земного тяжіння). Для результатів такого обстеження була сформована діагностична матриця, яка представлена у вигляді табл. 3.

Представивши вираз (7) стосовно величини інформації, отриманої за результатом обстеження вібрації стоякового підшипника, і використавши числові значення відповідних величин з табл. 3, отримаємо:

$$J_D(k_2) = \frac{1}{\lg 2} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 P(D_i k_{2j}) \lg \frac{P(D_i k_{2j})}{P(D_i)P(k_{2j})} = 0.415.$$

Розрахунок величини інформації стосовно працездатного і непрацездатного станів розраховується за виразами, аналогічними для обстежень мастила підшипника:

$$J_{D1}(k_2) = \frac{1}{\lg 2} \sum_{j=1}^3 P(k_{2j}/D_1) \lg \frac{P(D_1 k_{2j})}{P(D_1)P(k_{2j})} = 0.531, \\ J_{D2}(k_2) = \frac{1}{\lg 2} \sum_{j=1}^3 P(k_{2j}/D_2) \lg \frac{P(D_2 k_{2j})}{P(D_2)P(k_{2j})} = 0.935.$$

Для зручності проведення аналізу отриманих результатів представимо їх у табл. 4.

Як видно з даних, наведених у табл. 4, величини інформації, яка отримана за результатами обстежень мастила і вібрації стоякового підшипника ТГ, є практично однаковими. Це свідчить, що обидві ці діагностичні ознаки є інформативними щодо його станів. Слід відзначити високі рівні значень  $J_{D2}(k_1)$  та  $J_{D2}(k_2)$ . Це означає, що інформація про результати обстеження за обома ознаками особливо цінна є для виявлення непрацездатного стану.

**Таблиця 3.** Діагностична матриця обстеження вібрації стоякового підшипника ТГ  
**Table 3.** Diagnostic matrix of the TG standoff bearing vibration inspection

$D_i$	$k_2$			$P(D_i)$
	$P(D_i k_{21})$	$P(D_i k_{22})$	$P(D_i k_{23})$	
$D_1$	0,4000	0,3000	0,0250	0,7250
$D_2$	0,0125	0,0625	0,2000	0,2750
$P(k_{2j})$	0,4125	0,3625	0,2250	

**Таблиця 4.** Значення інформації за результатами обстеження підшипників ТГ  
**Table 4.** The meaning of information from the results of the TG bearing inspection

$J_D(k_1)$	$J_D(k_2)$	$J_{D_1}(k_1)$	$J_{D_1}(k_2)$	$J_{D_2}(k_1)$	$J_{D_2}(k_2)$
0.400	0.415	0.18	0.531	0.880	0.935

Тепер перевіримо правомірність використання математичного апарату на основі ентропії сигналу, який не корелюється зі станами, але був використаний для отримання результатів щодо стоякового підшипника ТГ. Для цього розглянемо випадок, коли прийнята якась діагностична ознака  $k_3$ , котра не корелюється зі станом якось об'єкта. Стосовно стоякового підшипника ТГ це можуть бути якісь електричні, механічні, чи інші характеристики, котрі ніяк не пов'язані зі станом підшипників, наприклад: стан ізоляції обмоток, механічна міцність стояка, атмосферний тиск тощо. Вони можуть змінюватися, але ці зміни практично не пов'язані зі станом вкладишів стоякового підшипника. Якщо так, то під час обстежень такого об'єкта завжди буде виявлений якийсь один розряд ( $k_{31}$ ,  $k_{32}$ ,  $k_{3j}$ ) ознаки  $k_3$ , наприклад  $k_{31}$ . Якщо припустити під час якогось обстеження появу

іншого розряду, то така подія буде малоімовірною тому, що ця ознака не пов'язана з умовами функціонування даного вузла ТГ. У такому разі можемо стверджувати, що  $P(k_{31})=1$ ,  $P(k_{32})=P(k_{33})=\dots=0$ . З цієї самої причини  $P(D_i k_{32})=P(D_i k_{33})=\dots=P(D_i k_{3j})=0$ .

Таким чином, під час обстеження підшипника ТГ діагностична ознака буде відображатися інтервалом (розрядом)  $k_{31}$  незалежно від того, чи має місце стан  $D_1$ , чи  $D_2$ . Це означає, що для всіх  $N$  обстежень ТГ  $k_{31}$  буде виявлено у всіх  $N_1$  випадках появи стану  $D_1$ , а також у всіх  $N_2$  випадках появи стану  $D_2$ . Тоді отримаємо:  $P(D_1 k_{31})=N_1/N$ ;  $P(D_2 k_{31})=N_2/N$ . Очевидно, що  $P(D_1 k_{31})=P(D_1)$ ,  $P(D_2 k_{31})=P(D_2)$ . Представимо діагностичну матрицю для цього випадку у вигляді табл. 5, обмежившись трьома розрядами діагностичної ознаки, як це було у табл. 2 і табл. 3.

**Таблиця 5.** Діагностична матриця для випадку діагностичної ознаки, некорельованої зі станом об'єкта  
**Table 5.** Diagnostic matrix for the case of a diagnostic feature uncorrelated with the state of the object

$D_i$	$k_3$			$P(D_i)$
	$P(D_i k_{31})$	$P(D_i k_{32})$	$P(D_i k_{33})$	
$D_1$	$N_1/N$	0.00	0.00	$N_1/N$
$D_2$	$N_2/N$	0.00	0.00	$N_2/N$
$P(k_{3j})$	1.00	0.00	0.00	

Очевидно, що складові виразу (7) з нульовими значеннями співмножників  $P(D_i k_{32})$ ,  $P(D_i k_{33})$  будуть також нульовими. Знайдемо значення тих складових, де співмножники є ненульовими, а саме:

$$\begin{aligned}
 & P(D_1 k_{31}) \lg \frac{P(D_1 k_{31})}{P(D_1)P(k_{31})} \\
 & + P(D_2 k_{31}) \lg \frac{P(D_2 k_{31})}{P(D_2)P(k_{31})} \\
 & = \frac{N_1}{N} \lg \frac{N_1/N}{(N_1/N) \cdot 1} + \frac{N_2}{N} \lg \frac{N_2/N}{(N_2/N) \cdot 1} \\
 & = \frac{N_1}{N} \lg 1 + \frac{N_2}{N} \lg 1 = 0.
 \end{aligned}$$

Отже, величина інформації  $J_D(k_3)=0$ . Таким чином, отримано підтвердження очевидного факту, що обстеження будь-якого об'єкта за некорельованою з його станом діагностичною ознакою не має сенсу. Це підтвердження отримано за результатом строгого математичного доведення.

**Висновки.** Отримано об'єктивні підтвердження рекомендацій щодо обстеження стоякових підшипників ТГ за станом мастила та величиною вібрації корпусу стояка. Саме такі обстеження є найбільш інформативними щодо можливого

непрацездатного стану. На це вказують значення інформації  $J_{D2}(k_1) = 0.880, J_{D2}(k_2) = 0.935$ .

Доведено, що величина інформації, отриманої за результатами обстеження діагностичної ознаки, яка не корелюється зі станом об'єкта  $J_D(k_3)=0$ . Це слугує об'єктивною підставою, щоб такі діагностичні ознаки не брати до уваги в процесі діагностування.

Розглянута методика оцінки інформативності діагностичних ознак дає можливість об'єктивно здійснити порівняльний аналіз характеристик різної фізичної природи у числовому представленні. Такий підхід може бути застосований до оцінки інформативної цінності обстежень не тільки за двома діагностичними ознаками, а й за більшою їх кількістю.

### Бібліографічний список

1. Аналіз причин повредження турбогенераторів и гидрогенераторов путём определения сложно напряжённого состояния деталей / К. А. Кобзарь, А. Ю. Шуть, Е. А. Овсянникова, А. В. Сенцкий, А. В. Третьяк. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2016. № 8(1180). С. 136–142.
2. Василевич Л.Ф., Маловик К.Н., Смирнов С.Б. Количественные методы принятия решений в условиях риска. Севастополь: СМУЯэиП, 2006. 232 с.
3. Василів К. М. Експлуатація електричних станцій: навч. посіб. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2022. 236 с.
4. Драган Я., Сікора І., Яворський Б. Шеннонова міра інформації і теорія сигналів. *Вісник державного університету «Львівська політехніка»*. 2000. № 387. С. 21–30.
5. Мельник А. О., Голембо В. А., Бочкарьов О. Ю. Наукова спадщина засновника кібернетики Норберта Вінера. Комп'ютерні системи і мережі. *Вісник НУ «Львівська політехніка»*. 2019. № 1, т. 1. С. 1–8.
6. Методы определения напряженно-деформированного состояния коробов турбогенераторов в трехмерной постановке и их верификация на стенде завода / А. В. Третьяк и др. *East European Scientific Journal*. 2019. № 3(43), ч. 4. Р. 71–78.
7. Розроблення й впровадження перспективних методів розрахунку і моделювання при проектуванні та експлуатації потужних турбогенераторів та гідрогенераторів для ТЕС, АЕС, ГЕС, ГАЕС / К. О. Кобзар та ін. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. 2018. № 5 (1281). С. 38–45.
8. Шевченко В. В., Лізан І. Я. Визначення технічного стану турбогенераторів для встановлення необхідності їх реабілітації або заміни. *Вісник Харківського університету повітряних сил. Системи озброєння і військова техніка*. 2015. № 2(42). С. 145–150.
9. Шевченко В. В. Основы электроэнергетики: учеб. пособие. Харьков: ФОП Панов А. М., 2019. 338 с.
10. Designing of high power turbogenerators / K. Kobzar, O. Tretiak, O. Ovsianykova, V. Polienko, P. Gakal. *Vestnik KazNRTU*. 2018. № 4 (128).
11. Korpela Seppo A. Principles of turbomachinery. The Ohio State University: Second edition. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2019. 565 p.
12. Modeling of the Stress–Strain of the Suspensions of the Stators of High-Power Turbogenerators / O. Tretiak et al. *Computation*. 2022. Vol. 10, No. 191. P. 1–13.
13. Peculiarities of three dimensional calculation of large units of generators by finite element methods / O. Tretiak, K. Kobzar, O. Shut', V. Polienko, P. Gakal. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 2018. No. 5–6. P. 16–20.
14. Shumilov Y. A., Demidyuk B. M., Shtorgin A. V. Vibrodiagnostics as a component of monitoring the technical condition of power units. *Pract. Inst. Electrodyn. Natl. Acad. Sci. Ukr*. 2008. No. 19. P. 76–80.
15. Tretiak O. Peculiarities of Designing of Suspensions for Stators of High Power Turbogenerators. *Вісник НТУ «ХП»*. Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2018. № 12 (1288). С. 83–88.

Стаття надійшла 14.02.2025