

**СТАТИСТИЧНА МОДЕЛЬ ТА УЗАГАЛЬНЕНИЙ КРИТЕРІЙ ОЦІНКИ
ПОТОЧНОГО ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГОЛОВНИХ ЦИРКУЛЯЦІЙНИХ НАСОСІВ
ПЕРШОГО КОНТУРУ РЕАКТОРІВ ВВЕР**

З метою підвищення безпеки експлуатації ядерних енергоблоків з реакторами ВВЕР-1000 запропоновано якісне удосконалення систем підтримки операторів шляхом оперативної діагностики головних циркуляційних насосів першого контуру. На відміну від детермінованого підходу, що використовується в існуючих системах і не забезпечує раннього виявлення початкових фаз потенційно небезпечних аномалій, використано статистичний підхід до аналізу спектральних складових сигналів датчиків штатних систем контролю та додаткових віброакселерометрів, що встановлюються в зонах найбільш пошкоджуваних вузлів насосних агрегатів, і запропоновано відповідну модель для автоматичного обчислення та порівняння з нормою узагальненого статистичного критерію. На основі даних циклу виконаних стендових експериментів отримано навчальну інформацію для створеної статистичної системи і оцінено ефективність автоматичного розпізнавання поточних технічних станів критичних вузлів і насосу в цілому. [dx.doi.org/10.29010/86.8]

Ключові слова: реактор ВВЕР-1000; перший контур; вібраційний стан; випробувальні експерименти; статистична модель; узагальнений критерій.

1. Актуальність проблеми

Істотне ускладнення експлуатаційних задач, а також гострий дефіцит часу для вироблення діагностичних і керуючих рішень, з якими зіткнулися в останні роки оператори сучасних АЕС, зумовили необхідність перегляду дотеперішніх концепцій створення комп'ютерних засобів підтримки операторів АЕС, а також надали особливої актуальності проблемам розроблення нового – інтелектуального – покоління цих обчислювальних комплексів. При цьому основний зміст функцій експертних систем, що розробляються на основі концепцій штучного інтелекту, становить автоматичне розпізнавання початкових фаз потенційно небезпечних порушень, що виникають в роботі основного обладнання енергоблоків і, зокрема, найбільш поширених головних циркуляційних насосів (ГЦН) типу ГЦН-195М ядерних енергоблоків з реакторами ВВЕР-1000.

Досвід аварій ядерних енергоблоків свідчить, що швидкість сприйняття оператором інформації про стан обладнання, яка є основою для вироблення евристичних діагностичних рішень, є недостатньою і адекватне управління енергоблоком забезпечено бути не може. В аварійній обстановці істотно зростає вірогідність пропуску оператором критично важливих для безпеки енергоблоку опе-

ративних даних. Всі існуючі ергатичні (людино-машинні) комплекси систем підтримки операторів (СПО) АЕС, в яких відсутня функція автоматичного вироблення діагностичних рішень, слід віднести до систем моніторингу обладнання, але не його діагностики. Такими, зокрема, є сучасні комп'ютерні комплекси моніторингу обладнання АЕС, розроблені рядом зарубіжних фірм: SPDS, DASS, HDSR, ALLY, pwVDN EAGLE-21 (США), STAR, ALUS, SUS (Німеччина), ALARM (Великобританія), COMPASS (Данія); СКУД (Росія).

В умовах України у 1997 р. на Рівненській АЕС було введено в експлуатацію систему COMPASS (фірми «Брюль і К'ер») для автоматичної моніторингації ГЦН-195М. Але ця система не має функції автоматичного розпізнавання ушкоджень, (коли вони ще не привели до перевищення уставок) і вироблення прогностичних рішень. Діагностичні рішення в цій системі оператор-діагност виробляє вручну.

2. Аналіз моделей

З урахуванням необхідності мінімізації економічних втрат, а також зменшення негативного впливу, який здатні надавати аварійні зупинки ядерних енергоустановок (ЯЕУ) на надійність фізичних бар'єрів безпеки в умовах виникнення

небезпечних експлуатаційних аномалій, в ряді робіт, особливо в [1–11], запропоновані нові інформаційні підходи до якісного вдосконалення засобів оперативної діагностики обладнання ЯЕУ. Зазначені завдання пов'язані з розробкою і створенням нового – інтелектуального – покоління комп'ютерних комплексів оперативної діагностики обладнання, які покликані забезпечити реалізацію актуальної вимоги раннього автоматичного виявлення початкових фаз стохастичних експлуатаційних аномалій, а також надійного розпізнавання основних фізичних класів цих випадкових об'єктів, у тому числі процесів латентного зародження і подальшої прихованої їх еволюції у аварійні режими експлуатації.

Ці методи автоматичної комп'ютерної діагностики в роботах [1–11] реалізовано на основі статистичної теорії розпізнавання образів та автоматичного формування діагностичних гіпотез. Основний зміст функцій перспективних комплексів інформаційної підтримки операторів складають процедури автоматичного розпізнавання найбільш небезпечних – латентних – видів пошкоджень у критично важливих для безпеки ядерного енергоблоку елементах і системах ЯЕУ.

Слід зазначити, що математичне забезпечення детермінованого типу, яке використовується у вищезазначених відомих інформаційних моніторингових системах оперативного контролю стану обладнання ЯЕУ передбачає безальтернативне використання логіки бінарного типу та булевої алгебри, яке в силу обмежень, властивих цим підходам, не забезпечує надійної ідентифікації ймовірнісних діагностичних об'єктів. З огляду на це актуальна вимога надійного розпізнавання прихованих експлуатаційних аномалій із складними ймовірнісними властивостями обумовлює необхідність розробки і практичної реалізації якісно нових – інтелектуальних – діагностичних підходів.

3. Концепція автоматичної діагностики

Сучасні ГЦН є обладнаними системою механічного ущільнення валу та гідродинамічними підшипниковими вузлами осевого та радіального типу, від працездатності яких залежить надійність всього насосного агрегату. Статистика аварійних зупинок ЯЕУ, що обумовлені раптовими відмовами ГЦН, свідчить про те, що найбільш вірогідними причинами аварій є відмови їх найчастіше пошкоджуваних вузлів, а саме пар тертя в механічному ущільненні валу та підшипниках ковзання. Практика експлуатації свідчить про можливість раптового зростання з цієї причини (а також через деякі інші фізичні чинники, наприклад виникнення розвинутої кавітації в проточній частині ГЦН) аварійної вібрації всього агрегату. Розроблювана мате-

матична модель автоматичної комп'ютерної інтегральної вібраційної діагностики ГЦН-195М базується на принципах формування запропонованого в роботі узагальненого статистичного критерію байєсівського типу, який має слугувати інформаційним показником технічного стану ГЦН, що формується на основі моніторингу експлуатаційних режимів шести критичних елементів конструкції насосного агрегату. Розміщення вузлів ГЦН, обраних в якості критичних елементів конструкції, представлено на рис. 1.

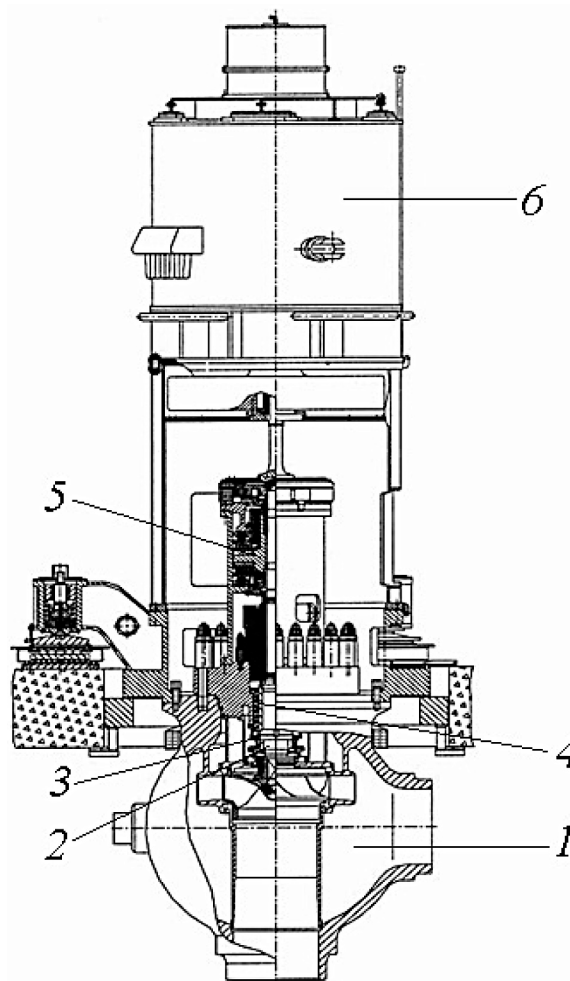


Рис. 1. Критичні конструктивні вузли ГЦН, які було обрано для розробки математичної моделі:

- 1 – проточна частина; 2 – нижній радіальний підшипник;
- 3 – автономний контур для змащування нижнього радіального підшипника; 4 – система механічного ущільнення валу;
- 5 – головний радіально-упорний підшипник (ГУП);
- 6 – приводний електродвигун

4. Експериментальні дослідження

Режими експлуатації натурних зразків насосних агрегатів ГЦН-195М було експериментально досліджено в циклі робіт, виконаних на випробувальному стенді заводу-виробника з метою отримання масивів реальних статистичних даних відповідно до діагно-

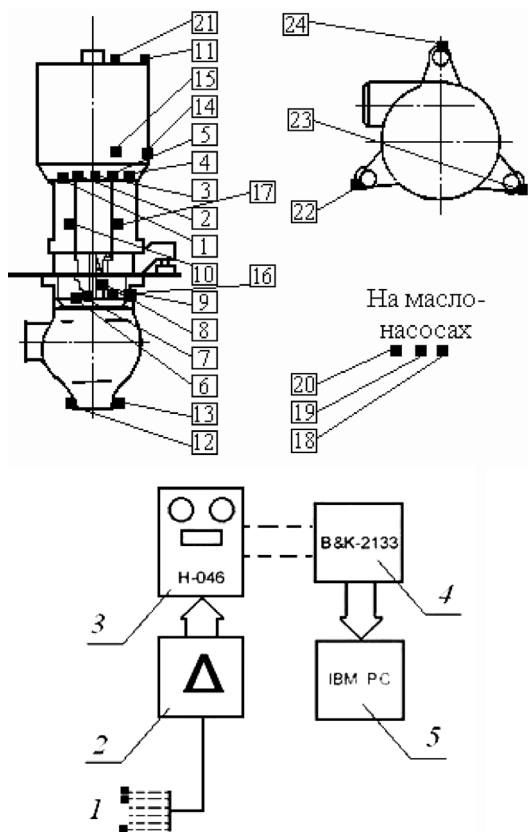


Рис. 2. Схема розташування діагностичних віброакселерометрів та реєстрації вимірюваних сигналів на ГЦН-195М:
 1 – датчики, 2 – блок підсилювачів, 3 – магнітограф,
 4 – спектроаналізатор, 5 – ПК

стичних сигналів від комплексу віброакселерометрів, а також датчиків штатної системи КВПіА ГЦН. Структуру застосованого комплексу вібродатчиків, що включає 24 віброакселерометри фірми «Брюль і К'єр» типу 8317, що підключені до цифрового спектроаналізатору тієї ж фірми типу 2133, а також до розробленого вимірювального комп'ютерного комплексу, представлено на рис. 2.

Локалізація віброакселерометрів на корпусі ГЦН відповідає конструктивним вузлам №№ 1–6 насосного агрегату. Датчики №№ 1, 2, 3, 4, 5 було встановлено на корпусі ГЦН в місці, що відповідає розміщенню головного упорного підшипника (ГУП); №№ 6, 7, 8, 9, 10 – на корпусі ГЦН в місці, що відповідає розміщенню нижнього радіального підшипника; №№ 11, 21 – на верхній та №№ 14, 15 – на нижній хрестовинах електродвигуна; №№ 12, 13 – на раглику ГЦН; №№ 16, 17 – на корпусі механічного ущільнення валу; №№ 18, 19, 20 на гвинтових насосах змащувальної системи; №№ 22, 23, 24 на опорах ГЦН-195М.

Експерименти було проведено на п'яти екземплярах насосних агрегатів ГЦН-195М, що проходили випробування після їх виготовлення на теплогідралічному стенді НВО «Гідромаш» (м. Суми). Загальний термін ресурсного випробування кожного з насосних агрегатів складав не менше 120 годин безперервної експлуатації в стаціонарному режимі при змінних рівнях режимних параметрів, перелік яких наведено в таблиці.

Таблиця

Режими стендових технологічних випробувань натурних зразків насосного агрегату ГЦН-195М

| Режим | Визначальні параметри | | | Екземпляри ГЦН | | | | | Всього реалізацій |
|--------|------------------------|---------------------------------------|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|--------------------|
| | Q, м ³ /год | R _{вс} , кгс/см ² | T _{грвс} , °C | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| K1 | 20·10 ³ | 15 | 80 | | | $\frac{100}{1}$ | | $\frac{200}{2}$ | $\frac{300}{3}$ |
| K2 | 20·10 ³ | 15 | 40 | | | $\frac{200}{1}$ | | $\frac{420}{3}$ | $\frac{620}{4}$ |
| K3 | 20·10 ³ | 156 | 80 | $\frac{200}{1}$ | | | | $\frac{200}{2}$ | $\frac{400}{3}$ |
| K4 | 20·10 ³ | 156 | 160 | | $\frac{360}{3}$ | $\frac{200}{1}$ | | $\frac{200}{1}$ | $\frac{760}{5}$ |
| K5 | 20·10 ³ | 156 | 310 | $\frac{960}{8}$ | $\frac{1300}{10}$ | $\frac{840}{6}$ | $\frac{600}{5}$ | $\frac{1400}{7}$ | $\frac{5100}{36}$ |
| K6 | 20·10 ³ | 180 | 300 | | $\frac{420}{3}$ | | $\frac{100}{1}$ | | $\frac{520}{4}$ |
| K7 | 20·10 ³ | 150 | 300 | | $\frac{150}{1}$ | $\frac{100}{1}$ | $\frac{100}{1}$ | $\frac{600}{4}$ | $\frac{950}{7}$ |
| K8 | 20·10 ³ | 140 | 300 | $\frac{300}{3}$ | $\frac{200}{2}$ | | $\frac{150}{1}$ | $\frac{200}{2}$ | $\frac{850}{8}$ |
| K9 | 20·10 ³ | 156 | 100 | $\frac{300}{3}$ | | | $\frac{200}{1}$ | $\frac{400}{1}$ | $\frac{900}{5}$ |
| K10 | 20·10 ³ | 180 | 100 | | | | | $\frac{100}{1}$ | $\frac{100}{1}$ |
| Всього | | | | $\frac{1760}{15}$ | $\frac{2430}{19}$ | $\frac{1440}{10}$ | $\frac{1150}{9}$ | $\frac{3720}{23}$ | $\frac{10500}{76}$ |

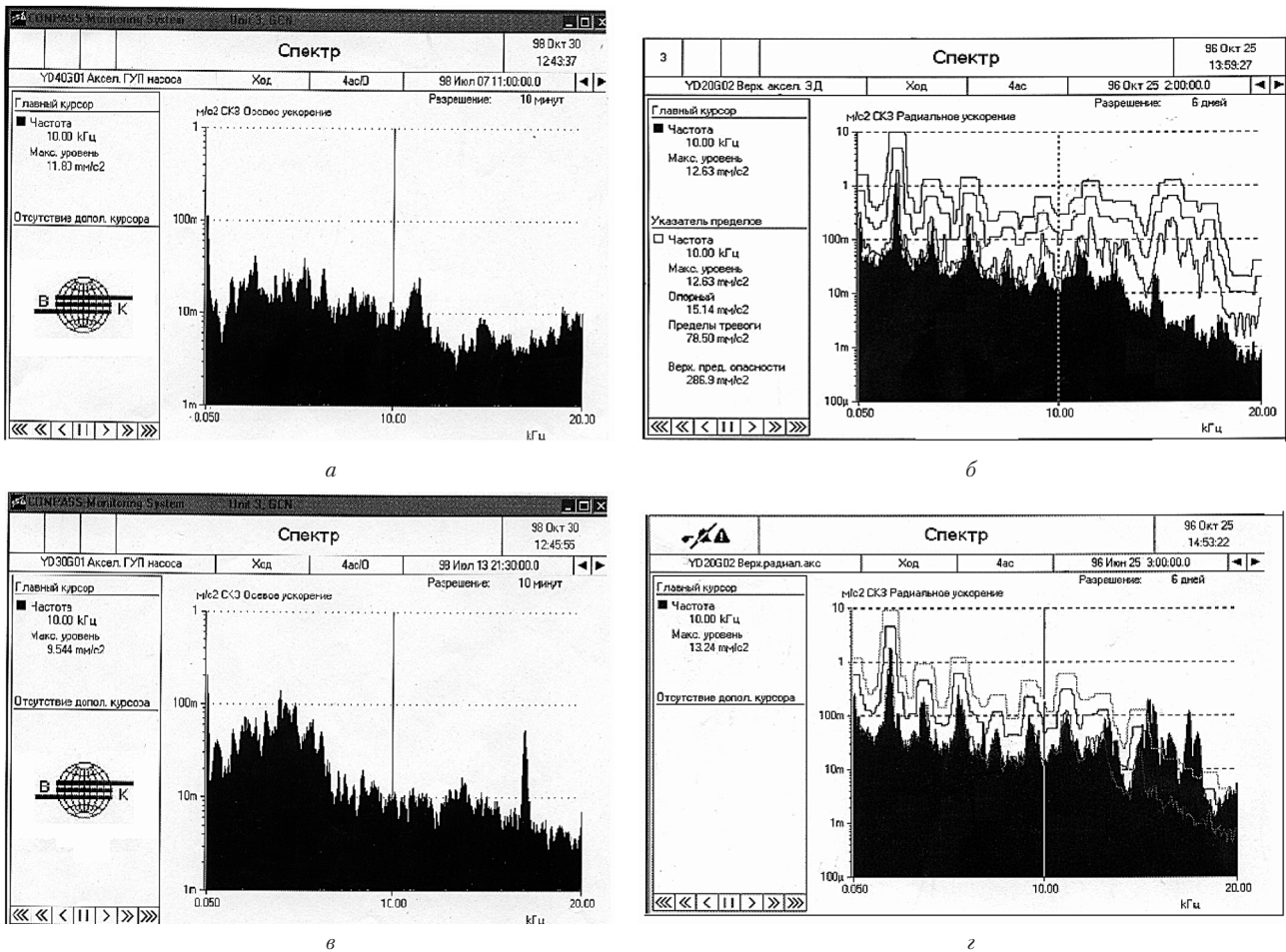


Рис. 3. Типові спектри вібрації ГЦН в зонах:

а, б – головного упорного підшипника вздовж осей X та Y в штатному режимі експлуатації; в, г – приводного електродвигуна у штатному режимі експлуатації та у випадку чіпляння його ротору за статорні елементи

В якості прикладів спектральної структури досліджуваних діагностичних сигналів на рис. 3 наведено типові отримані спектри вібрацій ГЦН в зонах головного упорного підшипника та приводного електродвигуна.

Таблиця свідчить, що для кожного з досліджених п'яти екземплярів ГЦН виконано від 15 до 23 циклів вимірювань та отримано від 1150 до 3720 масивів спектральних реалізацій. При цьому загальна кількість циклів виконаних вимірювань досягла 76, а кількість реалізацій в масивах спектрів віброакустичних сигналів склала 10500.

5. Математична формалізація статистичної моделі розпізнавання станів вузлів та режимів роботи ГЦН

В основу розробки узагальненого статистичного критерію (УСК) ГЦН було покладено статистичний підхід до розпізнавання випадкових об'єктів, засади якого викладено у роботах [3, 13]. За вказаних вище діагностичних умов кінцева множина A експлуатаційних станів насосного агрегату утво-

рюється наступними класами: A_1 – нормальна експлуатація; A_2 – відхилення; A_3 – аномалія. При цьому автоматична ідентифікація класів має бути забезпечена на основі розпізнавання відповідних випадкових спектральних реалізацій з множини B із використанням множини X діагностичних ознак, що мають бути сформовані з реалізацій автоспектральної щільності інформаційно значущих стохастичних сигналів віброакселерометрів. Тому обмеження на отримання представленої множиною B апріорної статистичної інформації про класи множини A вважаються відсутніми. З огляду на це, математична формалізація статистичної моделі розпізнавання виглядає наступним чином. По-перше, класи випадкових об'єктів, які мають бути ідентифікованими, складають множину (алфавіт) класів реально можливих експлуатаційних станів ГЦН, а саме: $A = \{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_m\}$, де: A_i – конкретний клас даної множини, який відповідає конкретному виду стану вузла; M – число класів у даному алфавіті (прийнято $M = 3$, а саме: A_1 – «норма», A_2 – «відхилення», A_3 – «аномалія»); i – поточний номер класу. По-друге, сукупність реалі-

заций випадкових об'єктів даного алфавіту класів складає іншу множину $B = \{B_1, B_2, \dots, B_j, \dots, B_l\}$, де: B_j – якась конкретна реалізація, що характеризує конкретну випадкову сукупність штатних і вібро-акустичних параметрів та утворює множину, яка підлягає розпізнаванню; T – число неоднакових реалізацій; j – поточний номер реалізації. Очевидно, що при розпізнаванні має місце нерівність $T \gg M$. По-третє, випадковий об'єкт, що підлягає розпізнаванню, представлено його кількісним описом, причому сукупність ознак алфавіту класів A , становить множину $X = \{x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_N\}$, де: x_k – деяка конкретна ознака; N – загальне число ознак; k – поточний номер ознаки. Образ експлуатаційного стану ГЦН являє собою сукупність реалізацій об'єктів, які належать одному із класів, що в N – мірному ознаковому просторі займає деяку область. Опис цієї області, який відображає окремий клас у просторі ознак, розглядається як еталон, тобто узагальнений опис цього класу. Крім того, при дискретному розгляді ознак для кожної з них x_k існує сукупність градацій $l = 1, 2, \dots, R$, яка утворює множину $x_k = \{x_1^k, x_2^k, \dots, x_R^k\}$. Якщо образи \vec{x}_i всіх M класів $A(\vec{x}_i)$, $i = 1, 2, \dots, M$ є відомими, розпізнавання об'єкту здійснюється за наступним правилом, що відповідає детермінованій моделі

$$\vec{x}_j \in \vec{x}_i \Rightarrow B(\vec{x}_j) \in A(\vec{x}_i). \quad (1)$$

Очевидно, що при ідентифікації поточного технічного стану основних вузлів ГЦН, в яких реалізуються стохастичні технологічні процеси, умови моделі (1) не виконуються. Тому при розпізнаванні класів як випадкових діагностичних об'єктів за даними навчальної вибірки має бути сформована множина моделей образів \vec{K}_i всіх M класів, на основі яких буде реалізовано розпізнавання об'єкта $B(\vec{x}_j)$ за наступним правилом, що відповідає ймовірнісній моделі розпізнавання:

$$\vec{x}_j \in \vec{K}_i \Rightarrow \vec{x}_j \in \vec{x}_i \Rightarrow B(\vec{x}_j) \in A(\vec{x}_i). \quad (2)$$

Реалізація статистичної моделі розпізнавання за правилом (2) передбачала проведення етапу навчання діагностичної системи, який має бути реалізований за результатами спеціально проведеного вищезгаданого циклу експериментальних досліджень.

Кінцеву мету етапу статистичного навчання становить формування універсальних моделей образів \vec{K}_i всіх M класів, що підлягають розпізнаванню і мають розглядатися як цифрові еталони класів, що підлягають ідентифікації, за даними обмеженої навчальної вибірки. Слід відзначити, що навчальна вибірка має бути представлена реалізаціями відповідних випадкових сигналів (їх спектральних реалізацій), приналежність яких до всіх класів M може вважатися надійно встановленою. З огляду на це, апріор-

на інформація, що є необхідною для формування всіх еталонів класів K_i має включати: 1) множину класів, що розпізнаються $A = \{A_1, A_2, \dots, A_M\}$, 2) їх апріорні вірогідності $P(A_i)$, 3) простір діагностичних ознак $x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, 4) умовні апріорні ймовірності зна-

чень всієї множини ознак $P\left(\bigcup_{k=1}^N x_k | A_i\right)$, $i = 1, 2, \dots, M$.

При цьому за результатами відповідної обробки цієї апріорної інформації має бути сформована кінцева множина еталонів K_i

$\left\{P(A_i), P\left(\bigcup_{k=1}^N x_k | A_i\right)\right\}$ всіх

класів множини A , які підлягають розміщенню в пам'яті комп'ютера.

Головний зміст наступного етапу імовірнісної ідентифікації, а саме: процедури розпізнавання, – становить визначення приналежності невідомого об'єкту до статистичних моделей образів, тобто еталонів класів, що були отримані на етапі навчання. За результатами вищезазначеного етапу робиться висновок стосовно приналежності невідомого об'єкта до одного з класів множини A . Таким чином, головним результатом процедури навчання системи розпізнавання є формування статистичних еталонів \vec{K}_i всіх класів A_i , $i = 1, 2, \dots, M$, що підлягають розпізнаванню. Відповідно до вищевикладеного статистичного підходу критерій розпізнавання має являти собою алгоритм, за яким здійснюється побудова система гіперповерхонь у багатомірному (розмірністю N) просторі діагностичних ознак, що розділяють області цього класу, де компактно розташовані реалізації різних класів. Як відомо [14], один з підходів до такого поділу багатомірного ознакового простору на M областей різних класів полягає в побудові M таких функціоналів $\gamma_i(\vec{x})$, що забезпечують максимальне значення певного функціоналу на всіх елементах образу, до якого він належить, а саме:

$$\forall j \in M : \left[\vec{x} \in \vec{K}_j \Leftrightarrow \forall i \in M \setminus \{j\} : \gamma_j(\vec{x}) > \gamma_i(\vec{x}) \right]. \quad (3)$$

При цьому оптимальне рішення $\gamma(\vec{x})$ у (3) за умови відомих апріорних ймовірностей класів множини A має забезпечувати мінімальне значення середнього ризику помилкових рішень з функцією втрат $G[\gamma(x), A]$, що враховує можливі наслідки вибору відповідного функціоналу. Як відомо [14, 15], цей середній ризик становить:

$$R_\gamma = \iint_{M \times x} G[\gamma(x), A] F\left(\bigcup_{k=1}^N x_k | A_i\right) P(A) dx dA. \quad (4)$$

Відповідно до зазначених теоретичних засад мінімальне значення середнього ризику R_γ може бути забезпечене застосуванням байєсівської стратегії прийняття статистичних рішень, використання якої доцільне у випадках багатократного при-

йняття рішення в однакових умовах та при відомих апіорних ймовірностях класів $P(A_i)$, $i = 1, 2, \dots, M$, які можуть вважатися рівноймовірними, тобто $P(A_1) = P(A_2) = \dots = P(A_M) = 1/M$, що відповідає умовам вирішуваної задачі розпізнавання. Дійсно, технічні стани вузлів ГЦН, що підлягають ідентифікації, доцільно прийняти рівноймовірними.

Згідно з фундаментальними науковими засадами статистичних рішень [14, 15], ефективну мінімізацію функціоналу (4) забезпечує байесівське вирішуюче правило, згідно з яким для деякої випадкової реалізації рішення про її приналежність до класу A_i приймається за умови, якщо для всіх M класів виконується нерівність

$$\sum_{i=1}^M g_{ij} P(A_i) F\left(\bigcup_{k=1}^N x_k | A_i\right) \leq \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^M g_{ij} P(A_i) F\left(\bigcup_{k=1}^N x_k | A_i\right), \quad (5)$$

де g_{ij} — елементи матриці втрат.

В умовах однакової вартості помилкових рішень, тобто при $g_{ij} = 1$ (що цілком відповідає загальним умовам вирішуваної задачі), а також при відсутності втрат в разі правильної ідентифікації невідомого об'єкту, тобто $g_{ij} = 0$ класифікатор (5) передбачає обчислення сумарної умовної апостеріорної ймовірності гіпотез для всієї множини M класів, тобто:

$$P\left(A_i \mid \bigcup_{k=1}^N x_k\right) = \frac{P(A_i) F\left(\bigcup_{k=1}^N x_k | A_i\right)}{\sum_M P(A_i) F\left(\bigcup_{k=1}^N x_k | A_i\right)}. \quad (6)$$

Кінцевим етапом розглянутого статистичного алгоритму розпізнавання випадкового багатомірного вектору, що представляє відповідний спектральний образ, є формування за результатами обчислення апостеріорних ймовірностей (6) рішення щодо приналежності невідомого об'єкту до певного класу множини M , яке приймається за максимальною з обчислених для всіх класів апостеріор-

них ймовірностей $P\left(A_i \mid \bigcup_{k=1}^N x_k\right) = 1, 2, \dots, M$.

Поряд з вибором суто алгоритму розпізнавання, визначальною є задача оцінки якості складових ознакового простору X . Ефективним при її вирішенні є інформаційний підхід, що заснований на визначенні кількості інформації за кожною діагностичною ознакою I_{xk} , $k = 1, 2, \dots, N$, яка отримується системою розпізнавання в процесі ідентифікації даного об'єкту. Відповідно до нього для дискретної ознаки x_k , що приймає у класах A_i кінцеву множину R дискретних значень $x_1^k, x_2^k, \dots, x_R^k$ з відповідними ймовірностями $P(x_l^k)$, $l = 1, 2, \dots, R$, має бути обчис-

лена кількість інформації I_{xk} , яку одержить у результаті ідентифікації цих об'єктів система розпізнавання. Згідно з інформаційними співвідношеннями [14], усереднена кількість інформації в ознаці x_k складає:

$$I_{xk} = H(A) - \bar{H}(A_i | x_k) = -\sum_{i=1}^M P(A_i) \log P(A_i) + \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^R P(x_l^k | A_i) P(A_i | x_l^k) \log P(A_i | x_l^k). \quad (7)$$

Очевидно, що інформаційна якість діагностичної ознаки x_k вища від відповідної якості ознаки x_s , якщо $I_{xk} > I_{xs}$.

Слід зазначити, що розробці процедур розпізнавання технічного стану вузлів та режимів ГЦН має передувати всебічне дослідження для вибору кінцевого простору діагностичних ознак для ідентифікації режимів експлуатації ГЦН та розпізнавання технічного стану його основних вузлів. Також має бути визначена ефективна мірність простору діагностичних ознак, що доцільно реалізувати на основі обчислення кількості інформації, що міститься у кожній ознаці, за співвідношенням (7).

З огляду на вищезазначене діагностична модель передбачає реалізацію етапу навчання системи розпізнавання в умовах випробувального стенду заводу-виробника. При цьому значення сумарної апостеріорної ймовірності, що розраховується на основі запропонованого УСК — байесівського критерію (6) для кожної діагностичної реалізації (її представлено множиною спектральних компонент, що сформовані поточними діагностичними даними від встановлених на ГЦН 24 віброакселерометрів, а також сукупністю миттєвих значень сигналів штатних датчиків КВПіА) має відповідати одному з трьох наступних класів: «норма», «відхилення», «аномалія». Рівні зазначених класів встановлюються індивідуально для кожного ГЦН за результатами випробувань.

6. Реалізація запропонованої моделі

Відповідно до розроблюваної системи автоматичної діагностики постулюється, що при появі порушення в роботі одного (або декількох) вузлів ГЦН відповідно змінюються значення конкретних спектральних компонент та можливий миттєвий рівень ряду штатних технологічних параметрів ГЦНА. При цьому в результаті виконання процедури розпізнавання такої реалізації, що надійшла на вхід діагностичної системи, факт аномального стану одного (або кількох) вузлів ГЦН і відповідно всього насосного агрегату має бути виявлений за фактом зміни величини сумарної апостеріорної ймовірності, розрахованої за байесівським критерієм (6). Саме цей критерій (УСК) запропоновано

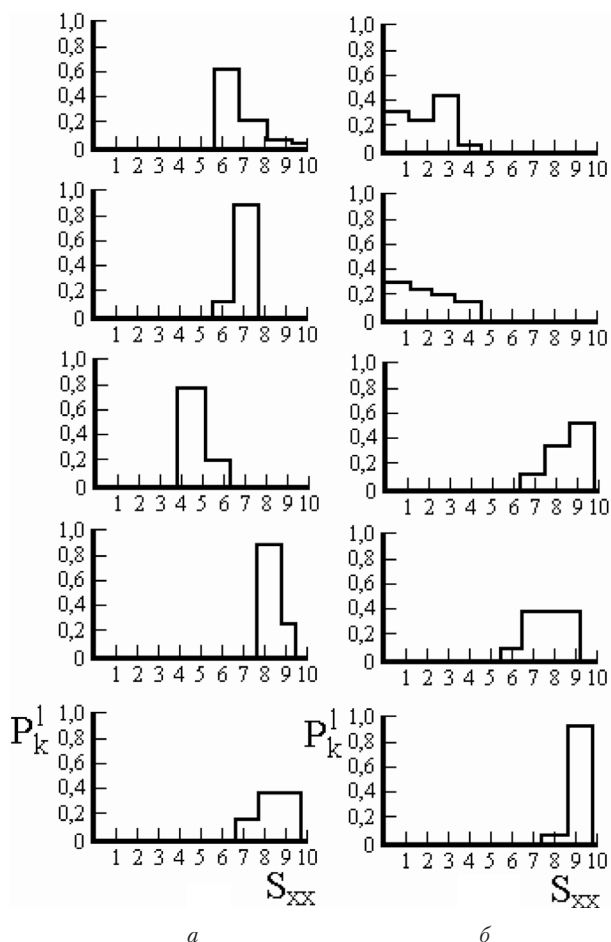


Рис. 4. Динаміка трансформації структури спектральної щільності спектральної ознаки № 25 (частота 121 Гц), яка обчислена для віброакселерометра № 4 в умовах розігріву контуру циркуляції від початкового холодного стану $T = 20^\circ\text{C}$, $P_{\text{ис}} = 156 \text{ кгс/см}^2$ (розподіли імовірностей *a*) до виходу ГЦН-195М на штатний експлуатаційний режим $T = 300^\circ\text{C}$ (розподіли *б*)

використовувати в якості об'єктивної характеристики технічного стану ГЦН. В залежності від величини зміни значення сумарної імовірності встановлюються межі обраних класів технічного стану «норма», «відхилення» і «аномалія».

В якості ілюстрації інформаційної значущості спектральних ознак на рис. 4 наведено характерні розподіли ймовірностей P_k^1 рівнів спектральної щільності S_{xx} сигналів віброакселерометру № 4, розташованого на корпусі в районі радіально-осьового підшипникового вузла (див. рис. 2), що були обчислені для окремої спектральної ознаки № 25, яка відповідає частоті 121 Гц.

Приклад ілюструє якісний характер трансформації структури розподілів ймовірностей спектральної щільності сигналу зазначеного віброакселерометра при значенні фіксованої величини витрат перекачуваного насосом теплоносія, що становить $20000 \text{ м}^3/\text{год}$ та в умовах послідовного зростання тиску в контурі циркуляції від 1,5 до 16,0 МПа (*a*), а

також зміни температури потоку від 40 до 300°C (*б*), тобто до штатного рівня режимних параметрів.

Таким чином, в результаті аналізу отриманого в цих експериментах масиву даних було встановлено, що інформаційна якість спектральних компонент сигналів різних діагностичних сенсорів, яка обчислюється за співвідношенням (7), розподілена суттєво нерівномірно.

Цей експериментально встановлений факт зумовив необхідність оптимізації ознакового простору з метою суттєвого скорочення кількості спектральних діагностичних ознак, що мають низьку інформаційну якість. Виключення низькоінформативних частотних компонент зі складу багатомірного діагностичного вектору дозволило істотно скоротити його мірність і за рахунок цього підвищити швидкодію процедури розпізнавання, яка і складає функціональне ядро розробленого в даній роботі програмного комплексу. Як приклад практичної реалізації застосованого в роботі інформаційного підходу, на рис. 5 представлено характер розподілу інформативності за номерами спектральних ознак сигналу від віброакселерометра № 4, що встановлений в зоні нижнього радіального підшипника ГЦН після суттєвого скорочення (це стосується, зокрема, спектральних каналів №№ 2÷4 та 8, 10, 16) ознакового простору цього діагностичного сенсору на основі запропонованого інформаційного підходу (7). Таким чином, скорочення мірності ознакового простору не спричиняє пов'язаного з цим помітного зниження надійності розпізнавання, оскільки наведений на цьому рисунку характер розподілу обчисленої за результатами виконаних досліджень інформативності окремих спектральних ознак сигналу діагностичного віброакселерометра, що встановлений в районі нижнього радіального підшипника ГЦН дозволяє виключити ознаки №№ 2÷4 та №№ 8, 10, 16 з подальшого розгляду як малоінформативні.

Після виявлення факту перетину обчисленою величиною УСК встановлених в процесі навчання

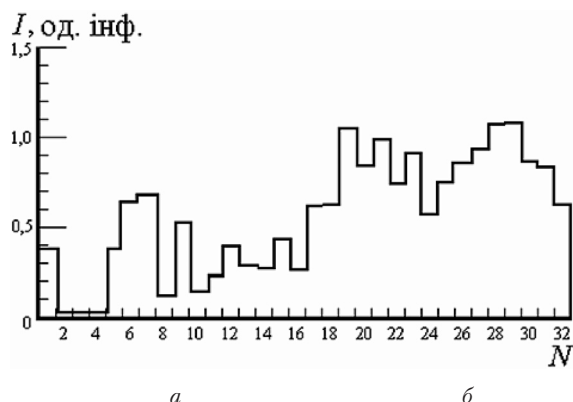


Рис. 5. Характер розподілу інформативності за спектральними ознаками сигналу віброакселерометра № 8, що встановлений в зоні нижнього радіального підшипника ГЦН

статистичних меж класів тренду технічних станів відповідно до номерів ознак мають бути локалізовані конкретні вузли ГЦН як джерела збурення. Очевидно, що вони є фізично обумовленими виникненням технічного порушення у відповідних вузлах, тобто відхиленням експлуатаційного режиму від штатного стану, що було виявлено зміною величини УСК. Таким чином, ідентифікація номера сенсора та діагностичної ознаки або групи ознак, що спричинила відповідне відхилення, дає змогу локалізувати вузол з порушенням штатного режиму експлуатації.

У відповідності до розробленої статистичної моделі автоматичної оперативної діагностики ГЦН етапові робочого функціонування передують етап і статистичного навчання. Кінцевою метою цього етапу є адаптація інтелектуального діагностичного комплексу до реальних віброакустичних характеристик циркуляційної петлі першого контуру з працюючим конкретним зразком ГЦН-195М. При цьому комплексне статистичне навчання діагностичної системи має бути реалізоване в умовах реального ядерного енергоблоку з реактором ВВЕР-1000, де в штатному режимі функціонує насосна група в складі 4-х ГЦН-195М, які експлуатуються саме в номінальному режимі і знаходяться в стані, коли в початковий період експлуатації ЯЕУ функціонування всіх вузлів і систем ГЦН експертами може бути визнане як нормальне. При цьому технічний стан всіх основних вузлів кожного насосного агрегату може бути визнаний таким, що відповідає штатному режиму експлуатації, і з огляду на це кваліфікується як клас «норма». При цьому у відповідності до запропонованої статистичної моделі, обчислюється значення сумарної апостеріорної імовірності на кожному функціональному циклі алгоритму розпізнавання на основі УСК для кожної реалізації, що представлена кінцевою множиною спектральних компонент по всій структурі віброакселерометрів ГЦН, а також додаткової сукупності миттєвих значень штатних датчиків у вигляді 256-мірного випадкового вектору. Таким чином, обрана на етапі навчання ширина смуги тренду сумарної апостеріорної імовірності в штатному режимі відповідає нормальним режимам експлуатації всіх вузлів ГЦН, а, отже, і штатній експлуатації агрегату.

При появі порушення в роботі вузлів ГЦН змінюються значення спектральних компонент і відповідні миттєві значення відповідних штатних параметрів. При розпізнаванні такої реалізації, що поступає на вхід діагностичної системи, факт аномального стану одного (або декількох) вузлів ГЦН (і всього насосного агрегату) визначається перевищенням рівня дисперсії тренду математичного очікування величини сумарної апостеріорної байєсівської імовірності. При цьому ідентифікація порядкового номеру діагностичної ознаки в структурі 256-мірного вектору дозволяє співвіднести цю

ознаку з номером відповідного діагностичного сенсора, що встановлений в околиці одного з шести основних агрегатних вузлів ГЦН-195М. Таким чином, кінцевим результатом процедури ідентифікації номерів спектральних складових поточного вектора технічного стану ГЦН є визначення зони локалізації порушення штатного режиму експлуатації, яке фізично зумовило вищезазначену спектральну трансформацію.

Слід зазначити, що використання УСК не вирішує в повній мірі основну діагностичну задачу, оскільки не дає змоги раннього автоматичного виявлення за параметрами віброакустичних сигналів початкових фаз перед аварійних експлуатаційних станів деяких найбільш вразливих вузлів ГЦН, а саме: підшипників ковзання та зони трибоспрями системи механічного ущільнення валу, оскільки порушення технічного стану в них розвивається лавиноподібно і звичайно призводить до незворотньої руйнації їх критичних елементів.

Суттєве підвищення чутливості запропонованої методики визначення УСК стосовно вищезазначених трибологічних вузлів ГЦН потребує застосування якісно нових підходів і може бути реалізоване на основі використання методів неруйнівного контролю, зокрема з використанням сигналів акустичної емісії трибоспрями в комплексі з перспективними математичними моделями теорії стохастичних динамічних систем та нейронних мереж, які підлягають розробці на основі створення нових топологій штучних комп'ютерних нейромережевих структур.

7. Висновки

За результатами розробки математичної моделі автоматичної діагностики технічного стану агрегатних вузлів та режимів експлуатації ГЦН ядерних енергоблоків з реакторами ВВЕР-1000 слід відзначити наступне.

1. Розроблена математична модель автоматичної діагностики технічного стану ГЦН, в основу якої покладено запропонований діагностичний підхід, що передбачає оперативне обчислення величини сумарної апостеріорної імовірності технічного стану насосного агрегату і дозволяє однозначно характеризувати цей стан місцезнаходженням багатомірного діагностичного вектора-реалізації у відповідних областях простору діагностичних ознак, які відповідають встановленим на етапі заводських випробувань класам «норма», «відхилення», «аномалія», дозволяє адекватно врахувати реальні стохастичні властивості насосного агрегату як об'єкту діагностики.

2. Виконані оцінки діагностичних можливостей розробленого методу контролю поточного технічного стану ГЦН та побудованого на основі цього методу алгоритму діагностики засвідчили достатньо високий (99,8 %) рівень надійності без-

помилкової ідентифікації експлуатаційних станів досліджених зразків насосних агрегатів.

3. Запропонований узагальнений статистичний критерій (УСК) поточного технічного стану, який базується на фундаментальних та апробованих принципах статистичної теорії розпізнавання випадкових об'єктів, є адекватним і може бути використаний в структурі існуючих технічних засобів оперативного моніторингу насосних агрегатів першого контуру ЯЕУ.

4. Практичне застосування розробленої діагностичної моделі складає об'єктивне підґрунтя при вирішенні задач управління ресурсом насосної групи першого контуру ЯЕУ, що стосуються визначення доцільності проведення планово-попереджувальних ремонтів на конкретному екземплярі ГЦН після напрацювання ним регламентованої кількості годин з метою економії матеріально технічних ресурсів і відповідних економічних втрат від невикористаних простой.

Література

- [1] Теплофизика безопасности атомных электростанций / А.А. Ключников, И.Г. Шараевский, Н.М. Фиалко, Л.Б. Зимин, Г.И. Шараевский — 2010. — 484 с;
- [2] Теплофизика надежности активных зон / А.А. Ключников, И.Г. Шараевский, Н.М. Фиалко, Л.Б. Зимин, Г.И. Шараевский — 2015. — 772 с.
- [3] Теплофизика ресурса ядерных энергоустановок / А.В. Носовский, И.Г. Шараевский, Н.М. Фиалко, Л.Б. Зимин, Г.И. Шараевский — 2017. — 624 с.
- [4] Фиалко Н.М., Шараевский И.Г., Зимин Л.Б., Бабак С.В., Шараевский Г.И. Проблемы диагностики виброакустической безопасности реакторов ВВЭР (часть 1) / Сборник ИПБ АЭС «Проблемы безопасности АЭС и Чернобиля». — вып. 25, 2015, С. 5-14.
- [5] Шараевський Г.І. Нейрокомп'ютерна діагностична система для раннього виявлення прихованих експлуатаційних аномалій в технологічному обладнанні атомних електростанцій // Технологічні системи.- 2015, №4(73).
- [6] Фиалко Н.М., Шараевский И.Г., Зимин Л.Б., Бабак С.В., Шараевский Г.И. Проблемы диагностики виброакустической безопасности реакторов ВВЭР (часть 2) / Сборник ИПБ АЭС «Проблемы безопасности АЭС и Чернобиля». — вып. 26, 2016, С. 44-51.
- [7] Шараевський Г.І. Методологія визначення режиму початку кипіння в ТВС шляхом аналізу акустичного шуму // Ядерна та радіаційна безпека. — Вип. 3(71), 2016, С. 20 — 27.
- [8] Носовский А.В., Шараевский И.Г., Фиалко Н.М., Зимин Л.Б., Шараевский Г.И. Актуальные теплофизические проблемы управления ресурсом ядерных энергоблоков АЭС // Сборник ИПБ АЭС «Проблемы безопасности АЭС и Чернобиля». Вип. 29, 2017, С. 5 -14.
- [9] Шараевський І. Г., Фиалко Н. М., Зимин Л. Б., Шараевский Г. И. Особенности диагностики нерегламентных тепловых, виброакустических и нейтронных процессов в первом контуре ядерных реакторов // Сборник ИПБ АЭС «Проблемы безопасности АЭС и Чернобиля». — Вип. 31, 2018. — С. 6-15
- [10] Носовский А. В., Шараевский И. Г., Фиалко Н. М., Зимин Л. Б., Шараевский Г. И. Теплофизические аспекты совершенствования систем диагностики первого контура АЭС // Сборник ИПБ АЭС «Проблемы безопасности АЭС и Чернобиля». — Вип. 30, 2018. — С. 8-16.
- [11] Шараевський Г.І., Фиалко Н.М., Шараевский И.Г., Зимин Л.Б. Актуальные проблемы аварийной колебательной динамики первого контура реактора ВВЭР // Ядерна фізика та енергетика. — 2018, Том 19, №2. — С. 111-120.
- [12] Шараевський І.Г. Розпізнавання передаварійних теплогідролічних процесів у водоохолоджуваних ядерних енергетичних реакторах. — Автореф. дис ... д-ра техн. наук. — К.: ІПБ АЕС НАН України, 2010. — 48 с.
- [13] Фомин Я.А., Тарховский Г.Р. Статистическая теория распознавания образов. — М.: Радио и связь, 1986. — 264 с.
- [14] Галлагер Р. Теория информации и надежная связь. — М.: Советское радио, 1974 — 720 с.
- [15] Бэнн Д.В., Фармер Е.Д. Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки. Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 200 с.

Sharaevsky G. I., Fialko N. M., Sharaevsky I. G., Zimin L. B.

Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine. Ukraine, Kyiv

STATISTICAL MODEL AND GENERALIZED STATISTICAL CRITERIA FOR RATE OF THE MAIN CIRCULATING PUMPS CURRENT TECHNICAL CONDITION OF THE WWER REACTORS FIRST CIRCUMENT

In order to improve the safety of operation of nuclear power units with VVER-1000 reactors, the qualitative improvement of the support systems for operators by means of the operative diagnostics of the main primary circulation pumps has been proposed. In contrast to the deterministic approach used in existing sys-

tems and not providing early detection of the initial phases of potentially dangerous anomalies, a statistical approach was used to analyze the spectral components of the sensor signals of standard control systems and additional vibroaccelerometers installed in the zones of the most damaged nodes aggregates, and an appropriate model is proposed for automatic calculation and comparison with the norm of a generalized statistical criterion. On the basis of the cycle data of the performed bench experimental tests, training information was obtained for the created statistical system and the efficiency of automatic recognition of the current technical states of critical components and the pump unit as a whole was evaluated. [dx.doi.org/10.29010/086.8]

Keywords: VVER-1000 reactor; first circuit; vibration state; test experiments; statistical model; generalized criterion.

References

- [1] Thermalphysic of NPP safety / A. A. Kliuchnikov, I. G. Sharaevsky, N. M. Fialko, L. B. Zimin, G. I. Sharaevsky / In-t problem bezopasnosti AES NAN Ukrainy, 2010. — 484 p. (Rus)
- [2] Thermalphysic of active zones reliability / A. A. Kliuchnikov, I. G. Sharaevsky, N. M. Fialko, L. B. Zimin, G.I. Sharaevsky / In-t problem bezopasnosti AES NAN Ukrainy, 2015. — 772 p. (Rus)
- [3] Thermalphysic of NPP resource / A. V. Nosovsky, I. G. Sharaevsky, N. M. Fialko, L. B. Zimin, G.I. Sharaevsky / In-t problem bezopasnosti AES NAN Ukrainy, 2017. — 624 p. (Rus)
- [4] Fialko N.M., Sharaevsky I.G., Zimin L.B., Babak S.V., Sharaevsky G.I. Problems of vibroacoustic safety diagnostics of VVER reactors (part 1) // Problems of safety of the NPP and Chernobyl. — Vyp. 25, 2015, P. 5-14. (Rus)
- [5] Sharaevsky G.I. Neurocomputer diagnostic system for early detection of hidden exploitation anomalies in technological equipment of nuclear power plants // Technological systems. — 2015, №4 (73). (Ukr)
- [6] Fialko N.M., Sharaevsky I.G., Zimin L.B., Babak S.V., Sharaevsky G.I. Problems of vibroacoustic safety diagnostics of VVER reactors (part 2) / Problems of safety of the NPP and Chernobyl. — Vyp. 26, 2016, P. 44-51. (Rus)
- [7] Sharaevsky G.I. Methodology for determining the initial boiling regime in fuel assemblies by analyzing acoustic noise // Yaderna ta radiacijna bezpeka. — Vyp. 3(71), 2016, P. 20 — 27. (Rus)
- [8] Nosovsky A.V., Sharaevsky I.G., Fialko N.M., Zimin L.B., Sharaevsky G.I. Actual thermophysical problems of resource management of nuclear power units of nuclear power plants // Problems of safety of the NPP and Chernobyl. — Vyp. 29, 2017, P. 5 — 14. (Rus)
- [9] Sharaevsky I.G., Fialko N.M., Zimin L.B., Sharaevsky G.I. Features of diagnostics of non-regulatory thermal, vibroacoustic and neutron processes in the primary circuit of nuclear reactors // Problems of safety of the NPP and Chernobyl. — Vyp. 31, 2018. — P. 6 — 15. (Rus)
- [10] Nosovsky A.V., Sharaevsky I.G., Fialko N.M., Zimin L.B., Sharaevsky G.I. Thermophysical aspects of improving diagnostic systems for primary NPP // Problems of safety of the NPP and Chernobyl. — Vyp. 30, 2018. — P. 8 — 16. (Rus)
- [11] Sharaevsky G.I., Fialko N.M., Sharaevsky I.G., Zimin L.B. Actual problems of emergency oscillatory dynamics of the primary circuit of a VVER reactor // Ядерна фізика та енергетика. — 2018, Том 19, № 2. — P. 111-120. (Rus)
- [12] Sharaevsky I.G. Recognition of transient thermal-hydraulic processes in water-cooled nuclear power reactors. — Author's abstract dis ... dr tech. sciences — Kyiv: IPB AES NAS of Ukraine, 2010. — 48 p. (Ukr)
- [13] Fomin Ya.A., Tarkhovskiy G.R. Statistical Pattern Recognition Theory. — Moskwa: Radio i sv'yaz, 1986. — 264 p. (Rus)
- [14] Gallager R. Information Theory and Reliable Communication. — Moskwa: Soviet radio, 1974 — 720 p. (Rus)
- [15] Bann D.V., Farmer E.D. Comparative Electric Load Prediction Models. Trans. From engl. — Moskwa: Energoatomizdat, 1987. — 200 p. (Rus)