

УДК 621.39.1+681.142.2

Н.І. БУРАУ, О.В. ЗАЖИЦЬКИЙ

*Національний технічний університет "КПІ", Київ, Україна***РОЗПІЗНАВАННЯ НЕЙРОННОЮ МЕРЕЖЕЮ СТАНУ ЛОПАТОК ГТД НА СТАЦІОНАРНИХ ТА НЕСТАЦІОНАРНИХ РЕЖИМАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

Досліджується ефективність застосування нейронних мереж для розпізнавання технічного стану лопаток авіаційних двигунів в процесі експлуатації на стаціонарному та нестационарних режимах вібраційного збурення. Розглядається задача двокласової діагностики (відсутність чи наявність малої тріщини в одній з лопаток робочого колеса двигуна) на основі множини двомірних векторів діагностичних ознак. Ефективність розпізнавання для кожного з режимів експлуатації оцінювалась за значенням імовірності правильної класифікації для тестових векторів діагностичних ознак.

віброакустична діагностика, тріщиноподібні пошкодження, розпізнавання стану, імовірнісна нейронна мережа, вірогідність розпізнавання

Вступ

Відповідно до [1], основною задачею технічної діагностики є розпізнавання стану технічної системи в умовах обмеженої інформації. Як і для будь-якої складної динамічної системи, основна задача діагностики ГТД полягає в необхідності визначення технічного стану (ТС) двигуна чи прогнозування одного з його майбутніх станів шляхом віднесення об'єкту до одного з класів можливих станів за визначеною множиною діагностичних ознак.

Як показує практика, значна частина відмов авіаційних двигунів зумовлена експлуатаційними пошкодженнями компресорів та турбін внаслідок появи та розвитку в робочих лопатках тріщиноподібних пошкоджень (забоїн, тріщин втоми, корозії, ерозії тощо). Тому однією з важливих та актуальних проблем комплексної діагностики ГТД є проблема визначення ТС лопаток в процесі функціонування двигуна та діагностування тріщиноподібних пошкоджень на ранній стадії розвитку, що дозволить значно зменшити вірогідність руйнування лопаток при експлуатації ГТД. Вирішити дану проблему можна використанням методів вібраційної та віброакустичної діагностики [2]. Загалом розпізнавання ТС лопаток ГТД в процесі експлуатації потребує розробки гнуч-

кої системи класифікації, яка б у загальній системі моніторингу та діагностики ГТД забезпечувала нелінійне розділення простору ознак, проводити розпізнавання ТС лопаток ГТД як за кількісними (чисельними) ознаками, так і за зображеннями, а також у випадках обмеженої кількості образів для навчання.

Така система класифікації може бути побудована з використанням методів штучного інтелекту, зокрема структур, що самі навчаються, на основі штучних нейронних мереж (НМ), які на сьогоднішній день знаходять все більше розповсюдження при вирішенні задач діагностування авіаційних двигунів [3].

1. Постановка задачі дослідження

Для розпізнавання ТС лопаток ГТД використовуються результати чисельного моделювання та обробки віброакустичних сигналів на виході робочого колеса на стаціонарному режимі вібраційного роторного збурення та на режимах прийомистості та дроселювання. Моделювання проведено за методикою, описаною в [4]. Моделювався бездефектний стан робочого колеса та з тріщиноподібним пошкодженням однієї лопатки (відносно змінювання жорсткості лопатки з пошкодженням $\theta = 0,03; 0,05$). Для обробки діагностичної інформації використано

визначення безрозмірних амплітудних дискримінант J_r , $r = \overline{1,4}$ для окремих елементів вейвлет-перетворення вибірок сигналів, сформованих для зазначених вище режимів [4, 5].

Для стаціонарного режиму вібраційного збурення та режимів прийомистості і дроселювання за результатами обробки інформації будемо використовувати по дві ознаки (коефіцієнти імпульсності J_3 та фону J_4), так що для розпізнавання визначимо наступні вхідні вектори діагностичних ознак:

$$\bar{X}_{cm} = (J_3; J_4);$$

$$\bar{X}_{np} = (J_3^{np}; J_4^{np});$$

$$\bar{X}_{dp} = (J_3^{dp}; J_4^{dp}),$$

за якими проведемо розпізнавання стану лопаток робочого колеса для двокласової діагностики – відсутність (S_0) чи наявність (S_1) тріщиноподібного пошкодження.

За визначеними векторами для кожного з розглянутих режимів вібраційного збурення було сформовано множини об'єктів, що класифікуються, які використовувались як навчальні та тестові множини на входах нейронної мережі (кожна множина містить по 50 об'єктів для кожного стану лопаток).

На рис. 1 представлено навчальні множини об'єктів векторів діагностичних ознак, сформованих за вказаних вище значень параметру пошкодження ϑ для стаціонарного та нестационарних режимів вібраційного збурення (вісь абсцис відповідає значенням J_3 , вісь ординат – J_4).

Як бачимо, лінійне розділення на класи має місце для об'єктів навчальних множин векторів на режимі прийомистості для обох значень параметру пошкодження, а на стаціонарному режимі та режимі дроселювання – для $\vartheta = 0,05$.

Метою роботи є визначення та дослідження можливості підвищення вірогідності розпізнавання нейронною мережею технічного стану лопаток ГТД

за визначеними векторами ознак на стаціонарному та нестационарних режимах експлуатації двигуна.

2. Розпізнавання стану лопаток

Для класифікації використаємо імовірнісну нейронну мережу [6], перший шар якої містить 100 нейронів, а другий – 2 нейрони. Так як параметр мережі σ впливає на результат класифікації, то його величина визначалась експериментально під час пред'явлення мережі навчальної множини об'єктів, що класифікуються.

Визначені інтервали значень σ використовувались при класифікації об'єктів тестової множини, причому змінювання параметру σ в межах визначених інтервалів в процесі класифікації в подальшому було використано для оцінки впливу його на точність класифікації. Приклади результатів класифікації пред'явлених мережі об'єктів тестової множини для окремих значень параметру впливу σ наведено на рис. 2. Як видно, мережа розбиває площину, яка обмежена значеннями діагностичних ознак в об'єктах тестової множини, на класи, що відповідають бездефектному та дефектному станам робочого колеса ГТД. Візуальне порівняння множини об'єктів, що класифікуються (рис. 1), та результатів класифікації (рис. 2) показує, що мережа здійснює в основному правильне розділення на класи відповідно до навчальної множини об'єктів. Але значну частину площини нейронна мережа відносить до дефектного стану. І хоча ціна пропуску дефекту значно вища за ціну хибної тривоги, в більшості практичних випадків імовірність несправного стану об'єкту є малою величиною і тому може мати місце підвищення імовірності хибної тривоги, що загалом знижує точність класифікації. Тому важливо оцінити гарантовану мінімальну точність (вірогідність) розпізнавання технічного стану лопаток ГТД, яку забезпечує імовірнісна нейронна мережа з урахуванням ймовірних похибок першого та другого роду.

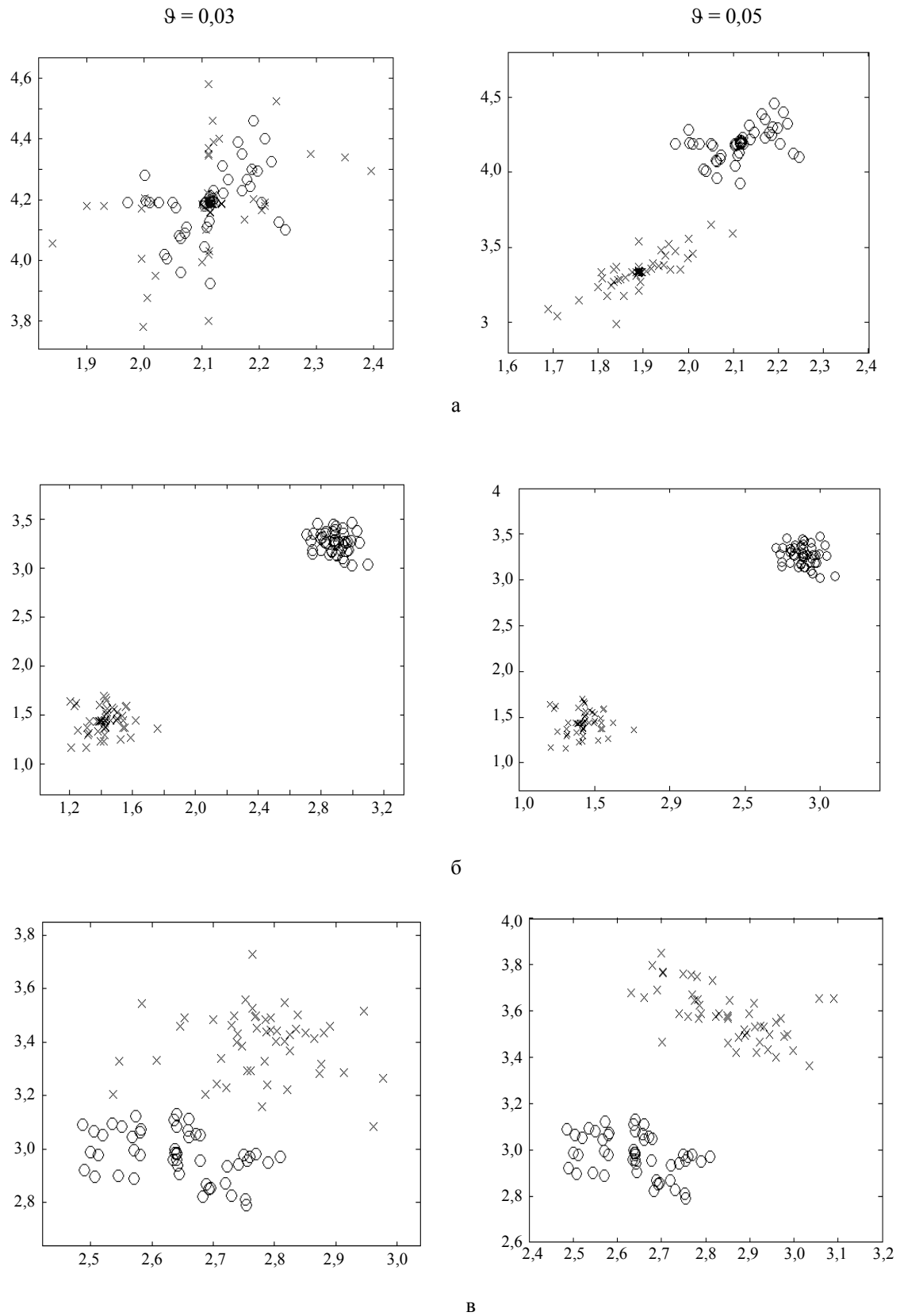


Рис. 1. Навчальні множини векторів діагностичних ознак для режимів: а – стаціонарного режиму; б – прийомистості; в – дроселювання (о – клас без пошкодження; х – клас з пошкодженням)

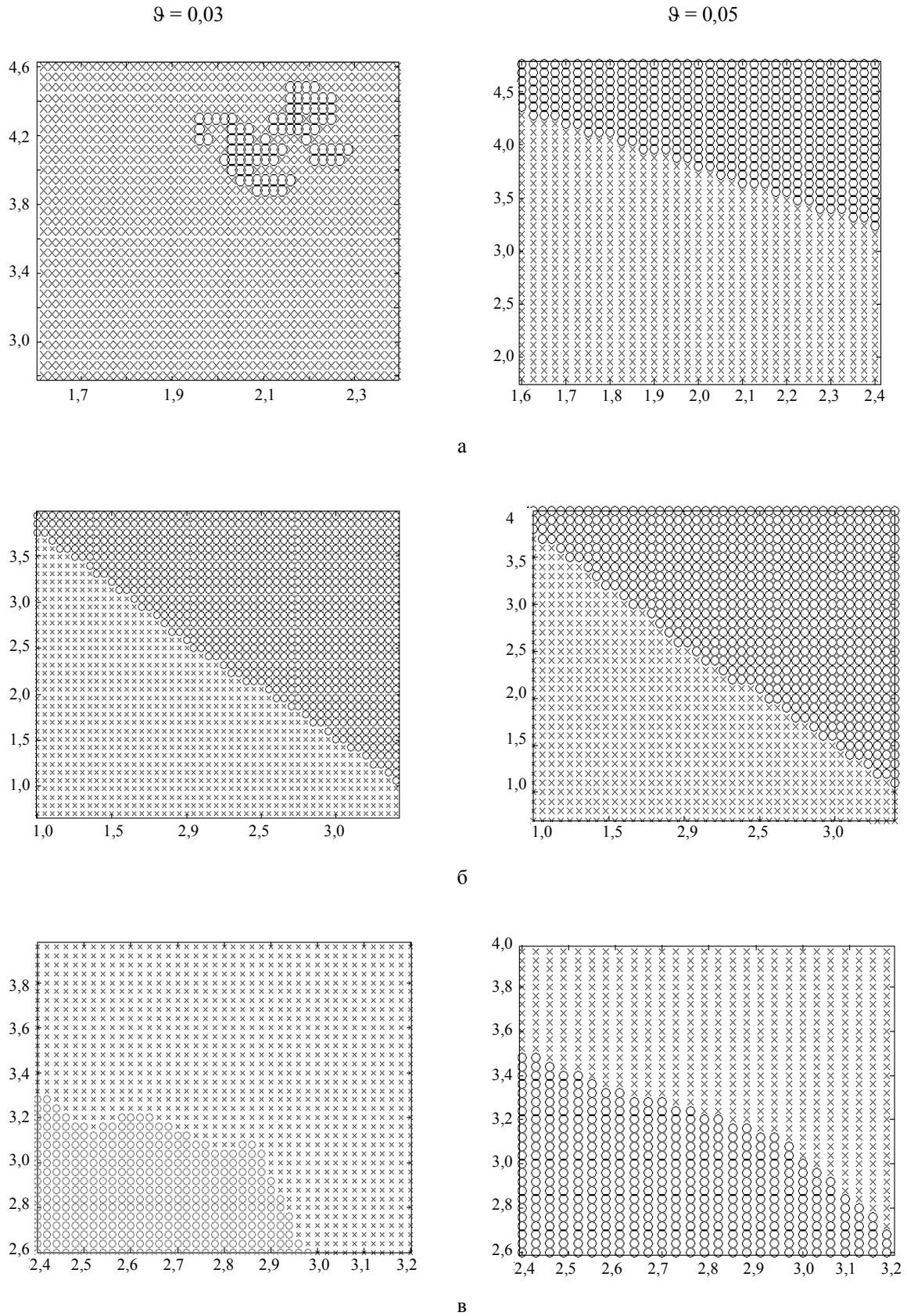


Рис. 2. Результаты класифікації для: а – стаціонарного режиму; б – прийомистості; в – дроселювання; (о – клас без пошкодження; х – клас з пошкодженням)

3. Аналіз вірогідності розпізнавання

Оцінимо точність проведеної класифікації за коефіцієнтом ефективності K_{ef} , який являє собою значення ймовірності правильної класифікації. Для цього використаємо результати оцінювання сумарної щільності ймовірності (ЩІ) векторів діагностичних ознак \bar{X}_{cm} , \bar{X}_{np} та \bar{X}_{dp} об'єктів тестової множини для зазначених вище класів ТС ОД і методу аналізу, наведену в [6]. Найвища точність класифікації матиме місце в разі потрапляння тестового об'єкту в центри визначених класів ($K_{ef} = 1$). Точність класифікації знижується при віддаленні діагностичних ознак від центрів класів, а найнижче значення точності буде мати місце на межі розділення класів, де сумарні ЩІ ознак для обох класів є близькими за значеннями. Крім того, класи технічних станів для стаціонарного режиму при пошкодженні $\vartheta = 0,03$ (рис. 1) лінійно не розділяються, і на площині діагностичних ознак має місце значна область невизначеності, де сумарні ЩІ ознак для обох класів також є близькими за значеннями.

Для оцінки вірогідності розпізнавання розіб'ємо множину результатів класифікації на елементарні осередки прямокутної форми для кожної з розглянутих задач розпізнавання відповідно до режимів вібраційного збурення (загальна кількість осередків K_{zag} для векторів ознак дорівнює 1152). Кожен з елементарних осередків множини результатів класифікації вже віднесений мережею до одного з визначених класів. Для результатів оцінювання сумарної ЩІ ознак кожен з елементарних осередків буде відносити до того класу, сумарна ЩІ ознак для якого більша за значенням, що відповідає правилу прийняття рішення за методом максимальної правдоподібності [1]:

$$\chi \in S_0, \text{ якщо } \frac{f(\chi|S_0)}{f(\chi|S_1)} > 1;$$

$$\chi \in S_1, \text{ якщо } \frac{f(\chi|S_0)}{f(\chi|S_1)} < 1,$$

де χ – координата елементарного осередку на площинах діагностичних ознак; $f(\chi|S_i)$ – значення ЩІ класів ($i = 0; 1$) для даної координати.

Таким чином, для кожної задачі розпізнавання елементарні осередки можуть співпадати чи не співпадати між собою за віднесенням ОД до одного з визначених класів. Ймовірність правильної класифікації за K_{ef} визначимо як відношення кількості осередків, що співпадають за класифікацією стану, до загальної кількості елементарних осередків K_{zag} .

На рис. 3 наведено графіки залежності K_{ef} від параметру впливу нейронної мережі σ в інтервалах його значень, де забезпечується нульова похибка навчання. Як видно з наведених графіків, мережа забезпечує розпізнавання технічного стану лопаток робочого колеса ГТД (відсутність пошкодження та наявність малого тріщиноподібного пошкодження з $\vartheta = 0,03; 0,05$ в одній з лопаток) з наступними мінімальними значеннями ймовірності правильної класифікації:

– *стаціонарний режим* – $K_{ef} = 0,93$ для та $\vartheta = 0,05$ при $\sigma = 0,1$; для $\vartheta = 0,03$ розпізнавання з низькою вірогідністю ($K_{ef} = 0,3$);

– *приймистість* – $K_{ef} = 0,94$ при $\sigma = 0, 1, \dots, 0,2$ для обох розглянутих значень параметру пошкодження;

– *дроселювання* – $K_{ef} = 0,94$ для $\vartheta = 0,03$ та $\vartheta = 0,05$ при $\sigma = 0,1$.

Висновки

Проведений в роботі аналіз показав, що за використаними кількісними ознаками найбільш ефективним є розпізнавання ТС лопаток робочого колеса ГТД в режимі приймистості та дроселювання, коли

дефектний стан відповідає пошкодженню з параметром 0,03 та 0,05.

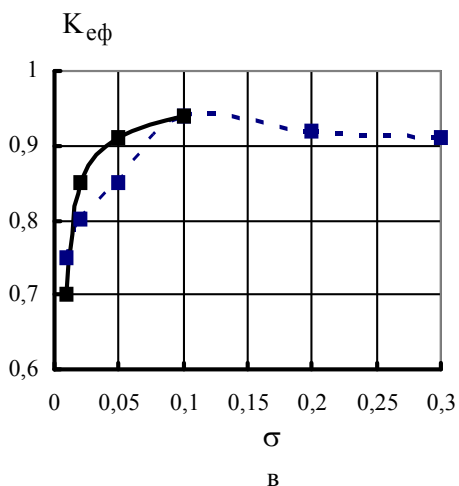
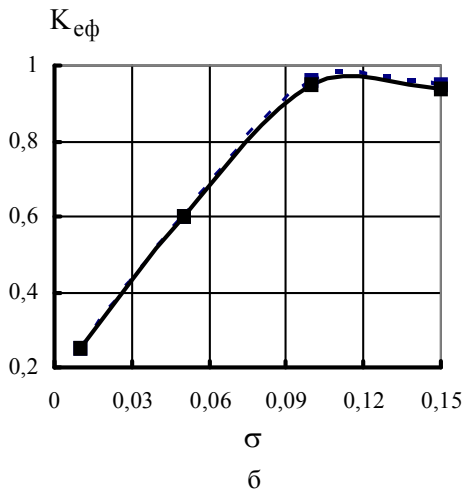
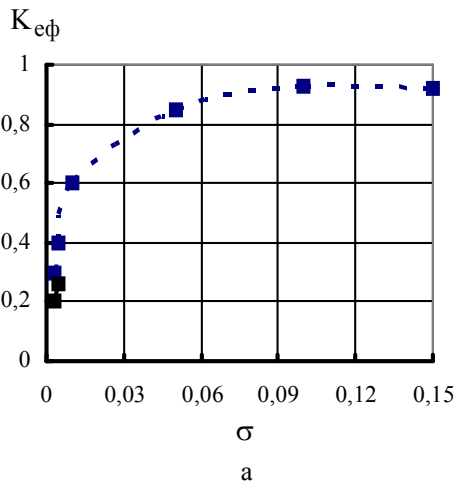


Рис. 3. Результати оцінювання вірогідності розпізнавання для: а – стаціонарного режиму; б – прийомистості; в – дроселювання (суцільна крива – $\vartheta = 0,03$; пунктир – $\vartheta = 0,05$)

В стаціонарному режимі розпізнавання є ефективним для пошкоджень з параметром 0,05 та біль-

ше. Для вказаних режимів імовірність неправильної класифікації $(1 - K_{\text{эф}})$ є меншою за середній ризик $R = 0,13$ для значень імовірності пропуску пошкодження 0,005; імовірність хибної тривоги 0,03 та відношення ціни пропуску пошкодження та хибної тривоги $C_{12} : C_{21} = 20$, значення яких для діагностики систем ГТД рекомендовано в [1].

Література

1. Биргер И.А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
2. Бурау Н.И. О новых направлениях в развитии виброакустических методов диагностики прочностных дефектов в лопатках газотурбинных двигателей // Вибрации в технике и технологии. – 2001. – № 4 (20). – С. 45 – 48.
3. Кучер О.Г., Якушенко О.С., Сухоруков В.Ю. Розпізнавання технічного стану авіаційних ГТД з використанням нейронних мереж // Вестник двигателестроения. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич». – 2002. – № 1. – С. 101 – 106.
4. Бурау Н.И., Сопілка Ю.В. Виділення діагностичних ознак початкових міцнісних дефектів в елементах машин і механізмів // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2002. – № 5. – С. 54 – 58.
5. Бурау Н.И., Сопілка Ю.В. Повышение чувствительности дискриминантных признаков трещины в задачах виброакустической диагностики элементов роторных систем // Акустичний вісник. – 2003. – Т. 6, № 3. – С. 10 – 17.
6. Бурау Н.И., Зажицький О.В. Аналіз ефективності розпізнавання технічного стану об'єкту віброакустичної діагностики нейронними мережами // Методи та прилади контролю якості. – 2003. – № 11. – С. 21 – 26.

Надійшла до редакції 18.05.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.Г. Кучер, Національний авіаційний університет, Київ.