

7. *Свойства* сталей и сплавов, применяемых в котлотурбостроении: Справочник. Исполнители: Либман Л. Я, Пейсихис М. И.; т. 1–3. – Л.: НПО Центр. котлотурбин. ин-т, 1966. – 212 с.
8. *Загорулько А. В.* Програмный комплекс ANSYS в инженерных задачах: учебное пособие / А. В. Загорулько. – Сумы: СумДУ, 2008. – 201 с.
9. *Нормы* расчета на прочность хвостовых соединений рабочих лопаток: ОСТ 108.021.07-84-Л. – Л.: НПО Центр. котлотурбин. ин-т, 1986. – 19 с.
10. *Шульженко Н. Г.* Задачи термочности, вибродиагностики и ресурса энергоагрегатов (модели, методы, результаты исследований) / Н. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровский, Б. Ф. Зайцев. – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. – 370 с. – Напечатано в России.

Поступила в редакцию
25.06.13

УДК 621.314: 621.393.66

І. М. Яворський^{**}, д-р фіз.-мат. наук

Р. М. Юзефович^{*}, канд. техн. наук

І. Б. Кравець^{*}, канд. техн. наук

І. Й. Мацько^{*}

І. Г. Стецько^{*}

^{*} Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України
(м. Львів, e-mail: abzac@ipm.lviv.ua)

^{**} Інститут телекомунікації Технологічно-природничого університету
(Польща, м. Бидгощ)

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ДЛЯ БАГАТОВИМІРНОЇ ВІБРАЦІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ

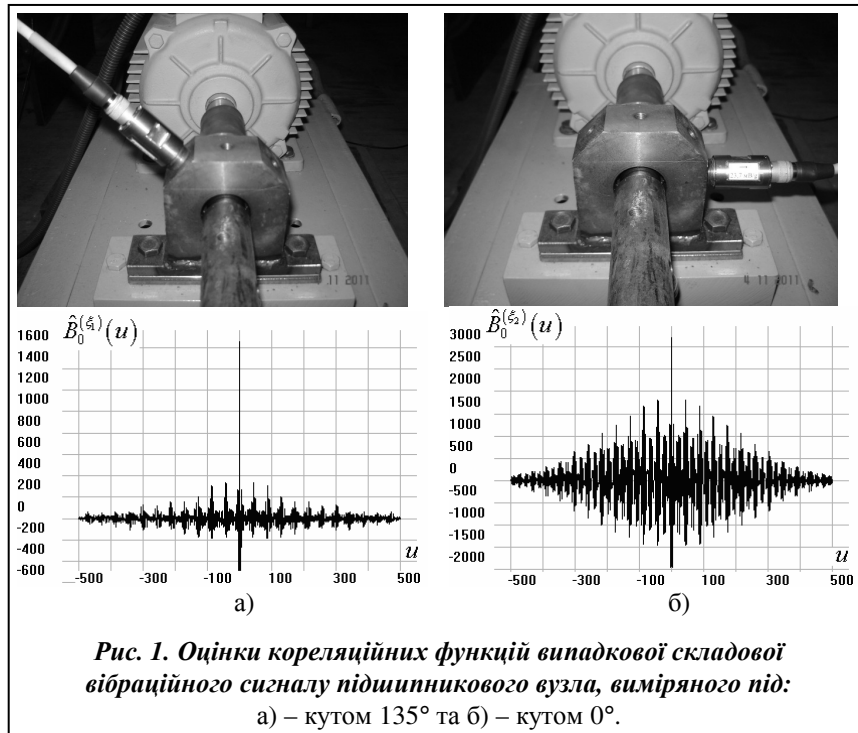
Запропоновано новий підхід до багатовимірної вібраційної діагностики обертових вузлів машинних комплексів, що базується на використанні методів теорії нестационарних випадкових процесів та кореляційного тензорного аналізу. Розроблені методи верифіковані при проведенні натурних випробувань на вібраційному стенді та промислових об'єктах України. На основі розробленої методики побудовано портативну діагностичну систему багатовимірного контролю.

Предложен новый подход к многомерной вибрационной диагностике вращающихся узлов машинных комплексов, основанный на использовании методов теории нестационарных случайных процессов и корреляционного тензорного анализа. Разработаны методы верифицированы при проведении натурных испытаний на вибрационном стенде и промышленных объектах Украины. На основе разработанной методики построено портативную диагностическую систему многомерного контроля.

Вступ

Ефективним методом, що широко використовується при розв'язанні задач технічної діагностики, на цей час є статистичний аналіз зареєстрованих сигналів, що ґрунтується на спектральній та кореляційній теоріях [1]. При визначенні характеристик вібраційних сигналів одним з найважливіших етапів, що обумовлюють подальший напрям досліджень, є вибір адекватної до поставленої задачі їх математичної моделі.

Дослідження, проведені в Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України, показали, що використання імовірнісної моделі цих сигналів у вигляді періодично корельованих випадкових процесів (ПКВП) відкриває нові можливості при діагностиці дефектів обертових механізмів на ранніх стадіях їх виникнення [2–4]. У таких випадках вібраційний сигнал розглядається як сума детермінованої, стаціонарної та нестационарної випадкових



на частоті обертання ротора та її гармонік. Для розв'язання такої задачі слід визначити та аналізувати амплітудний і фазовий спектри вібрацій сусідніх опор вала, оскільки різниця фаз коливань опор на частоті обертання ротора та її гармонік містить інформацію про форму коливань вала. При розв'язанні вказаних діагностичних задач доцільно використовувати взаємний спектральний аналіз сигналів, виміряних в різних точках контролю, та тензорний статистичний аналіз [7–8].

Інваріанти вібраційних коливань

Зрозуміло, що вібраційні коливання, зареєстровані в різних точках того чи іншого механізму, відрізняються між собою. Так, на рис. 1, для прикладу, показані графіки оцінок кореляційних функцій стаціонарних наближень сигналів, відібраних в різних точках підшипникового вузла. І в першому, і в другому випадках графіки мають вигляд зникаючих коливань, однак ці коливання суттєво відрізняються як за своїми потужностями, так і співвідношеннями між параметрами окремих їх складових. А це фактично означає, що, записуючи лише горизонтальну чи вертикальну складові коливань, можна пропустити відгук від дефекту системи й тим самим помилитися при оцінюванні його ресурсу.

Саме тому слід проводити запис вібраційних коливань у декількох точках одночасно і використовувати для виявлення дефектів такі їх сумісні характеристики, які є нечутливими до повороту системи координат (рис. 2). Відтак, вибираючи такі інваріанти для побудови діагностичних ознак, можемо оцінити стан певного вузла, не задумуючись про місце кріплення первинних перетворювачів (рис. 2, а). Відмітимо, що інваріантні характеристики для виявлення певного типу дефектів можна побудувати, вже виходячи з математичного сподівання векторного ПКВП. Такими, наприклад, можуть бути параметри кривої в прямокутній системі координат Oxy , яка визначається функціями, що описують гармонічні складові вектора $m_{\xi}(t)$: $x(t) = A \cos(k\omega_0 t + \varphi_x)$, $y(t) = B \cos(k\omega_0 t + \varphi_y)$.

Така крива при дисбалансі вала для $k = 1$, що має вигляд еліпса, показана на рис. 2, б. Як бачимо, отриманий еліпс не змінює своєї орієнтації при поворотах системи координат (нові осі координат вибираються у напрямках встановлення первинних перетворювачів).

Лінійними інваріантами кореляційної тензор-функції є величини

$$I(t, u) = b_{\xi_1}(t, u) + b_{\xi_2}(t, u), \quad D(t, u) = b_{\xi_1 \xi_2}(t, u) - b_{\xi_2 \xi_1}(t, u).$$

складових. Детермінована складова описує загальний стан механізму, зокрема розбалансованість, неспіввісність, еліптичність валів тощо. Стаціонарна описує фонові шуми, що виникають в системі, а нестационарна – обумовлена наявністю дефектних елементів, що є в динамічній системі [5–6].

Однією з типових діагностичних задач є задача просторового та векторного аналізу вібрацій – дослідження форм коливань валів великих стаціонарних агрегатів

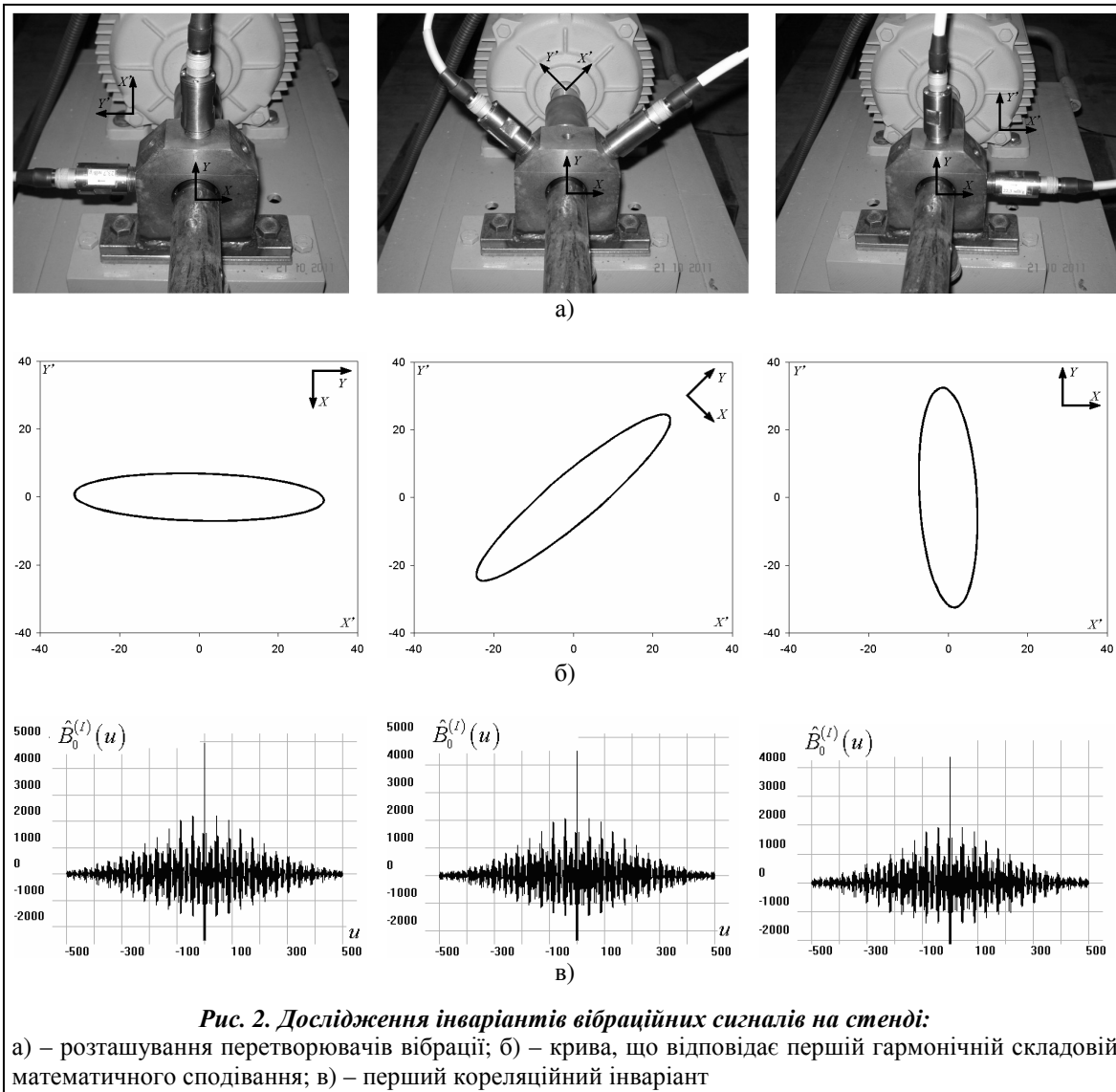


Рис. 2. Дослідження інваріантів вібраційних сигналів на стенді:

а) – розташування перетворювачів вібрації; б) – крива, що відповідає першій гармонічній складовій математичного сподівання; в) – перший кореляційний інваріант

Перший з них $I(t, u)$ визначає усереднений скалярний добуток векторів $\xi(t)$ і $\xi(t + u)$

$$I(t, u) = E[\xi(t)\xi(t + u)] = E[\xi(t)\xi(t + u)\cos\xi(t)\xi(t + u)],$$

а другий $D(t, u)$ – усереднений скісний добуток

$$D(t, u) = E[\xi(t)\times\xi(t + u)] = E[\xi(t)\xi(t + u)\sin\xi(t)\xi(t + u)].$$

Інваріант $I(t, u)$ векторного ПКВП можна подати у вигляді ряду Фур'є

$$I(t, u) = B_0^{(l)}(u) + \sum_{k \in N} (C_k^{(l)}(u) \cos k\omega_0 t + S_k^{(l)}(u) \sin k\omega_0 t),$$

де $B_0^{(l)}(u) = B_0^{(\xi_1)}(u) + B_0^{(\xi_2)}(u)$, $C_k^{(l)}(u) = C_k^{(\xi_1)}(u) + C_k^{(\xi_2)}(u)$, $S_k^{(l)}(u) = S_k^{(\xi_1)}(u) + S_k^{(\xi_2)}(u)$, при цьому $B_0^{(\xi_i)}(u)$, $C_k^{(\xi_i)}(u)$, $S_k^{(\xi_i)}(u)$ – нульові, косинусні і синусні кореляційні компоненти автокореляційних функцій $b_{\xi_i}(t, u)$, кожен з коефіцієнтів $B_0^{(l)}(u)$, $C_k^{(l)}(u)$, $S_k^{(l)}(u)$ є інваріантом і може використовуватися для опису стану обертового вузла. Графіки оцінок нульового коефіцієнта $B_0^{(l)}(u)$ при різних кріпленнях первинних перетворювачів показані на рис. 2, в. Вони підтверджують незалежність цієї величини від вибраної системи координат.

Максимальне значення інваріант $I(t, u)$ досягає при $u = 0$. Величина $I(t, 0)$ тоді визначає середнє значення квадрата модуля вектора $\xi(t)$, тобто потужність його флуктуацій, при цьому $B_0^{(l)}(0)$ – середню потужність, а коефіцієнти $C_k^{(l)}(0)$ і $S_k^{(l)}(0)$ – характер її часових змін.



Рис. 3. Загальний вигляд системи ВЕКТОР

Як показують експериментальні та комп'ютерно-симуляційні дослідження, глибина часових змін інваріанта $I(t, 0)$ є більшою, ніж кожної з функцій $b_{\xi_1}(t, 0)$ чи $b_{\xi_2}(t, 0)$. Це створює можливість для більш ефективного виявлення дефектів.

Вібраційна система ВЕКТОР

На базі розроблених у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України вібраційних діагностичних систем ранньої діагностики [9–10] сконструйована вібраційна діагностична система ВЕКТОР (рис. 3), що реалізує алгоритми тензорного статистичного аналізу. Вона дозволяє використовувати електронні одно- та тривимірні (векторні) перетворювачі віброприскорення ДВ1-70 та ДВ3-70 на основі сенсора ADXL001-70 фірми Analog Devices, давачі віброприскорення фірми Bruel & Kjaer. У ній є канал синхронізації (необхідний, наприклад, для балансування валів чи знаходження місцеположення дефекту), мікрофонні входи для вимірів інтенсивності шуму у виробничих приміщеннях (промислова санітарія) та для визначення місць витоків рідин з підземних трубопроводів.

Система складається з таких основних вузлів: п'єзокерамічні давачі віброприскорення; електронні давачі віброприскорення; перетворювач заряду; аналоговий комутатор; канали 1–6 основного підсилення та формування амплітудно-частотної характеристики системи; канали синхронізації відбору сигналів; канал 8 для підключення еталонного або інших промислових давачів вібрації фірми Bruel & Kjaer конструкції Delta Tron; аналогово-цифровий перетворювач Е-440 фірми L-card; блок живлення системи; персональний комп'ютер.

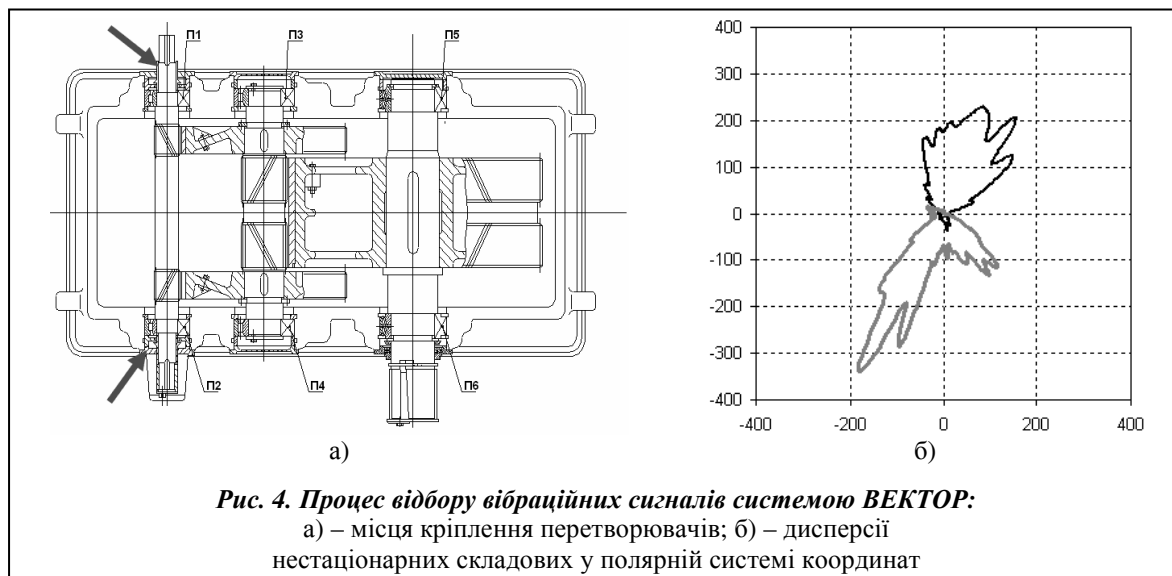
Технічні характеристики системи ВЕКТОР:

- кількість вхідних каналів 8;
- частота дискретизації 400 кГц (макс);
- смуга частот вхідного сигналу 25 кГц;
- максимальна пропускна здатність по шині USB не більше 500 кСлів/с.;
- діапазон вхідного сигналу ± 10 В; $\pm 2,5$ В; $\pm 0,625$ В; $\pm 0,156$ В;
- напруга синфазного сигналу ± 10 В;
- час перетворення 2,5 мкс;
- вхідний опір при одноканальному вході не менше 1 МОм;
- живлення: акумулятор 12 В,
- мережа змінного струму 220 В.

Дана вібраційна діагностична система ВЕКТОР відрізняється від існуючих систем тим, що: дозволяє одночасно вимірювати вібраційні коливання у багатьох точках по трьох координатах (осьовій, горизонтальній та вертикальній); використовує парафазні лінії прийому-передачі, що мінімізують вплив сигналів від можливих потужних перешкод, а це, в свою чергу, дозволяє оператору працювати з системою ВЕКТОР на відстань до 100 м від об'єкта; дає змогу виявляти дефекти обертових механізмів на ранніх стадіях зародження, використовуючи взаємний аналіз детермінованої та випадкової складових вібраційних сигналів, отриманих з різних каналів запису; використовує методи статистичного оцінювання імовірнісних характеристик вібраційних сигналів на основі теорії періодично нестационарних процесів, що дозволяє визначати глибину модуляцій, які присутні у сигналі, та оцінювати залишковий ресурс механізмів тривалої експлуатації.

Багатовимірна вібраційна діагностика редукторів вугільних конвеєрів

Магістральний конвеєр забезпечує безперебійну роботу технологічної лінії для перевантажування вугілля, зв'язуючи між собою станцію розвантаження вагонів (вагоноперекидач) і штабелеформуючу машину (стакер). Зупинка конвеєра визиває зупинку всієї техноло-



гічної лінії. В умовах інтенсивної роботи вугільного комплексу виникає необхідність в періодичній зупинці магістрального конвеєра для проведення технічного обслуговування і ремонту. Традиційно дефектування та ремонт вузлів приводу проводяться методами їх демонтажу та розбирання, з чим пов'язані значні простой перевантажувального комплексу.

З метою зниження простоїв під час технічного обслуговування та визначення технічного стану розроблено методику і проведено діагностику редуктора приводу магістрального конвеєра неруйнівними методами контролю. Відбір вібраційних сигналів від редукторів магістральних конвеєрів порту «Южний» здійснювався за допомогою вібраційної системи ВЕКТОР (рис. 4). Контрольні точки (рис. 4, а) були вибрані над підшипниковими вузлами П1 та П2. У кожній точці записувались три сигнали: горизонтальна, вертикальна та осьові компоненти вібрації. Частота відбору вібраційних сигналів 2 кГц, довжина реалізацій 2 хв. Технічні характеристики механізму: редуктор – циліндричний двоступінчатий, зубчаті колеса $Z1 = 27$, $Z2 = 171$, $Z3 = 32$, $Z4 = 182$ розташовані на трьох валах та опираються на підшипники кочення П1, П2 – 32634; П3, П4 – 2556; П5, П6 – 97172.

Відповідно до характеристик редукторів проведено розрахунки їх основних частотних характеристик. Використовуючи методи теорії стаціонарних випадкових сигналів, оцінено спектральну щільність потужності та ідентифіковано усі спектральні підняття, проте вони не дозволили встановити наявності будь-яких локалізованих дефектів системи. Використовуючи методи теорії нестационарних випадкових процесів, було виявлено модуляційні процеси, які пов'язані із зародженням дефектів у механічних системах. Найбільшу увагу привернув магістральний конвеєр № 217-34, підшипникові вузли № 1 та № 2 якого випромінювали вібраційні процеси, що були нестационарними у часі, при цьому частота модуляції, а також характеристики модулюючих процесів співпадали. Для встановлення типу дефекту був проведений багатовимірний нестационарний аналіз, що дозволив ідентифікувати биття вала, яке привело до модуляції вузько-смугових процесів ~16 Гц, на частоту 201 Гц. У редукторі встановлено два незалежних джерела таких вібрацій, що проявилось у підвищенні потужності шумів на краях вала у протифазі (рис. 4,б).

Література

1. *Неразрушающий контроль*: Справочник / Под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2005. – Т 7. – 829 с.
2. *Probabilistic Models and Statistical Methods for the analysis of Vibrational signals in the problems of diagnostics of machines and structures* / V. Yu. Myhailyshyn, I. M. Yavors'kyi, Yu. T. Vasylyna et al. // *Materials Sci.* – 1997. – Vol. 33, № 5. – P. 655–672.
3. *McCormick A. C. Cyclostationarity in rotating machine vibrations* / A. C. McCormick, A. C. Nandi // *Mechanical Systems and Signal Proc.* – 1998. – Vol. 2, № 12. – P. 225–242.

4. *Розробка інформаційно-виміральної системи для вібродіагностики підшипників великих стаціонарних агрегатів* / І. М. Яворський, П. П. Драбич, І. Ю. Ісаєв та ін. – К.: Ін-т електрозварювання ім. С. О. Патона. – 2009. – С. 113–122.
5. *Linear Filtration Methods for Statistical Analysis of Periodically Correlated Random Processes. Part I: Coherent and Component Methods* / I. M. Javors'kyi, J. Leskow, I. Kravets, I. Isayev, E. Gajicka // *Signal Processing*. – 2012. – Vol. 92.– P. 1559–1566.
6. *Component covariance analysis fro periodically correlated random processes* / I. M. Javors'kyi, I. Yu. Isaev, I. Majewski, R. Yuzefovych // *Signal Processing*. – 2010. – Vol. 90. – P. 1083–1102.
7. *Інваріантний кореляційний аналіз векторних періодично корельованих випадкових процесів* / І. М. Яворський, І. Б. Кравець, І. Й. Мацько, Р. М. Юзефович // *Відбір і обробка інформації*. – 2011. – № 35 (111). – С. 22–31.
8. *Мак-Коннел А. Дж. Введение в тензорный анализ с приложениями к геометрии, механике и физике* / А. Дж. Мак-Коннел. – М.: Физматлит, 1963. – 411 с.
9. *Spectral analysis of stationary components of periodically correlated random processes* / I. N. Yavorskyj, I. B. Kravets, I. Y. Mats'ko // *Radoelectronics and Communications Systems*. – – 2011. – № 54 (8).– P. 451–463.
10. *Method of vibration diagnostics of initial stages of rotation systems damage* / I. M. Yavorskyj, P. P. Drabych, I. B. Kravets, I. I. Matsko // *Material Sci*. – 2011. – Vol. 47 (2).– P. 264–271.

Надійшла до редакції
05.08.12