

Одним із важливих завдань утримання рухомого складу в працездатному стані є діагностування буксових вузлів з підшипниками кочення, що дає змогу своєчасно виявляти несправності в будь-яких елементах підшипника. У статті для оцінки технічного стану буксових підшипників рухомого складу наведено алгоритм розпізнавання, який дає змогу порівняти апостеріорну інформацію з апіорним описом класів мовою діагностичних ознак

Ключові слова: алгоритм, буксовий вузол, вібродіагностування, дефект, ознака, підшипник, рухомий склад, технічний стан

Одной из важных задач содержание подвижного состава в работоспособном состоянии является диагностирование буксовых узлов с подшипниками качения, что позволяет своевременно выявлять неисправности в любых элементах подшипника. В статье для оценки технического состояния буксовых подшипников подвижного состава приведен алгоритм распознавания, который позволяет сравнить апостериорную информацию с априорным описанием классов языком диагностических признаков

Ключевые слова: алгоритм, буксовый узел, вибродиагностирование, дефект, признак, подшипник, подвижной состав, техническое состояние

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ БУКСОВИХ ПІДШИПНИКІВ РУХОМОГО СКЛАДУ ШЛЯХОМ ВІБРОДІАГНОСТУВАННЯ

В. Г. Равлюк

Кандидат технічних наук,
старший викладач

Кафедра «Вагони»

Українська державна академія
залізничного транспорту

пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна, 61050

E-mail: ravvg@ukr.net

1. Вступ

Однієї з серйозних проблем діагностування є визначення технічного стану підшипників кочення, які використовуються в буксових вузлах рухомого складу. У багатьох випадках безаварійність роботи буксових вузлів, майже повністю обумовлена підшипниками кочення від технічного стану яких буде залежати експлуатація рухомого складу та безпека руху поїздів на залізничному транспорті.

При обкочуванні тілами кочення механічних дефектів на кільцях підшипника, як і при дефектах на самих тілах кочення в підшипнику виникають специфічні вібраційні процеси. Причиною виникнення коливальних є одиничне імпульсне збудження.

Кожне імпульсне зусилля від дефекту збуджує в елементах підшипника і в елементах буксового вузла рухомого складу затухаючі коливання на частотах власного резонансу елементів. Оскільки зусилля, що збуджує носить короткочасний характер, тому на спектрі частот виникають вільні коливання, вони дуже широкі та можуть займати смугу частот від сотень герц до сотень кілогерц. Саме цим пояснюється успішне застосування для діагностування підшипників кочення різноманітних методів діагностування, аналізу вібрації як в зоні чутливих частот, так і в зоні ультразвуку.

2. Аналіз попередніх досліджень та постановка проблеми

Для діагностування технічного стану буксових підшипників рухомого складу використовуються різноманітні методи. Останніми роками набуло поширення діагностування за вібраційним сигналом, який володіє специфічними особливостями в часовій і частотній областях залежно від видів дефектів і ступеня їх розвитку. Ці методи є різними за теоретичними передумовами, мають різну трудомісткість, достовірність, потребують використання різного апаратного забезпечення.

Питанням діагностування вузлів механічного обладнання, а зокрема буксових вузлів з підшипниками кочення присвячено багато наукових праць. Зокрема у статті [1] розглянуто проблеми ефективності двох методів діагностування технічного стану підшипників кочення на основі аналізу вібраційних сигналів. У науковій праці [2] наведено залежності за яким можна оцінювати величину динамічних сил, які діють на підшипник, що дає змогу з більшою точністю оцінювати його потенційний ресурс.

У роботі [3] автори виконали загальний огляд методів діагностування механічних обертальних вузлів і розглянули їх переваги та недоліки. Науковцями в ро-

боті [4] приділено особливу увагу вібродіагностуванню вузлів залізничного рухомого складу й розглянуті напрямки подальшого удосконалення віброакустичного методу контролю. Важливе завдання для класифікації технічного стану елементів підшипників кочення рухомого складу досліджено авторами в роботі [5]. Вони використовують при вібродіагностуванні апарат імовірнісних нейронних мереж для аналізу віброакустичної інформації, яка отримана від сучасних вібродіагностичних комплексів.

Автори в роботі [6] запропонували спрощену схему пристрою для зняття сигналів з віброакселерометра та метод подальшої обробки спектрограми, що дозволило з мінімальними витратами, але з чималою вірогідністю проводити вібраційну оцінку підшипників.

В праці [7] наведено існуючі дефекти та причини вібрації підшипників кочення. Запропоновані особливості діагностування зовнішнього та внутрішнього кілець підшипника з використанням методу обвідної вібрації. Доведено, що амплітуда обвідної вібрації на частоті дефекту підшипника змінюється (модулюється) з частотою обертання ротора.

Розглянуті авторами [8] методи динамічних випробувань вагонів у дослідних лабораторіях на каткових стендах, дозволяють значно підвищити достовірність результатів діагностування, створити надійну та конкурентоздатну продукцію залізничного транспорту.

Автори дослідження [9] пропонують використовувати пристрій для реєстрації та аналізу вібраційних характеристик підшипників під час руху локомотивів. Питанням організації та проведення діагностування присвячено низку публікацій у галузевій літературі. Так, в праці [10] розглянуто методи та засоби діагностування механічних вузлів, робота яких супроводжується наростанням рівню шуму, вібрації, підвищеною температури. Дані методи дозволяють виявляти несправності, що зароджуються і запобігати виникненню аварійних ситуацій. Необхідно окремо виділити результати дослідження [11], де зареєстровані вібраційні реалізації містять багато цінної інформації, яку повністю сприйняти практично неможливо у зв'язку із чим сигнали зазнають попередньої обробки різними методами з метою виділення складових з певними характеристиками [12, 13].

У залізничній науці з урахуванням необхідності забезпечення безпеки руху завжди найважливіша роль приділялася діагностуванню вузлів, оскільки остаточний висновок про технічний стан елемента рухомого складу можна зробити лише після діагностування.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – виконати вібродіагностування буксових підшипників рухомого складу використовуючи діагностичне обладнання системи діагностики механізмів ОМСД-02 із подальшим дослідженням їх технічного стану.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі задачі:

– визначити технічний стан підшипників кочення буксових вузлів рухомого складу шляхом порівняння апостеріорної інформації з апіорним описом класів,

мовою діагностичних ознак із використанням алгоритмів розпізнавання;

– дослідити діагностичні ознаки технічного стану буксових підшипників шляхом використання алгоритмів із заходами близькості або подібності;

– на основі отриманих результатів діагностування зробити висновок про технічний стан буксових підшипників та доцільність їх подальшої експлуатації.

4. Розпізнавання технічних станів буксових підшипників кочення

У найбільш загальному вигляді постановка завдання розпізнавання технічних станів підшипників кочення може бути сформульована в наступному вигляді [10]. Якщо вихідна множина технічних станів підшипників кочення, що розпізнаються поділена на класи, тобто складений алфавіт класів $W = \{W_1, \dots, W_m\}$, визначений робочий словник ознак $U = \{u_1, \dots, u_n\}$ і складений опис кожного класу станів $W_i, i = 1, \dots, m$ мовою цих ознак $u_j, j = 1, \dots, n$, тобто складені функціональні залежності виду $W = p_i(u_1, \dots, u_n)$, тоді відомості, що вкладені в цих залежностях, являють собою апіорну інформацію системи розпізнавання. Тут $p_i(u_1)$ – умовна щільність розподілу ознак усередині i -го класу.

Якщо в результаті проведення навчальних експериментів встановлено, що для стану ознак, які розпізнаються прийняли значення: $u_1 = u_1^0, u_2 = u_2^0, \dots, u_n = u_n^0$, тоді потрібно встановити, до якого класу відноситься невідоме, що піддається розпізнаванню стану. Розв'язок завдання розпізнавання здійснюється на основі зіставлення апостеріорної інформації з апіорним описом класів мовою діагностичних ознак за допомогою алгоритмів розпізнавання. При цьому ознаки розпізнаваних станів можуть бути представлені як детерміновані, імовірнісні, логічні або структурні [3, 10].

Алгоритми розпізнавання ґрунтуються на порівнянні того або іншого заходу близькості, або заходу подібності розпізнаваного станів підшипників кочення з кожним класом. При цьому, якщо обраний захід близькості L ознак U даного стану w з ознаками якого-небудь класу $W_g, g = 1, \dots, m$ перевищує захід близькості з ознаками інших класів, тоді ухвалюється розв'язок про приналежність цього стану до класу W_g .

Захід близькості. В алгоритмах, що базуються на використанні детермінованих ознак для розпізнавання технічного стану підшипників кочення використовують метричні заходи близькості або подібності. Взагалі вибір метрики довільний, він необхідний лише для того, щоб вона задовольняла звичайним аксіомам відстаней: $d(a, b) = d(b, a)$; $d(a, c) \leq d(a, b) + d(b, c)$; $d(b, c) \geq 0$; $d(a, b) = 0$, тоді й тільки тоді, коли $a = b$.

Якщо дві точки в ознаковому просторі задані векторами $U_i = \{u_{i1}, \dots, u_{in}\}$ й $U_j = \{u_{j1}, \dots, u_{jn}\}$, тоді відстань d_{ij} між ними можна визначити за допомогою одного із загальноживаних показників відстані (метрики), що наведені нижче:

– відстань за Хемінгом

$$d_{ij} = \sum_{k=1}^n |u_{ik} - u_{jk}|; \quad (1)$$

– Евклідову відстань

$$d_{ij} = \left[\sum_{k=1}^n (u_{ik} - u_{jk})^2 \right]^{1/2}; \quad (2)$$

– квадрат відстані

$$d_{ij} = \sum_{k=1}^n (u_{ik} - u_{jk})^2; \quad (3)$$

– узагальнену відстань

$$d_{ij} = \left[\sum_{k=1}^n |u_{ik} - u_{jk}|^v \right]^{1/v}. \quad (4)$$

Коли клас характеризується переліком вхідних у нього елементів підшипника кочення, побудова системи розпізнавання образів може бути заснована на принципі приналежності до такого переліку. При цьому реалізація процесу автоматичного розпізнавання здійснюється за допомогою порівняння з еталоном кожного класу, що зберігаються в пам'яті системи. Під еталоном розуміють якийсь усереднений образ класу. При наявності навчальної вибірки із 1 членів класу станів з діагнозом W_i у якості етального вектора ознак даного діагнозу (центру кластера) можна прийняти вектор

$$V_i = U_i^{(0)} = \left\{ \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l u_{k1}, \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l u_{k2}, \dots, \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l u_{kn} \right\}. \quad (5)$$

Вираз (5) визначає етalon, як центр ваги області діагнозу [10]. Розпізнавання стану, заданого вектором U_i здійснюється оцінкою відстаней до кожного з етalonів V_j (рис. 1) і відноситься до відповідного класу станів W_j відповідно до правила:

$$w \in W_j, \text{ якщо } d_{ij} = \min d_{ik}; k=1, \dots, m. \quad (6)$$

Для зменшення ймовірності помилки розпізнавання вводиться деякий поріг, наприклад, діаметр ролика r_j , у який повинна попадати точка в ознаковому просторі для віднесення її j-му класу. Правило розпізнавання для ізотропного однорідного простору ознак формулюється при цьому в такий спосіб:

$$w \in W_j, \text{ якщо } |U_i - V_j| \leq r_j. \quad (7)$$

У практичних завданнях область діагнозу W_j з радіусом r_j , ухвалюється так, щоб вона включала з деяким запасом усі точки навчальної послідовності, що належать даному класу. Необґрунтоване розширення границь області може привести до зменшення надійності розпізнавання, яка тим вище, коли менша відстань від випробуваного вектора до одного з етalonних у порівнянні з відстанями до інших етalonів підшипників кочення.

Для класифікації технічного стану підшипників кочення рухомого складу часто користуються не заходом близькості векторів у ознаковому просторі, а заходом подібності. При цьому розпізнавання випробуваного стану здійснюється оцінкою заходу подібності вектора ознак з описами кожного класу й віднесенням

до того із класів, захід подібності з яким максимальний, тобто:

$$w \in W_j, \text{ якщо } R_{ij} = \max R_{ik}; k=1, \dots, n. \quad (8)$$

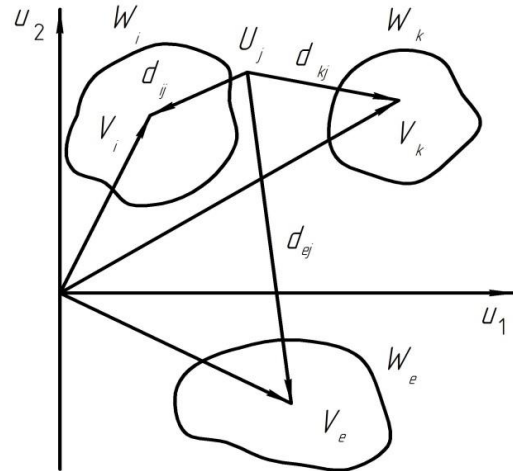


Рис. 1. Розпізнавання зображення $U_j = \{u_{j1}, \dots, u_{j2}\}$ у двовимірному ознаковому просторі за мінімумом відстані $d_{qj} = d(V_q, U_j)$ до етalonів $V_q = \{u_{q1}, \dots, u_{q2}\}$ $q=1, 2, \dots, i, k, l, \dots$

Найбільш уживаним заходом подібності є косинус кута φ_{ij} між векторами U_i і U_j , який у статистиці називається заходом лінійної подібності або нормованою функцією кореляції:

$$R_{ij} = \cos \varphi_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n u_{ik} u_{jk}}{\left[\left(\sum_{k=1}^n u_{ik}^2 \right) \left(\sum_{k=1}^n u_{jk}^2 \right) \right]^{1/2}}. \quad (9)$$

Максимум подібності досягається, коли напрямки векторів, що розпізнаються U_j та етalonного V_j збігаються (рис. 2).

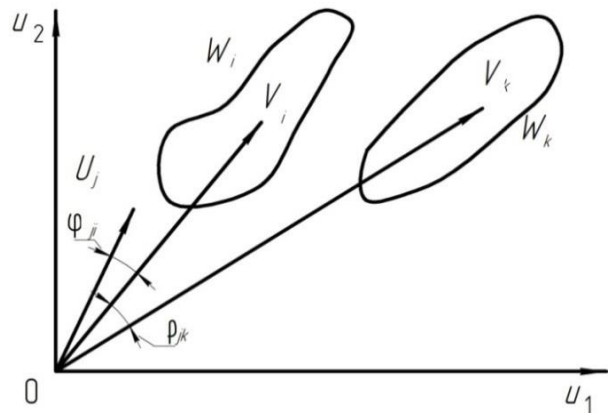


Рис. 2. Розпізнавання зображень за мінімумом кута φ_{ij} між випробуваним U_j зображенням і етalonами V_q

Коли класи станів не перетинаються в просторі ознак, будь-який пред'явлений для розпізнавання вектор діагностичних ознак технічного стану підшипників кочення практично вірогідно можна віднести

до одного з класів технічних станів. А якщо ні, тоді, розпізнавання можна виконати ймовірнісним методом [10, 13], при якому апіорі передбачається, що вектор свідомо належить одному із класів стану.

5. Результати експериментального дослідження діагностичних ознак технічного стану підшипників кочення.

Дослідження з виділення діагностичних ознак технічного стану підшипників кочення рухомого складу базувались на порівнянні апостеріорної інформації з апіорним описом класів, мовою діагностичних ознак із використанням алгоритмів розпізнавання в діагностичній системі ОМСД-02. Дана система є складовою частиною вібродіагностичних стендів і дозволяє здійснювати вимірювання середньоквадратичного значення віброприскорення при діагностуванні механізмів рухомого складу.

Для уточнення діагностичних ознак технічного стану буксових підшипників у вантажному вагонному депо „Основа“ Південної залізниці були відібрані підшипники з різними несправностями, які виникли в процесі експлуатації рухомого складу. Кожен підшипник встановлювався на стенд СВ-01П (рис. 3), зазнавав навантаження 2,5 кН і розкручувався до відповідної частоти обертання. Далі при досягненні відповідного числа обертів за допомогою системи ОМСД-02 реєструвалися часові подання вібраційних сигналів підшипників кочення. Границі відносної допустимої похибки системи ОМСД-02 при вимірюванні віброприскорення в робочому діапазоні амплітуд і частот не перевищують $\pm 10\%$. При вібродіагностуванні реалізація процесу автоматичного розпізнавання діагностичних ознак технічного стану підшипника кочення, здійснюється шляхом порівняння отриманого результату з еталоном кожного класу, які зберігаються в пам'яті системи.

При систематизації інформації діагностування, яка зареєстрована системою ОМСД-02 ухвалюється рішення відносно технічного стану підшипника кочення. При якому можливі помилки першого й другого роду. Якщо, ознака фактично належить до класу справних станів W_1 , а система діагностування ухвалює рішення щодо наявності дефекту підшипника кочення, тобто про приналежність до класу W_2 , тоді відбувається помилка першого роду, яка називається “фіктивною тривоگوю”. Якщо ухвалюється розв'язок про справний стан W_1 , коли підшипник кочення несправний W_2 (рис. 4), тоді відбувається помилка другого роду, яка називається “пропуском дефекту”. Очевидно, що наслідок цих помилок різний, тому прийнято призначати їм різні ступені ризику щодо виникнення аварій.

На спектрі обвідної вібрації можна побачити ударні імпульси, які виникають при контакті кожного тіла кочення з раковиною (тріщиною) зовнішнього кільця. У результаті з'являється низка гармонік із частотами $f_{звн}$ у спектрі обвідної вібрації, причому кількість цих гармонік є досить значною, а їхня амплітуда, тобто діагностична ознака слабо знижується із зростанням частоти вібрації, що свідчить про наявність в підшипнику дефекту.



Рис. 3. Стенд СВ-01В для вібродіагностування підшипників кочення

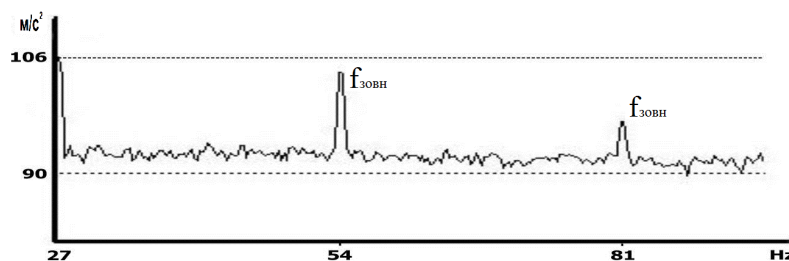


Рис. 4. Спектр обвідної вібрації із раковиною (тріщиною) на зовнішньому кільці підшипника кочення

6. Висновки

У ході роботи проведені теоретичні та експериментальні дослідження буксових підшипників рухомого складу шляхом діагностування.

Результатами проведеного діагностування встановлено, що швидкість розвитку різних видів дефектів неоднакова. Також необхідно зазначити, що мінімальний час розвитку дефектів зношування від моменту виявлення дефекту, що зароджується до аварійного стану підшипника близько до чверті від середнього ресурсу підшипника в буксовому вузлі.

На основі отриманих результатів діагностування та з використанням алгоритмів розпізнавання технічного стану в діагностичній системі ОМСД-02, оператор-експерт приймає рішення щодо подальшої експлуатації підшипників кочення.

Література

1. Федорончак, Т. В. Диагностирование технического состояния подшипников качения [Текст] / Т. В. Федорончак, В. Н. Харитонов, В. И. Дубровин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 7 (64). – С. 166–170.
2. Костюков, В. Н. Стендовая система входной вибродиагностики подшипников качения [Текст] / В. Н. Костюков и др. // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. – 2009. – № 4, – С. 38–42.
3. Браташ, О. В. Анализ методов вибродиагностики асинхронных двигателей [Текст] / О. В. Браташ, А. П.

- Калинов // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика : международный научно-технический журнал. – 2012. – № 5. – С. 44–52.
4. Матюшкова, О. Ю. Современные методы виброакустического диагностирования [Текст] / О. Ю. Матюшкова, В. Ю. Теттэр // Омский научный вестник. – 2013. – № 3 (123). – С. 294–299.
 5. Мартынов, И. Э. Оценка виброакустики буксовых узлов [Текст]: сб. науч. тр. / И. Э. Мартынов, В. Г. Равлюк, С. В. Михалкив. – Москва, Мир Транспорта. – 2013. – Вып. 3. – С. 52–57.
 6. Чернышенко, А. В. К вопросу об автоматизации вибродиагностики подшипников качения [Текст] / А. В. Чернышенко, А. А. Павлова, В. П. Петрушак // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ": Машинознавство і САПР. – 2007. – № 3. – С. 145–151.
 7. Борисюк, Д. В. Виброакустическая диагностика дефектов и неисправностей подшипников качения [Текст] / Д. В. Борисюк // Всеукраїнський науково-технічний журнал: Вибрації в техніці та технологіях. – 2014. – № 4 (76). – С. 50–53.
 8. Равлюк, В. Г. Визначення динамічних характеристик вагонів при випробуваннях на каткових стендах [Текст] / В. Г. Равлюк, А. С. Глущенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 5, № 7 (59). – С. 49–52. – Режим доступа: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/4158/3921>
 9. Тартаковський, Е. Д. Створення вбудованих систем контролю технічного стану механічного обладнання [Текст] / Е. Д. Тартаковський та ін. // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – 2014. – Вып. 149. – С. 13–22.
 10. Балицкий, Ф. Я. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. В 2 кн. Кн. 2 [Текст] / Ф. Я. Балицкий, А. В. Барков, Н. А. Баркова и др.; под общ. ред. В. В. Клюева. Вибродиагностика. – М.: Машиностроение, 2005. – 829 с.
 11. Борзилов, І. Д. Визначення працездатності буксових вузлів вагонів вібродіагностичними методами [Текст] / І. Д. Борзилов, В. Г. Равлюк, М. Г. Равлюк // Зб. наук. праць ДонІЗТ. – 2009. – Вып. 19. – С. 83–92.
 12. Барков, А. В. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации [Текст]: учеб. / А. В. Барков, Н. А. Баркова. – СЗУЦ, СПб.: СПбГМТУ, 2004. – 156 с.
 13. Баркова, Н. А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Расчет основных частот вибрации узлов машин, параметров измерительной аппаратуры и практическая экспертиза [Текст] / Н. А. Баркова, А. А. Борисов. – СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2009. – 111 с.