

УДК 534.647

В.С. Єременко, П.А. Шегедін

Національний авіаційний університет, Київ

СИСТЕМА ОБРОБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ ДИНАМІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ РУХОМОГО СКЛАДУ

Запропоновано і досліджено використання алгоритмів виявлення розладки інформаційного сигналу датчиків віброприскорень при динамічних випробуваннях рухомого складу. Розроблено програмне забезпечення, що реалізує визначення стрибкоподібної зміни властивостей сигналів алгоритмами кумулятивних сум, Ш'юхарта та критерій перевірки однорідності Лемона-Розенבלата. Наведено приклад використання розробленої системи для обробки результатів приймальних випробувань рухомого складу.

Ключові слова: система вібродіагностики, рухомий склад, інформаційний сигнал, розладання, алгоритм кумулятивних сум, алгоритм Ш'юхарта, критерій Лемона-Розенבלата.

Вступ

Постановка проблеми. Процес забезпечення надійності роботи технічного обладнання залізничного транспорту багато в чому опирається на результати діагностичних випробувань з використанням інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) та спеціалізованого програмного забезпечення для обробки даних. Достовірність отриманої інформації в рівній мірі залежить від характеристик засобів вимірювальної техніки та методів подальшої обробки вимірювальної інформації [1]. Зазвичай ІВС діагностики являють собою комплекс, функціонально об'єднаних в логічні структури, засобів, які не лише призначені для збору інформації, контролю та діагностики, а і є потужною базою по обробці інформації, її зберіганню та прийняттю рішень. При розробці ІВС діагностики використовуються статистичні та обчислювальні методи, які дозволяють з необхідною точністю обробляти на ЕОМ експериментальні дані, а також математичні моделі, які з фізичної точки зору з достатньою достовірністю описують фізичні процеси.

В основу існуючих ІВС діагностики рухомого складу та методології обробки даних динамічних випробувань покладене припущення про стаціонарність досліджуваних процесів. А це в свою чергу вимагає, щоб при аналізі результатів вимірювань використовувалися моделі стаціонарних та ергодичних вхідних інформаційних сигналів. Однак на практиці інформаційні сигнали з фізичної точки зору, зазвичай, не можна безпосередньо описати стаціонарними моделями. Тому, необхідно вирішувати задачу пошуку таких шляхів попередньої обробки інформаційних сигналів, які б дозволяли виділяти інтервали на яких сигнали можна розглядати як умовно стаціонарні. Для цього використовуються методи пошуку вкладених стаціонарних процесів та методи стаціонаризації спеціальних класів процесів.

Мета та задачі дослідження. Основною метою проведеного дослідження є підвищення точності обробки експериментальних даних ходових динамічних випробувань тягово-рухомого складу (ТРС) шляхом застосування первинної обробки даних. Дана обробка базується на використанні алгоритмів виявлення аномальної (стрибкоподібної) зміни властивостей процесу в вибраних для аналізу часових реалізаціях. Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити ряд задач, а саме:

- проаналізувати властивості інформаційних сигналів, отриманих в ході експериментальних випробувань ТРС;
- провести вибір та дослідження алгоритмів пошуку розладки;
- розробити програмне забезпечення, що реалізує вибрані алгоритми для автоматизації первинної обробки інформації;
- провести аналіз та порівняння результатів роботи даних алгоритмів та визначити параметри інформаційних сигналів до та після даної первинної обробки.

Опис розробленої системи первинної обробки експериментальних даних динамічних випробувань

Важливими критеріями вибору і налаштування алгоритмів пошуку розладки є:

1. Мала кількість помилкових тривог - «хороший» детектор розладки повинен бути нечутливий до шумів і випадкових короткочасних викидів, іншими словами, необхідно забезпечити великий середній час між помилковими спрацьовуваннями;
2. Мале запізнювання при виявленні - на практиці дуже важливо, щоб сигнал тривоги виникав без затримки, хоча б для того, щоб втратити якомога менше спостережень для оцінювання параметрів після стрибкоподібної зміни параметрів;

При цьому необхідно вирішити протиріччя між вимогою наявності малого числа помилкових

тривог і малого запізнення у виявленні: здатність швидко виявляти зміни підвищує імовірність появи помилкового виявлення моментів розладки.

Для вирішення задачі виявлення неоднорідності у вихідних сигналах датчиків прискорення при проведенні ходових динамічних випробувань ТРС були проведені дослідження алгоритмів Лемана-Розенבלата, Ш'юхарта [2], кумулятивних сум, який являє собою модифікацію алгоритму Пейджа [3].

Алгоритм кумулятивних сум описується наступним рівнянням:

$$G(n) = \begin{cases} \max\{0, G(n-1) + z(n) - \mu_1 - v/2\}, \\ \mu_1 < \mu_2 \\ \max\{0, G(n-1) + z(n) - \mu_1 + v/2\}, \\ \mu_1 > \mu_2, \end{cases}$$

$$G(0) = 0.$$

Алгоритм Ш'юхарта (рекурентний вигляд):

$$G(n) = \begin{cases} 0, & n < M; \\ \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M z(i), & n = M; \\ G(n-1) + (z(n) - z(n-M))/M, & n > M, \end{cases}$$

де μ_1 – математичне сподівання вхідного сигналу z до появи розладки,

$v > 0$ – поріг чутливості.

M – глибина пам'яті алгоритму.

Рішення про наявність чи відсутність розладки в кожний момент часу приймається на основі результатів порівняння:

$G < h \Rightarrow$ розладка відбулася,

$G \geq h \Rightarrow$ розладка відсутня,

де $h > 0$ – поріг спрацювання алгоритму пошуку розладки.

В ході аналітичного налаштування алгоритмів здійснюється оцінка середнього часу запізнення виявлення розладки $\bar{\tau}$ і розраховується імовірність хибного спрацювання алгоритмів P_{xc} :

$$P_{xc} = \frac{(\mu' - \mu)^2 \left(1 - \sum_{i=1}^p a_i\right)^2}{2\beta} (e^h - h - 1),$$

$$\bar{\tau} = \frac{2\beta}{(\mu' - \mu)^2 \left(1 - \sum_{i=1}^p a_i\right)^2} (e^{-h} + h - 1),$$

де a_i – коефіцієнти авторегресії,

p – порядок авторегресії,

μ – математичне сподівання процесу авторегресії до розладки,

μ' – математичне сподівання процесу авторегресії після розладки,

β – дисперсія процесу авторегресії,

h – поріг спрацювання алгоритму.

Серед наявних непараметричних критеріїв перевірки однорідності найбільш зручним для практичного використання є критерій Лемана-Розенבלата [4], який не вимагає оцінювання функції щільності розподілу імовірностей або наявності апріорної інформації щодо неї. Процедура застосування критерію Лемана-Розенבלата наступна. Нехай наявні два варіаційні ряди η_i та η_j побудовані за вибірками x_i та y_j . Перевіряється гіпотеза H_0 : $f(x) = g(y)$, за альтернативної гіпотези H_1 : $f(x) \neq g(y)$. Для перевірки справедливості гіпотези H_0 розраховується T – статистика:

$$T = \frac{1}{1 \cdot n(1+n)} \left(n \sum_{i=1}^n (r_i - i)^2 + 1 \sum_{j=1}^1 (s_j - j)^2 \right) - \frac{4l \cdot n - 1}{6(1+n)},$$

де r_i, s_j – порядкові номери відповідно η_i та η_j в загальному варіаційному ряді, побудованому за об'єднаною вибіркою з x_i та y_j ;

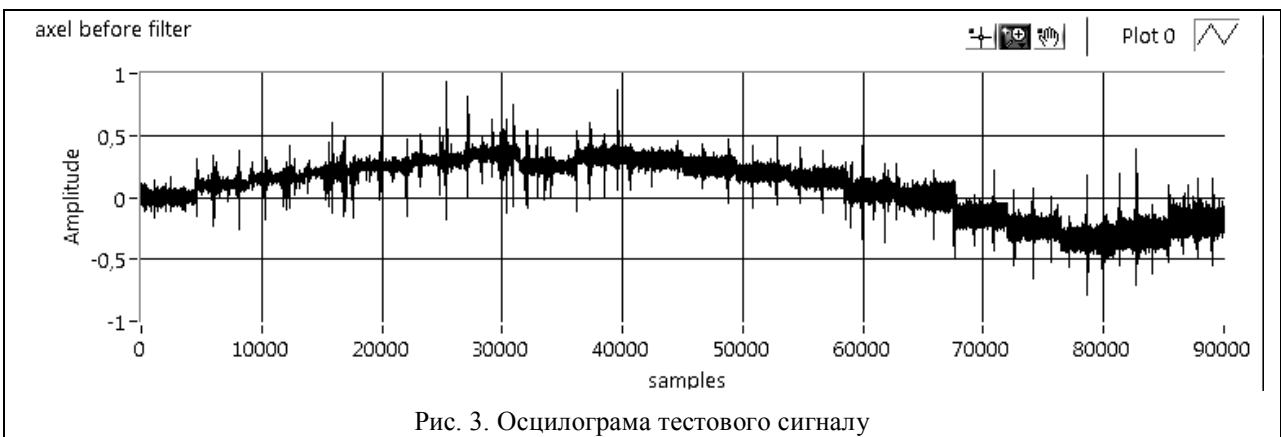
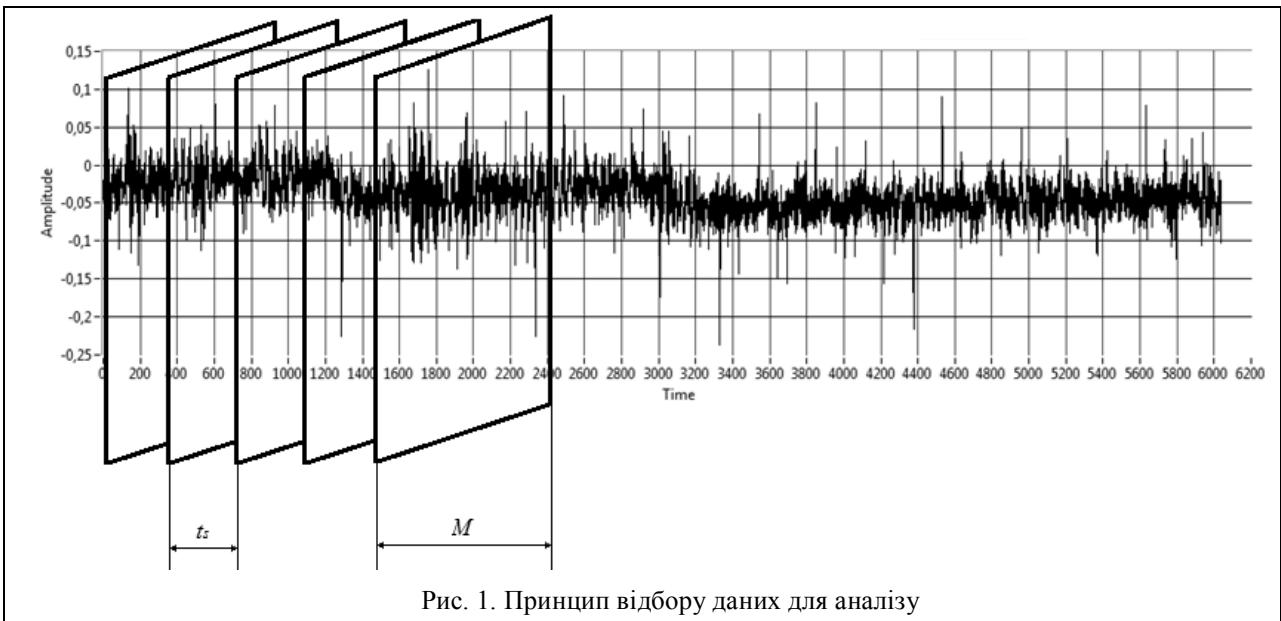
n, l – об'єми вибірок відповідно x_i та y_j .

Якщо в результаті розрахунків отримане значення $T \leq T_{гр}$, де $T_{гр}$ граничне значення розподілу статистики при заданому рівні довіри α , то приймають гіпотезу H_0 , в протилежному випадку приймається гіпотеза H_1 .

Для аналізу відбираються дані по методу переміщення часового вікна заданої тривалості з певним кроком. Дані параметри можна налаштувати в залежності від вимог чутливості та швидкодії алгоритмів. Принцип відбору даних для аналізу представлено на рис. 1.

Авторами розроблено спеціальне програмне забезпечення в середовищі графічного програмування LabVIEW, що реалізує програмну фільтрацію і зазначені алгоритми виявлення розладки, а також розрахунок статистичних параметрів і перевірки однорідності вибірок по математичному сподіванню [5]. Функціональна схема розробленого програмного забезпечення представлена на рис. 2.

Налаштування та відладка алгоритмів пошуку моментів розладки здійснювалися на програмно синтезованому тестовому сигналі з наближеним спектральним складом до реальних сигналів з заданими моментами розладки. Сигнал згенеровано таким чином, що присутні 20 моментів стрибкоподібної зміни математичного сподівання інформаційного сигналу з наростаючим кроком, в позитивному та негативному напрямках та різною потужністю високочастотних завад. На рис. 3 наведена осцилограма тестового сигналу.



Здійснивши обробку даного сигналу описаними алгоритмами отримано результати, які представлені на рис. 4 – результат обробки тестового сигналу алгоритмом кумулятивних сум, рис. 5 – результат обробки алгоритмом Ш'юхарта. На цих рисунках однорідні зони інформаційного сигналу виділені вертикальними штриховими лініями.

На основі проведеного аналізу результатів обробки тестового сигналу визначено мінімальний поріг спрацювання алгоритмів та рівень високочастотних завад, що призводять до хибного спрацювання алгоритмів пошуку розладки. На рис. 6 наведено результат пошуку розладки даних за допомогою критерію Лемана-Розенблата.

Отримані результати свідчать, що детектори розладки коректно виділяють підвибірки даних, що характеризуються однорідністю значень в середині кожної підвибірки, але не однорідні між сусідніми групами.

Алгоритмами кумулятивних сум та Ш'юхарта було виділено 19 моментів розладки з 20 заданих при генерації сигналу. Перевірка даних критерієм Лемана-Розенблата виділила 18 моментів появи неоднорідності даних, що підлягали аналізу. З них один момент, спричинений високочастотними завадами. Однак при аналізі даних алгоритмами пошуку розладки хибного спрацювання не відбулося в даному проміжку.

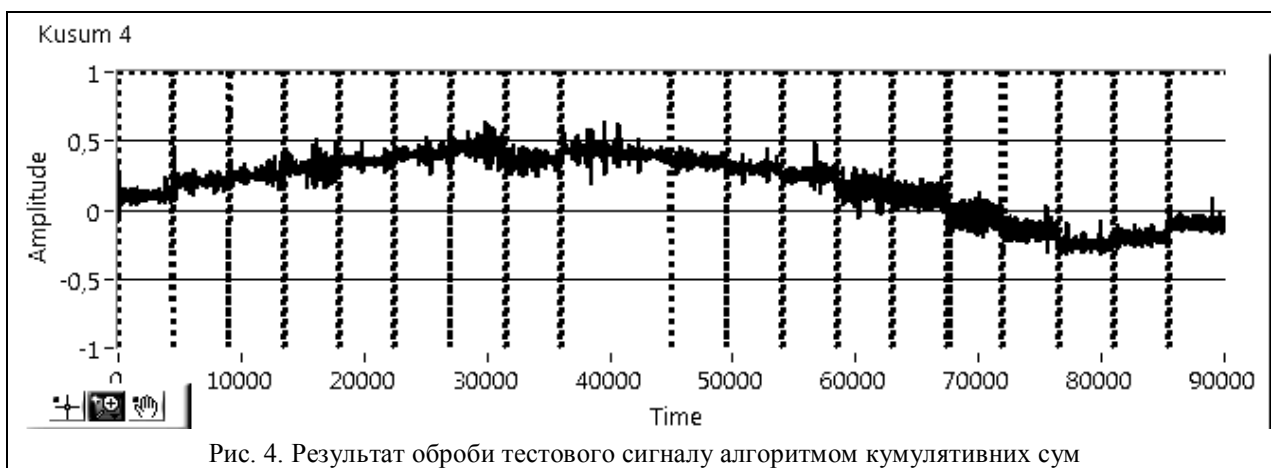


Рис. 4. Результат обробки тестового сигналу алгоритмом кумулятивних сум

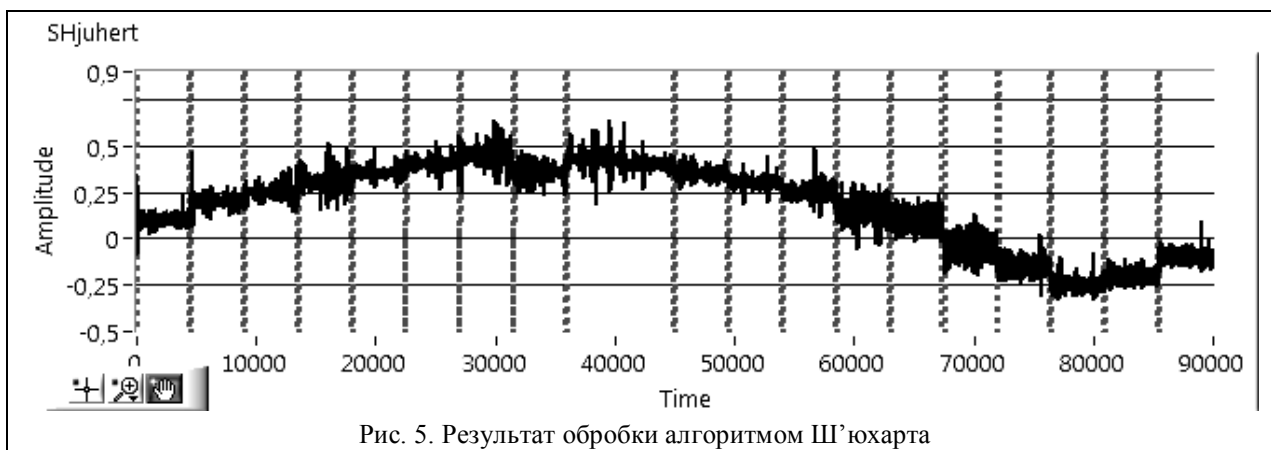


Рис. 5. Результат обробки алгоритмом Ш'юхарта

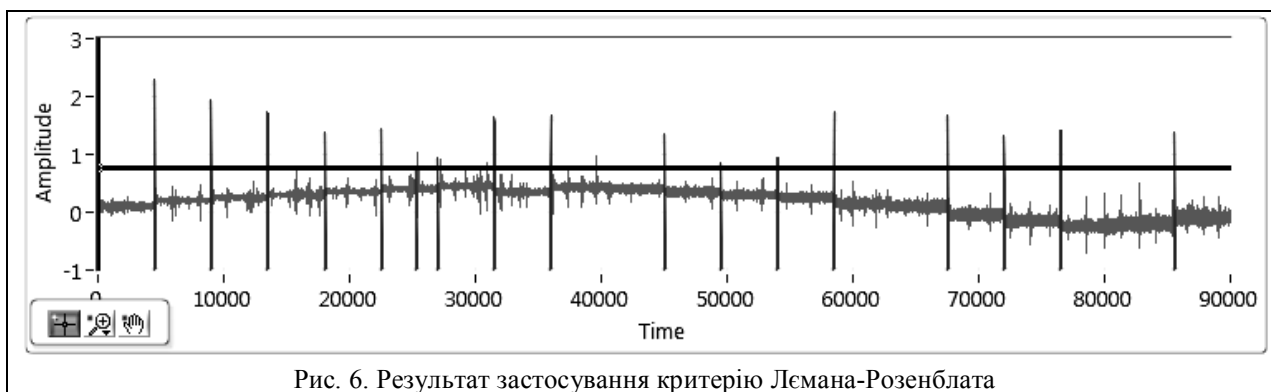


Рис. 6. Результат застосування критерію Лемана-Розенблата

Результати застосування системи при обробці даних динамічних випробувань представлені на рис. 7 – вихідний сигнал датчика віброприскорення, який встановлено на кузові швидкісного потягу, 8 – результат обробки інформаційного сигналу алгоритмом кумулятивних сум, 9 – результат обробки сигналу алгоритмом Ш'юхарта, 10– результат обробки сигналу алгоритмом Лемана-Розенблата. Інформаційний сигнал, представлений на рис. 7, а, записаний на прямій ділянці шляху довжиною 417 м при середній швидкості руху 99.6 км/год ± 5 км/год. Сигнал представлений на рис. 7, б отриманий при випробування того ж самого об'єкта на ділянці шляху довжиною 627 м при середній швидкості руху 149 км/год.

Як видно з наведених рисунків, в сигналі «а», записаного на прямій ділянці руху і при постійній швидкості, присутні три відрізка, що відповідають умові стаціонарності. Тому використовувати для проведення подальших розрахунків статистичних параметрів сигнал з усієї ділянки не є коректним через його нестаціонарність, адже присутні два моменти появи розладки. Сигнал представлений на рис. 7-б відповідає вимогам стаціонарності і може бути використаним для розрахунку статистичних характеристик і динамічних показників роботи вузлів рухомого складу. Таким чином, на основі результату виявлення розладки можна здійснювати відбір секцій для аналізу, які будуть мати характеристики властиві стаціонарним процесам.

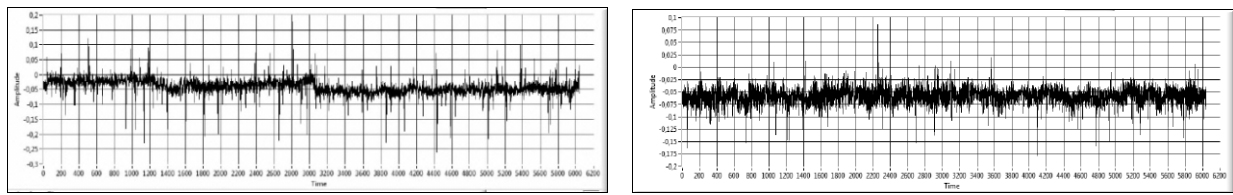


Рис. 7. Вихідні сигнали «а» та «б» датчика віброприскорення

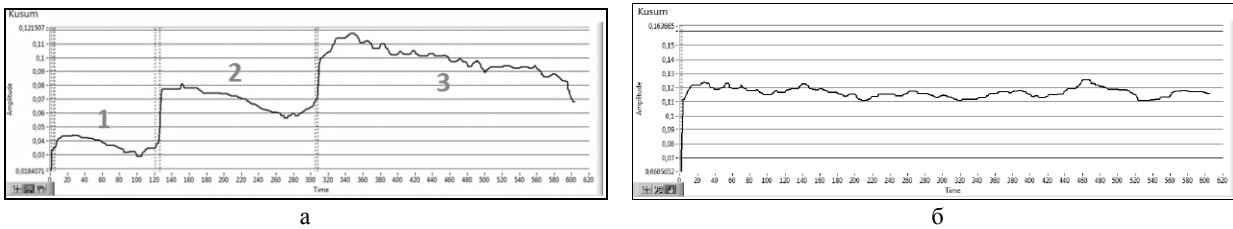


Рис. 8. Результати аналізу сигналів «а» та «б» алгоритмом кумулятивних сум

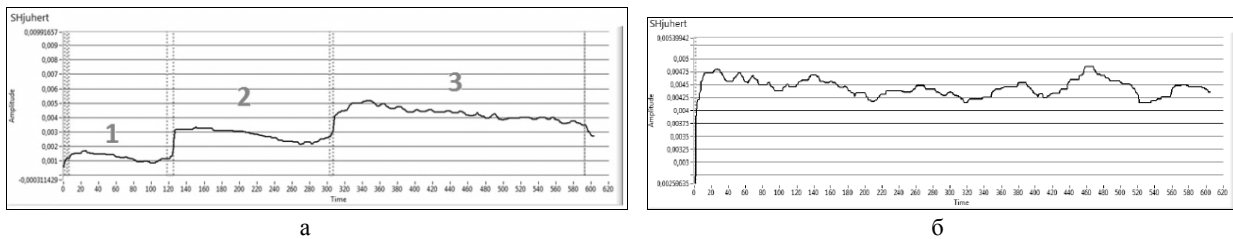


Рис. 9. Результати аналізу сигналів «а» та «б» алгоритмом Ш'юхарта

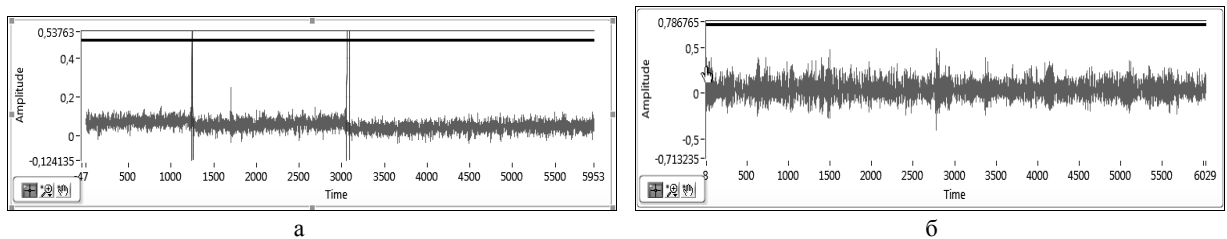


Рис. 10. Результати перевірки однорідності сигналів «а» та «б» критерієм Лемана-Розенблата

Для аналізу ступеня однорідності вибірок, отриманих в результаті роботи описаних алгоритмів здійснено перевірка однорідності по математичному сподіванню за критерієм Ст'юдента [6] (табл. 1). Наведені статистичні характеристики та результат перевірки однорідності за критерієм Ст'юдента вибірок сформованих детектором розладки з сигналу рис. 7, а та вибірок аналогічної

тривалості сформованих з сигналу рис. 7, б. Розроблене авторами програмне забезпечення обробки даних вібродіагностики тягово-рухомого складу дозволяє здійснювати аналіз даних випробувань ТРС на наявність розладки у вихідному сигналі, дозволяє відібрати для розрахунку діагностичних параметрів ТРС тільки реалізації, що відповідають вимогам стаціонарності процесу.

Статистичні характеристики та результати перевірки однорідності вибірок

Сигнал рис. 7-а			Сигнал рис. 7-б		
Статистичні характеристики					
Вибірка	Матем. сподівання	С.К.В.	Вибірка	Матем. сподівання	С.К.В.
Вибірка 1	-0,0216	0,0188	Вибірка 1	-0,0573	0,0141
Вибірка 2	-0,0361	0,0190	Вибірка 2	-0,0578	0,0164
Вибірка 3	-0,0516	0,0178	Вибірка 3	-0,5580	0,0167
Перевірка однорідності за критерієм Ст'юдента $t_{0,05}=1,96$					
Аналізуємі вибірки	t_{emp}	Результат	Аналізуємі вибірки	t_{emp}	Результат
Вибірки 1- 2	20,12	Неоднорідні	Вибірки 1- 2	0,80	Однорідні
Вибірки 2- 3	27,81	Неоднорідні	Вибірки 2- 3	1,21	Однорідні
Вибірки 1- 3	48,21	Неоднорідні	Вибірки 1- 3	1,81	Однорідні

Висновки

Реалізовано два алгоритми виявлення розладки в інформаційному сигналі, а саме алгоритм Ш'юхарта та кумулятивних сум. Розроблено програмне забезпечення, що дозволяє здійснювати обробку даних алгоритмами пошуку розладки, перевірки однорідності даних критеріями Лемона-Розенבלата та Ст'юдента. Обробка даних із секцій з локальною стаціонарністю забезпечує точність і однозначність результату вібродіагностики залізничного транспорту. Перевагою розробленої системи є гнучкість її архітектури і можливість простого додавання функціональних модулів, що реалізують додаткові алгоритми обробки сигналів та розрахунку статистичних параметрів сигналів. Апробація системи була проведена при обробці даних, отриманих при динамічних приймальних випробуваннях швидкісного поїзда на прямій ділянці шляху довжиною більше 40 км. Швидкість руху об'єкта діагностики досягала 170 км/год. Записані на електронні носії сигнали були розділені на реалізації згідно UIC 518 [7]. Після перевірки на наявність розладки кожної реалізації було відзначено, що в ряді випадків має місце нестационарність процесу, зумовлена змінами режимів руху об'єкта і якістю рейкового полотна. Таким чином, було сформульовано рекомендації щодо поліпшення процедури відбору реалізацій для розрахунку динамічних показників роботи рухомого складу.

Список літератури

1. EN 14363:2005 Railway applications - testing for the acceptance of running characteristics of railway vehicles - testing of running behavior and stationary tests/. – С.113.
2. Жиглявский А.А. Обнаружение разладки случайных процессов в задачах радиотехники / А.А. Жиглявский, А.Е. Красковский // Ленинград 1998. Издательство Ленинградского Университета. – С. 221.
3. Никифоров И.В. Применение кумулятивных сумм для обнаружения изменения характеристик случайного процесса / И.В. Никифоров // Автоматика и телемеханика. – 1979. – №2. – С. 48-58.
4. Дарховский Б.С., Бродский Б.Е. Непараметрический метод скорейшего обнаружения изменения среднего случайной последовательности // Теория вероятностей и ее применения. – 1987. – Т.32, №4. – С. 899-905.
5. Єременко В.С. Система вібродіагностики залізничного транспорту / В.С. Єременко, П.А. Шегедин, Ж.А. Павленко // 13 МНТК "Приладобудування: стан і перспективи" 23 - 24 квітня 2014 р. м. Київ, (КП) Україна. – С. 199-200.
6. Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
7. ДСТУ UIC 518:2009 Рейковий рухомий склад. Ходові та приймальні випробування щодо динамічних характеристик. Вимоги щодо безпеки, впливу на колію та ходових характеристик. UIC 518:1995, IDT. – С. 120.

Надійшла до редколегії 03.04.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.П. Захаров, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

В.С. Єременко, П.А. Шегедин

Предложено и исследовано использование алгоритмов обнаружения разладки информационного сигнала датчиков виброускорений при динамических испытаниях подвижного состава. Разработано программное обеспечение, реализующее определение скачкообразного изменения свойств сигналов алгоритмами кумулятивных сумм и Шухарта. Приведено пример использования разработанной системы для обработки результатов приемочных испытаний подвижного состава.

Ключевые слова: система вибродиагностики, подвижной состав, информационный сигнал, разладка, алгоритм кумулятивных сумм, алгоритм Шухарта, критерий Лемона-Розенבלата.

THE SYSTEM OF EXPERIMENTAL DATA PROCESSING OF ROLLING STOCK DYNAMIC TESTS

V.S. Yeremenko, P.A. Shegedin

It was proposed and investigated the usage of imbalance detection algorithms of information signal of vibroaccelerations sensors during dynamic tests of the rolling stock. This article describes software that implements the definition of spasmodic changes of signal properties by CUSUM procedure, Shyuhart's algorithm and Lemon-Rozenblat criteria. Results of practical usage of the developed system for processing results of running approval test of rolling stock were represented.

Keywords: vibrodiagnostics system, rolling stock, information signal, abrupt change, cumulative sum algorithm, Shyuhart's algorithm, Lemon-Rozenblat criteria.