

УДК 531.16:629.4.067

## АНАЛІЗ ТА ВИБІР АЛГОРИТМУ РОЗПІЗНАВАННЯ СХОДУ ВАГОНІВ ШВИДКІСНОГО РУХУ

Магістранти Т. В. Войнаровська, Н. С. Деордієва, С. С. Сауляк, В. І. Леонов

## АНАЛИЗ И ВЫБОР АЛГОРИТМА РАСПОЗНАВАНИЯ СХОДА ВАГОНОВ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ

Магистранты Т. В. Войнаровская, Н. С. Деордиева, С. С. Сауляк, В. И. Леонов

## ANALYSIS AND SELECTION FOR THE ALGORITHM IDENTIFICATION OF THE DERAILMENT OF HIGH-SPEED CARRIAGES

Masters T. V. Vojnarovs`ka, N. S. Dyeordiyeva, S. S. Saulyak, V. I. Leonov

*У статті запропоновано алгоритм розпізнавання сходу вагонів швидкісного руху, зроблено вибір найбільш раціонального коду, що відповідає кожному стану об'єкта, запропоновано основні ознаки сходу пасажирського вагона швидкісного руху, алгоритми логічної обробки сформованих ознак, які забезпечують оптимальне рішення задачі виявлення сходу вагона, Для порівняльної оцінки якості ознак розпізнавання встановлено критерії якості і вибране оптимальне рівняння функції, що розділяє.*

**Ключові слова:** високошвидкісний пасажирський поїзд, сход з рейок, класифікатор, алгоритм розпізнавання, ознака розпізнавання.

*В статтє предложен алгоритм распознавания схода вагонов скоростного движения, сделан выбор наиболее рационального кода, соответствующего каждому состоянию объекта, предложены основные признаки схода пассажирского вагона скоростного движения, алгоритмы логической обработки сформированных признаков, обеспечивающих оптимальное решение задачи обнаружения схода вагона. Для сравнительной оценки качества признаков распознавания установлены критерии качества и выбрано оптимальное уравнение разделяющей функции.*

**Ключевые слова:** высокоскоростной пассажирский поезд, сход с рельс, классификатор, алгоритм распознавания, признак распознавания.

*The purpose of this work is to develop algorithms for recognizing the gathering of high-speed carriages.*

*For this, the problem of choosing the most rational code corresponding to each state of the object was solved, the optimal equation of the separating function was chosen.*

*For this, the problem of choosing the most rational code corresponding to each state of the object was solved, the optimal equation of the separating function was chosen.*

*In general, the detection of a derailment of a railcar consists of the following operations: the conversion of monitored parameters into digital form for further processing by means of computer equipment; formation of signs (code) of the state of the object; classification of the state of the object in accordance with certain requirements.*

*To solve these problems, it is necessary to study the design features of the running gears and the superstructure, their working conditions, signs (parameters) characterizing the descent of the car, the behavior of these parameters in different modes of train movement. Also, the parameters of*

*the recognition system hardware (sensor characteristics, microcontroller capabilities, power supplies for electronic circuits) must be taken into account.*

*The main controlled parameters in this process are the amplitude and frequency of oscillation of the wheelset. Here, the system is required to separate the values of these parameters to identify a descent - these are road irregularities, wheel defects.*

*For a comparative assessment of the quality of recognition features, it was proposed to establish quality criteria. Here a criterion is used, based on a comparison of the statistical characteristics of the signs.*

*The classification of the state of an object is as follows: the likelihood ratio is calculated when the feature vector is measured and a hypothesis is then accepted or rejected depending on whether the point found is located above or below the separating function.*

*The decision making algorithm in favor of one of the classes of states of recognition objects is recommended to use the decision method with a constant sample size. The separation function equation is derived from the Bayesian criterion, which minimizes the average risk of making a wrong decision.*

**Keywords:** *high speed passenger train, derailment, classifier, diagnostic sign, algorithm identification.*

**Вступ.** Проблема сходу пасажирських вагонів швидкісних поїздів через різноманітні причини, незважаючи на сучасні засоби контролю, залишається актуальною для України, а також усіх країн, що мають швидкісне залізничне сполучення.

Так, 18 грудня 2017 року поїзд компанії Amtrak, що зійшов з рейок у штаті Вашингтон, упав з моста на шосе.

28 квітня 2015 року швидкісний поїзд Hyundai, що прямував за маршрутом Харків-Київ зійшов з рейок на станції Люботин.

Але найбільша залізнична катастрофа в історії високошвидкісних поїздів сталася 3 червня 1998 року на лінії Ганновер–Гамбург. Тоді у поїзда ICE, що рухався зі швидкістю 200 км/год, зійшов з рейок один з вагонів, проїхавши, таким чином, 10 км, поїзд врізався в опору моста та обрушив міст на себе. Слід зазначити, що пристрої безпеки цього поїзда та наземні системи контролю не змогли запобігти катастрофі.

На жаль, на сьогодні відсутні надійні системи розпізнавання сходів, тому проблема виявлення і розпізнавання сходів вагонів швидкісного руху залишається актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Усі основні роботи, що присвячені сходу вагонів аналізують, як правило, причини інцидентів. Найбільш повні сучасні дослідження сходів вагонів у результаті дефектів колії або дефектів ходових частин подані в роботах [1–3]. Також увагу дослідників спрямовано на моделювання динаміки вагонів у різних умовах. Розробленню математичних моделей динаміки вагона при взаємодії з рейковою колією присвячена робота [4].

У цей час, завдяки розвитку спеціалізованих програмних комплексів, розроблено значну кількість комп'ютерних моделей руху вагонів та імітації їх сходу [5–8].

Дослідження кінематики колісної пари після сходу та при її рухові по шпалах наведено в роботі [9].

У роботах [10, 11] запропоновані теоретичні розробки систем виявлення та реєстрації сходу рухомого складу.

Аналіз публікацій, присвячених сходу вагонів, показав, що основну увагу дослідники приділяли або механізму сходу, або його недопущенню. Методиці та алгоритмам виявлення сходу пасажирських вагонів швидкісного руху практично не приділяється увага, тому ця проблема

повинна вирішуватися системно, з обов'язковим розглядом усіх аспектів.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою цієї роботи є розроблення алгоритмів розпізнавання сходу вагонів швидкісного руху.

Для цього потрібно вирішити завдання вибору найбільш раціонального коду, відповідного кожному стану об'єкта. Також скласти алфавіт ознак сходу вагона. Для порівняльної оцінки якості ознак розпізнавання встановити критерії якості і вибрати оптимальне рівняння функції, що розділяє.

**Основна частина дослідження.** У загальному вигляді виявлення сходу може складатися з таких операцій: перетворення контрольованих параметрів у цифрову форму для подальшої обробки; формування ознак (коду) стану об'єкта; класифікація станів об'єкта відповідно до певних вимог.

Для вирішення цих завдань необхідно вивчити конструктивні особливості ходових частин та верхньої будови колії, умови їх роботи, ознаки (параметри), що характеризують схід вагона, поведінка цих параметрів при різних режимах руху поїзда. Так само тут обов'язково повинні враховуватися параметри апаратної

частини системи, що розпізнає (характеристики датчиків, можливості мікроконтролерів, джерел живлення електронних схем).

Від вибору цих параметрів будуть прямо залежати якісні показники системи виявлення сходу.

Основними контрольованими параметрами, як показують дослідження [3], є амплітуда і частота коливання колісної пари. Тут від системи потрібно розділяти величини цих параметрів для визначення сходу, нерівності колії, при дефектах коліс.

При цьому необхідно побудувати систему розпізнавання так, щоб при вибраних параметрах вона забезпечувала мінімальну ймовірність помилкового розпізнавання, так як та чи інша помилка буде призводити, з одного боку, до не виправданих ризиків, а з другого – до необґрунтованих зупинок.

Це можливо при високій кореляції вимірюваних динамічних параметрів руху об'єкта. Для цього потрібно встановити ступінь такої кореляції, тобто за результатами  $V$  вимірювань визначити коефіцієнт кореляції  $r_{ab}$  розглянутих величин  $a$  і  $b$  [12]:

$$r_{ab} = \frac{\frac{1}{V} \sum_{i=1}^V (a_i - m_a)(b_i - m_b)}{\sqrt{\frac{1}{V} \sum_{i=1}^V (a_i - m_a)^2 \frac{1}{V} \sum_{i=1}^V (b_i - m_b)^2}}, \quad (1)$$

де  $m_a$  і  $m_b$  – середні значення розглянутих величин.

Завдання формування ознак зводиться до вибору найбільш раціонального коду, відповідного кожному стану об'єкта. При цьому необхідно прагнути, щоб вибрані ознаки мали найменші дисперсії при максимально можливому розходженні середніх значень ознак станів різних класів (відстані між гіпотезами). Якщо ознаки розпізнавання корельовано, головні з них

можуть бути визначені шляхом переходу до нових випадкових змінних (за допомогою лінійних перетворень), при яких кореляція ознак зникає.

Для достовірного виявлення сходу вирішального значення набуває не тільки вибір ознак, а й їх логічне ранжування (упорядкування). Мета упорядкування ознак полягає в тому, щоб на кожному попередньому етапі процесу класифікації використовувалася більш інформативна ознака, ніж на наступному. При цьому

більш інформативною вважається та ознака, яка приводить до меншого відсотка помилок розпізнавання [12].

Складання алфавіту ознак є виключно важливим етапом при побудові алгоритму автоматичного контролю сходу вагона.

Для порівняльної оцінки якості ознак розпізнавання сходу необхідно встановити критерії якості. Залежно від способу опису ознак розпізнавання можливі різні критерії оцінки їх якості. У цьому завданні найбільш зручним є критерій, оснований на порівнянні статистичних характеристик ознак [13]. Як критерій порівняльної оцінки ознак у цьому випадку доцільно використовувати величину

$$K_j = \frac{m_1 [M_{2ji}]}{M_{2ji}} ; \quad (2)$$

де  $m_1 [M_{2ji}]$  – математичне очікування дисперсії  $j$ -ї ознаки за класами;

$M_{2ji}$  – дисперсія математичного очікування розподілу ознак при переході від класу до класу.

Відповідно до визначення

$$m_1 [M_{2ji}] = \sum_{i=1}^m M_{2ji} \rho(\Omega_i), \quad (3)$$

де  $m$  – кількість класів розпізнавання;

$\rho(\Omega_i)$  – апіорна ймовірність появи стану, що належить до класу  $\Omega_i$ .

Дисперсія математичного очікування розподілів ознак при переході від класу до класу

$$\overline{M_{2ji}} = m_1 \{ [m_{ji} - m_1(m_{ji})]^2 \}, \quad (4)$$

де  $m_{ji}$  – математичне очікування  $j$ -ї ознаки  $i$ -го класу стану;

$m_1(m_{ji})$  – математичні очікування математичних очікувань значень  $j$ -ї ознаки, що належать різним класам.

Найкращим слід вважати ту з ознак, яка мінімізує відношення (1):

$$\min K_j = \frac{m_1 [M_{2ji}]}{M_{2ji}}. \quad (5)$$

Якщо  $K_l < K_s$ , то якість ознаки  $X_l$  вища від якості ознаки  $X_s$ . Тобто, кращою з двох вважається ознака розпізнавання, у якої більша «відстань» між математичними очікуваннями значень ознаки, що належать різним класам, і менша дисперсія цих ознак.

Наступний етап побудови алгоритму полягає в аналітичному описі класів станів мовою обраних ознак. У межах цього етапу необхідно виділити в просторі ознак області  $D_i, i = 1, 2, \dots, m$ , відповідні класам  $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_m$  стану об'єктів розпізнавання, знайти апіорні ймовірності  $\rho(\Omega_i)$  належності стану об'єкта до класу  $\Omega_i$ , функції щільності ймовірності  $W_n(X_1, X_2, \dots, X_n)$  значень ознак розпізнавання  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , що належать класу  $\Omega_i$ .

Якщо сукупність  $n$  ознак розпізнавання подати у вигляді  $n$ -вимірного вектора  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  простору ознак, то при правильному аналітичному описі класів об'єктів розпізнавання межа (функція, що розділяє) між областями  $D_i$ , що відповідають класам  $\Omega_i$ , буде виражатися таким рівнянням:

$$F_q(X) - F_g(X) = 0. \quad (6)$$

Далі складаються такі алгоритми логічної обробки сформованих ознак, які забезпечили б оптимальний (відповідно до обраного критерію оптимальності) розв'язок задачі виявлення сходу вагона, тобто критерій якості розпізнавання сходу повинен досягати екстремального значення.

Алгоритм прийняття рішення на користь одного з класів станів об'єктів

розпізнавання рекомендується використувати для вирішення з постійним розміром вибірки.

У цьому випадку є  $n$  ознак ( $n = \text{const}$ )  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , які належать одному з класів станів  $\Omega_i$ . Позначимо через  $H_i$  і  $H_j$  – гіпотези того, що вибіркові значення

належать апріорно відомим розподілам  $W_n(X_1, X_2, \dots, X_n / \Omega_i)$  та  $W_n(X_1, X_2, \dots, X_n / \Omega_j)$ , а через  $\gamma_i$  і  $\gamma_j$  – рішення, що полягають у прийнятті відповідних гіпотез. Встановлення правила рішення зводиться до поділу  $n$ -вимірного простору ознак  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$  на дві області  $A_i$  і  $A_j$ , що не перетинаються, тобто

$$(X_1, X_2, \dots, X_n) \in A_i \rightarrow \gamma_i; (X_1, X_2, \dots, X_n) \in A_j \rightarrow \gamma_j. \quad (7)$$

Оскільки при класифікації необхідно за допомогою функції, що розділяє, розмежувати області, що перетинаються, на просторі ознак в області класів станів неминучі помилки класифікації.

Розрізняють помилки двох родів: імовірність «помилкової тривоги» (помилка першого роду), тобто ймовірність прийняття рішення про схід вагона в той час, як його стан нормальний:

$$P_{pm} = P\{\gamma_j / H_i\} = P\{(X_1, X_2, \dots, X_n) \in A_j / \Omega_i\} = \int_{A_j} \dots \int W_n(X_1, X_2, \dots, X_n / \Omega_i) dX_1 dX_2, \dots, dX_n, \quad (8)$$

і ймовірність «пропуску» сходу (помилка другого роду), тобто віднесення вибірки до

класу  $\Omega_i$ , хоча вона відображає  $\Omega_j$ -й клас стану:

$$P_{np} = P\{\gamma_j / H_j\} = P\{(X_1, X_2, \dots, X_n) \in A_i / \Omega_j\} = \int_{A_i} \dots \int W_n(X_1, X_2, \dots, X_n / \Omega_j) dX_1 dX_2, \dots, dX_n. \quad (9)$$

Очевидно, що при заданому (постійному) розмірі вибірки неможливо одночасно зробити як завгодно малими ймовірності «помилкової тривоги» і «пропуску». Можна лише змінювати їх співвідношення, переміщаючи функцію, що

розподіляє. Оптимальне рівняння функції, що розділяє, може бути отримано на основі критерію Байєса, що мінімізує середній ризик прийняття неправильного рішення. При використанні критерію Байєса функція, що розділяє, набуває такого вигляду:

$$D(X_1, X_2, \dots, X_n) = \frac{P(\Omega_j)W_n(X_1, X_2, \dots, X_n / \Omega_j)}{P(\Omega_i)W_n(X_1, X_2, \dots, X_n / \Omega_i)} = \frac{P(\Omega_j)}{P(\Omega_i)} \lambda(X_1, X_2, \dots, X_n) = \frac{C_{ij} - C_{ii}}{C_{ji} - C_{jj}}, \quad (10)$$

де  $P(\Omega_j)$ ,  $P(\Omega_i)$  – апріорні ймовірності відповідних класів станів;

$\lambda(X_1, X_2, \dots, X_n)$  – функція правдоподібності;

$\begin{vmatrix} C_{ii} & C_{ij} \\ C_{ji} & C_{jj} \end{vmatrix}$  – матриця вартостей втрат, у

якій рядки відповідають гіпотезам  $H_i$  і  $H_j$ , а стовпці – рішенням  $\gamma_i$  і  $\gamma_j$ .

Мінімальне значення середнього ризику

$$R = P(\Omega_i)C_{ii} + P(\Omega_j)C_{jj} + P(\Omega_i)(C_{ij} - C_{ii})P_{lm} - P(\Omega_i)(C_{ji} - C_{jj})(1 - P_{np}), \quad (11)$$

де  $P_{lm}, P_{np}$  – імовірності «помилкової тривоги» і «пропуску», що визначені за допомогою функції що розділяє (10).

Тоді класифікація за постійним розміром вибірки зводиться до такого:

- обчислюється відношення правдоподібності при вимірюваному векторі ознак;

- приймається або відкидається гіпотеза  $H_i$  залежно від того, над або під функцією, що розділяє, розташована знайдена точка.

**Висновки.** Таким чином, у цій роботі було запропоновано алгоритм розпізнавання сходу вагонів швидкісного руху, а також був зроблений вибір найбільш раціонального коду, що відповідає кожному стану об'єкта. Також запропоновані основні ознаки сходу пасажирського вагона швидкісного руху. Для порівняльної оцінки якості ознак розпізнавання встановлено критерії якості і вибране оптимальне рівняння розділюючої функції.

### Список використаних джерел

1. Сокол, Э. Н. Механизм железнодорожно-транспортных происшествий при сходе с рельсов подвижного состава [Текст] / Э. Н. Сокол // Матер. доп. наук.-техн. конф. "Фізичні методи та засоби контролю матеріалів та виробів", 17-21 лютого 1997р., м. Славське. – К.; Львів, 1997. – С. 100–102.
2. Сокол, Э. Н. Сходы с рельсов и столкновения подвижного состава (Судебная экспертиза. Элементы теории и практики) [Текст] : монография / Э. Н. Сокол. – 2-е изд., доп. – К. : Транспорт України, 2004. – 368 с.
3. Zeng, J. Study on the wheel/rail interaction and derailment safety / J. Zeng, P. Wu [Text] // Wear. – 2011. – Vol. 9–10, № 265. – P. 1452–1459.
4. Berghuvud, Ansel. Dynamic modelling of freight wagons [Text] / Ansel Berghuvud, Sebastian Stichel, Thomas Nordmark. – Master's Degree Thesis, 2011. – 80 p.
5. Buonsanti, M. Dynamic modelling of freight wagon with modified bogies [Text] / M. Buonsanti, G. Leonardi // European Journal of Scientific Research. – 2012. – Vol. 86, № 2. – P. 274–282.
6. Iwnicki, S. D. Handbook of Railway Vehicle Dynamics [Text] / S. D. Iwnicki. – London : CRC Press, 2006. – 527 p.
7. Mcclanachan, M. An investigation of the effect of bogie and wagon pitch associated with longitudinal train dynamics, The Dynamics of vehicles on roads and tracks, Vehicle Syst. [Text] / M. Mcclanachan, C. Cole, D. Roach, B. Scown. – Dyn. Suppl. (33), 1999. – P. 374–385.
8. Ловська, А. О. Комп'ютерне моделювання динаміки несучої конструкції кузова вагона при перевезенні залізничним поромом [Текст] / А. О. Ловська // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – № 3. – С. 9–14.

9. Петухов, В. М. Кинематическая модель движения колесной пары после схода с рельс [Текст] / В. М. Петухов, Н. А. Аксёнова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: зб. наук. праць. Сер. Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 30 (1252). – С. 92–97.

10. Орлова, А. М. Выбор типов, мест расположения датчиков и критериев для сигнализации о сходе грузового вагона на основе математического и физического моделирования [Текст] / А. М. Орлова, В. С. Лесничий, Н. В. Смирнов // Наука та прогрес транспорту. – Днепропетровск : ДНУЗТ им. академика В. Лазаряна, 2004. – № 5. – С. 162–166.

11. Салтыков, Д. Н. Разработка принципов создания устройств регистрации схода с рельсов нетягового подвижного состава [Текст] / Д. Н. Салтыков, А. Э. Павлюков // Развитие транспортного машиностроения в России: тр. Междунар. конф. Сб. докл. – М. : ВНИИЖТ, 2004. – С. 135-136.

12. Барабаш, Ю. Л. Вопросы статистической теории распознавания [Текст] / Ю. Л. Барабаш. – М. : Советское радио, 1967. – 400 с.

13. Горелик, А. Л. Методы распознавания [Текст] / А. Л. Горелик, В.А. Скрипкин. – М. : Высш. шк., 1977. – 222 с.

---

Войнаровська Тетяна Валеріївна, магістрант, Український державний університет залізничного транспорту.

Тел.: (057) 730-10-35. E-mail: vagon.ukrduzt@gmail.com.

Деордієва Надія Семенівна, магістрант, Український державний університет залізничного транспорту.

Тел.: (057) 730-10-35. E-mail: vagon.ukrduzt@gmail.com.

Сауляк Світлана Семенівна, магістрант, Український державний університет залізничного транспорту.

Тел.: (057) 730-10-35. E-mail: vagon.ukrduzt@gmail.com.

Леонов Володимир Іванович, магістрант, Український державний університет залізничного транспорту.

Тел.: (057) 730-10-35. E-mail: vagon.ukrduzt@gmail.com.

Войнаровская Татьяна Валерьевна, магистрант, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, г. Харьков. Тел.: (057) 730-10-35. E-mail: vagon.ukrduzt@gmail.com.

Деордиева Надежда Семеновна, магистрант, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, г. Харьков. Тел.: (057) 730-10-35. E-mail: vagon.ukrduzt@gmail.com.

Сауляк Светлана Семеновна, магистрант, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, г. Харьков. Тел.: (057) 730-10-35. E-mail: vagon.ukrduzt@gmail.com.

Леонов Владимир Иванович, магистрант, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, г. Харьков. Тел.: (057) 730-10-35. E-mail: vagon.ukrduzt@gmail.com.

Vojnarovs`ka Tetyana Valeriyivna, master, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-35. E-mail: vagon.ukrduzt@gmail.com.

Dyeordiyeva Nadiya Semenivna, master, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-35. E-mail: vagon.ukrduzt@gmail.com.

Saulyak Svitlana Semenivna, master, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-35. E-mail: vagon.ukrduzt@gmail.com.

Leonov Volodymyr Ivanovych, master, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-35. E-mail: vagon.ukrduzt@gmail.com.

Статтю прийнято 13.11.2018 р.