

УДК 620.1.082.13-187+681.264.3.08

О.Ф. Дашченко¹, д-р техн. наук, проф.,

Л.В. Коломієць², д-р техн. наук, проф.,

О.М. Лимаренко¹, канд. техн. наук, доц.

¹ Одеський національний політехнічний університет, пр. Шевченка, 1, 65044 Одеса, Україна; e-mail: aml28@mail.ru

² Одеська державна академія технічного регулювання та якості, вул. Ковальська, 15, 65020 Одеса, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ДИНАМІЧНОЇ МАСИ

О.Ф. Дашченко, Л.В. Коломієць, О.М. Лимаренко. Підвищення точності вимірювань динамічної маси. З прискоренням транспортування вантажів урахування перевезених вантажів набуває великого значення. Вага залишається найнадійнішим показником урахування матеріалів. На відміну від багатьох інших змінних величин, які можна виміряти опосередковано, вагу можна вимірювати безпосередньо і точно. При використанні тензометричних датчиків показання ваги може бути отримано через кілька мілісекунд, що відповідає миттєвому навантаженню, діючому на датчик. Визначення ваги рухомого транспорту можливо тільки за допомогою відповідної обробки сигналу датчика. Мета дослідження полягає в розробці методики для зважування вантажного рухомого складу, що підвищує точність вимірювання динамічної маси, зокрема вантажного вагона, що рухається. Крім методу часового ряду для підвищення точності пропонується використовувати попередню фільтрацію. Наведено результати моделювання.

Ключові слова: динамічна маса, сигнал, залізничний транспорт, вага, точність, функція автоковаріації.

O.F. Dashchenko, L.V. Kolomiets, O.M. Lymarenko. **Improving the accuracy of dynamic mass calculation.** With the acceleration of goods transporting, cargo accounting plays an important role in today's global and complex environment. Weight is the most reliable indicator of the materials control. Unlike many other variables that can be measured indirectly, the weight can be measured directly and accurately. Using strain-gauge transducers, weight value can be obtained within a few milliseconds; such values correspond to the momentary load, which acts on the sensor. Determination of the weight of moving transport is only possible by appropriate processing of the sensor signal. The aim of the research is to develop a methodology for weighing freight rolling stock, which increases the accuracy of the measurement of dynamic mass, in particular wagon that moves. Apart from time-series methods, preliminary filtration for improving the accuracy of calculation is used. The results of the simulation are presented.

Keywords: dynamic mass, signal, rail transport, weight, accuracy, autocovariance function.

Вступ. Точне визначення маси рухомого вантажного транспорту викликає постійний інтерес, і рівень необхідної точності безперервно зростає. При визначенні маси рухомих вантажних вагонів наразі необхідний рівень точності складає близько 0,1 %. Такий рівень точності легко досягається при статичних вимірюваннях, але подібне завдання перетворюється в стохастичну систему, коли вантажний транспорт рухається, внаслідок довільних впливів параметрів транспортного засобу, колії, під'їзних шляхів, силопередаючих ланок, датчика, що застосовується для вимірювання, і характеру самого вантажу.

Цілий ряд помилок, що виникають при вимірюваннях, може бути віднесений тільки до сил вимірювальних елементів, а також умов їх навантаження і абсолютно явно відокремлений від впливу ліній зв'язку і вторинного приладу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження динамічних характеристик залізничних вагонів показали, що при швидкостях 8 км/год можуть виникати коливання з частотами всього 2,5 кГц, що мають амплітуду, близьку до 10 % ваги вагона [1]. З появою більш довгих і важких вантажних вагонів практично стали зустрічатися частоти стрибків, що складають всього 0,5 Гц. Це означає, що статична вага може бути визначена тільки за допомогою відповідної обробки сигналу датчика. Внаслідок того, що в деяких випадках тривалість вимірювання складає тільки частку періоду низькочастотного коливання, виникають труднощі. Це головним чином зумовлено кінцевою довжиною платформних ваг, які можна застосовувати при вимірю-

DOI 10.15276/opus.2.46.2015.05

© 2015 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

ваннях, і зростаючою швидкістю переміщення вантажів. В минулому довжина платформи була такого ж порядку, як і довжина самих вантажних вагонів, і при проїзді за деякий період часу один єдиний вантажний вагон повністю стояв на платформі, що давало можливість здійснювати його повне зважування.

Зчіпка вантажних вагонів різної довжини, що утворюють залізничний склад, сприяла подальшому зменшенню вагової платформи. Цим фактом усувається можливість одночасної зайнятості платформи більш ніж одним вантажним вагоном. На сьогодні в основному зважують тільки осі. Вагу вагона визначають з урахуванням того, що довжина вагової платформи не перевищує два метри.

Крім стандартних аналогових і цифрових алгоритмів фільтра в літературних джерелах вказано цілий ряд методів обробки результатів [2, 3], таких як ступінчасті вагові функції, кубічні наближення, згладжуючі фільтри Уолша, дискретні фільтри Калмана. Виходячи з стохастичного характеру шуму, у запропонованій роботі виконується моделювання шуму у вигляді часового ряду авторегресивного процесу.

Мета дослідження полягає в розробці методики для зважування вантажного рухомого складу, що підвищує точність вимірювання динамічної маси, зокрема вантажного вагона, який рухається. Крім методу часового ряду для підвищення точності пропонується використовувати попередню фільтрацію.

Викладення основного матеріалу. Функція автоковаріації (ФАК) $C_x(h)$ дискретного стаціонарного стохастичного процесу x_i при затримці h

$$C_x(h) = E(x_i - \mu_x)(x_{i+h} - \mu_x), \quad h = 0, 1, \dots, N-1,$$

де $E(x_i) = E(x_{i+h}) = \mu_x$ — математичне очікування випадкової величини

N — число вибірок;

μ_x — ймовірність значень випадкової величини.

При нульовій затримці ФАК стає дисперсією δ_x^2 даного процесу. Нормована функція автоковаріації (НФАК)

$$\gamma_x(h) = C_x(h) / C_x(0), \quad h = 0, 1, \dots, N-1.$$

В ході дослідження запропоновано ряд оцінок функції автокореляції. Найбільш задовільною оцінкою автокореляції з k -ю затримкою $P_k \in 5$

$$\gamma_x(K) = C_x(K) / C_x(0).$$

Допускаючи ергодичність (середнє по множині дорівнює середньому по часу), ФАК і НФАК можна визначити на підставі рішення вибірки множини

$$\hat{C}(h) = \frac{1}{N-h} \sum_{i=1}^{N-h} (x_i - \hat{\mu}_x)(x_{i+h} - \hat{\mu}_x), \quad h = 0, 1, \dots, N-1,$$

$$\text{де } \hat{\mu}_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i.$$

При великому N $\hat{C}_x(h)$ є незміщеною оцінкою НФАК $C_x(h)$. Незміщеною оцінкою НФАК також є

$$\hat{\gamma}_x(h) = \hat{C}_x(h) / \hat{C}_x(0).$$

Подібні залежності можна визначити для функції перехресної коваріації двох довільних процесів [4, 5].

При моделюванні прийнято, що конструкція платформи являє собою застосовувані на практиці платформні ваги, що спираються на чотири однакові динамометричні датчики, які утворюють один замкнутий контур. На рис. 1 показані розміри колії біля місця зважування. G1 і G2 — модельовані виходи динамометричних датчиків, часова характеристика яких наведена на рисунку 1 для одиничного випадку.

Параметри моделювання: швидкість — 3...12 км/год, розподілена рівномірно; основна частота — 0,1...10 Гц, розподілена рівномірно; основна амплітуда — 0,1...10% ваги вагона, роз-

поділена рівномірно; гармоніки — до п'ятої гармоніки; амплітуда гармоніки — негативна експоненціальна з п'ятою гармонікою на 60 дБ нижче основної; фаза — 0...1800, розподілена рівномірно; статична вага — 25...125 %, розподілена рівномірно, при 100 % нормалізації до 1.

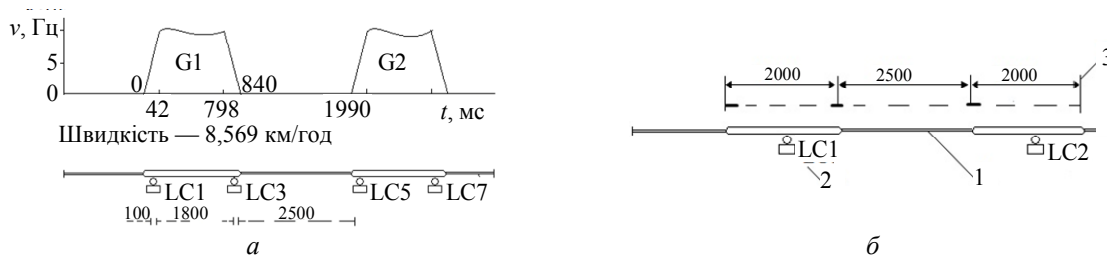


Рис. 1. Схематизація платформних ваг: моделювання платформних ваг з чотирма динамометричними датчиками (а); габаритні розміри експериментальної колії (б): 1 — вагова платформа; 2 — динамометричний датчик; 3 — розміри, мм

На рис. 2 наведено накладення виходів G1 та G2 в однакових ординатах.

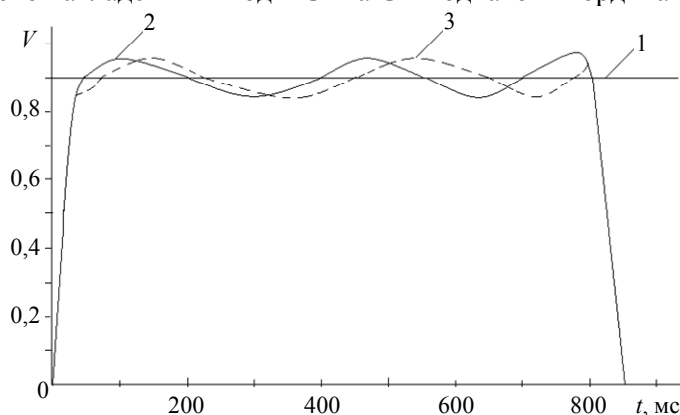


Рис. 2. Накладення виходів G1 і G2: величина одиночного сигналу (1); вихід G1 на першій платформі (2); вихід G2 на другій платформі (3)

Результати. В роботі здійснено ряд циклів моделювання. Використано одне рішення з такими параметрами: швидкість — 8,5696 км/год; величина одного сигналу — 0,09045; частота — 3,0841 Гц; основна амплітуда — 0,04702 мм; фаза — 5,1230 радіан.

Датчики розташовані з обох сторін платформи на відстані 10 см від її торців, що сприяє зменшенню впливу перехідних явищ, створюваних при переході від звичайних рейок до рейок на платформних вагах. Крім того, усувається вплив зростання і зменшення вихідної потужності датчиків, оскільки у часовій характеристиці враховуються тільки від 10 до 90% даних.

На рис. 3 показаний графік профілю шумів у виходах G1 і G2.

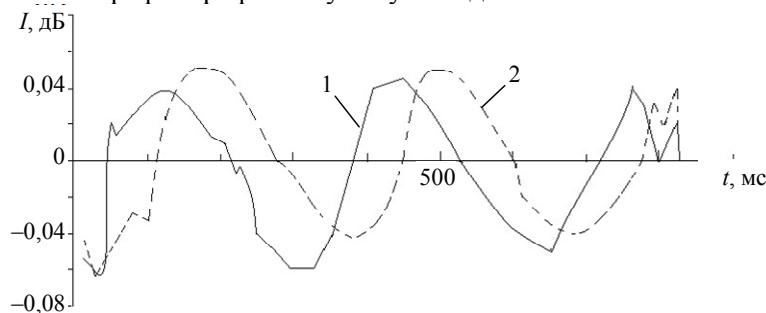


Рис. 3. Профіль шумів: у виходах G1 (1); у G2 (2)

На рис. 4 показана автокореляція виходу G1. Псевдоперіодичний характер графіка вказує на можливість моделювання даного процесу і на комплектність коренів характеристичного рівняння. Знаючи функцію автокореляції, що задовольняє диференціальному рівнянню другого порядку, можна встановити величини попередніх оцінок вагових коефіцієнтів ϕ_1 і ϕ_2 , використовуючи стандартні графіки і таблиці [5, 6].

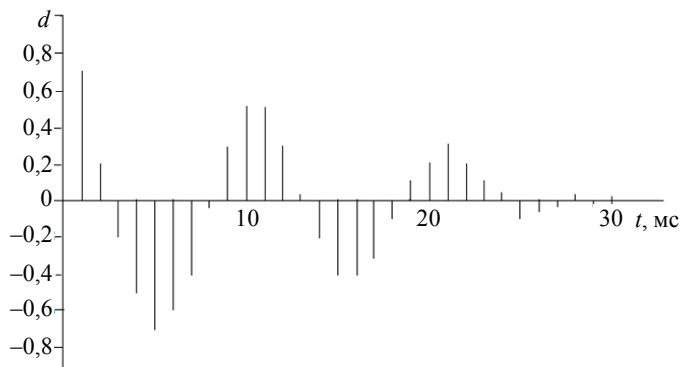


Рис. 4. Функція автокореляції шуму виходу G1

Коефіцієнт затухання d затухаючої синусоїдальної хвилі, частота f_0 і фаза F пов'язані з параметрами процесу:

$$d = \sqrt{-\phi_2},$$

після чого отримуємо позитивний квадратний корінь

$$\cos 2\pi f_0 = \frac{|\phi_1|}{2\sqrt{-\phi_2}},$$

$$\operatorname{tg} F = \frac{1 + d^2}{1 - d^2} \operatorname{tg} 2\pi f_0.$$

При такій моделі шумів можна зменшити динамічну складову, забезпечуючи загальну похибку зважування не більше 0,06 %.

Висновки. Встановлено, що точність зважування рухомого вантажного транспорту отримується при використанні у вторинній апаратурі дискретного фільтра Кальмана. Інтерактивний характер моделювання залишкового шуму і забезпечення його засобами програмування вимагають тривалого часу обробки. Виявлено, що на зазначені рівні точності великий вплив мають короткострокова стабільність сигналів датчика і ланцюг підсилювача, оскільки рівні сигналів складають менше мікрівольта.

Встановлено, що значну перевагу при вимірюванні тільки шуму забезпечує диференціальний метод вимірювання. Зміщення показань датчика другої платформи до рівня, еквівалентного середнім значенням виходу першого датчика на платформі, підвищує точність вимірювання профілю шумів.

Література

1. Orlova, A. The Anatomy of Railway Vehicle Running Gear / A. Orlova, Yu. Boronenko // В кн.: Handbook of Railway Vehicle Dynamics / S. Iwnicki. — Boca Raton: Taylor & Francis, 2006. — 535 p.
2. Cheng, L. Design of a capacitive flexible weighing sensor for vehicle WIM system / L. Cheng, H. Zhang, Q. Li // Sensors. — 2007. — Vol. 7, Issue 8. — PP. 1530 — 1544.
3. Roberts, S.J. Variational Bayes for generalized autoregressive models / S.J. Roberts, W.D. Penny // IEEE Transactions on Signal Processing. — 2002. — Vol. 50, Issue 9. — PP. 2245 — 2257.

4. Оробей, В.Ф. Метод граничных элементов в задачах с неустойчивыми решениями / В.Ф. Оробей, А.Ф. Дашченко, А.М. Лимаренко // Пр. Одес. політехн. ун-ту. — 2013. — Вип. 2(41). — С. 27 — 31.
5. Alsuwaidan, B.N. Generalized Multiple-Model Adaptive Estimation using an Autocorrelation Approach / B.N. Alsuwaidan, J.L. Crassidis, Yang Cheng // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. — 2011. — Vol. 47, Issue 3. — PP. 2138 — 2152.
6. Oussalah, M. Adaptive Kalman filter for noise identification / M. Oussalah, J. De Schutter // Proc. of ISMA25 Int. Conf. on Noise and Vibration Engineering, 13-15 September 2000, Leuven, Belgium. — Katholieke Universiteit Lueven, 2000. — PP. 1225 — 1232.

References

1. Orlova, A. and Boronenko, Yu. (2006). The Anatomy of Railway Vehicle Running Gear. In S. Iwnicki, *Handbook of Railway Vehicle Dynamics* (pp. 39-83). Boca Raton: Taylor & Francis.
2. Cheng, L., Zhang, H. and Li, Q. (2007). Design of a capacitive flexible weighing sensor for vehicle WIM system. *Sensors*, 7(8), 1530-1544.
3. Roberts, S.J. and Penny, W.D. (2002). Variational Bayes for generalized autoregressive models. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 50(9), 2245-2257.
4. Orobey, V.F., Dashchenko, A.F. and Limarenko, A.M. (2013). Boundary element method in the problems with unstable solutions. *Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi*, 2, 27-31.
5. Alsuwaidan, B.N., Crassidis, J.L. and Yang Cheng. (2011). Generalized multiple-model adaptive estimation using an autocorrelation approach. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 47(3), 2138-2152.
6. Oussalah, M. and De Schutter, J. (2000) Adaptive Kalman filter for noise identification. In P. Sas, D. Moens (Eds.), *Proceedings of International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA25)* (pp. 1225-1232). Leuven, Belgium: Katholieke Universiteit Lueven.

Надійшла до редакції 27 березня 2015 г.