

УДК 620.1.08

Л.В. Коломієць, О.М. Лимаренко, А.С. Лимаренко

Одеська державна академія технічного регулювання та якості, Одеса

## МЕТОДИКА ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРІВ ДИНАМІЧНОЇ МАСИ ВАНТАЖНОГО ВАГОНУ

З прискоренням транспортування вантажів, урахування перевезених вантажів придбав велике значення. Навіть у сучасних умовах 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. Крім стандартних аналогових і цифрових алгоритмів фільтра в літературних джерелах вказано цілий ряд методів обробки результатів. Виходячи з стохастичного характеру шуму в статті зроблена спроба моделювати шум у вигляді тимчасового ряду авторегресивного процесу. Розглянуто результати моделювання.

**Ключові слова:** датчик, фільтр, сигнал, транспорт, вага, точність, автоковаріація, функція.

### Вступ

Дослідження динамічних характеристик вантажних залізничних вагонів показують, що вже при швидкостях 8 км/год, виникають коливання з частотами 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 0,5 Гц. Це значить, що статична вага визначається 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 обумовлено кінцевою довжиною платформних ваг, які можна застосовувати при вимірах, і зростаючою швидкістю переміщення вантажів. Раніше 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 состав, сприяла подальшому зменшенню вагової платформи. Цим усувається можливість одночасної зайнятості платформи більш, ніж одним вантажним вагоном. На сьогодні в основному зважують тільки осі. При цьому довжина платформи не перевищує 2 м, і вагу вагону обчислюють за такими вимірами.

Крім стандартних аналогових та цифрових алгоритмів фільтра в літературних джерелах вказано цілий ряд методів обробки результатів [1-3], таких як ступінчасті вагові функції, кубічні наближення, згладжуючі фільтри Уолша, дискретні фільтри Калмана. Виходячи з стохастичного характеру шуму,

у запропонованій роботі шум моделюється у вигляді часового ряду авторегресивного процесу.

Мета роботи полягає в розробці методики для зважування вантажного рухомого складу, що підвищує точність вимірювання динамічної маси, зокрема, вантажного вагона що рухається.

### Основна частина

Функція автоковаріації (ФАК) дискретного стаціонарного стохастичного процесу  $x_i$  при затримці  $h$  визначається за допомогою

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

$$h = 0, 1, \dots, N-1,$$

де  $E(x_i) = E(x_{i+h}) = \mu_x$ .

При нульовій затримці ФАК стає дисперсією  $\delta_x^2$  даного процесу. Нормована функція автоковаріації (НАФК) визначається за допомогою

$$\gamma_x(h) = C_x(h) / C_x(0), \quad h = 0, 1, \dots, N-1. \quad (2)$$

В ході дослідження запропонований ряд оцінок функції автокореляції. Найбільш задовільною оцінкою автокореляції  $R_k$  з  $k$ -ю затримкою є 5

$$\gamma_x(K) = C_x(K) / C_x(0). \quad (3)$$

Допускаючи ергодичність (середнє по множині дорівнює середньому по часу), ФАК і НАФК можна визначити на підставі рішення вибірки множини (4).

Обчислена ФАК  $\hat{C}_x(h)$  при затримці  $h$  виражена за допомогою:

$$\hat{C}_x(h) = \frac{1}{N-h} \sum_{i=1}^{N-h} (x_i - \hat{\mu}_x)(x_{i+h} - \hat{\mu}_x), \quad (4)$$

$$h = 0, 1, \dots, N-1,$$

де  $N$  – кількість вибірок;

$$\hat{\mu}_x = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i \quad (5)$$

При великому  $N$ ,  $\hat{C}_x(h)$  є незміщеною оцінкою  $C_x(h)$ . Подібним чином незміщеною оцінкою НФАК являється

$$\hat{\gamma}_x(h) = \hat{C}_x(h) / C_x(0) \quad (6)$$

$h = 0, 1 \dots N - 1,$

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

При моделюванні прийнято, що конструкція платформи являє собою застосування на практиці платформні ваги, що спираються на чотири однакових динамометричних датчика, що утворюють один замкнутий контур. На рис. 1 і 2 показані деталі розмірів пристрою колії біля місця зважування, а також модельовані виходи динамометричних датчиків, часова характеристика яких приведена на рис. 1 для одиничного випадку.

Параметри моделювання:

швидкість — 3 км/год – 12 км/год, розподілена рівномірно;

основна частота — 0,1 Гц – 10 Гц, розподілена рівномірно;

основна амплітуда — 0,1 – 10% ваги вагону, розподілена рівномірно;

гармоніки — до 5-ї гармоніки;

амплітуда гармоніки — негативна експоненціальна з п'ятої гармонікою на 60 дБ нижче основної;

фаза — 0 – 180°, розподілена рівномірно;

статична вага — від 25% до 125 %, розподілена рівномірно, при 100 % нормалізації до 1.

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 100 мм 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, так як у часовій характеристиці враховуються тільки від 10 до 90% даних.

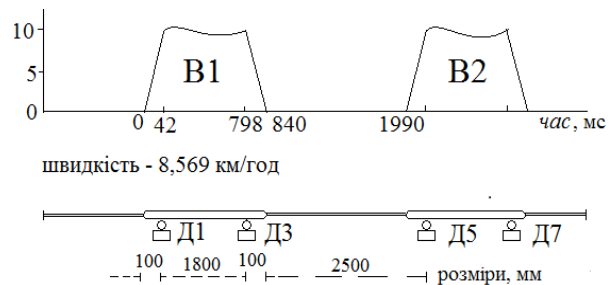


Рис. 1. Моделювання платформних ваг з чотирма динамометричними датчиками: В1, В2 – виходи; Д – датчик динамометричний

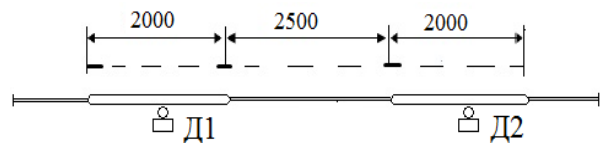


Рис. 2. Габаритні розміри модельованої колії

На рис. 3 наведено накладення рівня шумів В1 та В2 у однакових ординатах.

На рис. 4 показаний графік профілю шумів у виходах В1 і В2.

На рис. 5 показана автокореляція виходу В1 .

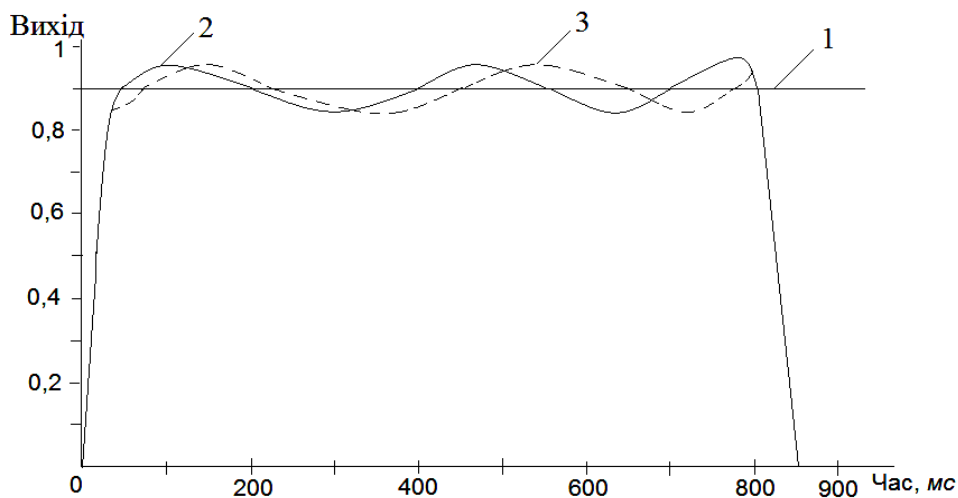


Рис. 3. Накладення виходів В1 і В2: 1 – величина одиничного сигналу; 2 – вихід G1 на першій платформі; 3 – вихід В2 на другій платформі

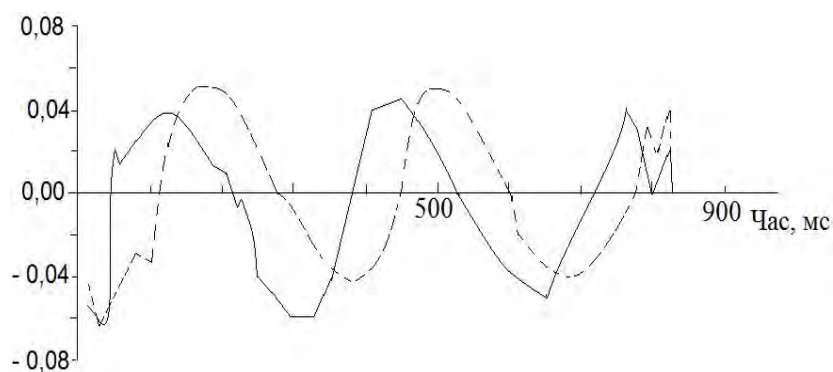


Рис. 4. Профіль шумів: 1 – у В1; 2 – у В2

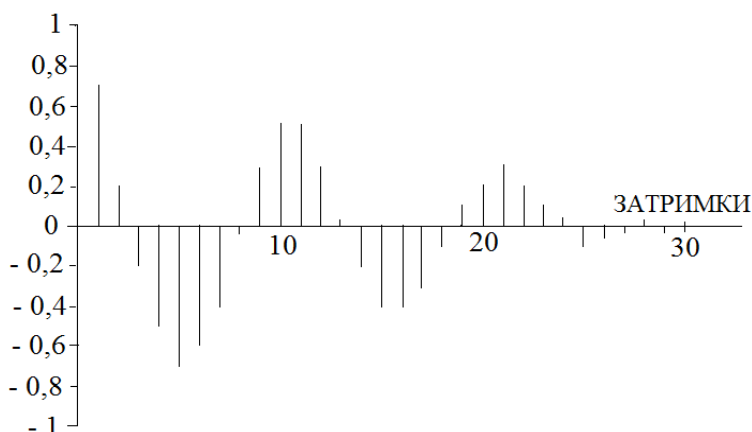


Рис. 5. Функція автокореляції шуму В1

В залежності від типу запису часового ряду моделювання можливо виконати допускаючи стаціонарність як для авторегресивного динамічного усередненого процесу. Досліджувана система є еквівалентною вихідної лінійній системі.

Допускається, що введення  $\vartheta_i$  в систему представляє послідовність білого шуму. Авторегресивний процес  $p$ -го порядку виражається як

$$Y_i = \sum_{k=1}^p \varphi_k B^k Y_i + \vartheta_i; \quad i = 1, 2, \dots, N-1, \quad (7)$$

де  $B^k$  – оператор повернення, що визначається у вигляді  $B^k Y_i = Y_{i-k}$ , а  $\varphi_k$  – вагові коефіцієнти.

Попередні оцінки вагових коефіцієнтів можливо отримати, вирішенням рівняння Ейля-Уокера, яке є лінійним по  $\varphi_k$ .

Динамічну середню модель порядку  $q$  виражає:

$$Y_i = \vartheta_i - \sum_{k=1}^q \theta_k B^k \vartheta_i; \quad i = 1, 2, \dots, N-1, \quad (8)$$

а змішаний авторегресивний динамічний усереднений процес виражається у вигляді

$$Y_i - \sum_{k=1}^p P_k B^k Y_i = \vartheta_i - \sum_{k=1}^q \theta_k B^k \vartheta_i; \quad (9)$$

$$i = 1, 2, \dots, N-1.$$

В обох цих процесах попередні оцінки  $\varphi_k$  та  $\theta_k$  можна отримати тільки методом пошуку.

Якщо процес нестационарний, дані можна диференціювати до тих пір, поки результат стаціонарності не стане рівним диференційному оператору повернення. Задовільним показником нестационарності є дисперсія. Процес вважають нестационарним, якщо дисперсія зменшується в залежності від диференціювання. Таким чином можна диференціювати будь-який даний процес до моменту початку збільшення дисперсії. Отриманий в результаті цього стаціонарний процес використовують для моделювання.

Авторегресивний процес другого порядку можна записати у вигляді

$$Y_i = \varphi_1 Y_i - 1 + \varphi_2 Y_{i-2} + \vartheta_i.$$

При стаціонарності корні

$$\varphi(B) = 1 - \varphi_1 B + \varphi_2 B^2 = 0 \quad (10)$$

повинні лежати поза одиничного кола.

Функція автокореляції задовольняють диференційному рівнянню другого порядку

$$P_k = \varphi_1 P_{k-1} + \varphi_2 P_{k-2}, \quad k > 0$$

при вихідних величинах  $P_0 = 1$  і  $P_1 = \varphi_1(1 - \varphi_2)$ .

Загальним вирішенням диференційного рівняння є:

$$P_k = A_1 G_1^k + A_2 G_2^k,$$

де  $G_1^{-1}$  та  $G_2^{-2}$  – корні характеристичного рівняння у вигляді (10).

На рис. 5 показана функція автокореляції моделювання виходу ВІ. «Псевдоперіодичний характер» такого графіка вказує на можливість моделювання даного процесу і на комплектність коренів характеристичного рівняння [5]. Знаючи функцію автокореляції, що задовольняє диференціальному рівнянню другого порядку, можна встановити величини попередніх оцінок  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$ , використовуючи стандартні графіки і таблиці [5]. Коефіцієнт затухання  $d$  затухаючої синусоїдальної хвилі, частота  $f_0$  і фаза  $F$  пов'язані з параметрами процесу таким чином:

$$d = \sqrt{-\varphi_2}, \quad (11)$$

після чого отримуємо позитивний квадратний корінь

$$\cos 2\pi f_0 = \frac{1\varphi_1}{2\sqrt{-\varphi_2}}; \quad (12)$$

$$\tan F = \frac{1 + d^2}{1 - d^2} \tan 2\pi f_0. \quad (13)$$

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

## Висновки

Встановлено, що точність зважування рухомого вантажного транспорту отримується при використанні у вторинній апаратурі дискретного фільтра Калмана. Інтерактивний характер моделювання

залишкового шуму і забезпечення його засобами програмування вимагають тривалого часу обробки. Виявлено, що на зазначені рівні точності великий вплив надають короткострокова стабільність сигналів датчика і ланцюг підсилювача, так як рівні сигналів складають менше мікрровольта.

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.

## Список літератури

1. Численные методы в механике / В.А. Баженов, А.Ф. Даценко, Л.В. Коломиец и др. – Одесса, «СТАНДАРТЬ», 2005. — 563 с.
2. Schriber U. Processing of Dinamic Truck Weighing Signals / U. Schriber and A. Schrode // Process Automation. – 1980. – P. 102-105.
3. Toshiro Ono, Koichi Kameoka and Kumeo Nakajima, Seasurement Method of Mass and Weight (Part 1) // Bulletin of the JSME, Vol.22, №.166 April 1979. – P. 503.
4. Оробей В.Ф. Метод граничных элементов в задачах с неустойчивыми решениями / В.Ф. Оробей, А.Ф. Даценко, А.М. Лимаренко // Пр. Одес. політехн. ун-ту. — Одеса, 2013. Вып.2(41). — С. 27–31.
5. Mendel, J.M. Computational Requirements for a discrete Kalman Filter / J.M. Mendel // IEEE Trans. Con Autom. Control, Vol. AC – 16 №. 6 – Dec. 1971.

Надійшла до редакції 26.03.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. К.Ф. Боряк, Одеська державна академія технічного регулювання та якості, Одеса.

## МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МАССЫ ГРУЗОВОГО ВАГОНА

Л.В. Коломиец, А.М. Лимаренко, А.С. Лимаренко

С ускорением транспортировки грузов, учет перевозимых грузов приобрел большое значение. Даже в современных условиях вес остается самым надежным показателем учета материалов. В отличие от многих других переменных величин, которые можно измерить опосредовано, вес можно измерять непосредственно и точно. При использовании тензометрических датчиков показание веса может быть получено через несколько миллисекунд, и такое показание может соответствовать мгновенной нагрузке действующей на датчик. Определение веса движущегося транспорта возможно только посредством соответствующей обработки сигнала датчика. Помимо стандартных аналоговых и цифровых алгоритмов фильтра в литературных источниках указан целый ряд методов обработки результатов. Исходя из стохастического характера шума в статье сделана попытка моделировать шум в виде временного ряда авторегрессивного процесса. Рассмотрены результаты моделирования.

**Ключевые слова:** датчик, фильтр, сигнал, транспорт, вес, точность, автоковариация, функция.

## A TECHNIQUE TO IMPROVE THE ACCURACY OF MEASUREMENTS OF THE DYNAMIC MASS OF FREIGHT-CAR

L.V. Kolomiets, A.M. Limarenko, A.S. Limarenko

With the acceleration of transportation, accounting transported goods acquired great importance. Even in modern conditions the weight remains the most reliable indicator of accounting materials. Unlike many other variables which can be measured indirectly, by weight can be measured directly and accurately. When using strain gauge weight sensors reading can be obtained within a few milliseconds, and this reading may correspond to the instantaneous load exerted on the sensor. Determination moving vehicle weight is only possible by appropriate processing of the sensor signal. In addition to standard analog and digital filter algorithms in the literature indicated a number of methods of processing the results. Based on the nature of the noise in the stochasticheskogo article is an attempt to simulate the noise in the form of time series autoregressive process. The results of the simulation.

**Keywords:** sensor, filter, signal, transportation, weight, accuracy, autocovariance function.