

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ МАСИ
ОБ'ЄКТІВ У РУСІ**Є. В. Шендрик¹, О. В. Головачова², В. В. Качеровський³

Національний університет «Одеська політехніка»

1, Шевченка пр., Одеса, 65044, Україна

Emails: e.v.shendryk@op.edu.ua¹, holovachova@op.edu.ua², 1562262@stud.op.edu.ua³

Розроблено метод підвищення точності вимірювання маси об'єкта при обмеженому часі зважування, який має високу точність та швидкодію за рахунок введення обмежень на величину отриманого значення постійної складової сигналу та використання формул заміни циклічних операцій. Запропоновані нові ефективні методи підвищення завадостійкості методу заданого діапазону частот шляхом його доповнення методами подвійного інтегрування вхідного сигналу або вагової функції, які знижують вплив високочастотних завад при автоматизованому вимірюванні маси рухомих об'єктів. Розроблено програмний модуль, який реалізує запропонований метод підвищення точності тензометричних вимірювань та може бути інтегрований в автоматизовані системи зважування об'єктів у русі при обмеженому часі спостереження.

Ключові слова: тензометричні вимірювання, тензодатчик, методи підвищення точності вимірювань, зважування у русі

Вступ. Динамічний розвиток автоматизованих систем управління та прогресивних інформаційних технологій у напрямку створення інтелектуальних засобів обробки інформації, зокрема, таких як методи побудови інформаційних моделей процесу, що автоматизується, обумовлює їх активне впровадження на всіх стадіях розробки й удосконалення автоматизованих систем вимірювання маси. Забезпечення автоматизації проведення процесу вимірювання, обробки отриманої інформації та подальше її накопичування, збереження й використання для задоволення інформаційних потреб залізничних або інших служб — основне призначення автоматизованих ваговимірювальних систем.

Автоматизований облік вантажопотоків, переміщуваних між регіонами країни або при перетинанні її державного кордону, є однією з найважливіших задач вирішуваних сьогодні. Відомо, що Україна володіє вельми розвиненою структурою залізничних магістралей, що зв'язують регіони країни, а також прикордонні держави, яких завдяки її геополітичному розташуванню виявляється досить багато. Тому своєчасне отримання вимірювальної інформації, що відбиває кількість перевезень, а також масу переміщеного вантажу, формування єдиної інформаційної мережі вимірювань дозволить оптимально врегулювати напрямки перевезень, здійснити контроль втрат вантажів (особливо сипучих) при переміщуванні між станціями, а також, що є дуже важливим, задовольнити інформаційні потреби залізничних служб, які забезпечують контроль та цілісність залізничних магістралей.

Мета і задачі роботи. Скорочення часу зважування при незмінній точності вимірювань шляхом побудови інформаційної моделі процесу зважування. Для досягнення цієї мети передбачається вирішити такі задачі:

- проаналізувати методи і засоби вимірювання маси об'єктів у русі;
- розробити інформаційну модель оцінки маси об'єкту при обмеженому часі зважування;
- на базі інформаційної моделі реалізувати алгоритм вагового обліку.

Основна частина. Досліджено характеристики динамічних явищ, виникаючих у процесі зважування, на підставі чого одержана нова об'єктно-орієнтована модель сигналу отриманого з датчиків автоматизованої вагової платформи при проведенні вагових вимірювань.

Доведено, що приведена об'єктно-орієнтована модель сигналу адекватна узагальненої моделі процесу зважування і представлена сукупністю трьох складових [1]

$$f(t) = D + A \sin(\Omega t + \psi) + \vec{\xi}(t), \quad (1)$$

де $f(t)$ — досліджуваний тензометричний сигнал;

D — постійна складова сигналу (інформативний параметр, відповідний масі об'єкта, що зважується);

$A \sin(\Omega t + \psi)$ — низькочастотна періодична складова сигналу;

$\vec{\xi}(t)$ — випадкова величина, що виникає під час зважування.

При цьому періодична завада представлена амплітудою — A , частотою — Ω і початковою фазою — ψ . Крім того, досліджуваний сигнал представлений сукупністю рівномірно розподілених у часі відрізків $t_{i+1} - t_i = t_i - t_{i-1} = \Delta t$, де $i = \overline{0, n}$, $n + 1 = N$ — кількість значень сигналу.

При довжині вагової платформи обмеженої 1,5 м, нижчої частотою коливань вагону 3 Гц та максимальній швидкості руху потягу 40 км/г тривалість вимірювального сигналу складає трохи більше чверті періоду низькочастотної періодичної складової сигналу. Тобто час спостереження сигналу — $T_{\text{н}}$ менше періоду завади $T_{\text{п}}$, $T_{\text{н}} < T_{\text{п}}$. Таким чином, розглядається випадок, коли періодична складова сигналу представлена менш чим одним періодом, а саме $T_{\text{н}} \approx \frac{1}{4} T_{\text{п}}$.

На підставі зазначених умов виміру побудована інформаційна модель, що відбиває не тільки характер поведінки сигналу, але й оцінку внеску кожної із складових сигналу в результуючий вихідний сигнал.

Відповідно до цього задача була зведена до пошуку найбільш ефективного методу побудови інформаційної моделі процесу зважування, спрямованого на визначення оцінок інформативних параметрів приведеної об'єктно-орієнтованої моделі (1), зокрема, маси об'єкта — D , при заданих обмеженнях.

Дослідження показали, що особливої уваги заслуговують наступні методи:

- метод заданого діапазону частот;
- методи нелінійної регресії.

Показано, що *метод заданого діапазону частот* має високу точність оцінок досліджуваної моделі (1).

В основі цього методу лежить метод апроксимації узагальненим поліномом методом найменших квадратів [2-5]. Однак метод заданого діапазону частот відрізняється від вказаного тим, що має визначену систему базисних функцій, що відповідає моделі (1). Крім цього для відшукування інформативного параметру сигналу використовувався послідовний перебір частот із заданого діапазону. Метод базується на критерії найменших квадратів, тому найкращим вважається той результат, середньоквадратична похибка котрого прийме найменше значення.

Апроксимація узагальненим поліномом методом найменших квадратів, яка лежить в основі методу заданого діапазону частот, полягає у відшуванні серед поліномів m -го ступеня, $m \leq n$

$$P_m(t) = a_0 \phi_0(t) + a_1 \phi_1(t) + \dots + a_m \phi_m(t) \quad (2)$$

такого, для якого справедливий вираз

$$S = \sum_{i=0}^n (P_m(t_i) - f_i)^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

де a_0, a_1, \dots, a_m — коефіцієнти узагальненого апроксимуючого полінома;

$\phi_0(t), \phi_1(t), \dots, \phi_m(t)$ — задана система базисних функцій;

S — середньоквадратична похибка відхилення апроксимуючого полінома (2) від заданої функції $f(t)$.

Шукані коефіцієнти a_0, a_1, \dots, a_m полінома (2) визначаються із системи лінійних алгебраїчних рівнянь, вирішивши яку і підставивши знайдені значення a_0, a_1, \dots, a_m в (2), при відповідних базисних функціях, одержимо шуканий узагальнений апроксимуючий поліном.

У методі заданого діапазону частот проведення апроксимації здійснюється декілька разів, постійно змінюючи величину частоти заданих базисних функцій в межах заданого діапазону частот.

Застосувавши к моделі (1) тригонометричні формули $A \sin(\Omega t + \psi) = A \sin \psi \cos \Omega t + A \cos \psi \sin \Omega t$, де $A_1 = A \sin \psi = \text{const}$; $A_2 = A \cos \psi = \text{const}$, визначаємо систему базисних функцій $\phi_0(t), \phi_1(t), \dots, \phi_m(t)$, обмеживши при цьому ступінь апроксимуючого полінома $m = 2$. При цьому зауважимо, що модель $D + A_1 \cos(\Omega t) + A_2 \sin(\Omega t)$ повністю адекватна моделі (1), різницею є тільки інший запис моделі (1), більш сприятливий для її дослідження запропонованим методом. Таким чином система базисних функцій приймає вид

$$\begin{cases} \phi_0(t) = 1; \\ \phi_1(t) = \cos(\Omega t); \\ \phi_2(t) = \sin(\Omega t). \end{cases} \quad (4)$$

Згідно (4), постійній складовій D відповідає функція $\phi_0(t)$, а періодична складова представлена сукупністю функцій $\phi_1(t), \phi_2(t)$.

Подальші обчислення зводилися до визначення коефіцієнтів a_0, a_1, a_2 таких, для яких величина (3) мінімальна. Алгоритм цих обчислень являє собою ітераційний процес і зводиться до побудови деякої множини $Z = \frac{\Omega_{\max} - \Omega_{\min}}{\Delta\Omega}$ апроксимуючих

кривих у заданому частотному діапазоні $[\Omega_{\max}, \Omega_{\min}]$, із кроком $\Delta\Omega$.

На основі отриманих коефіцієнтів a_0, a_1, a_2 визначаються значення постійної складової сигналу і складових періодичної завади, припускаючи, що найкраща апроксимація ($S \approx 0$) була досягнута на j -й ітерації

$$D = a_{0j}, A = \sqrt{a_{1j}^2 + a_{2j}^2}, \psi = \arctg\left(\frac{a_{1j}}{a_{2j}}\right), \Omega = \Omega_{\min}. \quad (5)$$

Проведено дослідження *методів нелінійної регресії*: метод лінеаризації моделі процесу (метод Гауса), метод Ньютона, метод Маркуардта і метод найшвидшого спуску, з метою виявлення ефективності їхнього використання до розв'язання поставленої задачі. Виявлено, що найкращим з розглянутих є метод Ньютона, який має найвищу точність, швидкість збіжності і найбільшу стійкість до вибору початкових умов у порівнянні з розглянутими методами. Показано, що ні метод Ньютона, ні інші методи нелінійної регресії не можуть застосовуватися для задачі проведення вагових вимірів при високій швидкості руху. Насамперед це зв'язано з тим, що розглянута модель сигналу має декілька локальних і тільки один глобальний мінімум функції середньоквадратичного відхилення (рис. 1), який приводить до точного результату. Як правило, в умовах обмеженого часу зважування, коли досліджуваний сигнал представлений чвертю періоду, пошук оптимальних оцінок приводить до влучення в область локального мінімуму, що в остаточному підсумку дає невірні результати і

вказує на неприйнятність використання методів нелінійної регресії для розв'язання поставленої задачі.

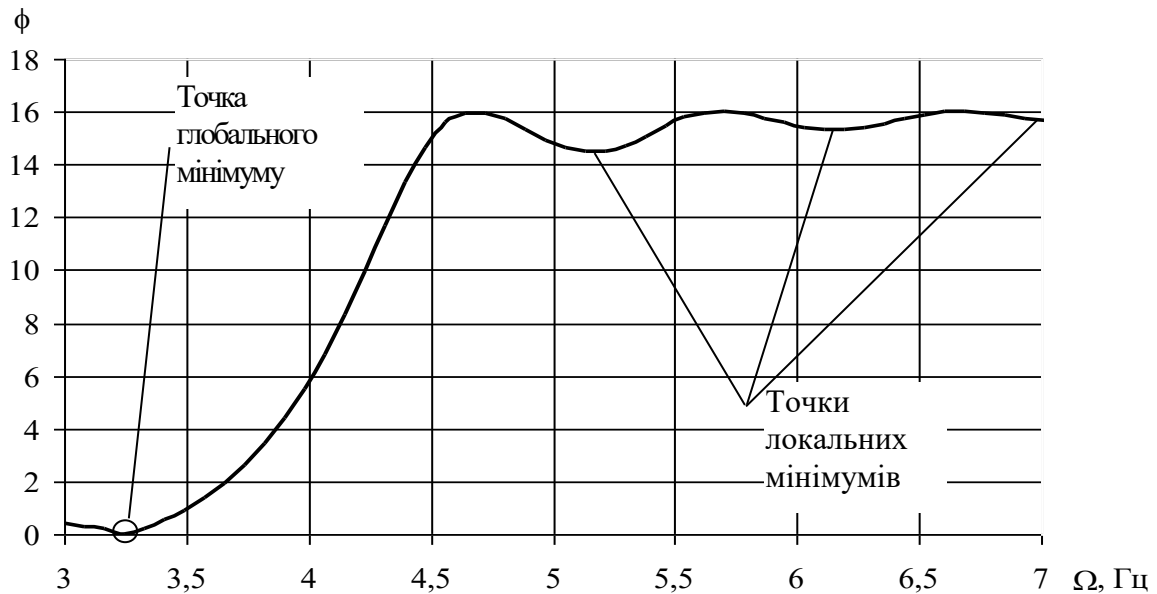


Рис. 1. Функція середньоквадратичного відхилення з одним глобальним і декілька локальних мінімумів

Приведено порівняльний аналіз методів (таблиця 1). Крім того, розглядається можливість використання кожного із методів для проведення вагових вимірів у різних умовах зважування і можливість їхнього впровадження у вже існуючі вагові комплекси з метою підвищення точності визначення інформативного параметру сигналу.

Таблиця 1.

Загальний порівняльний аналіз приведених методів

Найменування методу	Умови зважування	
	Похибка вимірювання при швидкості до 15 км/г, %	Похибка вимірювання при швидкості до 40 км/г, %
Звичайне усереднення	1,5	6
Метод заданого діапазону частот	0,1	0,7
Методи нелінійної регресії (метод Ньютона)	0,2	5

Відповідно до даних таблиці 1 зроблені висновки:

– методи нелінійної регресії мають великий потенціал при проведенні вагових вимірів із швидкістю руху об'єкта, що зважується, до 15 км/г, однак реалізація методів дуже складна, що вимагає їх доробки з ціллю забезпечення проведення вагових вимірів у реальному масштабі часу;

– метод заданого діапазону частот є єдиним прийнятним методом оцінки інформативного параметру сигналу при обмеженому часі зважування в реальних умовах, здатним визначати шукану величину, як при низькій, так і високій швидкості руху об'єкта, що зважується, забезпечуючи високу точність вимірювань.

Показано, що в деяких випадках похибка запропонованого методу може значно перевищити похибку, отриману шляхом усереднення значень сигналу. Встановлено, що причиною подібних випадків є несприятливий розподіл випадкового шуму, що у силу малої тривалості досліджуваного сигналу значно відхиляє апроксимуючу криву від реального значення представленого постійної складової і низькочастотною періодичною завадою, що у свою чергу приводить до помилкових оцінок параметрів.

Виявлено, що вплив випадкового шуму особливо гостро виявляється на граничних ділянках досліджуваного сигналу.

У якості методів підвищення завадостійкості методу заданого діапазону частот стосовно до поставленої задачі запропоновано використовувати:

- метод подвійного інтегрування;
- метод вагової функції;
- метод воріт.

Метод подвійного інтегрування [6] заснований на дослідженні реальних сигналів і припускає аналіз випадкового шуму $\vec{\xi}(t)$ у виді тригонометричного ряду

$$\vec{\xi}(t) = A_1 \sin(\Omega_1 t + \psi_1) + A_2 \sin(\Omega_2 t + \psi_2) + \dots + A_m \sin(\Omega_m t + \psi_m) \quad (6)$$

у якому величини амплітуд A_1, A_2, \dots, A_m як мінімум на порядок менше, а величини частот $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_m$ як мінімум, на порядок більше відповідних величин сигналу (1).

Запропоновано двічі проінтегрувати сигнал (1), підставивши замість $\vec{\xi}(t)$ вираз (6). Інтегрування проводиться двічі по двох причинах. Однократне інтегрування недостатньо забезпечує подавлення випадкового шуму, і, як наслідок, не дає бажаного збільшення точності вимірів. При багаторазовому інтегруванні виникає похибка алгоритму чисельного інтегрування, що приводить до зниження точності одержуваного результату. Таким чином, двічі проінтегрований сигнал має вид

$$f(t) dt dt = \frac{Dt^2}{2} - \frac{A}{\Omega^2} \sin(\Omega t + \psi) - \frac{A_1}{\Omega_1^2} \sin(\Omega_1 t + \psi_1) - \dots - \frac{A_m}{\Omega_m^2} \sin(\Omega_m t + \psi_m) \quad (7)$$

Як видно з (7), після дворазового інтегрування величина амплітуди кожної із складових сигналу ділиться на квадрат її частоти. З урахуванням того, що величини амплітуд шуму (6) на порядок менше, а величини частот на порядок більше відповідних величин сигналу (1), отримуємо істотне подавлення високочастотних складових сигналу. Подальший хід обчислень зводиться до використання методу заданого діапазону частот. При цьому пропонується нова система базисних функцій

$$\begin{cases} \phi_0(t) = t^2, \\ \phi_1(t) = \cos(\Omega t), \\ \phi_2(t) = \sin(\Omega t), \\ \phi_3(t) = t, \\ \phi_4(t) = 1. \end{cases}$$

Крім того, пропонується змінити спосіб обчислення оцінок шуканих параметрів сигналу (1):

$$D = 2a_{0j}, \Omega = \Omega_{min}, A = \Omega^2 \sqrt{a_{1j}^2 + a_{2j}^2}, \psi = \arctg\left(\frac{a_{1j}}{a_{2j}}\right).$$

Показано, що запропонований підхід дозволяє досягти десятикратного збільшення точності вимірів при малій тривалості досліджуваного сигналу.

Метод вагової функції [7] заснований на завданні вагових коефіцієнтів кожному із значень сигналу. Виявлено, що вплив випадкового шуму особливо гостро виявляється на граничних ділянках досліджуваного сигналу. Таким чином, для підвищення точності оцінок сигналу вводиться система вагових коефіцієнтів, відповідно до якої граничним значенням задається найменша вага, що збільшується в міру наближення до центральних значень досліджуваного сигналу.

Функцію, що визначає значення кожного вагового коефіцієнта w_i , визначена як

$$W(t) = \sin\left(\frac{\pi}{N} t + \frac{\pi}{2N}\right), \quad (8)$$

де N — кількість значень сигналу.
Нова система базисних функцій (4) приймає вид

$$\begin{cases} \phi_0(t) = W(t), \\ \phi_1(t) = \cos(\Omega t)W(t), \\ \phi_2(t) = \sin(\Omega t)W(t). \end{cases} \quad (9)$$

На величину (8) також збільшуються значення досліджуваного сигналу (1) — $f(t)W(t)$.

Показано, що існує ще один підхід, який дозволяє поліпшити точність оцінок параметрів тензометричного сигналу (1).

Шляхом множини експериментів та їхнього аналізу встановлено, що при застосуванні методу вагової функції обчислення середньоквадратичного відхилення в методі заданого діапазону частот повинне визначатися відповідно до формули

$$S = \sum_{i=0}^{N-1} (P_m(t_i) - f(t_i))^2 W(t_i). \quad (10)$$

Використання формули (10) дозволяє одержати мінімум середньоквадратичного відхилення відповідний найбільш точному значенню частоти із заданого діапазону $[\Omega_{\min} \dots \Omega_{\max}]$, і, як наслідок, найбільш точне значення постійної складової сигналу D .

Показано, що запропонований підхід дозволяє досягти як мінімум десятикратного збільшення точності вимірів при малій тривалості досліджуваного сигналу, і, крім того, його використання дозволяє одержати більшу точність оцінок параметрів сигналу (1) у порівнянні з методом подвійного інтегрування.

Метод воріт. Встановлено, що в реальних умовах похибка вимірів при використанні кожного з розглянутих методів, у деяких випадках, може перевищити похибку, отриману шляхом простого усереднення сигналу, що є неприпустимим і може розцінюватися як збійна ситуація. У зв'язку з цим пропонується доповнити метод вагової функції, як кращий із представлених, таким чином, щоб гарантувати величину похибки не перевищуючу похибку усереднення значень сигналу при будь-яких умовах виміру.

Як таке доповнення запропоновано використовувати обмеження на вибір оцінок параметрів моделі (1) — ворота, які визначають припустимий діапазон отриманого значення постійної складової сигналу D . У цьому випадку використовуються дослідження реальних сигналів. З проведених досліджень відомо, що величина амплітуди низькочастотної складової сигналу (1) складає не більш 10...15 % величини постійної складової сигналу D . Таким чином, у результаті застосування методу заданого діапазону частот, обчислене значення величини $D = a_0$ не повинне перевищити середньоарифметичне значення досліджуваного сигналу \bar{F} , на величину

$$G = \pm \bar{F}/10, \quad (11)$$

де G — величина воріт.

Таким чином, з урахуванням уведених доповнень найбільш точним вважається той результат, що, по-перше, знаходиться в інтервалі

$$a_0 \in [\bar{F} \pm G], \quad (12)$$

де a_0 — поточний результат апроксимації, що відповідає D ;
а по-друге, має найменшу середньоквадратичну похибку, розраховану по формулі (10). Якщо жодне з отриманих значень не задовольняє (12), то як шуканий результат виступає середньоарифметичне значення досліджуваного сигналу \bar{F} .

Проведено комп'ютерне моделювання з метою визначення точності оцінок параметрів сигналу, отриманих шляхом впровадження методу воріт (рисунок 2).

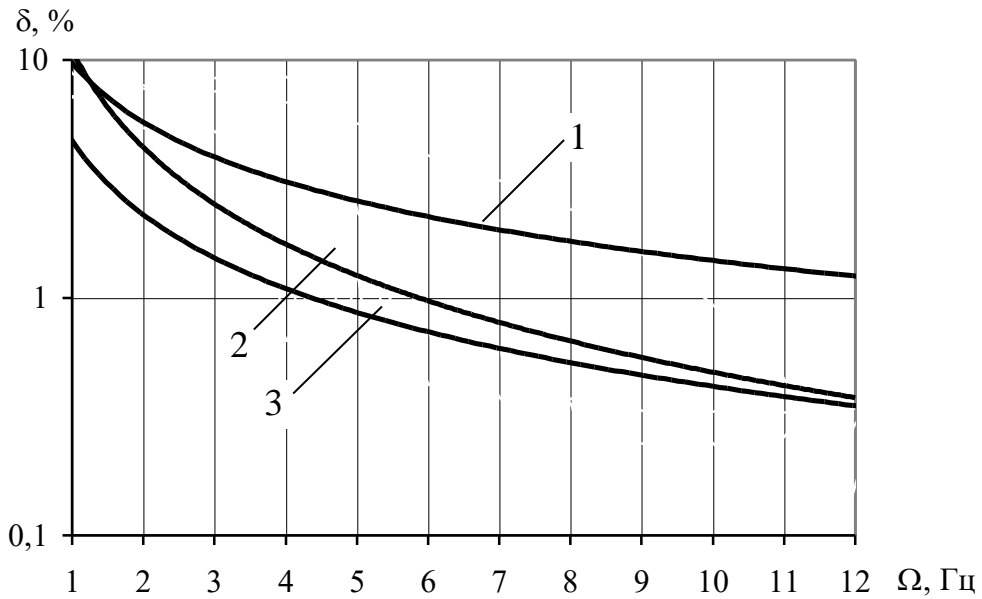


Рис. 2. Залежності відносної похибки виміру постійної складової сигналу від частоти, отримані: 1 – шляхом усереднення; 2 – з використанням методу вагової функції; 3 – з використанням методу вагової функції і методу воріт

Показано, що метод заданого діапазону частот удосконалений методом вагової функції і методом воріт (див. рисунок 2), є найкращим методом побудови інформаційної моделі оцінки маси об'єкта при обмеженому часі зважування, який дозволяє оцінити параметри об'єктно-орієнтованої моделі сигналу (1) при наявності збійних ситуацій у будь-яких умовах виміру.

Відповідно до проведених досліджень, реалізацію алгоритму побудови інформаційної моделі оцінки маси об'єкта при обмеженому часі зважування, необхідно робити на базі методу заданого діапазону частот із введенням у систему базисних функцій вагової функції і використанням методу воріт. При цьому необхідно забезпечити максимальну швидкодію обчислень шляхом застосування різних математичних перетворень, що зводять число обчислень до мінімально можливого значення.

У зв'язку з цим максимальним чином виключино з алгоритму циклічні обчислення, для чого використовуються отримані нами формули заміни циклічних обчислень.

В методі заданого діапазону частот, при формуванні системи лінійних рівнянь

$$\begin{aligned} c_{00}x_0 + c_{01}x_1 + c_{02}x_2 &= d_1, \\ c_{01}x_0 + c_{11}x_1 + c_{12}x_2 &= d_2, \\ c_{02}x_0 + c_{12}x_1 + c_{22}x_2 &= d_3, \end{aligned} \quad (13)$$

де $c_{jk} = (\phi_j, \phi_k) = \sum_{i=0}^n \phi_j(t_i)\phi_k(t_i)$;

ліва частина рівняння, з урахуванням рівності діагональних коефіцієнтів та визначеної системи базисних функцій (9), обчислюється за допомогою формул заміни циклічних операцій.

Позначивши через $q = \sin(\Omega)$, $b = \sin(\Omega N)$, $p = \sin\left(\frac{\pi}{N}\right)$, $r = \sin\left(\frac{\pi}{2N}\right)$, $e = \cos(\Omega)$, $f = \sin(\Omega N)$, $g = \cos\left(\frac{\pi}{N}\right)$, $h = \cos\left(\frac{\pi}{2N}\right)$, де N — обсяг вибірки дискретних значень сигналу; обчислення коефіцієнтів рівняння (13) необхідно робити по наступним формулам

$$c_{00} = \frac{N}{2}, c_{01} = \left(\frac{(2ghrp(f-1) - qbh^2)(1-\varepsilon) + qb(g^2 - \varepsilon)}{2(2g^2(1-\varepsilon) + \varepsilon^2 - 1)} + \frac{h^2(f-1) + 1 - f}{2} \right),$$

$$c_{02} = \left(\frac{q(f-1)(\varepsilon - g^2 + h^2(1-\varepsilon)) + 2gbhrp(1-\varepsilon)}{2(2g^2(1-\varepsilon) + \varepsilon^2 - 1)} + \frac{b(h^2 - 1)}{2} \right),$$

$$c_{11} = \left(\frac{N}{4} + \frac{f^2(h^2 - 1) - h^2 + 1}{2} + \frac{rphg(f^2 - 1)}{2(g^2 - e^2)} + \frac{fqbe(2e^2 - g^2 - 1 - 2h^2(e^2 - 1))}{4(g^2 - e^2)(e^2 - 1)} \right),$$

$$c_{12} = \left(\frac{fb(h^2 - 1)}{2} + \frac{qe(f^2 - 1)(1 - 2e^2 + g^2)}{4(g^2 - e^2)(e^2 - 1)} + \frac{h^2qe(f^2 - 1) + bhfrpg}{2(g^2 - e^2)} \right),$$

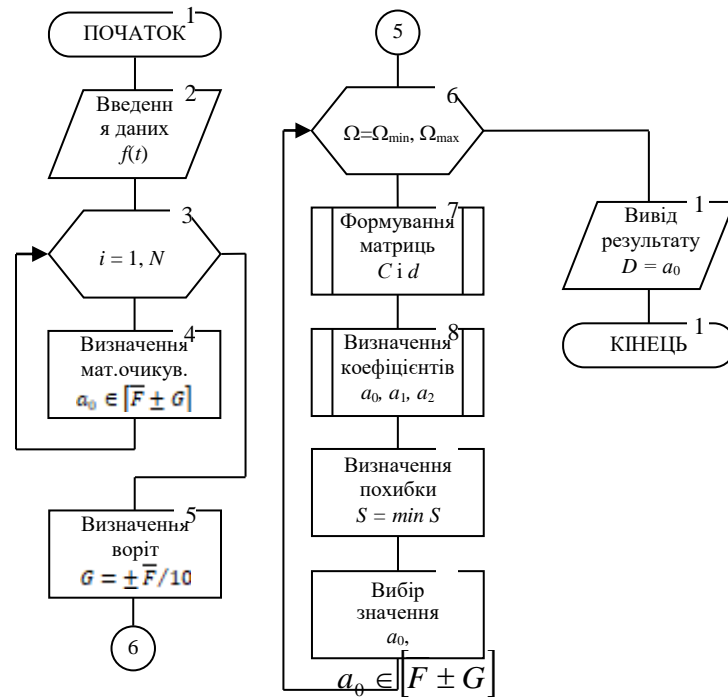
$$c_{22} = \left(\frac{N}{4} - \frac{f^2(h^2 - 1) - h^2 + 1}{2} - \frac{rphg(f^2 - 1)}{2(g^2 - e^2)} - \frac{fqbe(2e^2 - g^2 - 1 - 2h^2(e^2 - 1))}{4(g^2 - e^2)(e^2 - 1)} \right).$$

При цьому обчислення правої частини рівняння (13) залишається незмінним — $d_k = \sum_{i=0}^n f(t_i) \phi_k(t_i) W^2(t_i), k = 0, 1, 2$.

Слід зазначити, що використання зазначених формул дозволяє уникати виконання циклічних операцій для розрахунку коефіцієнтів лівої частини рівняння. При цьому по кількості виконуваних операцій зазначені формули вимагають меншої кількості часу обчислень, тому що із збільшенням кількості значень досліджуваного сигналу час обчислень коефіцієнтів лівої частини рівняння (13) залишається незмінним.

Крім того, слід зазначити, що існують дві виняткові ситуації, коли застосування зазначених формул виявляється неможливим, тому що в цьому випадку в деяких формулах знаменник виявляється рівним нулю. При цьому для ситуацій $\Omega = \frac{\pi}{N}$ і $\Omega = \frac{2\pi}{N}$ відповідно використовуються інші формули заміни циклічних операцій.

Таким чином, у результаті проведених експериментів було встановлено, що час обчислення проміжного результату за допомогою запропонованих формул зменшується, приблизно, в 10 разів в порівнянні із звичайним чином обчислення, що



цілком задовольняє проведенню вимірів у реальному масштабі часу. Алгоритм запропонованого методу представлений на рисунку 3.

Рис. 3. Алгоритм побудови інформаційної моделі оцінки маси об'єкта при обмеженому часі зважування, застосований у системах вагового обліку

Проведено натурні експерименти, що підтверджують доцільність використання запропонованого рішення для задачі оцінки маси об'єкта при обмеженому часі зважування (рисунок 4). При цьому для приведених графіків (див. рисунок 4) швидкість руху потягу складала 40 км/г.

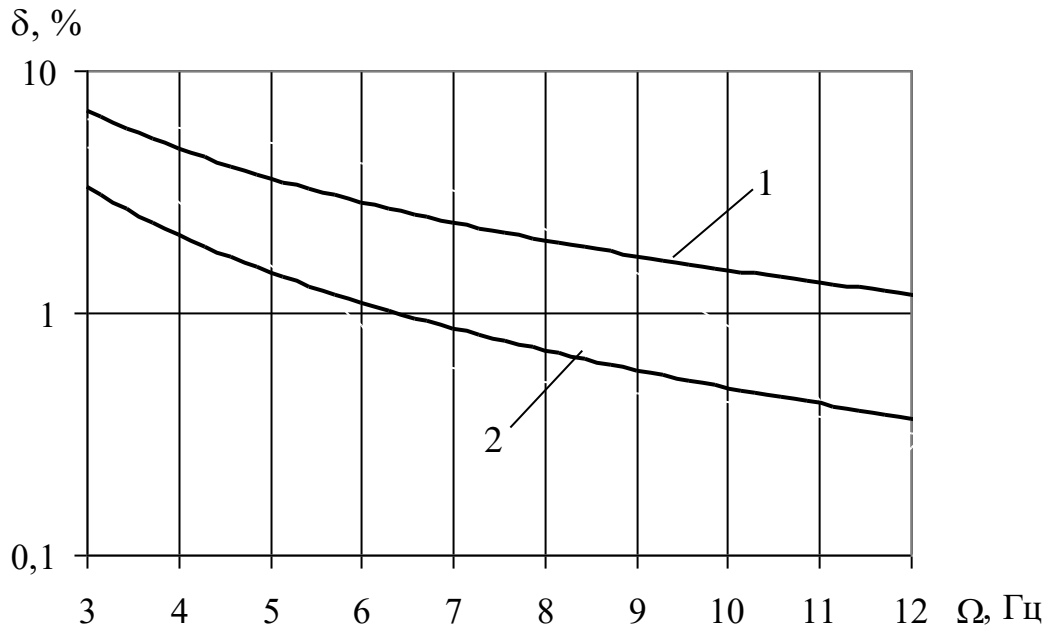


Рис. 4. Залежності відносної похибки виміру постійної складової сигналу від частоти, отримані: 1 — шляхом усереднення; 2 — з використанням запропонованого алгоритму

Зазначено, що програмна реалізація приведеного алгоритму в складі автоматизованого ваговимірювального комплексу при обмеженому часі зважування дозволяє підвищити точність вимірів у 2...7 разів стосовно усереднення значень сигналу, що на сьогоднішній день є кращим показником точності в рамках поставленої задачі.

Висновки. Основні наукові і практичні результати роботи полягають у наступному:

- проаналізовано сучасні методи та засоби для задачі підвищення точності та швидкодії автоматизованих ваговимірювальних систем. Доведено, що класичними методами та засобами, заснованими на усередненні вибірки сигналу не можливо забезпечити необхідну точність вимірювань, тому що їхнє використання не враховує особливості вхідного сигналу при автоматизованому зважуванні об'єктів на високій швидкості руху. Цей факт підтверджує доцільність розробки нових методів обробки сигналу, таких як методи побудови інформаційної моделі оцінки маси об'єкта при обмеженому часі зважування.

- досліджено автоматизовану ваговимірювальну систему з метою розробки нової моделі автоматизованого процесу зважування об'єктів у русі як базової моделі для подальших розробок методів побудови інформаційної моделі для оцінки маси об'єктів, що рухаються з підвищеною швидкістю.

- на базі нової моделі зважування вагонів у русі розроблено метод заданого діапазону частот, який шляхом послідовного перебору частот із заданого діапазону визначає оцінки інформативних параметрів тензометричних сигналів для побудови інформаційної моделі процесу автоматизованого зважування об'єктів у русі.

- запропоновані нові ефективні методи підвищення завадостійкості методу заданого діапазону частот шляхом його доповнення методами подвійного інтегрування вхідного сигналу або вагової функції, які знижують вплив високочастотних завад при автоматизованому вимірюванні маси рухомих об'єктів, поліпшуючи інформаційні параметри створеної інформаційної моделі.

– з урахуванням методу вагової функції розроблено метод та алгоритм побудови інформаційної моделі оцінки маси об'єкта при обмеженому часі зважування, який має високу точність та швидкодію за рахунок введення обмежень на величину отриманого значення постійної складової сигналу — метод воріт, та використання формул заміни циклічних операцій.

Список літератури

1. Копытчук Н.Б., Огинский В.Н., Милейко И.Г. Оценка информативных параметров сигналов на фоне помех при ограниченном времени наблюдения. *Тр. Одес. политехн. ун-та*. 1999. Вып. 3(9). С. 149 — 152.
2. Фиакко А., Мак-Кормик Г. Нелинейное программирование. Методы последовательной безусловной минимизации. М.: Мир, 1972. 240 с.
3. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения. М.: Наука, 1967. 368 с.
4. Копытчук Н.Б., Шендрик Е.В. Использование метода наименьших квадратов для оценки параметров сигнала с периодической помехой при ограниченном времени наблюдения. *Тр. Одес. политехн. ун-та*. 1999. Вып. 3(9). С. 167 — 169.
5. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. М.: Наука, 1970. 664 с.
6. Копытчук Н.Б., Шендрик Е.В. Повышение точности метода наименьших квадратов посредством интегрирования. *Праці міжнародної конференції з управління "Автоматика". Одеса*. 2001. С. 77 — 78.
7. Шендрик Е.В. Повышение эффективности алгоритма метода наименьших квадратов путем введения модифицированного метода весовой функции. *Праці УНДРТ*. 2002. № 1 (29). С. 88 — 90.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF METHODS FOR DETERMINING THE MASS OF OBJECTS IN MOTION

E.V. Shendryk¹, O.V. Golovachova², V.V. Kacherovskiy³

National Odessa Polytechnic University

1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine

Emails: e.v.shendryk@op.edu.ua¹, holovachova@op.edu.ua², 1562262@stud.op.edu.ua³

The work develops a method for improving the accuracy of object mass measurement with limited weighing time, which has high accuracy and speed due to the introduction of restrictions on the value of the obtained constant component of the signal and the use of formulas for replacing cyclic operations. New effective methods are proposed to improve the noise immunity of the specified frequency range method by supplementing it with methods of double integration of the input signal or weight function, which reduce the influence of high-frequency noise during automated measurement of the mass of moving objects. A software module has been developed that implements the proposed method for improving the accuracy of strain gauge measurements and can be integrated into automated systems for weighing objects in motion with limited observation time.

Keywords: strain gauge measurements, strain gauge, methods for improving measurement accuracy, weighing in motion