

УДК 681.13:681.26

DOI 10.47049/2226-1893-2025-2-121-127

ЗБІЛЬШЕННЯ СТІЙКОСТІ ТА ТОЧНОСТІ ЕЛЕКТРОННИХ ВАГ ДЛЯ ПРОМИСЛОВОГО ЗВАЖУВАННЯ

О.М. Воробйова

к.т.н., доцент,

зав. кафедрою «Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій».

vorobyovaem14@gmail.com

Державний університет інтелектуальних технологій, Одеса, Україна

К.Ю. Федорова

к.т.н., доцент кафедри «Морське та цивільне будівництво та архітектура»

fedorovaky@yahoo.com

О.К. Рожко

ст. викладач, аспірант кафедри «Машинознавство й інженерна механіка»

ooonlineshop@gmail.com

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

Анотація. У роботі розглянуто питання застосування математичної моделі джерела тензосигналу як двоосциляторної коливальної системи із загасанням.

Знайдено види тензосигналів, що відповідають робочому та аварійному режимам роботи тензодатчиків у ваговимірювальній платформі.

Синтезовані алгоритми придушення динамічної переешкоди з адаптацією аналого-цифрового перетворювача до їх характеристик шляхом передспотворення огинаючої та обробки безлічі пар відліків тензосигналу, дистантних напівперіоду переешкоди.

Розроблено метод синтезу за критерієм стійкості оптимальної структури АЦП без схильності до самозбудження при необмеженому підвищенні роздільної здатності та швидкодії.

Усунено необхідність будь-якого підстроювання АЦП під характеристики динамічних переешкод на об'єкті експлуатації.

Ключові слова: аналого-цифровий перетворювач (АЦП), тензодатчики, динамічна переешкода, ваговимірювальна платформа, критерії стійкості, самозбудження, роздільна здатність.

UDC 681.13:681.26

DOI 10.47049/2226-1893-2025-2-121-127

INCREASING THE STABILITY AND ACCURACY OF ELECTRONICS SCALES FOR INDUSTRIAL WEIGHING

O. Vorobyova

Ph.D., associate professor
of the Department of «Automation and computer-integrated technologies»
vorobyovaem14@gmail.com

State University of Intellectual Technologies, Odesa, Ukraine

K. Fedorova

PhD, associate professor
of the Department of «Marine and civil construction and architecture»
fedorovaky@yahoo.com

O. Rozhko

assistant professor, PhD Student
of the Department of «Machine science and mechanical engineering»
oonlineshop@gmail.com

Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine

Abstract. *The paper considers the issues of applying a mathematical model of a strain signals sources as a two-oscillatory system with demoing. Types of strain signals corresponding to the operating and emergency modes of strain gauges in weighing platforms were found.*

Synthesised algorithms for dynamic interference suppression with adaptation of the analog-to-digital converter to their characteristics by envelope transformations and processing of a plurality of pairs of strain signal samples of distant half-periods of the obstructed.

A synthesis method has been developed based on the stability criterion of the optimal ADC structure with out a tendency's to self-excitation with an ultimates increase in resolution and speed.

Eliminates the need for any adjustment of the ADC to the characteristics of dynamic interference at the operating site.

Keywords: *analog-to-digital converter (ADC), strain gauge, dynamic obstacle, weighing platform, stability criterion, self-excitement, resolution.*

Вступ. Широке використання на промислових об'єктах електронних цифрових ваговимірювальних пристроїв у даний час стримується їх порівняно високої похибкою, обумовленої такими чинниками.

По-перше, великий вплив перешкод, обумовлених механічними коливаннями вантажоприймального вузла, пов'язаного з аналого-цифровими перетворювачами.

Питанням придушення таких перешкод присвячено величезну кількість робіт, а аналого-цифрові перетворювачі для тензометричних ваг, що серійно випускаються, забезпечені пристроями придушення перешкод, що реалізують усереднення методом вагових функцій.

Разом з тим, АЦП, що забезпечує на стендових випробуваннях високий коефіцієнт придушення динамічних перешкод, різко знижує його на об'єкті експлуатації ваг.

Це пояснюється високою критичністю налаштування перешкодавляючих вузлів АЦП до спектрального складу перешкоди. Так як на кожному об'єкті спектральні характеристики перешкод свої, а до теперішнього часу не виявлені критерії налаштування, то на об'єкті вони ведуться чисто інтуїтивно, займають багато часу і не приносять бажаних результатів, забезпечуючи похибку зважування об'єктів, що рухаються, не нижче 1,5 %.

По-друге, останнім часом на промислових об'єктах виникає гостра необхідність зважувати масу, що постійно змінюється. Існуючі АЦП через низьку швидкодію цієї мети взагалі непридатні, так як реальна похибка таких тензометричних ваг на об'єкті становить понад 3 %.

Усе це пояснюється лише тим, що у дослідженнях АЦП практично не синтезовані не тільки їхні оптимальні структури щодо підвищення стійкості, але й алгоритм обробки тензосигналу.

Наявність перелічених та багатьох інших проблем у створенні АЦП для ЦЕТВ пояснюється тим, що відомі технічні рішення стали результатом евристичного пошуку, а не синтезу.

Проте навіть за великої кількості несинтезованих рішень немає впевненості в тому, що серед них є оптимальний варіант.

Мета цієї роботи полягає у створенні та дослідженні методів та засобів підвищення завадостійкості, точності та швидкодії АЦП та забезпечення його стійкості проти самозбудження при необмеженому підвищенні роздільної здатності.

Методи дослідження. При отриманні основних результатів використали апарат перетворення Лапласа, методи теорії диференціальних рівнянь, чисельні методи теорії ймовірностей, теорії стійкості систем зі зворотним зв'язком, комп'ютерне моделювання.

Викладання основного матеріалу. Для розробки математичної моделі джерела тензосигналу обрана двоосциляторна коливальна система із загасанням.

В основу розробки покладено аналіз динаміки джерела тензосигналу при вимірюванні маси вантажу, що переміщається, в результаті чого отримана система звичайних диференціальних рівнянь другого порядку

$$m_1 \frac{d^2 x_1(t)}{dt^2} + \mu_1 \frac{dx_1(t)}{dt} + C_1 x_1(t) - C_2 x_2(t) = P(t) \quad (1)$$

$$m_2 \frac{d^2 x_2(t)}{dt^2} + \mu_2 \frac{dx_2(t)}{dt} + C_2 [x_2(t) - x_1(t)] = 0. \quad (2)$$

Тут $x_j(t)$, m_j , μ_j , C_j – процеси вертикальних переміщень, маси, коефіцієнти загасання та жорсткості відповідно для платформи ($j=1$) та для вантажу, що переміщується ($j=2$); $P(t)$ – імпульсне навантаження одноразової дії

$$P(t) = \begin{cases} P_0 f(t); & 0 \leq t \leq \tau_0; \\ 0; & t > \tau_0, \end{cases} \quad (3)$$

де τ – час спостереження тензосигналу.

Вирішення цієї системи виконується за допомогою техніки перетворення Лапласа. Конкретні форми рішення залежать від виду коренів характеристичного рівняння

$$\Delta(p) = m_1 m_2 p^4 + (m_1 \mu_2 + m_2 \mu_1) p^3 + (m_1 C_2 + m_2 C_1 + \mu_1 \mu_2) p^2 + (\mu_1 C_2 + \mu_2 C_1) p + C_1 C_2 - C_2^2. \quad (4)$$

Встановлено, що при зміні m_j , μ_j , C_j ($j=1, 2$) у досить широких межах, рівняння (4) може мати:

- а) пару дійсних і пару комплексно-сполучених коренів;
- б) пару нульових і пару комплексно-сполучених коренів;
- в) дві пари комплексно-сполучених коренів.

Для початкових умов загального виду отримано аналітичні рішення, що описують процес зміни тензосигналу у часі.

Виявилося, що у випадку а) рішення системи обов'язково містять «вікові» доданки, а у разі б) – доданки, що мають експоненційне зростання, що в обох випадках призводить до необмеженого збільшення тензосигналу з часом. Лише у разі в) величина тензосигналу завжди обмежена.

Було виконано достатню кількість розрахунків на комп'ютері, внаслідок чого знайдено розрахункові формули, що містять характеристики вимірювальної системи m_j , μ_j , C_j і дозволяють встановити наявність комплексно-сполучених коренів без їх обчислення. Це дозволяє прогнозувати надійність роботи тензодатчиків, як в умовах експлуатації, так і на стадії проектування системи.

Показано, що вимірювальна система, що включає вагову платформу з вантажем, що рухається по ній, вага якого підлягає визначенню, може бути досліджена як двомасова коливальна система з демпфуванням.

Всебічний аналіз динаміки цієї системи показує, що сигнал тензодатчиків, укріплених на платформі тензометричних ваг, з достатньою точністю описується аналогічно коливанням лінійного осцилятора з загасанням рівнянням виду

$$u(t) = E + U_n \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (5)$$

де E – складова електричного сигналу, що відповідає вимірюваній масі об'єкта;

U, ω – амплітуда та частота складової електричного сигналу, що відповідає динамічній перешкоді;

φ – фаза перешкоди, в якій починається вимір.

Результати вимірювання маси об'єкта реалізуються у вигляді множини значень функції $u(t)$ взятих через малі рівні проміжки на інтервалі часу виміру. Виділення корисного сигналу такої вимірювальної системи розглядається як завдання визначення постійної E із рівняння (5) за відомими значеннями $u(t)$ на множині точок, що утворюють арифметичну прогресію з малим кроком.

Обґрунтовано наступний алгоритм розв'язання цього завдання:

1) за допомогою чисельного методу відшукуються два сусідні екстремуми функції;

2) інтервал часу між ними приймається за половину умовного періоду;

3) з (5) отримуємо лінійне рівняння алгебри

$$u(t) = E + k \left[u(t) - u\left(t + \frac{\pi}{\omega}\right) \right], \quad (6)$$

які пов'язують невідомі E та $k = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\pi d}{\omega}\right)}$. Це рівняння покладено основою

цифрового фільтра АЦП.

Застосовуючи (6) для достатньої кількості пар значень $u(t)$ та $u\left(t + \frac{\pi}{\omega}\right)$ формуємо перевизначену систему лінійних алгебраїчних рівнянь щодо E і k , наближене рішення яких відшукується чисельно методом найменших квадратів. Ефективний метод уточнення частоти перешкоди ґрунтується на використанні того очевидного факту, що інтеграл за періодом $\frac{2\pi}{\omega}$ від функції $\exp(\alpha t)[u(t) - E]$ повинен дорівнювати нулю, а можлива

нев'язка визначає поправку, що уточнює значення частоти. Запропонований метод визначення складової електричного сигналу, відповідної масі об'єкта, що вимірюється, можна без істотного коригування використовувати у разі наявності шумів, пов'язаних з роботою ланцюгів перетворювача. Слід лише застосувати згладжування дискретно заданої функції $u(t)$ щодо положення її експериментів.

Простота практичної реалізації методу очевидна, проте використання у ньому операцій визначення положення екстремумів функції, заданої дискретними значеннями і розв'язання перевизначеної системи рівнянь не дозволяє аналітично встановити похибку методу.

Для оцінки можливостей методу виконано імітаційне моделювання виділення корисного сигналу. За допомогою спеціальної програми для фіксованих значень α , ω , E , A , C – формується масив значень $u(t)$ за формулою (5) з додаванням випадкової помилки, яка має нормальний закон розподілу та задане середнє квадратичне відхилення. Потім запропонованим методом визначається значення E і порівнюється з точним значенням E , яке задається для даного сеансу моделювання. Встановлено, що у переважній більшості випадків точність визначення величини E пропонованим методом на один-два порядки перевищує точність його обчислення методами опосередкування. При цьому середнє відхилення відносної похибки не перевищує 0,02 % в широкому діапазоні зміни характеристик перешкоди та амплітуди «шумів».

Запропонований метод можна застосувати, якщо довжина реалізації дещо більша за півперіод осциляції – перешкоди, а його частину, пов'язану з уточненням частоти коливань – у разі, коли довжина цієї реалізації більша за період осциляції.

Висновки. Проаналізовано математичну модель джерела тензосигналу як двоосциляторної коливальної системи із загасанням. Знайдено аналітичні рішення отриманої системи диференціальних рівнянь та виконано аналіз цих рішень за довільних початкових умов. Аналітично визначено види тензосигналів, що відповідають робочому та аварійному режимам тензодатчиків. Синтезовані алгоритми придушення динамічних перешкод при обробці результатів вимірювань тензосигналів з незмінним та змінним середнім значеннями.

Запропоновано метод придушення динамічної перешкоди, що ґрунтується на математичній обробці пар відліків миттєвого значення тензосигналу, рознесених на половину періоду перешкоди.

Розроблено метод придушення динамічних перешкод тензосигналу з трендом середнього значення, заснований на предспотворенні огинаючої.

Виконано імітаційне моделювання синтезованих алгоритмів з метою оцінки їх ефективності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Азаров О.Д., Богомолів С.В., Крупельницький Л.В., Обертюх М.Р. Аналогові та аналого-цифрові пристрої системних перетворювачів форми інформації: підручник. Вінниця: ВНТУ, 2024. 316 с.

2. Чайковський А.В. Застосування аналого-цифрових перетворювачів: метод. посібник. Тернопіль: ТНТУ, 2020. 31 с. <https://elartu.tntu.edu.ua>
3. Обозовський С.С. Інформаційно-вимірювальна техніка. Методичні питання теорії вимірювань. К.: ІСДО, 2003. 424 с.
4. Паньків Р.С. Особливості аналого-цифрового перетворення з адаптивною дискретизацією сигналів. Львів: Національний університет «Львівська політехніка». <https://science.lpnu.ua>
5. Бортник Г., Бортник С., Бриль М., Бортник О. Паралельний аналого-цифровий перетворювач з випадковим перемиканням каналів. *Вісник Хмельницького національного університету*. Т. 339, № 4, 2024. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-339>
6. Doetsch G. *Hardbuch fer Laplace-Ttransformation. Theorie der Laplace-q Transformation*, BirkhausevVerlag. Basel-Stuttgart, 1980. 581 p.

REFERENCES

1. Azarov O.D., Bogomolov S.V., Krupelnyskyi LV., Obertyukh M.P. Analog and analog-to-digital devices of system converters of information form: textbook. Vinnytsia, VNTU. 2024. 316 p.
2. Tchaikovsky A.V. Applications analog-to-digital converters : method manual. Ternopil; TNTU. 2020. 31 p. <https://elartu.tntu.edu.ua>
3. Obozovsky S.S. Information and measuring equipment: methodological issues of measurement theory. Kyiv; ICDO. 2002. 424 p.
4. Pankov R.S. Features of analog-to-digital conversion with adaptive signal sampling: Lviv, National university «Lviv Polytechnic». <https://science.lpnu.ua>.
5. Bortnik G., Bortnik S., Bryl M., Bortnik O. Paralle analog-to-digital converters with randomly channel switching, Bulletin Khmelnytskyi National University. Volume 339, № 4, 2024. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-339>.
6. Doetsch G. *Hardbuch fer Laplace-Ttransformation. Theorie der Laplace-q Transformation*, BirkhausevVerlag. Basel-Stuttgart, 1980. 581 p.

Стаття надійшла до редакції 12.12.2024

Посилання на статтю: Воробьова О., Федорова К., Рожко О. Збільшення стійкості та точності електронних ваг для промислового зважування // *Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць*, 2025. № 2 (76). С. 121-127. DOI 10.47049/2226-1893-2025-2-121-127.

Article received 12.12.2024

Reference a journal artic: Vorobyova O., Fedorova K., Rozhko O. Increasing the stability and accuracy of electronics scales for indastrial weighing // *Herald of the Odesa National Maritime University: Coll. scient. works*, 2025. № 2 (76). P. 121-127. DOI 10.47049/2226-1893-2025-2-121-127.