

УДК 656.073.23:622.036

DOI 10.47049/2226-1893-2026-2-91-103

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ СИПКИХ ВАНТАЖІВ У ПОРТАХ

О.М. Воробйова

к.т.н., доцент,

зав. кафедрою Автоматизації та комп'ютерних інтегрованих технологій

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9285-3295>

vorobyovaem14@gmail.com

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, Одеса, Україна

О.К. Рожко

ст. викладач кафедри «Машинознавство і інженерна механіка»

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9572-1735>

ooonlineshop@gmail.com

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

Анотація. Сучасні тенденції завантаження – розвантаження сипких вантажів у портах пов'язані безпосередньо з вимірюванням маси цих вантажів за допомогою тензометричних кранових ваг. Кранові ваги в портах дозволяють вимірювати масу вантажу безпосередньо в процесі його підйому, поєднуючи підйомно-транспортні операції із зважуванням. Це унеможливорює транспортування вантажу на стаціонарні платформи, що, у свою чергу, прискорює перевалку вантажів, підвищує екологічність та автоматизує процес. Ще можна перерахувати ряд переваг при використанні кранових ваг у портах. Це запобігання перевантаженню кранів, обриву строп і безпосередньо поломки кранів, менше ушкоджується вантаж. Передача даних у масі здійснюється безпосередньо на табло і на відстань у необхідні облікові відділи порту.

Складність роботи кранових ваг полягає в тому, що необхідно забезпечити високу точність виміру за короткий час в умовах коливання вантажу на крані, вібрацій, ударів тощо.

У статті розглядається метод підвищення точності вимірювання маси на кранових терезах.

Для поліпшення результатів вимірювання пропонується алгоритм обробки сигналу тензодатчиків аналого-цифровим перетворювачем, який входить до складу кранових ваг, перетворює аналоговий сигнал на цифровий код і передає його як результат вимірювання.

Ключові слова: кранові ваги, перевантаження, точність вимірювання, динамічна похибка, алгоритм роботи, тензодатчики, аналого-цифровий перетворювач.

© Воробйова О.М., Рожко О.К., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

UDC 656.073.23:622.036

DOI 10.47049/2226-1893-2026-2-91-103

CURRENT AND REVENTANT TRENDS BOPPING CARGOES AT PORTS

Olena Vorobyova

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Automation and Computer Integrated Technologies

State University of Intellectual Technologies and Communications, Odesa, Ukraine

Olena Rozhko

Senior Lecturer

of the Department of Mechanical Engineering and Engineering Mechanics

Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine

Abstract. *Modern trends in loading and unloading of bulk cargo in ports are directly related to measuring the mass of these cargoes using strain gauge crane scales. Crane scales in ports allow measuring the mass of cargo directly during its lifting, combining lifting and transport operations with weighing. This makes it impossible to transport cargo to stationary platforms, which, in turn, accelerates cargo handling, increases environmental friendliness and automates the process. There are also a number of advantages to using crane scales in ports. This is the prevention of crane overloading, breakage of slings and direct crane breakage, less damage to the cargo. Mass data is transmitted directly to the display and over a distance to the necessary accounting departments of the port.*

The complexity of the operation of crane scales lies in the fact that it is necessary to ensure high measurement accuracy in a short time in conditions of cargo oscillation on the crane, vibrations, shocks, etc.

The article considers a method for increasing the accuracy of mass measurement on crane scales.

To improve the measurement results, an algorithm for processing the signal of strain gauges by an analog-to-digital converter is proposed, which is part of the crane scales, converts the analog signal into a digital code and transmits it as a measurement result.

Keywords: *crane scales, overload, measurement accuracy, dynamic error, operation algorithm, strain gauges, analog-to-digital converter.*

Вступ. Вантажообіг портів України постійно зростає. Основні тенденції перевантаження спрямовані на підвищення швидкості, екологічності та автоматизації процесів.

Автоматизація процесів завантаження-розвантаження сипких вантажів у портах пов'язана з обов'язковим виміром маси цих вантажів з використанням цифрових електронних тензометричних кранових ваг, що складаються з тензорезисторних датчиків, що перетворюють механічне зусилля в електричний сигнал і аналого-цифровий перетворювача (АЦП), що перетворюється на сигнал.

Незважаючи на багаторічний досвід використання АЦП у тензометричних терезах, вони недостатньо досліджені. Так, наприклад, досі невідомі шляхи уніфікації АЦП, через що типаж і число модифікацій надмірно розширені, хоча при цьому досі немає АЦП кранових ваг для плавильних виробництв.

Мета роботи. Основне питання процесу визначення маси за допомогою електричних тензометричних ваг – це підвищення точності за мінімального часу вимірювань. Специфіка роботи кранових ваг полягає в тому, що необхідно визначати точне значення вимірюваної маси в умовах вібрації, ударів, що виникають під час роботи крана, коливання безпосередньо вантажу на крані. Отже, потрібно забезпечити високу чутливість і точність роботи АЦП за малого часу спостереження за сигналом тензодатчиків, ураженому динамічною перешкодою, яка має гармонійний характер. Для цього в даній роботі пропонується розробка алгоритму обробки тензосигналу для відстеження миттєвого значення E .

Методи дослідження. При отриманні основних результатів використали численні методи теорії ймовірності, розв'язання перевизначених систем рівнянь алгебри, методи теорії диференціальних рівнянь.

Виклад основного матеріалу. В умовах динамічного характеру вантаження вимірюваний сигнал $U(t)$ не залишається постійним у часі

$$U(t) = E + U_n(t),$$

де E – справжнє значення;

$U_n(t)$ – гармонійна перешкода з амплітудою U_n .

Для синтезу алгоритму обробки тензосигналу з незмінним дійсним значенням E запропоновано введення попередніх викривлень огинаючої перешкоди шляхом модуляції швидкодії АЦП (рис. 1).

Попри твердження про те, що спотворення огинаючої призводить до похибки через неточне копіювання миттєвого значення $U(t) = E + U_n(t)$, виявляємо наступне. Якщо в АЦП отримати спотворену копію $U_k(t)$ миттєвого значення тензосигналу $U(t)$, ураженого гармонійною перешкодою з амплітудою U_n , можна досягти зниження похибки за рахунок $U_k < U_n$. Більше того, після моменту t_1 , що характеризується рівністю $U(t) = U_k(t)$, принципово можливо знизити швидкодію АЦП з таким розрахунком, щоб при змінному істинному значенні E копія $U_k(t)$ перетинала б точки t_2, t_3 нульових значень перешкоди (рис. 1).

При подальшому аналізі виходитимемо з діючих норм на час проходження шкали, що дорівнює 10 с.

Вихідний сигнал тензодатчиків описується подібно до осцилятора з загасанням рівнянням виду

$$U(t) = E + U_n e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \varphi). \quad (1)$$

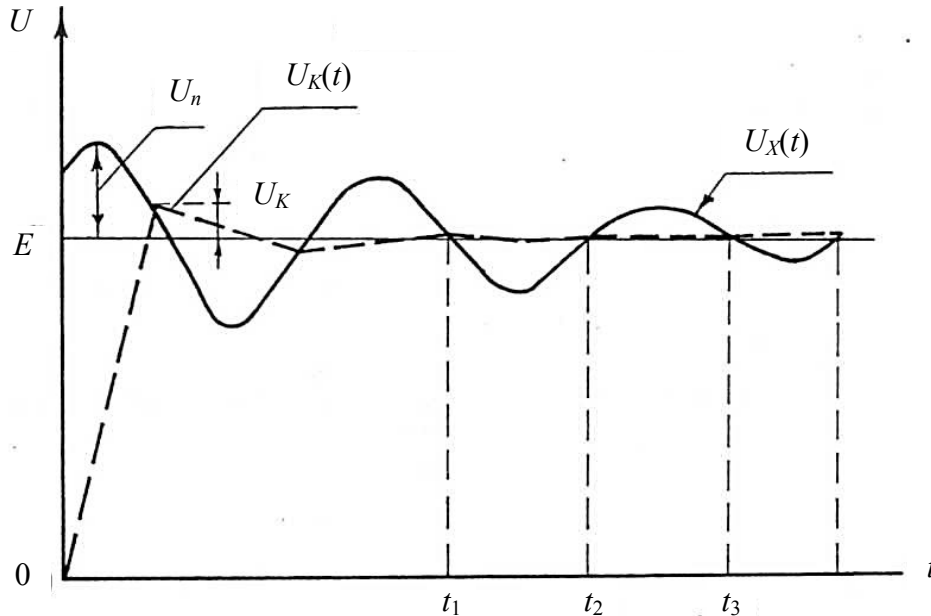


Рис. 1. Попередні викривлення огибаючої тензосигналу
з незмінним середнім значенням E

У завдання вимірювального АЦП входить найбільш точне визначення миттєвого значення E з рівняння (1) з огляду на те, що з часом E змінюється (монотонно збільшується чи зменшується) незначно. Отже, час виміру має бути настільки малим, щоб зафіксувати зміну вимірюваної величини.

АЦП реалізує результати вимірювання сигналу у вигляді множини значень $U(t)$, взятих через малі рівні проміжки часу системою рівнянь виду

$$\left\{ \begin{array}{l} U(t_1) = E + U_n e^{-\alpha t_1} \sin(\omega t_1 + \varphi) \\ U(t_2) = E + U_n e^{-\alpha t_2} \sin(\omega t_2 + \varphi) \\ U(t_3) = E + U_n e^{-\alpha t_3} \sin(\omega t_3 + \varphi) \\ \dots\dots\dots \\ U(t_n) = E + U_n e^{-\alpha t_n} \sin(\omega t_n + \varphi) \end{array} \right. \quad (2)$$

Нехай вимір починається в момент $t = 0$, де $U(t) = U(0)$ визначається з (1) як

$$U(0) = E + U_n \sin \varphi, \quad (3)$$

де $0 \leq \varphi \leq 2\pi$.

Тоді неважко отримати наступні залежності:

$$E = U(0) - U_n \sin \varphi; \quad U_n = \frac{U(0) - E}{\sin \varphi}. \quad (4)$$

З урахуванням (4) рівняння (1) набуває вигляду

$$U(t) = U(0) + U_n [-\sin \varphi + e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \varphi)]. \quad (5)$$

Алгоритм роботи АЦП має складатися з кількох етапів. Спочатку необхідно визначити справжнє значення E та фазу φ перешкоди, в якій починається вимір, у першому наближенні. Позначимо їх відповідно через E_0 та φ_0 . Припустимо, що характеристики системи α і ω до початку роботи відомі (нехай приблизно) і дорівнюють α_0 і ω_0 (надалі ці величини уточнюватимуться).

Нехай t_0 – аргумент першого максимуму. Відповідна цьому моменту напруга згідно (5) дорівнює

$$U(t) = U(0) + U_n [-\sin \varphi_0 + e^{-\alpha_0 t_0} \sin(\omega_0 t_0 + \varphi_0)] \quad (6)$$

і відшукується з допомогою чисельних методів з аналізу низки значень $U(t)$.

Продиференціюємо рівняння (1) по t і, вважаючи $t = t_0$, маємо

$$U_n e^{-\alpha_0 t_0} [-\alpha_0 \sin(\omega_0 t_0 + \varphi_0) + \omega_0 \cos(\omega_0 t_0 + \varphi_0)] = 0. \quad (7)$$

З (7) слідує

$$\operatorname{tg}(\omega_0 t_0 + \varphi_0) = \frac{\omega_0}{\alpha_0}. \quad (8)$$

Нехай

$$\omega_0 t_0 + \varphi_0 = \theta_0, \quad (9)$$

де

$$\theta_0 = \operatorname{arctg} \frac{\omega_0}{\alpha_0}. \quad (10)$$

Тоді значення φ_0 знаходиться за формулою

$$\varphi_0 = \theta_0 - \omega_0 t_0, \quad (11)$$

де t_0 – аргумент, який визначається автоматично в процесі роботи АЦП.

Значення E_0 визначається з таких міркувань. З урахуванням прийнятого позначення (3) рівняння (6) набуває наступного вигляду:

$$U(t_0) = U(0) + U_n [-\sin \varphi_0 + e^{-\alpha_0 t_0} \sin \theta_0]. \quad (12)$$

Підставляючи значення φ_0 з (11), після нескладних тригонометричних перетворень отримаємо

$$U(t_0) = U(0) + U_n [\cos \theta_0 \sin \omega_0 t_0 - \sin \theta_0 (\cos \omega_0 t_0 - e^{-\alpha_0 t_0})]. \quad (13)$$

З цього виразу випливає

$$U_n = \frac{U(t_0) - U(0)}{\cos \theta_0 \sin \omega_0 t_0 - \sin \theta_0 (\cos \omega_0 t_0 - e^{-\alpha_0 t_0})}. \quad (14)$$

Тепер знайдемо значення E_0 , використовуючи для цього перше зі співвідношень (4), підставляючи при цьому значення U_n з (14), а φ_0 з (11)

$$E_0 = U(0) - [U(t_0) - U(0)] \frac{\sin \theta_0 \cos \omega_0 t_0 - \cos \theta_0 \sin \omega_0 t_0}{\cos \theta_0 \sin \omega_0 t_0 - \sin \theta_0 (\cos \omega_0 t_0 - e^{-\alpha_0 t_0})}. \quad (15)$$

Визначимо вирази для $\sin \theta_0$ та $\cos \theta_0$, виконавши тригонометричні перетворення рівняння (8). Отримаємо

$$\cos \theta_0 = \frac{\alpha_0}{\sqrt{\alpha_0^2 + \omega_0^2}}; \quad \sin \theta_0 = \frac{\omega_0}{\sqrt{\alpha_0^2 + \omega_0^2}}, \quad (16)$$

де $0 < \theta_0 < \pi$.

Введемо позначення

$$r = \alpha_0^2 + \omega_0^2. \quad (17)$$

Тоді вираз (16) має такий вигляд:

$$\cos \theta_0 = \frac{\alpha_0}{r}; \sin \theta_0 = \frac{\omega_0}{r}. \quad (18)$$

Підставляючи навчені значення для $\cos \theta_0$ і $\sin \theta_0$ з (18) в (15), запишемо остаточно вираз визначення E_0

$$E_0 = \frac{U(0)\omega_0 e^{-\alpha_0 t_0} - U(t_0)(\omega_0 \cos \omega_0 t_0 - \alpha_0 \sin \omega_0 t_0)}{\omega_0(e^{-\alpha_0 t_0} - \cos \omega_0 t_0) + \alpha_0 \sin \omega_0 t_0}, \quad (19)$$

де величина $U(t_0)$ знаходиться чисельними методами, а відповідний момент t_0 – експериментально. Зауважимо, що на початку даного розділу було зроблено припущення, що характеристики α_0 і ω_0 до початку роботи імовірно відомі.

Ці значення E_0 (19) і φ_0 (11), знайдені за значенням першого максимуму, будуть надалі використані при визначенні параметрів модулятора швидкодії. Суть модуляції швидкодії ось у чому.

Для роботи вимірювального АЦП по алгоритму, що розробляється, його необхідно забезпечити пристроєм формування лінійної функції.

$$F_n(t) = K_n(t) + a_n, \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (20)$$

З початком вимірювання в момент включення формується перше плече ламаної (відрізок прямої $F_n(t)$), що виходить із початку координат, яка в цьому випадку описується рівнянням

$$F_1(t) = K_1 t_1,$$

де K_1 – кутовий коефіцієнт першого плеча.

Нехай t_1 – момент першого збігу значення плеча ламаної $F_1(t)$ з миттєвим значенням сигналу $U(t_1)$, визначеного за допомогою АЦП (рис. 2), тобто

$$F_1(t_1) = K_1 t_1 = U(t_1). \quad (21)$$

Для отримання моменту збігу за час, що дорівнює (приблизно) напівперіоду динамічної перешкоди, кутовий коефіцієнт першого плеча повинен дорівнювати

$$K_1 = \frac{U(0)\omega_0}{\pi}. \quad (22)$$

З (1) з урахуванням (4) та (19) отримуємо

$$K_1 t_1 = E + \frac{U(0) - E}{\sin \varphi_0} e^{-\alpha t_1} \sin(\omega t_1 + \varphi_0). \quad (23)$$

Тут φ_0 – значення початкової фази перешкоди, визначене (11) у першому наближенні. Знайдемо уточнене значення складової E за першим кроком роботи формувача лінійної функції, яке позначимо через E_1 . З (23) маємо

$$E_1 = \frac{K_1 t_1 \sin \varphi_0 - U(0) e^{-\alpha t_1} \sin(\omega t_1 + \varphi_0)}{\sin \varphi_0 - e^{-\alpha t_1} \sin(\omega t_1 + \varphi_0)}. \quad (24)$$

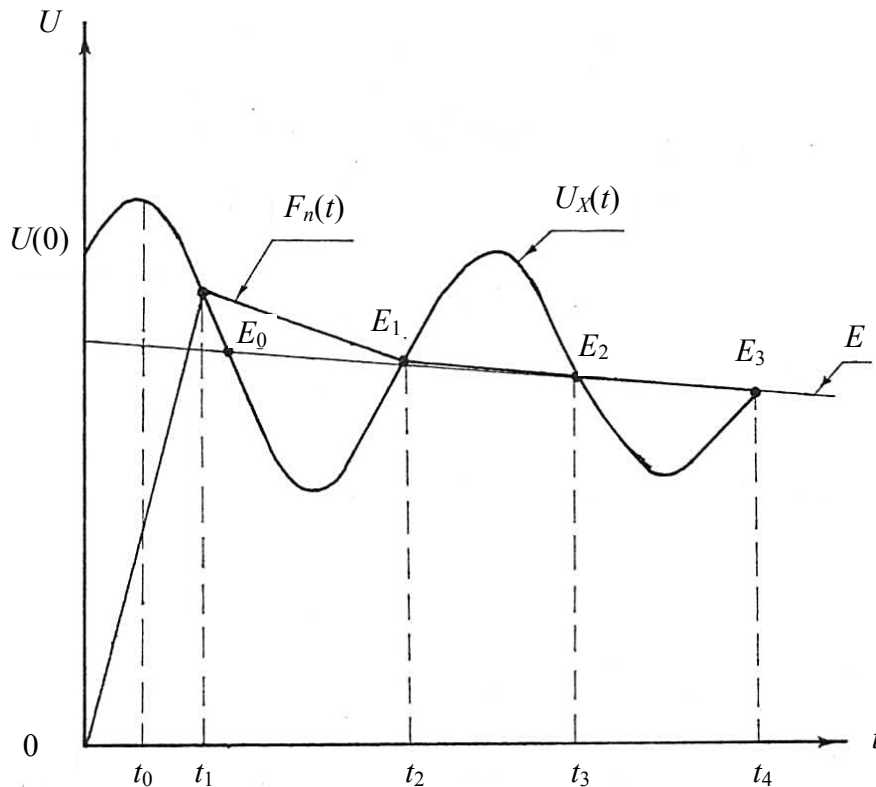


Рис. 2. До пояснення алгоритму придушення перешкод

Таким чином, отримано значення складової E_1 уточнене після першого кроку роботи формувача лінійної функції. Розглянемо тепер процедуру уточнення фази φ (проти φ_0), яку позначено через φ_1 . Для цього в рівняння (23) підставимо

уточнене формулою (24) значення

. (25)

Після виконання алгебраїчних перетворень маємо

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{[U(0) - E_0] \sin \omega t_1}{K_1 t_1 - E_0 - [U(0) - E_0] e^{-\alpha t_1} \cos \omega t_1}. \quad (26)$$

Знайдемо область визначення для $\varphi = \varphi_1$, виходячи з наступних міркувань. Перша похідна $U(t)$ для будь-яких довільних значень α і ω може бути обчислена шляхом диференціювання (1) по t

$$\frac{dU(t)}{dt} = -U_n e^{-\alpha t} [-\alpha \sin(\omega t + \varphi) + \omega \cos(\omega t + \varphi)]. \quad (27)$$

Підставляючи в (27) значення α і ω , визначені з (18) з урахуванням (8), отримаємо

$$\frac{dU(t)}{dt} = -U_n e^{-\alpha t} r \sin(\omega t + \varphi - \theta_0), \quad (28)$$

де $0 < \theta_0 < \frac{\pi}{2}$.

У момент $t = 0$ похідна $\frac{dU(t)}{dt}$ дорівнює

$$\frac{dU(t)}{dt} = -U_n r \sin(\varphi - \theta_0). \quad (29)$$

Розглянемо два можливі варіанти, рішення.

1) $\frac{dU(t)}{dt} > 0$. З фізичних міркувань випливає, що $U_n r$ завжди більше 0,

отже, маємо

$$\sin(\varphi - \theta_0) < 0. \quad (30)$$

Ця нерівність справедлива для випадку, де

$$\pi < \varphi - \theta_0 < 2\pi. \quad (31)$$

або

$$\pi + \theta_0 < \varphi < 2\pi + \theta_0. \quad (32)$$

2) $\frac{dU(t)}{dt} < 0$. Якщо при цьому врахувати, що $U_n r$ – позитивне число, то отримуємо

$$\sin(\varphi - \theta_0) > 0. \quad (33)$$

Нерівність (33) виконується лише в тому випадку, якщо

$$0 < \varphi - \theta_0 < \pi \quad (34)$$

або

$$\theta_0 < \varphi < \pi + \theta_0. \quad (35)$$

Отже, наприкінці першого кроку роботи АЦП по алгоритму, що розглядається, маємо наступні відомі значення параметрів функцій:

$K_1 t_1 = U(t_1)$ – показання АЦП при першому збігу його зі значенням функції, що виробляється пристроєм формування лінійної функції $F_n(t)$ в момент t_1 ;

E_1 – значення постійної складової вихідного сигналу певне (24) для першого кроку обчислення;

φ_1 – фаза динамічної перешкоди вихідного сигналу, обчислена по (26) першого кроку обчислень з уточненими інтервалами залежно від знака першої похідної функції $U(t)$.

Перейдемо до розгляду другого етапу роботи АЦП. Для визначення кутового коефіцієнта K_2 другого плеча ламаної лінії вважатимемо, що кінець другого плеча потрапляє до найближчої точки з ординатою E_1 (див. рис. 2). Виконання останньої умови можливе лише за

$$\sin(\omega t_2 + \varphi) = 0. \quad (36)$$

З рис. 2 слідує, що при цьому

$$\omega t_2 + \varphi = 2\pi, \quad (37)$$

звідки визначаємо

$$t_2 = \frac{2\pi - \varphi}{\omega}. \quad (38)$$

Якщо врахувати, що ордината характеристики $U(t)$ у момент $t = t_1$ дорівнює $K_1 t_1$, а на момент t_2 – визначається як E_1 , то можна записати вираз для визначення кутового коефіцієнта K_2 другого плеча ламаної лінії функції $F_n(t)$

$$K_2 = \frac{E_1 - K_1 t_1}{\frac{2\pi - \varphi}{\omega} - t_1}. \quad (39)$$

Запишемо рівняння другого плеча

$$F_2(t) = K_1 t_1 + \frac{E_1 - K_1 t_1}{\frac{2\pi - \varphi}{\omega} - t_1} (t_2 - t_1). \quad (40)$$

Розв'яжемо рівняння (40), вважаючи, що в момент $t = t_2$ настає збіг значення другого плеча функції $F_2(t_2)$ з миттєвим значенням сигналу $U(t_2)$, що вимірюється, тобто $F_2(t_2) = U(t_2)$. З урахуванням (4) отримаємо

$$U(t_1) + \frac{E_1 - U(t_1)}{\frac{2\pi - \varphi}{\omega} - t_1} (t_2 - t_1) = E + \frac{U(0) - E}{\sin \varphi} e^{-\alpha t_2} \sin(\omega t_2 + \varphi). \quad (41)$$

Введемо таке позначення

$$U(t_1) + \frac{E_1 - U(t_1)}{\frac{2\pi - \varphi}{\omega} - t_1} (t_2 - t_1) = \chi_1. \quad (42)$$

Тоді з урахуванням рівності (42) вираз (41) спрощується

$$\chi_1 = E + \frac{U(0) - E}{\sin \varphi} e^{-\alpha t_2} \sin(\omega t_2 + \varphi). \quad (43)$$

Визначимо з (43) значення E по другому кроці обчислень, позначивши при цьому через E_2 . Для цього вираз (43) підставимо замість φ значення φ_1 , уточнене після першого кроку роботи формувача лінійної функції

$$E_2 = \frac{\chi_1 \sin \varphi_1 - U(0) e^{-\alpha t_2} \sin(\omega t_2 + \varphi_1)}{\sin \varphi_1 - e^{-\alpha t_2} \sin(\omega t_2 + \varphi_1)}. \quad (44)$$

Наступний етап – уточнення значення φ після другого кроку, яке позначимо через φ_2 . Для цього у вираз (41) підставимо значення E_1 з формули (24), уточнене після першого кроку роботи, в результаті маємо

$$(\chi_1 - E_1) \sin \varphi_2 = [U(0) - E_1] e^{-\alpha t_2} \sin(\omega t_2 + \varphi_2). \quad (45)$$

Після нескладних тригонометричних перетворень отримуємо

$$\{\chi_1 - E_1 - [U(0) - E_1] \cos \omega t_2 e^{-\alpha t_2}\} \sin \varphi_2 = [U(0) - E_1] e^{-\alpha t_2} \sin \omega t_2 \cos \varphi_2. \quad (46)$$

Значення φ_2 , зрештою, визначається з наступного співвідношення:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{[U(0) - E_1] e^{-\alpha t_2} \sin \omega t_2}{\chi_1 - E_1 - [U(0) - E_1] e^{-\alpha t_2} \cos \omega t_2}, \quad (47)$$

де область визначення для φ_2 можна не уточнювати, так як результат обчислень (26) і (47) скоригує лише чисельне значення $\operatorname{tg} \varphi$, де φ_2 буде перебувати в інтервалі, визначеному раніше для φ_1 .

Аналізуючи вирази, представлені формулами (24) і (44), і, відповідно, (26) і (47) можна зробити наступний висновок: замінюючи індекс «1» на « n », а індекс «2» на « $(n+1)$ », отримуємо рекурентні співвідношення, які можна використовувати для знаходження параметрів E та φ при $(n+1)$ кількості плечей ламаної лінії функції, що виробляється пристроєм формування лінійної функції $F_n(t)$.

$$E_{(n+1)} = \frac{\chi_n \sin \varphi_n - U(0)e^{-\alpha t_{(n+1)}} \sin(\omega t_{(n+1)} + \varphi_n)}{\sin \varphi_n - e^{-\alpha t_{(n+1)}} \sin(\omega t_{(n+1)} + \varphi_n)}, \quad (48)$$

а

$$\operatorname{tg} \varphi_{(n+1)} = \frac{[U(0) - E_n]e^{-\alpha t_{(n+1)}} \sin \omega t_{(n+1)}}{\chi_n - E_n - [U(0) - E_n]e^{-\alpha t_{(n+1)}} \cos \omega t_{(n+1)}}. \quad (49)$$

Таким чином, отримані загальні вирази для визначення миттєвого значення складової E та фази динамічної перешкоди, в якій починається вимір. Кутовий коефіцієнт кожного плеча ламаної лінії знаходиться за формулою

$$K_{n+1} = \frac{E_n - K_n t_n}{\frac{(n+1)\pi - \varphi_n}{\omega} - t_n}. \quad (50)$$

Для достовірнішої оцінки результатів вимірювань після кожного кроку роботи АЦП необхідно уточнювати значення α та ω , які на початку роботи покладалися відомими та рівними α_0 і ω_0 , що особливо важливо при значенні, яке змінюється E з часом.

У разі використання запропонованого алгоритму роботи АЦП у кранових тензометричних вагах значення α_0 та ω_0 можна вважати відомими. Якщо дозволяє час вимірів, процес уточнень можна проводити необхідну кількість разів.

Висновки. Використання в алгоритмі чисельних методів, що розробляється, і вирішення перевизначеної системи алгебраїчних рівнянь не дозволяють встановити аналітично похибку визначення миттєвого значення E із рівняння (1). Можливості запропонованого алгоритму з'ясовано за допомогою імітаційного моделювання. Максимальна похибка, одержана в результаті, не перевищує 0,03 %.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Carlo H.J., Vis I.F.A., Roodbergen K.J. Storage Yard Operations in Container Terminals: Literature Overview, Trends, and Research Directions // European Journal of Operational Research. – 2014. – Vol. 235, № 2. – P. 412-430.
2. Carlo H.J., Vis I.F.A., Roodbergen K.J. Seaside Operations in Container Terminals: Literature Overview, Trends, and Research Directions // Flexible Services and Manufacturing Journal. – 2015. – Vol. 27, № 2-3. – P. 224-262.
3. Luo J., Wu Y., Halldorsson A., Song X. Storage and Stacking Logistics

- Problems in Container Terminals // OR Insight. – 2011. – Vol. 24, № 4. – P. 256-275.
4. Russell D., Ruamsook K., Roso V. Managing Supply Chain Uncertainty by Building Flexibility in Container Port Capacity: A Logistics Triad Perspective and the COVID-19 Case // Maritime Economics & Logistics. – 2022. – Vol. 24. – P. 92-113.
 5. Bolgov O. Method for Analytical Describing of the Bulk Carrier Loading Operations and Optimizing Them According to the Criterion of the Nautical Safety // Transport Systems and Technologies. – 2020. – № 35. – P. 19-31.
 6. Cao Z., Sun Q., Wang S. Dry Bulk Terminal Operations: A Critical Review of Models and Optimization Methods // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2025. – Vol. 178. – Article 105221.
 7. Benbrik O., Benmansour R., Rodrigues F. A Review of Bulk Terminal Operations: Status, Trends, and Future Outlook // Computers & Operations Research. – 2025. – Vol. 183. – Article 107199.
-
8. Kwa K., Gourvenec S., Evans T. et al. Rolling Table Centrifuge Modelling of Partially Saturated Granular Material to Inform on Instability During Solid Bulk Cargo Transport // Acta Geotechnica. – 2024. – Vol. 19. – P. 7677-7697.
 9. Голубенко О.О., Ляшенко І.М. Чисельні методи лінійної алгебри. – Київ: Видавничий дім «КМ Академія», 2016. – 312 с.
 10. Кузьмін В.О. Лінійна алгебра та чисельні методи: навч. посібник. – Харків: ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2019. – 284 с.

REFERENCES

1. Carlo H.J., Vis I.F.A., Roodbergen K.J. Storage Yard Operations in Container Terminals: Literature Overview, Trends and Research Directions // European Journal of Operational Research. – 2014. – Vol. 235, № 2. – P. 412-430.
2. Carlo H.J., Vis I.F.A., Roodbergen K.J. Seaside Operations in Container Terminals: Literature Overview, Trends and Research Directions // Flexible Services and Manufacturing Journal. – 2015. – Vol. 27, № 2-3. – P. 224-262.
3. Luo J., Wu Y., Halldorsson A., Song X. Storage and Stacking Logistics Problems in Container Terminals // OR Insight. – 2011. – Vol. 24, № 4. – P. 256-275.
4. Russell D., Ruamsook K., Roso V. Managing Supply Chain Uncertainty by Building Flexibility in Container Port Capacity: A Logistics Triad Perspective and the COVID-19 Case // Maritime Economics & Logistics. – 2022. – Vol. 24. – P. 92-113.
5. Bolgov O. Method for Analytical Describing of the Bulk Carrier Loading Operations and Optimizing Them According to the Criterion of the Nautical

- Safety // Transport Systems and Technologies. – 2020. – № 35. – P. 19-31.
6. Cao Z., Sun Q., Wang S. Dry Bulk Terminal Operations: A Critical Review of Models and Optimization Methods // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2025. – Vol. 178. – Article 105221.
 7. Benbrik O., Benmansour R., Rodrigues F. A Review of Bulk Terminal Operations: Status, Trends, and Future Outlook // Computers & Operations Research. – 2025. – Vol. 183. – Article 107199.
 8. Kwa K., Gourvenec S., Evans T. et al. Rolling Table Centrifuge Modelling of Partially Saturated Granular Material to Inform Instability During Solid Bulk Cargo Transport // Acta Geotechnica. – 2024. – Vol. 19. – P. 7677-7697.
 9. Golubenko O.O., Lyashenko I.M. Numerical methods of linear algebra. – Kyiv: "KM Academy" Publishing House, 2016. – 312 p.
 10. Kuzmin V.O. Linear algebra and numerical methods: teaching manual. – Kharkiv: KHNU named after V.N. Karazina, 2019. – 284 p.

Дата надходження статті: 29.05.2026

Дата прийняття статті: 31.05.2026

Дата публікації статті: 16.06.2026