

Розробка, дослідження та оптимізація ваговимірювальної системи

М.Д. Кошовий, Г.О. Черепашук, Є.Є. Калашніков, О.В. Заболотний, В.П. Сіроклин

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", вул. Чкалова, 17, 61070, Харків, Україна
kafedraapi@ukr.net

Анотація

Мета дослідження – підвищення техніко-економічних показників ваговимірювальних систем.

Розроблено систему з вимірювальним лотком, яка відрізняється від існуючих можливістю управління кутом нахилу лотка, вологістю і температурою сипкого матеріалу, що забезпечує високу точність вимірювання маси.

Дослідження ваговимірювальної системи виконувалось із застосуванням таких методів оптимального за вартісними витратами планування експерименту: табу-пошук, метод рою часток, повний перебір, метод, заснований на використанні коду Грея. Це дозволило скоротити вартісні витрати на реалізацію експерименту.

У результаті дослідження отримано математичні моделі у кодованих і натуральних значеннях факторів, які характеризують залежність похибки вимірювання від таких показників, як кут нахилу вимірювального лотка, вологість сипкого матеріалу, коефіцієнт тертя сипкого матеріалу в русі. З використанням математичної моделі отримані раціональні значення конструктивних параметрів ваговимірювальної системи, які забезпечують високу точність (похибка вимірювання не перевищує 0,20%).

Ключові слова: вимірювання; ваговимірювальна система; точність; план експерименту; математична модель; оптимізація.

Отримано: 22.04.2021

Відредаговано: 05.08.2021

Схвалено до друку: 12.08.2021

Постановка проблеми

Проблема дозування сипких матеріалів виникає в технологічних процесах на більшості підприємств гірничодобувної, хімічної, харчової промисловостей. Для випуску якісної продукції важливо підвищення точності дозування сипких матеріалів. Характерною особливістю ваговимірювальних систем, що застосовуються на багатьох підприємствах, є те, що вони морально застаріли, фізично зношені й вимагають заміни або модернізації.

На сучасних підприємствах завдяки впровадженню мікроелектронної техніки в стрічкових ваговимірювальних і вагодозувальних системах досягається точність дозування порядку 1,0%. Але сучасні вимоги технологічних процесів багатьох підприємств уже не задовольняє точність дозування, яка характерна для стрічкових ваговимірювальних систем.

У зв'язку з цим основним завданням удосконалення ваговимірювальних систем є підвищення точності вимірювання маси.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Теорія та принципи побудови автоматичних ваговимірювальних комплексів для зважування

маси у потоці на стрічкових вагах розглянуті в роботі [1]. На точність стрічкових ваг значним чином впливає спосіб передавання вагового навантаження від сипких матеріалів на ваговимірювальні давачі. Неможливість підвищення точності дозування сипких матеріалів стрічковими вагодозувальними системами обумовлена їхніми конструктивними особливостями: похибка залежить від натягу конвеєрної стрічки, нерівності, варіацій товщини, наявності місця склеювання стрічки, накопичення пилу на її частинах, тиску на неї сипкого матеріалу, що не рухається; змінне погонне навантаження на стрічку; мікропереміщення вагового ролика порівняно з люфтом в основній опорі роликів [1–4].

Для ліквідації розглянутих недоліків стрічкових ваг доцільно застосувати двоагрегатні ваговимірювальні системи з ваговимірювальним лотком.

Відома ваговимірювальна система [5] має такі недоліки: відсутність управління такими параметрами, як кут нахилу вимірювального лотка, вологість і температура сипкого матеріалу; неможливість моделювання параметрів вимірювання масової витрати матеріалів.

Мета статті – поліпшення техніко-економічних показників ваговимірювальної системи, а також підвищення ефективності її дослідження на основі оптимального за вартісними витратами планування експериментів.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- розробити ваговимірювальну систему з вимірювальним лотком, у якій реалізовано управління такими параметрами: кут нахилу лотка; вологість і температура сипкого матеріалу;
- підвищити ефективність експериментальних досліджень, спрямованих на отримання адекватної математичної моделі процесу вимірювання;
- провести експериментальні дослідження, спрямовані на створення математичної моделі процесу вимірювання і визначення раціональних конструктивних параметрів ваговимірювальної системи.

Розробка ваговимірювальної системи для дозування гранульованих або порошкоподібних матеріалів

Загальний вигляд розробленої ваговимірювальної системи показано на рис. 1, а функціональну схему системи – на рис. 2.

До складу ваговимірювальної системи (рис. 1) входить бункер 1 із компонентом, що дозується, електровібратор 2, давач вологості матеріалу 3, які розміщені у бункері 1. Під бункером 1 містяться стрічкові ваги 4 із електроприводом 5. До стрічкових ваг 4 підключено давач швидкості руху стрічки 6. Під стрічковими вагами 4 закріплено похилий вимірювальний лоток 7, який за допомогою шарнірних з'єднань поєднано з трьома тензорезистивними давачами сили 8, 9, 10, що підключені до відповідних аналого-цифрових перетворювачів 11, 12, 13, з'єднаних із мікропроцесором 14 (рис. 2). Давач розтягування стрічки 15, давач швидкості руху стрічки 6 стрічкових ваг 4, а також кінцеві

вимикачі 16 і давач температури 17, що закріплені безпосередньо на стрічкових вагах 4 (рис. 1), підключені до мікропроцесора 14, який з'єднаний з адресним дешифратором 18 і накопичувачем пам'яті 19 (рис. 2). До мікропроцесора 14 також підключено оперативний запам'ятовуючий пристрій 20, регістр адреси 21, блок індикації 22 і функціональну клавіатуру 23. Цифро-аналоговий перетворювач 24 підключено до електроприводу 5 та електровібратора 2. До мікропроцесора 14 через цифро-аналоговий перетворювач 24 підключені дозатор 25, що розташовується у бункері 1, та електропривід 26 вимірювального лотка 7. Давач температури 17 підключений до терморегулятора 27 (рис. 1).

Принцип вимірювання маси гранульованого або порошкоподібного матеріалу ґрунтується на тому, що пересуваючись по вимірювальному лотку 7, він впливає на тензорезистивні давачі сили розтягування (ТДС) 8, 9, 10. Сигнали з цих давачів через аналого-цифрові перетворювачі 11, 12, 13 передаються на мікропроцесор 14, у якому виконується їх обробка.

Контроль за надходженням гранульованого або порошкоподібного матеріалу на стрічкові ваги 4 відбувається за допомогою кінцевих вимикачів 16.

Для того щоб урахувати вплив вологості гранульованого або порошкоподібного матеріалу, використовується давач вологості 3, в якості якого можна застосувати ємнісні давачі [6]. Якщо вологість матеріалу не збігається із заданими значеннями, тоді мікропроцесор 14 за допомогою цифро-аналогового перетворювача 24 передає сигнал на дозатори 25, щоб змінити вологість матеріалу. У той же час відбувається перемішування сипкого матеріалу в бункері 1, із використанням електровібратора 2, який підключається мікропроцесором 14. Мікропроцесор 14 через цифро-аналоговий

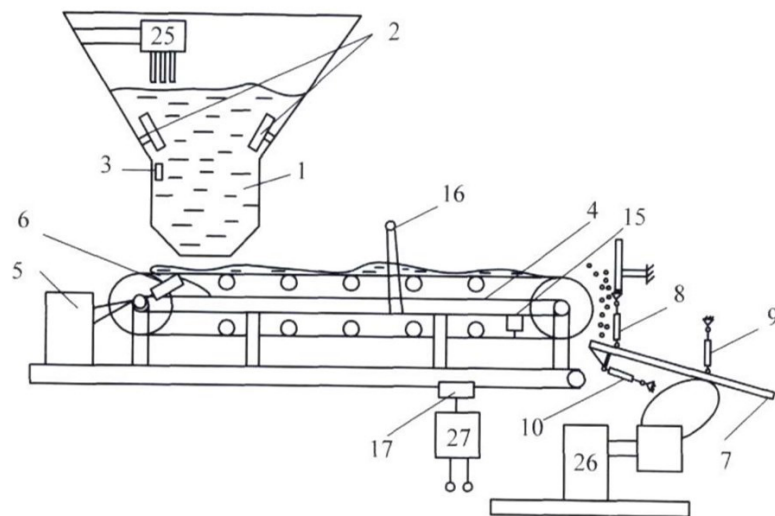


Рис. 1. Загальний вигляд розробленої ваговимірювальної системи

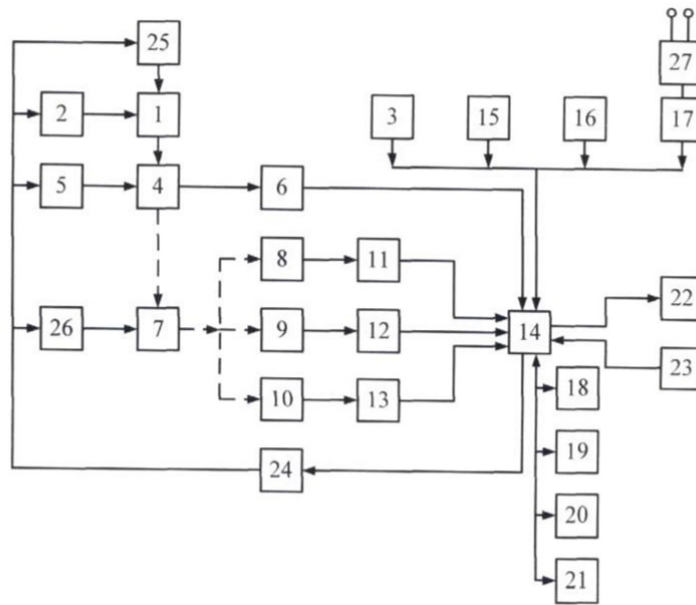


Рис. 2. Функціональна схема ваговимірювальної системи

перетворювач 24 також видає сигнал на електропривід 26, щоб встановити відповідний кут нахилу вимірювального лотка 7.

Для стабілізації температури гранульованого або порошкоподібного матеріалу застосовується терморегулятор 27, до складу якого входить датчик температури 17, підключений до мікропроцесора 14.

Кількість матеріалу, що поступає на вимірювальний лоток 7, можливо регулювати, змінюючи швидкість руху стрічки стрічкових ваг 4.

Мікропроцесором 14 розраховується маса гранульованого або порошкоподібного матеріалу за допомогою сигналів, що пройшли через аналого-цифрові перетворювачі 11, 12, 13 із тензорезистивних датчиків сили розтягування 8, 9, 10. Більш детальний опис роботи системи наведено в роботі [7].

Можливість управління кутом нахилу вимірювального лотка, швидкістю руху стрічки стрічкових ваг, вологістю і температурою сипкого матеріалу дозволила забезпечити високу точність для дозування сипкого матеріалу, а також підвищити точність вимірювання ваговимірювальної системи.

Дослідження та оптимізація ваговимірювальної системи

Дослідження виконувалися на дослідному зразку ваговимірювальної системи з вимірювальним лотком.

Як критерій оптимізації було вибрано похибку вимірювання δ , % у ваговимірювальній системі. Факторами, що впливають на цей показник, були вибрані: X_1 – кут нахилу ваговимірювального лотка α , градуси; X_2 – вологість сипкого матеріалу W , %; X_3 – коефіцієнт тертя сипкого матеріалу в русі f_d . Інтервали варіювання та рівні факторів наведені в табл. 1.

Для проведення дослідження було вибрано початковий план повного факторного експерименту, матрицю планування якого наведено в табл. 2.

Враховуючи, що досліди коштують дорого, необхідно оптимізувати початковий план експерименту за критерієм вартісних витрат на його реалізацію. При цьому вартості зміни рівнів факторів наведені в табл. 3.

Для оптимізації початкового плану експерименту (табл. 2) були застосовані такі методи: рою часток [8, 9], табу-пошуку [8, 9], метод, заснований на використанні коду Грея [10], повний перебір.

Таблиця 1

Рівні та інтервали варіювання факторів

Позначення факторів	Рівні факторів			Інтервали варіювання	Розмірність
	-1	0	+1		
$X_1(\alpha)$	30	37,5	45	7,5	градуси
$X_2(W)$	5	15	25	10	%
$X_3(f_d)$	0,48	0,58	0,68	0,10	–

Таблиця 2

Матриця планування експерименту

Номер досліджу	Фактори		
	X ₁	X ₂	X ₃
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1

Таблиця 3

Вартості зміни значень рівнів факторів

Позначення факторів	Вартості	
	зміни із "-1" в "+1", ум. од.	зміни із "+1" в "-1", ум. од.
X ₁ (α)	12,0	8,0
X ₂ (W)	16,0	24,0
X ₃ (f _d)	10,0	10,0

У табл. 4 наведені плани експерименту, які отримані із використанням перерахованих методів.

При цьому оптимальними за вартістю реалізації є плани, що отримані методом на основі коду Грея та повним перебором. Для реалізації повного перебору необхідно було проаналізувати 40320 варіантів перестановок, у той час як метод на основі коду Грея будується вручну без жодних розрахунків.

Вартості реалізації експериментів за цими планами наведені в табл. 5.

Досліди проводилися на сипких компонентах різної вологості. Похибка вимірювання ваговиміральної системи розраховувалася за формулою

$$\delta = \frac{M_{\text{вим}} - M_{\text{етал}}}{M_{\text{етал}}} \cdot 100\%,$$

де $M_{\text{етал}}$ – маса сипкого матеріалу, яка вимірювалася на вагах для статичного зважування і дорівнює

30 кг; $M_{\text{вим}}$ – маса сипкого матеріалу, що вимірювалася на дослідному макеті ваговиміральної системи.

Результати дослідження ваговиміральної системи за оптимальним планом експерименту наведені в табл. 6.

Аналіз експериментальних даних, наведених у табл. 6, показав, що ваговимірвальна система має раціональні технічні характеристики при параметрах, що задані рядком 3 матриці планування експерименту: кут нахилу ваговимірвального лотка $\alpha=45^\circ$, вологість сипкого матеріалу $W=5\%$; коефіцієнт тертя сипкого матеріалу в русі $f_d = 0,68$. При цьому ваговимірвальна система буде мати мінімальну похибку вимірювання $\delta = 0,31\%$.

Для подальшої оптимізації ваговимірвальної системи за критерієм точності використовувався метод крутого спуску [11]. Результати оптимізації наведені в табл. 7.

Таблиця 4

Плани експериментів, отримані різними методами оптимізації

Табу-пошук				Рою часток				Код Грея				Повний перебір			
№ досліджу	Фактори			№ досліджу	Фактори			№ досліджу	Фактори			№ досліджу	Фактори		
	X ₁	X ₂	X ₃		X ₁	X ₂	X ₃		X ₁	X ₂	X ₃		X ₁	X ₂	X ₃
1	+1	-1	-1	1	+1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1
2	+1	+1	-1	2	+1	+1	-1	2	+1	-1	-1	2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1	3	-1	+1	-1	3	+1	-1	+1	3	+1	-1	+1
4	-1	+1	+1	4	-1	+1	+1	4	-1	-1	+1	4	-1	-1	+1
5	+1	+1	+1	5	+1	+1	+1	5	-1	+1	+1	5	-1	+1	+1
6	+1	-1	+1	6	+1	-1	+1	6	+1	+1	+1	6	+1	+1	+1
7	-1	-1	+1	7	-1	-1	+1	7	+1	+1	-1	7	+1	+1	-1
8	-1	-1	-1	8	-1	-1	-1	8	-1	+1	-1	8	-1	+1	-1

Вартість реалізації отриманих планів експериментів

Вартість реалізації планів експериментів	Метод пошуку			
	Табу-пошук	Рою часток	Код Грея	Повний перебір
Вартість початкового плану, ум. од.	164	164	164	164
Вартість оптимального плану, ум. од.	110	110	102	102

Таблиця 6

Матриця планування та результати експерименту

Номер досліду	Позначення факторів			Результати експерименту	
	X_1	X_2	X_3	$M_{вим}$, кг	δ , %
1	-1	-1	-1	29,35	2,17
2	+1	-1	-1	29,08	3,06
3	+1	-1	+1	29,91	0,31
4	-1	-1	+1	29,44	1,87
5	-1	+1	+1	30,63	2,11
6	+1	+1	+1	30,16	0,53
7	+1	+1	-1	30,75	2,50
8	-1	+1	-1	30,80	2,67

Таблиця 7

Результати оптимізації за методом крутого спуску

Послідовність етапів крутого спуску	Фактори			Параметр оптимізації	
	X_1	X_2	X_3	δ	
Коефіцієнти математичної моделі b_i	0,301	0,050	-0,699	–	
Добуток $b_i \Delta X_i$	2,258	0,5	-0,069	–	
Округлений крок	2,26	0,5	-0,07	–	
Крок, зменшений у 2 рази	1,13	0,25	-0,03	–	
Натуральні значення факторів	α	W	f_d	–	
Досліди	1	37,5	15	0,58	1,903
	2	38,6	14,75	0,61	1,60
	3	39,7	14,5	0,64	1,21
	4	40,8	14,25	0,67	0,73
	5	41,9	14	0,70	0,20

У результаті обробки експериментальних даних, наведених у табл. 6, отримані такі математичні моделі ваговимірювальної системи:

а) в кодованих значеннях факторів

$$\delta = 1,903 - 0,301 X_1 + 0,050 X_2 - 0,699 X_3 - 0,676 X_1 X_2 - 1,026 X_1 X_3 + 0,064 X_2 X_3 + 0,128 X_1 X_2 X_3;$$

б) в натуральних значеннях факторів

$$\delta = -22,37 + 0,793 \alpha - 5,19 W + 44,14 f_d - 1,368 \alpha f_d - 2,39 \alpha W f_d - 102,42 W f_d - 0,14 \alpha W.$$

Таким чином, у результаті оптимізації отримані раціональні значення конструктивних параметрів ваговимірювальної системи: кут нахилу ваговимірювального лотка $\alpha = 41,9^\circ$; вологість сипкого матеріалу $W = 14\%$; коефіцієнт тертя сипкого матеріалу в русі $f_d = 0,70$. У цьому випадку похибка зважування сипкого матеріалу не перевищує 0,20%.

Висновки

1. Розроблено ваговимірювальну систему з вимірювальним лотком, яка відрізняється від існуючих можливістю управління кутом нахилу вимірювального лотка, вологістю і температурою сипкого матеріалу, що забезпечує високу точність дозування цього матеріалу.

2. У результаті оптимізації ваговимірювальної системи з використанням розробленої математичної моделі отримані раціональні конструктивні параметри ваговимірювальної системи, які дозволяють із високою точністю (похибка не перевищує 0,20%) вимірювати масу сипкого матеріалу.

3. Розроблено методику підвищення ефективності експериментальних досліджень системи, що дозволяє скоротити вартісні витрати на її дослідження.

4. Розроблена система може знайти широке застосування для дозування сипких матеріалів у різноманітних технологічних виробництвах.

Разработка, исследование и оптимизация весоизмерительной системы

Н.Д. Кошевой, Г.А. Черепашчук, Е.Е. Калашников, А.В. Заболотный,
В.П. Сироклы

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт", ул. Чкалова, 17,
61070, Харьков, Украина
kafedraapi@ukr.net

Аннотация

Разработана весоизмерительная система с измерительным лотком, которая отличается от известных возможностью управления углом наклона лотка, влажностью и температурой сыпучего материала, что обеспечивает большую точность измерения массы.

Для исследования системы использовались следующие методы оптимального по стоимостным затратам планирования эксперимента: табу-поиск, метод роя частиц, полный перебор, метод, основанный на коде Грея. Это позволило сократить стоимостные затраты на реализацию эксперимента.

В результате исследования получены математические модели в кодированных и натуральных значениях факторов, которые характеризуют зависимость погрешности измерений от таких факторов, как угол наклона измерительного лотка, влажность сыпучего материала, коэффициент трения сыпучего материала в движении. С использованием математической модели получены рациональные значения конструктивных параметров весоизмерительной системы, которые обеспечивают высокую точность (погрешность не превышает 0,20%).

Ключевые слова: измерения; весоизмерительная система; точность; план эксперимента; математическая модель; оптимизация.

Development, research and optimization of weight measuring system

N. Koshevoy, G. Cherepashchuk, Ye. Kalashnikov, O. Zabolotnyi,
V. Siroklyn

National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Chkalova Str., 17, 61070, Kharkiv, Ukraine
kafedraapi@ukr.net

Abstract

The main task of the research is to improve technical and economic indicators of weight measuring system and to increase the efficiency of its research on the basis of cost-optimal planning of experiments.

A system with a measuring tray has been developed, and it is different from existing systems with a possibility to control inclination angle of a tray, moisture content and temperature of a bulk substance, what provides better accuracy of mass measurement.

The researches of weight measuring system were performed using the following methods of cost-optimal experiment planning: taboo search, particle swarm method, exhaustive search, Gray code based method. It gave possibility to reduce cost of implementing the experiment.

To perform the research of weight measuring system, a plan of a full-factor experiment was selected, which was optimized for the cost of its implementation by using a method based on the Gray code.

In the result of research, mathematical models in coded and natural values of factors were obtained. They characterize the dependence of the measurement acceptable error on such indicators as the angle of the measuring tray, the humidity of the bulk material, the coefficient of friction of the bulk material in motion. Using a mathematical model, rational values of the design parameters of the weight measuring system were obtained, which provide high accuracy (measurement acceptable error does not exceed 0.20%): the angle of the weight measuring tray $\alpha = 41.9^\circ$; humidity of loose material $W = 14\%$; the coefficient of friction of the bulk material in motion $f_d = 0.70$.

The developed weight measuring system can be widely used for dosing of bulk materials in various technological productions.

Keywords: measurements; weight measuring system; accuracy; plan of experiment; mathematic model; optimization.

Список літератури

1. Жуковицкий В.И. Основы теории и принципы построения автоматических весоизмерительных комплексов в горнорудной промышленности: монография. Днепропетровск: Нац. горн. ун-т, 2014. 243 с.
2. Назаров В.Н., Круг О.В. Существующие конструкции и способы поверки конвейерных весов и их совершенствование. *Метрологическое обеспечение весоизмерительной техники “ВЕСЫ – 2006”*: сб. докладов Всероссийской науч.-практ. конф., 4–8 сентября 2006. Самара: ВНИИМС, 2006. С. 55–67.
3. Шубин И.Н., Свиридов М.М., Таров В.П. Технологические машины и оборудование. Сыпучие материалы и их свойства: учеб. пособие для вузов. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. 76 с.
4. Першина С.В., Катыльмов А.В., Однолюк В.Г., Першин В.Ф. Весовое дозирование зернистых материалов. Москва: Машиностроение, 2009. 260 с.
5. Ваговимірювальна система: пат. 27285, Україна, МПК G01F 11/00. №U200706404; заявл. 08.06.07; опубл. 25.10.07, Бюл. № 17.
6. Zabolotnyi O., Zabolotnyi V., Koshevoy N. Primary measuring transducer of moisture content for grain quality control. *Український метрологічний журнал*. 2020. № 3. С. 42–49. doi: 10.24027/2306-7039.3.2020.216844
7. Ваговимірювальна система: пат. 129696, Україна, МПК G01F 11/02. №U201804607; заявл. 26.04.18; опубл. 12.11.2018, Бюл. № 21.
8. Кошевой Н.Д., Костенко Е.М., Беляева А.А. Сравнительный анализ методов оптимизации при исследовании весоизмерительной системы и терморегулятора. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2018. № 4. С. 179–187. doi: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-4-17>
9. Кошевой Н.Д., Костенко Е.М., Муратов В.В., Крюков А.М., Биленко А.И., Морозов А.А. Сравнительный анализ методов оптимизации по стоимостным (временным) затратам планов полного факторного эксперимента. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2020. № 1. С. 54–62. doi: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-1-6>
10. Кошовий М.Д., Дергачов В.А., Павлик Г.В., Заболотний О.В., Кошова І.І., Костенко О.М. Метод побудови планів багатofакторних експериментів з мінімальною кількістю змін рівнів факторів та оптимальних за вартісними (часовими) витратами. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2020. № 4. С. 55–64. doi: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-4-6>
11. Адлер Ю.П., Маркова Е.М., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Программированное введение в планирование эксперимента. Москва: Наука, 1971. 284 с.
12. Principles of building automatic weighting complexes in mining industry: monograph]. Dnepropetrovsk, 2014. 243 p. (in Rus.)
13. Nazarov V.N., Krug O.V. Sushhestvuyushhie konstrukcii i sposoby poverki konveyernykh vesov i ih sovershenstvovanie [Existing constructions and methods for examination of conveyor weights and improvement of them]. *Proceedings of All-Russian Scientific and Practical Conference “Metrological support of weighing equipment “LIBRA – 2006”*. Samara, 2006, pp. 55–67 (in Russian).
14. Shubin I.N., Sviridov M.M., Tarov V.P. Tehnologicheskie mashiny i oborudovanie. Syuchie materialy i ih svojstva [Technological machines and equipment. Bulk materials and their properties]. Tambov, 2005. 76 p. (in Russian).
15. Pershina S.V., Katalymov A.V., Odnolko V.G., Pershin V.F. Vesovoe dozirovanie zernistykh materialov [Weight dosing of granular materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 260 p. (in Russian).
16. Pat. 27285 UA, MPK G01 F11/00, no. U200706404. Vahovymiriuvalna sistema [Mass measuring system]. Publ. 25.10.07 (in Ukrainian).
17. Zabolotnyi O., Zabolotnyi V., Koshevoy N. Primary measuring transducer of moisture content for grain quality control. *Ukrainian Metrological Journal*, 2020, no. 3, pp. 42–49. doi:10.24027/2306-7039.3.2020.216844
18. Pat. 129696 UA, MPK G01 F11/02, no. U201804607. Vahovymiriuvalna sistema [Mass measuring system]. Publ. 12.11.2018 (in Ukrainian).
19. Koshevoy N.D., Kostenko Ye.M., Belyaeva A.A. Sravnitelnyy analiz metodov optimizatsii pri issledovanii vesoizmeritelnoy sistemy i termoregulyatora [Comparative analysis of optimization methods in the investigation of a weigh-measuring system and thermoregulatory]. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2018, no. 4, pp. 179–187 (in Russian). doi: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-4-17>
20. Koshevoy N.D., Kostenko Ye.M., Muratov V.V., Kryukov A.M., Bilenko A.I., Morozov A.A. Sravnitelnyy analiz metodov optimizatsii po stoimostnym (vremennym) zhatram planov polnogofaktornogo eksperimeta [Comparative analysis of optimization methods by cost (time) costs of full factor experiment plans]. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2020, no. 1, pp. 54–62 (in Russian). doi: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-1-6>
21. Koshevoy N.D., Dergachov V.A., Pavlyk H.V., Zabolotnyi O.V., Koshevaya I.I., Kostenko E.M. Metod pobudovy planiv bahatofaktornykh eksperymetiv z minimalnoiu kilkistiu zmin rivniv faktoriv ta optymalnykh za vartisnymi (chasovymi) vytratamy [The method of building plans of multifactorial experiments with minimal number of factors levels measurements and optimal by cost (time) expenses]. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2020, no. 4, pp. 55–64 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-4-6>
22. Adler Ju.P., Markova E.M., Granovskij Ju.V. Planirovanie eksperimeta pri poiske optimalnykh uslovij. Programirovanoe vvedenie v planirovanie eksperimeta [Planning of experiment, while finding of optimal conditions. Programmed introduction to planning of the experiment]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 284 p. (in Russian).

References

1. Zhukovickij V.I. Osnovy teorii i principy postroeniya avtomaticheskikh vesoizmeritelnykh kompleksov v gornorudnoj promyshlennosti: monografiya [Basics of theory and prin-