

МЕТОД ПОБУДОВИ ПЛАНІВ БАГАТОФАКТОРНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ З МІНІМАЛЬНОЮ КІЛЬКІСТЮ ЗМІН РІВНІВ ФАКТОРІВ ТА ОПТИМАЛЬНИХ ЗА ВАРТІСНИМИ (ЧАСОВИМИ) ВИТРАТАМИ

Кошовий М. Д. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри інтелектуальних вимірювальних систем та інженерії якості, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

Дергачов В. А. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інтелектуальних вимірювальних систем та інженерії якості, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

Павлик Г. В. – канд. техн. наук, доцент кафедри інтелектуальних вимірювальних систем та інженерії якості, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

Заболотний О. В. – д-р техн. наук, доцент, декан ф-ту систем управління літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

Кошова І. І. – аспірант кафедри інтелектуальних вимірювальних систем та інженерії якості, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

Костенко О. М. – д-р техн. наук, професор, професор кафедри технологій та обладнання переробних та харчових виробництв, Полтавська державна аграрна академія, Полтава, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Вирішено актуальну задачу розробки методу побудови планів багатофакторних експериментів (БФЕ) з мінімальною кількістю змін рівнів факторів та оптимальних за вартісними (часовими) витратами.

Мета роботи: розробка методу та засобів синтезу планів багатофакторних експериментів з мінімальною кількістю змін рівнів факторів та оптимальних за вартісними (часовими) витратами.

Методи. Застосування методів планування експериментів дає можливість зменшити вартісні (часові) витрати при дослідженні різноманітних технологічних процесів, пристроїв та систем.

Мінімізація кількості змін рівнів факторів при побудові планів багатофакторних експериментів також призводить до зменшення вартості (часу) на їх реалізацію.

Запропонований раніше метод побудови планів багатофакторних експериментів, оснований на застосуванні коду Грея, дає можливість мінімізувати в них кількість змін рівнів факторів. Але ці плани не завжди являються мінімальними за вартісними (часовими) витратами.

В зв'язку з цим виникає задача розробки методу та засобів побудови планів багатофакторних експериментів з мінімальною кількістю змін рівнів факторів та оптимальних за вартісними (часовими) витратами. Суть запропонованого методу полягає в наступному: генерування перестановок з мінімальним числом транспозицій сусідніх елементів; для кожного отриманого плану визначається кількість змін рівнів факторів шляхом розрахунку відстані по Хеммінгу для сусідніх пар двійкових слів; запис плану з мінімальною кількістю змін рівнів факторів в множину D ; аналіз двійкових кодів, що входять у множину D , серед яких присутні коди, отримані з коду Грея шляхом E , H та (E, H) перетворень; пошук серед множини модифікованих кодів Грея $G(E, H)$ таких, що відповідають оптимальним за вартісними (часовими) витратами планам експерименту.

Результати. Розроблено програмне забезпечення, що реалізує запропонований метод побудови планів з мінімальною кількістю змін рівнів факторів та оптимальних за вартісними (часовими) витратами. Програмне забезпечення може синтезувати оптимальні плани експериментів для дослідження об'єктів з кількістю факторів $k \leq 4$.

Висновки. Проведені комп'ютерні експерименти направлені на побудову оптимальних планів для дослідження таких об'єктів як технологічний процес виготовлення деталей гарячим штампуванням та слідкуюча система підтвердили працездатність та ефективність розробленого методу та програмного забезпечення, що його реалізує. Наукову новизну роботи становить метод, що дозволяє синтезувати плани багатофакторних експериментів з мінімальною кількістю змін рівнів факторів та оптимальних за вартісними (часовими) витратами. Практична значимість результатів роботи в тому, що розроблене програмне забезпечення може знайти широке застосування при дослідженні технологічних процесів, пристроїв та систем, на яких можлива реалізація активного експерименту.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: метод, оптимальний план експерименту, рівні факторів, перетворення, множина, вартість, час, програмне забезпечення.

АБРЕВІАТУРИ

БФЕ – багатофакторний експеримент.

НОМЕНКЛАТУРА

B_i – номер стовпця, що знаходиться на i -му місці;

C_i – інверсія i -го стовпця;

D – множина планів БФЕ з мінімальною кількістю змін рівнів факторів;

E – множина перестановок стовпців коду;

$G(E)$ – модифікований код Грея, отриманий за допомогою E перетворень;

$G(H)$ – модифікований код Грея, отриманий за допомогою H перетворень;

$G(E, H)$ – модифікований код Грея, отриманий за допомогою E та H перетворень;

H – множина інверсій стовпців коду;

i – поточний номер перетворення;

k – кількість факторів;

L – кількість сформованих планів БФЕ з мінімальною кількістю змін рівнів факторів;

M – план БФЕ;

M_i^* – план БФЕ, отриманий у результаті i -го перетворення;

n – кількість дослідів;

P – множина перетворень;

p_i – вид i -го перетворення;

q – кількість змін рівнів факторів;

X – двійкове число;

z – кількість перетворень;

ρ – відстань по Хеммінгу.

ВСТУП

Планування експерименту доцільно застосовувати для підвищення ефективності експериментальних досліджень. В класичних роботах з планування експерименту вважали, що досліді в плані являються рівнозатратними. Але це не так. Тому зміна порядку проведення дослідів при реалізації плану експерименту суттєво впливає на вартість (час) його проведення. При цьому вартість (час) реалізації експерименту залежить від кількості змін рівнів факторів у його плані. Мінімальна кількість змін рівнів факторів характерна для планів експериментів, побудованих методом, оснований на застосуванні коду Грея. Але плани синтезовані цим методом не завжди являються оптимальними за вартістю або часом їх реалізації. Тому виникає задача розробки методу побудови планів багатофакторних експериментів з мінімальною кількістю змін рівнів факторів та оптимальних за вартісними (часовими) витратами.

Об'єкт дослідження: процеси оптимізації за вартісними (часовими) витратами планів багатофакторних експериментів.

Предмет дослідження: методи та засоби побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатофакторних експериментів.

Мета дослідження: розробка та дослідження методу побудови планів багатофакторних експериментів з мінімальною кількістю змін рівнів факторів та оптимальних за вартісними (часовими) витратами.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для досягнення поставленої мети дослідження необхідно вирішити наступні задачі:

– розробити метод побудови планів багатофакторних експериментів з мінімальною кількістю змін рівнів факторів та оптимальних за вартісними (часовими) витратами;

– розробити програмне забезпечення, що реалізує даний метод;

– для кількості факторів $k=3$ з допомогою розробленого програмного забезпечення синтезувати та дослідити множину планів з мінімальною кількістю змін рівнів факторів;

– довести працездатність та ефективність розробленого методу при оптимізації за вартісними (часовими) витратами планів експериментів для дослідження технологічних процесів, пристроїв та систем.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Для побудови оптимальних планів багатофакторних експериментів можна застосовувати методи комбінаторної оптимізації [1–11]. Відомі також розроблені методи побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатофакторних експериментів в [12–15]. Ці методи мають свої переваги та недоліки. Суттєві їх недоліки: низька швидкодія не завжди отримується точне рішення, а лише близьке до оптимального. Плани, що синтезуються методом, оснований на застосуванні коду Грея [12] мають мінімальну кількість змін рівнів факторів, але не завжди оптимальні за вартісними (часовими) витратами на їх реалізацію.

Метод повного перебору при сучасному рівні розвитку техніки дає змогу побудувати оптимальні за вартісними (часовими) витратами плани тільки для кількості факторів $k \leq 3$.

Таким чином, виникає задача розробки методу побудови планів багатофакторних експериментів з мінімальною кількістю змін рівнів факторів та оптимальних за вартісними (часовими) витратами.

3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Метод побудови множини планів БФЕ з мінімальною кількістю змін рівнів факторів складається з наступних етапів.

Етап 1. Установлюємо початкові значення поточних параметрів: $i = 0$, $L = 0$.

Етап 2. Визначаємо поточний номер перетворення $i = i + 1$ та його вид p_i .

Етап 3. Формуємо план БФЕ, отриманий у результаті i -го перетворення $M_i^* = M(p_i)$.

Етап 4. Визначаємо кількість змін рівнів факторів у плані M_i^* :

$$q = \sum_{j=1}^{n-1} \rho(X_j, X_{j+1}).$$

Етап 5. Якщо $q > n-1$, то переходимо до п. 7.

Етап 6. $L=L+1$, $D_L = M_i^*$.

Етап 7. Якщо $i < z$, то переходимо до етапу 2.

Етап 8. Кінець.

Розглянемо приклад побудови множини планів повного БФЕ з мінімальною кількістю змін рівнів факторів для $n=8$ і $k=3$.

При описі планів БФЕ значення «+1» замінимо на «1», а значення «-1» замінимо на «0».

Початковий план БФЕ, представлений у вигляді двійкових кодів, має вигляд $M = \{000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111\}$.

Для розглянутого завдання множина перетворень – це множина всіх перестановок. Для заданої кількості факторів k кількість перетворень $z = (2^k)!$ і істотно росте з ростом значення k . Аналіз способів генерування перестановок [16] показав, що найбільш ефективним є генерування всіх перестановок з мінімальним числом транспозицій сусідніх елементів. У табл. 1 наведений фрагмент генерування перестановок для $k=3$.

План БФЕ в результаті i -го перетворення $M_i^* = M(p_i)$ виходить шляхом перетворення в плані $M_{i-1}^* = M(p_{i-1})$ тільки двох його наборів. Наприклад, план $M_2^* = \{001, 000, 010, 011, 100, 101, 110, 111\}$ у результаті перетворення $P = \{2,3,1,4,5,6,7,8\}$ перетвориться в план $M_3^* = \{001, 010, 000, 011, 100, 101, 110, 111\}$ і т.д.

Для кожного отриманого плану БФЕ проводиться оцінка кількості змін рівнів факторів у плані шляхом визначення відстані по Хеммінгу для сусідніх пар двійкових слів. Наприклад, для плану $M = \{001, 010, 011, 100, 000, 101, 110, 111\}$ кількість змін рівнів факторів у плані визначається в такий спосіб:

$$q = \rho(001, 010) + \rho(010, 011) + \rho(011, 100) + \rho(100, 000) + \rho(000, 101) + \rho(101, 110) + \rho(110, 111) = 12.$$

Якщо кількість змін рівнів факторів у плані є мінімальною ($q=n-1$), то план записується в множину D .

У табл. 2 наведений фрагмент аналізу характеристик планів БФЕ.

У роботі [14] наведений фрагмент множини планів багатофакторних експериментів з мінімальною кількістю змін рівнів факторів для $k=3$, отриманої за допомогою описаного методу.

Описаний метод побудови планів повного БФЕ експерименту дозволяє побудувати каталоги оптимальних по кількості змін рівнів факторів і вибір оптимального за вартістю (часом) реалізації варіанта проводити не на всій множині можливих планів, а тільки серед планів, що входять у каталог, кількість яких значно менше. Для наведеного вище приклада кількість перетворень 40320, а кількість оптимальних планів у каталозі – 144.

Аналіз представників каталогу показує, що в нього входить код Грея. На рис. 1 показаний розподіл двійкових кодів.

Таблиця 1 – Генерування перестановок з мінімальним числом транспозицій сусідніх елементів для $k=3$

№	P								№	P							
1	1	2	3	4	5	6	7	8	2	2	1	3	4	5	6	7	8
3	2	3	1	4	5	6	7	8	4	2	3	4	1	5	6	7	8
5	2	3	4	5	1	6	7	8	6	2	3	4	5	6	1	7	8
7	2	3	4	5	6	7	1	8	8	2	3	4	5	6	7	8	1
9	3	2	4	5	6	7	8	1	10	3	2	4	5	6	7	1	8
11	3	2	4	5	6	1	7	8	12	3	2	4	5	1	6	7	8
13	3	2	4	1	5	6	7	8	14	3	2	1	4	5	6	7	8
15	3	1	2	4	5	6	7	8	16	1	3	2	4	5	6	7	8
17	1	3	4	2	5	6	7	8	18	3	1	4	2	5	6	7	8
19	3	4	1	2	5	6	7	8	20	3	4	2	1	5	6	7	8
21	3	4	2	5	1	6	7	8	22	3	4	2	5	6	1	7	8
23	3	4	2	5	6	7	1	8	24	3	4	2	5	6	7	8	1
25	3	4	5	2	6	7	8	1	26	3	4	5	2	6	7	1	8
27	3	4	5	2	6	1	7	8	28	3	4	5	2	1	6	7	8
29	3	4	5	1	2	6	7	8	30	3	4	1	5	2	6	7	8
31	3	1	4	5	2	6	7	8	32	1	3	4	5	2	6	7	8
33	1	3	4	5	6	2	7	8	34	3	1	4	5	6	2	7	8
35	3	4	1	5	6	2	7	8	36	3	4	5	1	6	2	7	8
37	3	4	5	6	1	2	7	8	38	3	4	5	6	2	1	7	8
39	3	4	5	6	2	7	1	8	40	3	4	5	6	2	7	8	1
41	3	4	5	6	7	2	8	1	42	3	4	5	6	7	2	1	8
43	3	4	5	6	7	1	2	8	44	3	4	5	6	1	7	2	8
45	3	4	5	1	6	7	2	8	46	3	4	1	5	6	7	2	8
...																	

Таблиця 2 – Аналіз характеристик планів БФЕ

M	q	Коментар
000,001,010,011,100,101,110,111	11	
001,000,010,011,100,101,110,111	10	
001,010,000,011,100,101,110,111	12	
001,010,011,000,100,101,110,111	10	
001,010,011,100,000,101,110,111	12	
000,010,011,001,100,101,110,111	9	
010,000,011,001,100,101,110,111	10	
010,011,000,001,100,101,110,111	10	
010,011,001,000,100,101,110,111	8	
010,011,001,100,000,101,110,111	10	
010,011,100,000,101,001,110,111	12	
010,011,100,101,000,001,110,111	12	
010,011,100,101,001,000,110,111	10	
010,011,100,101,001,110,000,111	14	
010,011,100,101,001,110,111,000	13	
010,011,100,101,110,001,111,000	15	
000,100,101,001,011,010,110,111	7	$L=1$
100,001,101,010,110,000,111,011	13	
100,001,101,010,000,110,111,011	11	
100,001,101,000,010,110,111,011	9	
100,001,000,101,010,110,111,011	11	
100,000,001,101,010,110,111,011	9	
000,100,001,101,010,110,111,011	10	
000,100,101,001,010,110,111,011	8	
100,000,101,001,010,110,111,011	9	
100,101,000,001,010,110,111,011	9	
100,101,001,000,010,110,111,011	7	$L=2$
100,101,001,010,000,110,111,011	9	
100,101,001,010,110,000,111,011	11	
100,101,001,010,110,111,000,011	11	
100,101,001,010,110,111,011,000	9	
000,001,100,101,110,111,011,010	9	
000,001,101,100,110,111,011,010	7	$L=3$
100,101,010,001,110,111,011,000	13	
001,100,101,000,110,111,011,010	10	
001,100,000,101,110,111,011,010	10	
001,000,100,101,110,111,011,010	8	
...		

Код Грея має найменшу кількість змін, але він тільки один і його значення «жорстко прив'язані» до позиційного коду та не допускають перестановку рядків.

Аналіз двійкових кодів, що входять у множину кодів з мінімальними змінами показав, що серед них присутні коди, отримані з коду Грея за допомогою певних перетворень. Такі коди будемо називати модифікованими кодами Грея.

© Кошовий М. Д., Дергачов В. А., Павлик Г. В., Заболотний О. В., Кошова І. І., Костенко О. М., 2020
 DOI 10.15588/1607-3274-2020-4-6

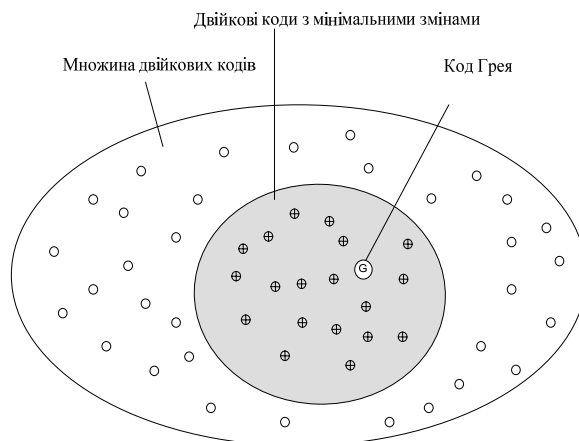


Рисунок 1 – Розподіл двійкових кодів

На рис. 2 показані модифіковані коди Грея, що входять у множину двійкових кодів з мінімальними змінами.

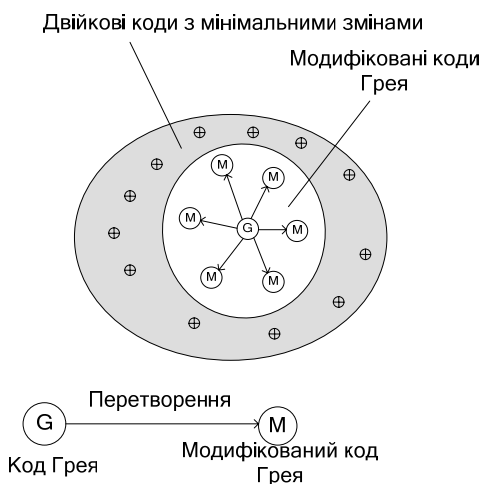


Рисунок 2 – Модифіковані коди Грея

Серед можливих перетворень визначені такі, що зберігають основну властивість коду Грея – мінімальну кількість змін. Розглянемо ці перетворення.

Множина E перетворень $E = \{E_1, \dots, E_d\}$ – це перестановка стовпців k -розрядного коду Грея. E_1 відповідає коду Грея (тобто перестановок немає), значення стовпців позначено $B_1 \dots B_k$. У таблиці 3 наведені E перетворення для $k=3$.

Множина H перетворень $H = \{H_1, \dots, H_m\}$ – це інверсія стовпців k -розрядного коду Грея. Перетворення H_i задається у вигляді двійкового набору, у якому значення «0» означає, що інверсії відповідного стовпця немає і він позначається літерою «В». Якщо значення «1», то відбувається інверсія стовпця і він позначається літерою «С».

Приклади H перетворень коду Грея для $k=3$ наведені у табл. 4.

У табл. 5 наведені модифіковані $G(E,H)$ коди для $k=3$.

Таблиця 3 – E перетворення кодів Грея

E_1			E_2			E_3			E_4			E_5			E_6		
B_1	B_2	B_3	B_1	B_3	B_2	B_2	B_1	B_3	B_2	B_3	B_1	B_3	B_1	B_2	B_3	B_2	B_1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0
0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0
0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1
1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1

Таблиця 4 – Приклади H перетворень кода Грея для $k=3$

H_1			H_2			H_3			H_4		
0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1
B_1	B_2	B_3	B_1	B_2	C_3	B_1	C_2	B_3	B_1	C_2	C_3
0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1
0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0
0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0
0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1
1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1
1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0
1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0
1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1
H_5			H_6			H_7			H_8		
1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1
C_1	B_2	B_3	C_1	B_2	C_3	C_1	C_2	B_3	C_1	C_2	C_3
1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1
1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0
1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0
1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1
0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1
0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0
0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1

Таблиця 5 – Модифіковані $G(E,H)$ коди для $k=3$

	E	H	$G(E,H)$
1	1	1	000, 001, 011, 010, 110, 111, 101, 100
2	1	2	001, 000, 010, 011, 111, 110, 100, 101
3	1	3	010, 011, 001, 000, 100, 101, 111, 110
4	1	4	011, 010, 000, 001, 101, 100, 110, 111
5	1	5	100, 101, 111, 110, 010, 011, 001, 000
6	1	6	101, 100, 110, 111, 011, 010, 000, 001
7	1	7	110, 111, 101, 100, 000, 001, 011, 010
8	1	8	111, 110, 100, 101, 001, 000, 010, 011
9	2	1	000, 010, 011, 001, 101, 111, 110, 100
10	2	2	001, 011, 010, 000, 100, 110, 111, 101
11	2	3	010, 000, 001, 011, 111, 101, 100, 110
12	2	4	011, 001, 000, 010, 110, 100, 101, 111
13	2	5	100, 110, 111, 101, 001, 011, 010, 000
14	2	6	101, 111, 110, 100, 000, 010, 011, 001
15	2	7	110, 100, 101, 111, 011, 001, 000, 010
16	2	8	111, 101, 100, 110, 010, 000, 001, 011
17	3	1	000, 001, 101, 100, 110, 111, 011, 010
18	3	2	001, 000, 100, 101, 111, 110, 010, 011
19	3	3	010, 011, 111, 110, 100, 101, 001, 000
20	3	4	011, 010, 110, 111, 101, 100, 000, 001
21	3	5	100, 101, 001, 000, 010, 011, 111, 110
22	3	6	101, 100, 000, 001, 011, 010, 110, 111
23	3	7	110, 111, 011, 010, 000, 001, 101, 100
24	3	8	111, 110, 010, 011, 001, 000, 100, 101
25	4	1	000, 010, 110, 100, 101, 111, 011, 001
26	4	2	001, 011, 111, 101, 100, 110, 010, 000
27	4	3	010, 000, 100, 110, 111, 101, 001, 011
28	4	4	011, 001, 101, 111, 110, 100, 000, 010
29	4	5	100, 110, 010, 000, 001, 011, 111, 101
30	4	6	101, 111, 011, 001, 000, 010, 110, 100
31	4	7	110, 100, 000, 010, 011, 001, 101, 111
32	4	8	111, 101, 001, 011, 010, 000, 100, 110
33	5	1	000, 100, 101, 001, 011, 111, 110, 010
34	5	2	001, 101, 100, 000, 010, 110, 111, 011
35	5	3	010, 110, 111, 011, 001, 101, 100, 000
36	5	4	011, 111, 110, 010, 000, 100, 101, 001
37	5	5	100, 000, 001, 101, 111, 011, 010, 110
38	5	6	101, 001, 000, 100, 110, 010, 011, 111
39	5	7	110, 010, 011, 111, 101, 001, 000, 100
40	5	8	111, 011, 010, 110, 100, 000, 001, 101
41	6	1	000, 100, 110, 010, 011, 111, 101, 001
42	6	2	001, 101, 111, 011, 010, 110, 100, 000
43	6	3	010, 110, 100, 000, 001, 101, 111, 011
44	6	4	011, 111, 101, 001, 000, 100, 110, 010
45	6	5	100, 000, 010, 110, 111, 011, 001, 101
46	6	6	101, 001, 011, 111, 110, 010, 000, 100
47	6	7	110, 010, 000, 100, 101, 001, 011, 111
48	6	8	111, 011, 001, 101, 100, 000, 010, 110

Для автоматизації процесу побудови каталогів планів БФЕ з мінімальною кількістю змін рівнів факторів розроблено програмне забезпечення (свід. про реєстр. автор. права на твір №№74877, 74881, 89032, Україна).

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для дослідження слідуючої системи в роботі [14] наведений оптимальний план експерименту з вартістю реалізації 13,60 ум. од., отриманий методом повного перебору, а також план, побудований методом на

основі коду Грея, що має вартість реалізації 17,60 ум. од. За допомогою розробленого методу та програмного забезпечення, що його реалізує, отримані три оптимальні плани експериментів з вартістю реалізації 13,60 ум. од. кожний (табл. 6).

За допомогою описаного методу для дослідження технологічного процесу виготовлення деталей гарячим штампуванням отримані два оптимальні плани з часом реалізації 113,25 хв. кожний (табл. 7).

Таблиця 6 – Оптимальні плани експерименту для дослідження слідкуючої системи

G(1,6)			G(1,7)			G(1,8)		
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	+1	-1
+1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	-1
+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
-1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	+1
-1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	-1
-1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1

Таблиця 7 – Оптимальні плани експерименту для дослідження технологічного процесу виготовлення деталей гарячим штампуванням

№№ п/п	G(1,1)			G(6,6)		
	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	-1	+1	-1	-1
2	-1	-1	+1	+1	-1	+1
3	-1	+1	+1	+1	+1	+1
4	-1	+1	-1	+1	+1	-1
5	+1	+1	-1	-1	+1	-1
6	+1	+1	+1	-1	+1	+1
7	+1	-1	+1	-1	-1	+1
8	+1	-1	-1	-1	-1	-1

План експерименту, отриманий методом на основі коду Грея, також має час реалізації 113, 25 хв.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

При проведенні комп'ютерних експериментів отримані наступні результати.

Метод, заснований на застосуванні модифікованих кодів Грея, дає вигравш за вартістю реалізації плану експерименту для дослідження слідкуючої системи в 1,29 раза у порівнянні з планом, отриманим на основі коду Грея. А збіг за вартістю реалізації з планом, отриманим методом повного перебору, вказує на працездатність та ефективність запропонованого методу. Співпадання за часом реалізації планів експерименту для дослідження технологічного процесу виготовлення деталей гарячим штампуванням, отриманих методами, основаними на застосуванні коду Грея та модифікованих кодів Грея, вказує на те, що в деяких випадках оптимальний результат дає і метод на основі коду Грея.

6 ОБГОВОРЕННЯ

При побудові планів для дослідження слідкуючої системи показано, що плани багатофакторного експерименту, синтезовані методом з використанням коду Грея, мають мінімальну кількість змін рівнів факто-

рів, але не завжди оптимальні за вартістю (часом) реалізації експерименту. Тому доцільно для оптимізації планів багатофакторного експерименту за вартісними (часовими) витратами застосовувати метод, оснований на використанні модифікованих кодів Грея.

Розроблене програмне забезпечення для реалізації запропонованого методу синтезу оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатофакторного експерименту дозволяє суттєво скоротити множину планів для пошуку оптимального.

ВИСНОВКИ

1. В роботі вирішена актуальна задача з розробки методу побудови планів багатофакторного експерименту з мінімальною кількістю змін рівнів факторів та скороченню множини планів для пошуку оптимального за вартісними (часовими) витратами.

2. Показано, що метод побудови планів багатофакторних експериментів, оснований на застосуванні коду Грея, не завжди дає оптимальний за вартістю (часом) реалізації план. Тому доцільно застосовувати метод, заснований на використанні модифікованих кодів Грея.

3. Розроблено програмне забезпечення, яке реалізує запропонований метод побудови оптимальних за вартістю (часом) реалізації планів багатофакторних

експериментів та скорочує множину пошуку цих планів.

4. Наукова новизна роботи заключається в тому, що вперше запропоновано метод побудови оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів багатofакторного експерименту, оснований на побудові кодів з мінімальною кількістю змін та з заданими властивостями, що дозволяє будувати оптимальний план без перебору варіантів перестановок дослідів, так як пошук ведеться на множині типових варіантів без побудови самих планів, а розглядаються тільки їх характеристики, визначаються параметри оптимального плану і його вид.

5. Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблений метод та програмне забезпечення дозволяють скоротити вартісні та часові витрати на дослідження технологічних процесів, пристроїв і систем.

6. Перспективи подальших досліджень полягають в застосуванні розробленого методу та програмного забезпечення для оптимізації дробових факторних експериментів

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Hoskins D. S. Combinatorics and Statistical Inferecing / D. S. Hoskins // *Applied Optimal Designs*. – 2007. – № 4. – P. 147–179.
2. Morgan J. P. Association Schemes: Designed Experiments, Algebra and Combinatorics / J. P. Morgan // *Journal of the American Statistical Association*. – 2005. – Vol. 100, № 471. – P. 1092–1093.
3. Bailey R. A. Combinatorics of optimal designs / R. A. Bailey, P. G. Cameron // *Surveys in Combinatorics*. – 2009. – V. 365. – P. 19–73.
4. Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiments, 9th Edition / D. C. Montgomery. – Wiley, 2017. – 629 p.
5. Bartos B. J. Design and analysis of time series experiments / B. J. Bartos, R. Mc Cleary, D. Mc Dowall. – Oxford : Oxford University Press, 2017. – 393 p.
6. Berger P. D. Experimental Design with Applications in Management, Engineering and the Sciences / P. D. Berger, R. E. Maurer. – Celli New York : Springer, 2018. – 640 p.
7. Rodrigues M. I. Experimental Design and Process Optimization / M. I. Rodrigues, A. F. Iemma. – N.-Y. : CRC Press, 2016. – 336 p.
8. Wu C. F. J. Experiments: Planning, Analysis, and Optimization / C. F. J. Wu., M. S. Hamada. – Wiley, 2015. – 743 p.
9. Карпенко А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой : учебное пособие / А. П. Карпенко. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 446 с.
10. Halchenko Y. Ya. Development of excitations structure RBF- metamodels of inoving concentric dycurrent probe / Y. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, V. V. Tychkov // *Electrical engeneering & electromechanics*. – 2019. – № 2. – P. 28–38. DOI: 10.20998/2074-272X.2019.2.05.
11. Jones B. C. Efficient designs with minimal aliasing / B. C. Jones, C. J. Nachtsheim // *Technometrics*. – 2011. – № 53. – P. 62–71.
12. Koshevoy M. Research and optimization of the eddy current transducer of dielectric coatings' thickness on metal surfaces of products / M. Koshevoy, O. Zabolotnyi, M. Tsekhovskiyi et al. // *Ukrainian Metrological Journal*. – 2020. – № 2. – P. 33–39. DOI:10.24027/2306-7039.2.2020.208935
13. Koshevoy N. D. Application of the fish search method for optimization plans of the full factor experiment / N. D. Koshevoy, E. M. Kostenko, V. V. Muratov // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – 2020. – № 2. – P. 44–55. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-2-5
14. Koshevoy N. D. Research of multiple plans in multi-factor experiments with a minimum number of transitions of levels of factors / N. D. Koshevoy, E. M. Kostenko, A. V. Pavlyk at al. // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – 2019. – № 2. – P. 53–59. DOI:10.15588/1607-3274-2019-2-6
15. Koshevoy N. D. Comparative analysis of optimization methods by cost (time) costs of full factor experiment plans / N. D. Koshevoy, E. M. Kostenko, V. V. Muratov et al. // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – 2020. – № 1. – P. 54–62. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-1-6
16. Bona M. Combinatorics of permutations / M. Bona. – N. -Y. : CRC Press, 2012. – 478 p.

Стаття надійшла до редакції 25.09.2020.
Після доробки 02.11.2020.

УДК519.24

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ПЛАНОВ МНОГОФАКТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С МИНИМАЛЬНЫМ КОЛИЧЕСТВОМ ИЗМЕНЕНИЙ УРОВНЕЙ ФАКТОРОВ И ОПТИМАЛЬНЫХ ПО СТОИМОСТНЫМ (ВРЕМЕННЫМ) ЗАТРАТАМ

Кошевой Н. Д. – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой интеллектуальных измерительных систем и инженерии качества, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Дергачев В. А. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры интеллектуальных измерительных систем и инженерии качества, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Павлик А. В. – канд. техн. наук, доцент кафедры интеллектуальных измерительных систем и инженерии качества, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Заболотный А.В. – д-р техн. наук, доцент, декан ф-та систем управления летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Кошевая И. И. – аспирант кафедры интеллектуальных измерительных систем и инженерии качества, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Костенко Е. М. – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры технологий и оборудования перерабатывающих и пищевых производств, Полтавская государственная аграрная академия, Полтава, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Решена актуальная задача разработки метода построения планов многофакторных экспериментов (МФЭ) с минимальным количеством измерений уровней факторов и оптимальных по стоимостным (временным) затратам.

Цель работы: разработка метода и средств синтеза планов многофакторных экспериментов с минимальным количеством изменений уровней факторов и оптимальных по стоимостным (временным) затратам.

Методы: применение методов планирования экспериментов дает возможность уменьшить стоимостные (временные) затраты при исследовании разнообразных технологических процессов, устройств и систем.

Минимизация количества изменений уровней факторов при построении планов многофакторных экспериментов также приводит к уменьшению стоимости (времени) на их реализацию.

Предложенный ранее метод построения планов многофакторных экспериментов, основанный на применении кода Грея, дает возможность минимизировать в них количество изменений уровней факторов. Но эти планы не всегда являются оптимальными по стоимостным (временным) затратам. В связи с этим возникает задача разработки метода и средств построения планов многофакторных экспериментов с минимальным количеством изменений уровней факторов и оптимальных по стоимостным (временным) затратам.

Сущность предложенного метода заключается в следующем: генерирование перестановок с минимальным числом транспозиций соседних элементов; для каждого полученного плана определяется количество изменений уровня факторов путем вычисления расстояния по Хеммингу для соседних пар двоичных слов; запись плана с минимальным количеством изменений уровней факторов в множество D ; анализ двоичных кодов, что входят в множество D , среди которых присутствуют коды, полученные с кода Грея путем E , H и (E,H) преобразований; поиск среди множества модифицированных кодов Грея $G(E,H)$ таких, что представляют собой оптимальные по стоимостным (временным) затратам планы эксперимента.

Результаты. Разработано программное обеспечение, которое реализует предложенный метод построения планов с минимальным количеством изменений уровней факторов и оптимальных по стоимостным (временным) затратам. Программное обеспечение может синтезировать оптимальные планы экспериментов для исследования объектов с количеством факторов $k \leq 4$.

Выводы. Проведенные компьютерные эксперименты, направленные на построение оптимальных планов для исследования таких объектов как технологический процесс изготовления деталей горячей штамповкой и следящая система подтвердили работоспособность и эффективность разработанного метода и программного обеспечения, что его реализует.

Научную новизну работы представляет метод, который позволяет синтезировать планы многофакторных экспериментов с минимальным количеством изменений уровней факторов и оптимальных по стоимостным (временным) затратам.

Практическая значимость результатов работы заключается в том, что разработанное программное обеспечение может найти широкое применение при исследовании технологических процессов, устройств и систем, на которых возможна реализация активного эксперимента.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метод, оптимальный план эксперимента, уровни факторов, преобразования, множество, стоимость, время, программное обеспечение.

UDC 519.24

THE METHOD OF BUILDING PLANS OF MULTIFACTORIAL EXPERIMENTS WITH MINIMAL NUMBER OF FACTOR LEVELS MEASUREMENTS AND OPTIMAL BY COST (TIME) EXPENSES

Koshevoy N. D. – Dr. Sc., Professor, Head of Intellectual Measuring Systems and Quality Engineering Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation institute”, Kharkiv, Ukraine.

Dergachov V. A. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of Intellectual Measuring Systems and Quality Engineering Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation institute”, Kharkiv, Ukraine.

Pavlyk H. V. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of Intellectual Measuring Systems and Quality Engineering Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation institute”, Kharkiv, Ukraine.

Zabolotnyi O. V. – Dr. Sc., Associate Professor, Dean of the Aircraft Control Systems Faculty, National Aerospace University “Kharkiv Aviation institute”, Kharkiv, Ukraine.

Koshevaya I. I. – Postgraduate Student of Intellectual Measuring Systems and Quality Engineering Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation institute”, Kharkiv, Ukraine.

Kostenko E. M. – Dr. Sc., Professor, Professor of Technology and Equipment for Reprocessing and Food Facilities department, Poltava State Agrarian Academy, Poltava, Ukraine.

ABSTRACT

Context. Relevant task of developing the method of plans building for multifactorial experiments was solved with minimal number of factor levels measurements and optimal by cost (time) expenses.

Objective. To develop method and means of synthesis the plans of multifactorial experiment with minimal number of factor levels measurements and optimal by cost (time) expenses.

Methods. Methods of experiment planning gives possibility to reduce cost (time) expenses when researching different technological processes, devices and systems.

Quantity of factor levels measurements minimization during the process of building the plans of multifactorial experiments also leads to cost (time) reduction on their implementation.

Suggested earlier method of building the plans of multifactorial experiments, based on Grey code application, provides a possibility to minimize number of factor levels measurements. But such plans are not always optimal in relation to cost (time) expenses.

That's why the task appears to develop a method and means of synthesis the plans of multifactorial experiment with minimal number of factor levels measurements and optimal by cost (time) expenses.

Essence of a suggested method consists of: generation of permutations with minimal number of transpositions for neighbor elements; number of factor level variations is determined for each obtained plan by calculating the distance after Hamming for neighbor pairs of binary words; recording the plan with minimal number of factor levels measurements into set D ; analysis of binary codes that enter set D , among which codes, received from Grey code by E , H and (E, H) transformations are present; searching among modified Grey codes $G(E, H)$ such codes, that are optimal by cost (time) expenses.

Results. Software which performs the suggested method of building the plans with minimal number of factor levels measurements and optimal by cost (time) expenses was developed. Software allows to synthesize optimal plans of experiment with $k = 3, \dots, 4$ number of factors.

Conclusions. Computer experiments, that were carried out to build optimal plans to research such an objects as production of pieces by hot press forming technological process and a tracking system proved workability and effectiveness both of the developed method and software for its performance.

Scientific novelty is represented by method, that allows to synthesize plans of multifactorial experiments with minimal number of factor levels measurements and optimal by cost (time) expenses.

Practical importance of the results is that developed software can find wide application for technological processes, devices and systems researching, if it is possible to implement active experiment.

KEYWORDS: method, optimal plan of experiment, factor levels, transformations, set, cost, time, software.

REFERENCES

1. Hoskins D. S. Combinatorics and Statistical Inferecing, Applied Optimal Designs, 2007, No. 4, pp. 147–179.
2. Morgan J. P. Association Schemes: Designed Experiments, Algebra and Combinatorics, *Journal of the American Statistical Association*, 2005, Vol.100, No. 471, pp. 1092–1093.
3. Bailey R. A., Cameron P. G. Combinatorics of optimal designs, *Surveys in Combinatorics*, 2009, V.365, pp. 19–73.
4. Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiments, 9th Edition. Wiley, 2017, 629 p.
5. Bartos B. J., Cleary R. Mc., Dowall D. Mc. Design and analysis of time series experiments. Oxford, Oxford University Press, 2017, 393 p.
6. Berger P. D., Maurer R. E. Experimental Design with Applications in Management, Engineering and the Sciences. Celli New York, Springer, 2018, 640 p.
7. Rodrigues M. I., Iemma A. F. Experimental Design and Process Optimization. N.-Y., CRC Press, 2016, 336 p.
8. Wu C. F. J., Hamada M. S. Experiments: Planning, Analysis, and Opti-mization. Wiley, 2015, 743 p.
9. Karpenko A. P. Sovremennye algoritmy poiskovoj optimizacii. Algoritmy, vdohnovlennye prirodoy: uchebnoe posobie. Moscow, izd-vo MGTU im. N. Je. Baumana, 2014, 446 p.
10. Halchenko Y. Ya., Trembovetska R. V., Tychkov V. V. Development of excitations structure RBF-metamodels of inovng concentriced dycurrent probe, *Electrical engeneering & electromechanics*, 2019, No. 2, pp. 28–38. DOI: 10.20998/2074-272X.2019.2.05
11. Jones B. C., Nachtsheim C. J. Efficient designs with minimal aliasing, *Technometrics*, 2011, No. 53, pp. 62–71.
12. Koshevoy M., Zabolotnyi O., Tsekhovskiy M. et al. Research and optimization of the eddy current transducer of dielectric coatings' thickness on metal surfaces of products, *Ukrainian Metrological Journal*, 2020, No. 2, pp. 33–39. DOI:10.24027/2306-7039.2.2020.208935
13. Koshevoy N. D., Kostenko E. M., Muratov V. V. Application of the fish search method for optimization plans of the full factor experiment, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2020, No. 2, pp.44–55. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-2-5
14. Koshevoy N. D., Kostenko E. M., Pavlyk A. V. et al Research of multiple plans in multi-factor experiments with a minimum number of transitions of levels of factors, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2019, No. 2, pp. 53–59. DOI:10.15588/1607-3274-2019-2-6
15. Koshevoy N. D., Kostenko E. M., Muratov V.V. et al. Comparative analysis of optimization methods by cost (time) costs of full factor experiment plans, *Radio Electronics, Computer Science, Contro*, 2020, No. 1, pp. 54–62. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-1-6
16. Bona M. Combinatorics of permutations. N.-Y., CRC Press, 2012, 478 p.