

УДК 519.24

Н.Д. КОШЕВОЙ, И.И. КОШЕВАЯ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ"

Е.М. КОСТЕНКО

Полтавская государственная аграрная академия

### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ, ОСНОВАННЫХ НА КОДЕ ГРЕЯ, ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРИБОРОВ

*В данной работе предложенные методы оптимизации по стоимостным (временным) затратам планов таких многофакторных экспериментов, как дробный и полный факторные эксперименты, композиционные планы применялись для исследования технологических процессов и приборов. При этом исследовались технологические процессы прессования корпуса катера из стеклопластика и литья под давлением на термопласт автоматах, фотоэлектрический преобразователь угловых перемещений и полупроводниковый терморегулятор. Доказана работоспособность и эффективность предложенных методов оптимизации планов многофакторных экспериментов.*

*Ключевые слова: план, эксперимент, оптимизация, метод, стоимость, технологический процесс, прибор.*

М.Д. КОШОВИЙ, І.І. КОШОВА

Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського "ХАІ"

О.М. КОСТЕНКО

Полтавська державна аграрна академія

### ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ, ЗАСНОВАНИХ НА КОДІ ГРЕЯ, ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І ПРИЛАДІВ

*У даній роботі запропоновані методи оптимізації за вартісними (часовими) витратами планів таких багатофакторних експериментів, як дрібний і повний факторні експерименти, композиційні плани застосовувалися для дослідження технологічних процесів і приладів. При цьому досліджувалися технологічні процеси пресування корпусу катера із склопластика, лиття під тиском на термопласт автоматах, фотоелектричний перетворювач кутових переміщень і напівпровідниковий терморегулятор. Доказана працездатність та ефективність запропонованих методів оптимізації планів багатофакторних експериментів.*

*Ключові слова: план, експеримент, оптимізація, метод, вартість, технологічний процес, прилад.*

N.D. KOSHEVOI, I.I. KOSHEVAYA

National Aerospace University named Zhukovsky "KhAI"

E.M. KOSTENKO

Poltava State Agrarian Academy

### APPLICATION OF OPTIMIZATION METHODS, BASED ON THE GRAY CODE, IN RESEARCH OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND DEVICES

*In this article the optimization methods in the price (time) costs of plans of such multi-factor experiments as fractional and full factor experiments, were proposed. Compositional plans were used in study of technological processes and devices. At the same time technological processes of pressing the hull of a boat made of fiberglass and casting under pressure in thermoplastic automata, a photoelectric converter of angular displacements and a semiconductor thermoregulator were studied. The efficiency and effectiveness of the proposed methods for optimizing the plans of multifactorial experiments are proved.*

*At the same time, the optimal experimental plan for the investigation of technological process of foundry under pressure with thermoplastic automatic machines (the number of factors  $k = 4$ ), obtained by the method of optimization based on Gray's code, yields 2.56-fold increase in the cost of implementing the experiment in comparison with the initial plan and in 1.16 times compared with the plan obtained by the analysis of permutations.*

*Optimization of the experiment plan ( $k = 5$ ) for study of the technological process of pressing the hull of a boat made of fiberglass by the method based on the Gray code, gave a gain in the cost of implementing the experiment 1.94 times compared with the initial plan and 1.28 times compared with plan obtained by the limited-search method.*

When the method based on Gray's code was applied, the plan of the full factorial experiment ( $k = 3$ ) for the study of the photoelectric converter of angular displacements, the plan was synthesized and it coincides with the plan obtained by the full search method.

Optimization of the experiment plan for rotatable central compositional planning ( $k = 4$ ) for the investigation of a semiconductor thermoregulator using the Gray-based method, greedy algorithm and annealing simulation method, yielded 1.28-fold increase in the cost of implementing the experimental plan in comparison with the random search and in 1.11 times in comparison with the method of serial sequences

Keywords: plan, experiment, optimization, method, cost, technological process, device.

### Постановка проблемы

В настоящее время широко используются методы планирования экспериментов при проведении исследований различных объектов. Планирование эксперимента позволяет решить задачу получения математической модели объекта при минимальных стоимостных и временных затратах. Причем на стоимость реализации эксперимента существенное влияние оказывает порядок чередования опытов в разработанном плане. Таким образом, возникает задача оптимизации планов эксперимента по стоимостным (временным) затратам на его проведение. Эта задача особенно актуальна при исследовании длительных и дорогостоящих процессов.

### Анализ последних исследований и публикаций

Разработаны следующие методы оптимизации по стоимостным (временным) затратам планов многофакторных экспериментов [1, 2]: ограниченный перебор, случайный поиск, метод ветвей и границ, жадный алгоритм, имитация отжига, генетические алгоритмы, симплекс-метод, алгоритм ближайшего соседа, табу-поиск, метод вложенных разбиений, роя частиц, муравьиный алгоритм. В работе [2] приведен сравнительный анализ этих методов. В [1] доказана эффективность разработанных методов при исследовании ряда различных технологических процессов, приборов и систем. Однако им присущи такие недостатки как низкое быстродействие, не всегда находится оптимальное решение. Поэтому были разработаны методы оптимизации планов многофакторных экспериментов, основанные на применении кода Грея [3–5].

### Цель исследования

Цель работы – доказать на ряде реальных примеров эффективность методов оптимизации по стоимостным (временным) затратам планов многофакторных экспериментов, основанных на применении кода Грея.

### Изложение основного материала исследования

Проверку работоспособности и эффективности предложенного метода синтеза оптимальных планов дробного факторного эксперимента, основанного на коде Грея [3], осуществляли на примере исследования технологического процесса литья под давлением на термопластоавтоматах [1, 6]. При этом исходный план эксперимента с количеством факторов  $k=4$  и стоимости изменений значений их уровней приведены в работе [1]. Синтезированный этим методом план эксперимента представлен в табл. 1.

Таблица 1

Оптимальный план эксперимента, синтезированный методом, основанным на коде Грея ( $k=4$ )

Номер опыта	Обозначение факторов			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
	Новые обозначения факторов			
	$X_1$	$X_4$	$X_2$	$X_3$
1	-1	-1	-1	+1
2	+1	-1	-1	+1
3	+1	+1	-1	-1
4	-1	+1	-1	-1
5	-1	+1	+1	+1
6	+1	+1	+1	+1
7	+1	-1	+1	-1
8	-1	-1	+1	-1

Стоимость реализации плана составляет 862 усл. ед., в то время как стоимость проведения эксперимента по исходному плану – 2206 усл. ед., а полученного методом анализа перестановок – 998 усл. ед. Таким образом, достигнут выигрыш по стоимости реализации эксперимента в 2,56 раза по сравнению с исходным планом и в 1,16 раза по сравнению с планом, полученным методом анализа перестановок.

С использованием этого же метода [3] оптимизирован план для исследования технологического процесса прессования корпуса катера из стеклопластика. Исходный план и стоимости изменений значений уровней факторов приведены в работе [1]. Порядок проведения опытов оптимизированного плана представлен в табл. 2. Стоимость реализации эксперимента по этому плану составляет 171 усл. ед, тогда как стоимость проведения эксперимента по исходному плану – 331, 5 усл. ед., а полученному по методу ограниченного перебора – 219, 5 усл. ед.

Таким образом, достигнут выигрыш по стоимости реализации эксперимента в 1,94 раза по сравнению с исходным планом и в 1,28 раза по сравнению с планом, полученным методом ограниченного перебора.

При оптимизации предложенным методом [4] плана полного факторного эксперимента (ПФЭ) для исследования фотоэлектрического преобразователя угловых перемещений ( $k=3$ ) получен план, представленный в табл. 3.

Таблица 2

**Оптимальный план эксперимента, синтезированный методом, основанным на коде Грея ( $k=5$ )**

Номер опыта	Обозначение факторов				
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4 = X_2X_3$	$X_5 = X_1X_3$
	Новые обозначения факторов				
	$X_1$	$X_3$	$X_4$	$X_2$	$X_5$
1	-1	-1	-1	+1	+1
2	+1	-1	-1	+1	-1
3	+1	+1	-1	-1	-1
4	-1	+1	-1	-1	+1
5	-1	+1	+1	+1	-1
6	+1	+1	+1	+1	+1
7	+1	-1	+1	-1	+1
8	-1	-1	+1	-1	-1

Таблица 3

**Оптимальный план полного факторного эксперимента, синтезированный методом, основанным на коде Грея ( $k=3$ )**

Номер опыта	Обозначение факторов		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$
	Новые обозначения факторов		
	$X_1$	$X_3$	$X_2$
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

При этом исходный план эксперимента и стоимости изменений значений уровней факторов приведены в работе [1]. Стоимость реализации этого плана эксперимента, также как и плана, полученного методом полного перебора, составляет 22,2 усл. ед., что подтверждает работоспособность и эффективность разработанного метода [4].

Проверка работоспособности и эффективности предложенного метода [5] для оптимизации композиционного плана эксперимента ротатбельного центрального композиционного планирования (РЦКП) осуществлялась на примере исследования полупроводникового терморегулятора [1]. При этом исходный план эксперимента и стоимости изменений уровней факторов приведены в работе [1].

Синтезированный оптимальный по стоимости реализации план ядра РЦКП представлен в табл.4.

Таблица 4

**Оптимальный план ядра РЦКП ( $k=4$ )**

Номер опыта	Обозначение факторов			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
	Новые обозначения факторов			
	$X_4$	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	-1
3	+1	+1	-1	-1
4	-1	+1	-1	-1
5	-1	+1	+1	-1
6	+1	+1	+1	-1
7	+1	-1	+1	-1
8	-1	-1	+1	-1
9	-1	-1	+1	+1
10	+1	-1	+1	+1
11	+1	+1	+1	+1
12	-1	+1	+1	+1
13	-1	+1	-1	+1
14	+1	+1	-1	+1
15	+1	-1	-1	+1
16	-1	-1	-1	+1

Стоимость этого плана составляет 107 усл. ед. Оптимизация плана достройки ПФЭ до РЦКП осуществлялась комбинированным методом (жадный алгоритм → имитация отжига) (табл. 5). Стоимость его реализации составляет 86,4 усл. ед., а суммарная стоимость проведения эксперимента по плану РЦКП будет равна 193,4 усл. ед. Стоимость реализации плана РЦКП, полученного методом случайного поиска – 247,8 усл. ед., а методом серийных последовательностей – 214,5 усл. ед. Таким образом, имеем следующие выигрыши по стоимости реализации плана: по сравнению с методом случайного поиска в 1,28 раза; по сравнению с методом серийных последовательностей в 1,11 раза.

Таблица 5

**План достройки ПФЭ до РЦКП**

Номер опыта	Обозначение факторов			
	$X_4$	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	0	0	0	$\alpha$
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	$\alpha$	0	0	0
9	0	0	0	0
10	$-\alpha$	0	0	0
11	0	0	$\alpha$	0
12	0	$\alpha$	0	0
13	0	0	$-\alpha$	0
14	0	$-\alpha$	0	0
15	0	0	0	$-\alpha$

**Выводы**

1. Оптимизированы планы дробного и полного факторного экспериментов, а также композиционный план для исследования технологических процессов и приборов.

2. Доказана работоспособность и эффективность методов оптимизации планов многофакторных экспериментов, основанных на применении кода Грея.

## Список использованной литературы

1. Методология оптимального по стоимостным и временным затратам планирования эксперимента: монография / Н.Д. Кошевой, Е.М. Костенко, А.В. Павлик и др. – Полтава: Полтавская государственная аграрная академия, 2017. – 232 с.
2. Кошовий М.Д. Методи оптимізації по вартісним (часовим) витратам планів багатofакторних експериментів / М.Д. Кошовий, І.І. Кошова, О.М. Костенко // Тези доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції "Датчики, прилади та системи-2017", присвяченої пам'яті В.М. Шарапова (м. Черкаси, вересень, 2017 р.). – Черкаси: Видавець Третьяков О., 2017. – С.13-14.
3. Кошевой Н.Д. Синтез оптимальных по стоимостным или временным затратам планов дробного факторного эксперимента / Н.Д. Кошевой, А.В. Заболотный, И.И. Кошова // Открытые информационные и компьютерные технологии. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", 2016. – Вып. 72. – С. 177-182.
4. Кошевой Н.Д. Синтез оптимальных по стоимостным или временным затратам планов полного факторного эксперимента / Н.Д. Кошевой, И.И. Кошова, Л.Г. Раскин // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2016. – № 2. – С.46-50.
5. Метод синтеза оптимальных по стоимостным (временным) затратам композиционных планов многофакторного эксперимента / Н.Д. Кошевой, А.В. Заболотный, И.И. Кошова, Е.М. Костенко // Зб. наук. пр. військ. ін-ту Київського нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. – 2016. – Вип. 53. – С.31-34.
6. Optimum planning of experiment in manufacturing the electronic equipment / N.D. Koshevoy, E.M. Kostenko, V.A. Gordienko, V.P. Syroclin // Telecommunications and Radio Engineering. – 2011. – Vol.70. – №8. – P.731-734. – DOI: 10.1615 / TelecomRadEng.V70.i8.60.