

УДК 519.24:62.50

Н.Д. Кошевой<sup>1</sup>, Е.Е. Калашников<sup>1</sup>, Е.М. Костенко<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского "ХАИ", Харьков, Украина<sup>2</sup>Полтавская государственная аграрная академия, Полтава, Украина

## ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

Для исследования весоизмерительной системы непрерывного дозирования сыпучих материалов с помощью пакета прикладных программ получен оптимальный по стоимости реализации план полного факторного эксперимента и математические модели, описывающие зависимость относительной погрешности измерения от существенных факторов. Определены оптимальные режимы её работы. Для исследования погрешностей таких приборов как устройство контроля качества диэлектрических материалов, вихревой преобразователь толщины диэлектрических покрытий, бесконтактный измеритель постоянного тока и плотности тока получены оптимальные по стоимостным затратам планы эксперимента. Проведен сравнительный анализ полученных планов.

**Ключевые слова:** погрешность, оптимальный план, эксперимент, стоимость, прибор, система.

### Введение

**Постановка проблемы.** При исследовании приборов и систем возникает задача получения математических моделей, описывающих зависимость погрешности измерения от конструктивных параметров устройств. В дальнейшем с использованием математической модели определяются оптимальные параметры конструкции, обеспечивающие минимальную погрешность измерения разрабатываемым устройством. Для решения этих задач целесообразно применение методов планирования эксперимента. При этом естественно стремление экспериментаторов получать эти модели при минимальных стоимостных и временных затратах.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Известны методы синтеза оптимальных по стоимостным и временным затратам планов эксперимента [1 – 3], основанные на использовании следующих видов оптимизации: анализ перестановок строк матрицы планирования, случайный поиск, метод ветвей и границ. В работе [4] показано, что при количестве факторов  $k \leq 3$  для исследования технологических процессов, приборов и систем оптимальные планы, полученные методом ветвей и границ и методом анализа перестановок строк матрицы планирования, совпадают. Авторами данной статьи также доказано, что синтез оптимальных планов для количества факторов  $k > 3$  целесообразно осуществлять методом ветвей и границ.

**Цель статьи.** Исследование погрешностей приборов и систем с использованием оптимального планирования эксперимента.

### Основные результаты исследований

При исследовании весоизмерительной системы для непрерывного дозирования сыпучих материалов

[5] в качестве критерия оптимизации была выбрана относительная погрешность измерения  $\delta$ , %, а доминирующие факторы:  $X_1$  - угол наклона весоизмерительного лотка,  $\alpha$ , градусы;  $X_2$  - влажность сыпучего материала,  $W$ , %,  $X_3$  - коэффициент трения сыпучего материала в движении,  $f_d$ . Для выявления закономерностей дозирования был выбран исходный план полного факторного эксперимента ПФЭ типа  $2^3$  (табл. 1). Стоимости изменений уровней факторов приведены в табл. 2.

С помощью пакета прикладных программ [6] синтезирован оптимальный по стоимости проведения план эксперимента, полученный в результате реализации перестановок строк матрицы планирования (проанализировано 40320 вариантов). Матрица планирования и результата эксперимента приведены в табл. 1.

Стоимости реализации экспериментов по оптимальному ( $S_{\text{опт}}$ ), исходному ( $S_{\text{исх}}$ ) и плану с максимальной стоимостью ( $S_{\text{max}}$ ), а также выигрыши при проведении эксперимента по оптимальному плану приведены в табл. 3.

Погрешность измерения весоизмерительной системы определяем по формуле

$$\delta = \frac{M_{\text{изм}} - M_{\text{ист}}}{M_{\text{ист}}} \cdot 100\%,$$

где  $M_{\text{ист}}$  – масса сыпучего материала, которая измерялась на весах для статического взвешивания и равнялась 30 кг;  $M_{\text{изм}}$  – масса просыпанного материала, измеренная на макетной модели весоизмерительной системы.

При обработке результатов с использованием пакета прикладных программ [7] получены статические модели, которые описывают зависимость погрешности измерения  $\delta$  от исследуемых факторов:

Таблица 1

Исходный и оптимальный планы, результаты эксперимента

Номер опыта	Исходный план			Оптимальный план			Результаты эксперимента		
	Обозначения факторов			Номер опыта	Обозначения факторов			M <sub>изм</sub> , кг	δ, %
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>		
1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	29,35	2,17
2	+1	-1	-1	2	+1	-1	-1	29,08	3,06
3	-1	+1	-1	6	+1	-1	+1	29,91	0,31
4	+1	+1	-1	5	-1	-1	+1	29,44	1,87
5	-1	-1	+1	7	-1	+1	+1	30,63	2,11
6	+1	-1	+1	8	+1	+1	+1	30,16	0,53
7	-1	+1	+1	4	+1	+1	-1	30,75	2,50
8	+1	+1	+1	3	-1	+1	-1	30,80	2,67

Таблица 2

Стоимости изменений значений уровней факторов

Обозначения факторов	Стоимости изменений, усл. ед.			
	из «-1» в «+1»	из «+1» в «-1»	из «0» в «+1»	из «0» в «-1»
X <sub>1</sub> (α)	12,0	8,0	6,0	4,0
X <sub>2</sub> (W)	16,0	24,0	8,0	12,0
X <sub>3</sub> (f <sub>d</sub> )	10,0	10,0	10,0	10,0

Таблица 3

Стоимости реализации планов и выигрыши

Стоимость, усл. ед.			Выигрыши	
S <sub>исх</sub>	S <sub>опт</sub>	S <sub>max</sub>	S <sub>max</sub> / S <sub>опт</sub>	S <sub>max</sub> / S <sub>исх</sub>
164	102	278	1,61	2,73

а) в кодированных значениях факторов  
 $\delta = 1,903 - 0,301X_1 + 0,050X_2 - 0,699X_3 - 0,676X_1X_2 - 1,026X_1X_3 + 0,064X_2X_3 + 0,128X_1X_2X_3;$

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

В результате оптимизации по методу крутого спуска получены следующие рациональные значения конструктивных параметров весоизмерительной системы и сыпучего материала:  $\alpha = 41,9^\circ$ ;  $f_d = 0,70$ ;  $W = 14\%$ . При этом погрешность взвешивания сыпучего материала составляет 0,20%.

При исследовании [8] влияния таких факторов как напряжение питания  $U_{пит}$ , значение сопротивления R, подключенного к выходу операционного усилителя, числа витков W основной обмотки магниточувствительного преобразователя, числа витков W<sub>1</sub> дополнительной мультивибраторной обмотки, на абсолютную погрешность устройства для контроля качества диэлектрических материалов (УККДМ) получены оптимальные планы эксперимента с использованием следующих методов: анализ перестановок строк матрицы планирования, случайный поиск, метод итерационного планирования эксперимента.

Сравнительный анализ полученных планов по стоимости их реализации приведен в табл. 4.

При исследовании [9] влияния на относительную погрешность  $\delta$  измерения вихретокового преобразователя толщины диэлектрических покрытий

(ВПТДП) на металлических поверхностях таких факторов как диаметр сердечника, высота сердечника, количество витков, частота питающего напряжения получены оптимальные планы эксперимента.

В табл.4 приведен сравнительный анализ планов, полученных различными методами оптимизации. Для исследования [10] влияния на относительную погрешность измерения бесконтактного измерителя постоянного тока и плотности тока (БИПТ1 с напряжением питания  $U_{пит} = 9$  В и БИПТ2 с  $U_{пит} = 5$  В) таких факторов как сопротивление R<sub>4</sub>, которое позволяет устанавливать ток, протекающий по обмотке бесконтактного магниточувствительного преобразователя, и сопротивление R<sub>3</sub>, позволяющее устанавливать токовый режим микроомного операционного усилителя методом анализа перестановок получен оптимальный план эксперимента, сравнение которого с исходным планом и планом максимальной стоимости реализации приведено в табл.4.

## Выводы

На примерах исследования погрешности измерения различных систем и приборов показана эффективность оптимального по стоимостным затратам планирования эксперимента. Перспективным направлением развития проведенных исследований является создание программных продуктов, реализующих синтез оптимальных планов по стоимостным и временным затратам.

Сравнительный анализ планов эксперимента

Уст-рой-ство	Метод														
	Анализ перестановок					Случайный поиск					Метод итерационного планирования экспериментов				
	Стоимость, усл. ед.			Выигрыш		Стоимость, усл. ед.			Выигрыш		Стоимость, усл. ед.			Выигрыш	
	$S_{исх}$	$S_{опт}$	$S_{max}$	$\frac{S_{исх}}{S_{опт}}$	$\frac{S_{max}}{S_{опт}}$	$S_{исх}$	$S_{опт}$	$S_{max}$	$\frac{S_{исх}}{S_{опт}}$	$\frac{S_{max}}{S_{опт}}$	$S_{исх}$	$S_{опт}$	$S_{max}$	$\frac{S_{исх}}{S_{опт}}$	$\frac{S_{max}}{S_{опт}}$
УККДМ	29,4	24,7	120,3	1,19	4,87	29,4	29,4	120,0	1,00	4,86	85,5	40,4	-	2,1	-
ВПГДП	204,5	112,85	255,3	1,81	2,26	204,5	101,8	246,0	2,01	2,42	155,15	86,3	-	1,78	-
БИПТ1	5,4	4,05	6,65	1,33	1,64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
БИПТ2	2,3	1,72	2,72	1,34	1,58	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

### Список литературы

1. Кошевой Н.Д. Метод итерационного планирования оптимальных по стоимостным и временным затратам экспериментов / Н.Д. Кошевой, Е.М. Костенко // *Зб. наук. пр. Військового інституту КНУ ім. Тараса Шевченка*. – К.: ВІКНУ, 2009. – Вип.19. – С. 44-48.
2. Кошевой Н.Д. Оптимальное планирование эксперимента для исследования динамических объектов / Н.Д. Кошевой, Е.М. Костенко // *Зб. наук. пр. Військового інституту КНУ ім. Т. Шевченка*. – К.: ВІКНУ, 2009. – Вип.20. – С. 57-62.
3. Кошевой Н.Д. Метод оптимального по стоимостным и временным затратам последовательного планирования эксперимента / Н.Д. Кошевой, Е.М. Костенко, В.А. Дергачёв // *Автоматизация: проблемы, поиски, решения. Материалы между. научн.-техн. конф., 7-12 сентября 2009*. – Севастополь: Сев. НТУ, 2009. – С. 21-23.
4. Кошевой Н.Д. Применение метода ветвей и границ для оптимизации многофакторных планов эксперимента / Н.Д. Кошевой, О.Л. Бурлеев, Е.М. Костенко // *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи*. – 2010. – № 1 (42). – С. 67-70.
5. Кошевой Н.Д. Весоизмерительная система для непрерывного дозирования сыпучих материалов / Н.Д. Кошевой, Е.Е. Калашников, Г.А. Черепашук // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. – Х.: НАКУ «ХАИ», 2008. – Вып. 38. – С. 146-149.
6. Кошовий М.Д., Костенко О.М. Комп'ютерна програма "Програма пошуку оптимальних планів багатofакторного експерименту". Свідоцтво про реєстрацію

авторського права на твір №29920. – Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін. освіти і науки України 17.08.2009 р.

7. Кошевой Н.Д. Разработка программного обеспечения по автоматизации планирования эксперимента / Н.Д. Кошевой // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х.: ХАИ, 1998. – С. 242-244.

8. Кошевой Н.Д. Оптимальное планирование эксперимента при исследовании устройства для контроля качества диэлектрических материалов / Н.Д. Кошевой, Е.М. Костенко, А.В. Заболотный // *АСУ и приборы автоматизации*. – Х.: ХНУРЭ, 2009. – Вып. 147 – С. 38-41.

9. Оптимальное планирование экспериментальных исследований вихрековых преобразователей / Н.Д. Кошевой, В.А. Дергачёв, Е.М. Костенко, М.В. Цеховской // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. – Х.: НАКУ «ХАИ», 2009. – Вып. 42. – С. 147-151.

10. Кошовий М.Д. Оптимальне планування експериментальних досліджень безконтактних вимірювачів постійного струму і густини струму / М.Д. Кошовий, О.М. Костенко // *Вісник ХНТУ СГ ім. Петра Василенка*. – Х.: ХНТУСГ, 2009. – Вип. 87. – С. 93-94.

Поступила в редколлегию 30.04.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.Ю. Соколов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ПОХИБОК ПРИБОРІВ І СИСТЕМ

М.Д. Кошовий, Є.Є. Калашников, О.М. Костенко.

Для дослідження ваговимірювальної системи безперервного дозування сипких матеріалів за допомогою пакету прикладних програм отримані оптимальні за вартістю реалізації план повного факторного експерименту і математичні моделі, що описують залежність відносної похибки від суттєвих факторів. Знайдені оптимальні режими її роботи. Для дослідження похибок таких приладів як пристрій контролю якості діелектричних матеріалів, вихорострумівий перетворювач товщини діелектричних покриттів, безконтактний вимірювач постійного струму і густини струму отримані оптимальні за вартістими витратами плани експерименту. Виконано порівняльний аналіз отриманих планів.

**Ключові слова:** похибка, оптимальний план, експеримент, вартість, прилад, система.

### OPTIMUM PLANNING OF THE EXPERIMENT AT STUDY OF INSTRUMENT AND SYSTEMS ERRORS

N.D. Koshevoy, E.E. Kalashnikov, E.M. Kostenko

For study weight measuring system unceasing dose loose material by means of package of the applied programs is received it was received optimum of plan full factorial experiment by cost of the realization and mathematical models, describing dependency of relative errors of the measurement from essential factor. The optimum models of its functioning are determined. For study of errors such instrument as device of the checking quality of dielectric material, curl current converter of the thickness dielectric covering, noncontact meter of the direct current and density of the current are received optimum plans of the experiment by price expenses. Benchmark analysis of got plan was carried out.

**Keywords:** errors, optimum plan, experiment, cost, instrument, system.