

## ИССЛЕДОВАНИЕ МНОЖЕСТВА ПЛАНОВ МНОГОФАКТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С МИНИМАЛЬНЫМ ЧИСЛОМ ПЕРЕХОДОВ УРОВНЕЙ ФАКТОРОВ

**Косовой Н. Д.** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой авиационных приборов и измерений, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

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

**Павлик А. В.** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры авиационных приборов и измерений, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Косеняк И. И.** – аспирант кафедры авиационных приборов и измерений, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Рожнова Т. Г.** – канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры автоматизации проектирования вычислительной техники, Харьковской национальной университет радиоэлектроники, Харьков, Украина.

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Решена актуальная задача сокращения множества планов многофакторных экспериментов при поиске оптимального по стоимостным затратам.

**Цель работы** – синтез и исследование множества планов эксперимента с минимальным числом переходов уровней факторов.

**Метод.** Применение методов планирования эксперимента позволяет сократить стоимостные и временные затраты при исследовании различных технологических процессов, приборов и систем.

Минимизация количества переходов уровней факторов в плане эксперимента, в свою очередь, приводит к уменьшению стоимости (времени) его реализации. Одним из методов уменьшения количества переходов уровней факторов является применение кода Грея при построении плана эксперимента.

Показано, что планы многофакторных экспериментов, построенные с использованием кода Грея, имеют минимальное количество переходов уровней факторов, но не всегда оптимальны по стоимости (времени) реализации эксперимента.

Для синтеза множества планов эксперимента с минимальным числом переходов уровней факторов при поиске оптимального плана по стоимостным (временным) затратам предложен метод, в основе которого лежит генерация вариантов двучленных кодов, анализ их характеристик и выбор последовательностей, отвечающих заданным требованиям. Формирование типовых планов эксперимента осуществляется по методу, в основе которого лежит генерация вариантов построения планов, определение классов эквивалентности относительно заданной группы  $F$  преобразований и формирование множества типовых представителей для выделенных классов эквивалентности.

**Результаты.** Разработано программное обеспечение, реализующее предложенные методы, которое использовано при построении множества планов экспериментов для количества факторов  $k=3$  с минимальным числом переходов уровней.

**Выводы.** Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенных методов и реализующего их программного обеспечения, которое позволяет сократить множество планов эксперимента для поиска оптимального. Научную новизну работы представляют методы, которые позволяют синтезировать множество планов многофакторных экспериментов, сокращающих поиск оптимальных по стоимостным (временным) затратам планов. Практическая значимость результатов работы в том, что разработанное программное обеспечение, реализующее предложенные методы, может найти широкое применение при исследовании технологических процессов, приборов и систем, на которых возможна реализация активного эксперимента.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** методы, оптимальный план эксперимента, множество, программное обеспечение, стоимость.

### НОМЕНКЛАТУРА

$k$  – количество факторов;

$X_i$  –  $i$ -й фактор;

$X_{min k}$  – множество планов эксперимента с минимальным числом переходов уровней факторов;

$X_{opt min}$  – планы, полученные методом полного перебора;

$X_{opt Гр}$  – планы, построенные с использованием кода Грея.

### ВВЕДЕНИЕ

Для повышения эффективности экспериментальных исследований, направленных на построение математических моделей объектов, целесообразно применять методы планирования эксперимента. При этом изменение порядка проведения опытов плана эксперимента существенно влияет на стоимость (время)

реализации эксперимента, так как переход от одного опыта к другому не равнозатратен.

Характерно, что при стремлении к минимальному количеству переходов уровней факторов будем также приближаться к минимизации стоимости (времени) реализации эксперимента. Минимальное количество переходов уровней факторов имеют планы экспериментов, построенные с применением кода Грея [1]. Однако существует множество планов с минимальным числом переходов уровней факторов, которое необходимо исследовать по критерию стоимости (времени) их реализации.

**Объект исследования:** процессы оптимизации по стоимостным затратам планов многофакторных экспериментов.

**Предмет исследования:** множества планов многофакторных экспериментов с минимальным числом переходов уровней факторов.

**Цель исследования:** синтез и исследование множества планов эксперимента с минимальным числом переходов уровней факторов.

### 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- показать, что планы многофакторных экспериментов  $X_{opt, t}$ , построенные с использованием кода Грея, имеют минимальное количество переходов уровней факторов, но не всегда оптимальны по стоимостным (временным) затратам на их реализацию;
- разработать программное обеспечение для синтеза множества планов эксперимента  $X_{opt, k}$  с минимальным числом переходов уровней факторов;
- для количества факторов  $k=3$  с помощью разработанного программного обеспечения синтезировать и исследовать планы эксперимента  $X_{opt, k}$  с минимальным числом переходов уровней факторов;
- показать, что оптимальные планы, полученные методом полного перебора  $X_{opt, m}$  и с применением кода Грея  $X_{opt, t}$  входят в множество планов  $X_{opt, k}$ , т.е.  $X_{opt, m} \in X_{opt, k}$ ;  $X_{opt, t} \in X_{opt, k}$ .

### 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Для построения оптимальных планов экспериментов можно применять методы комбинаторной оптимизации [2–18]. Эти методы имеют свои преимущества и недостатки. Существенными недостатками при их применении являются: низкое быстродействие, не всегда находится точное решение, а удается найти решение лишь близкое к оптимальному.

Известны примеры [1] построения методами, основанными на использовании кода Грея, оптимальных по стоимостным (временным) затратам планов многофакторных экспериментов.

Однако планы, синтезированные этими методами, имеют минимальное количество переходов уровней факторов, но не всегда оптимальны по стоимости (времени) реализации эксперимента.

Оптимизацию планов эксперимента по стоимостным (временным) затратам методом полного перебора при современном уровне развития вычислительной техники можно решить только для количества факторов  $k \leq 3$ .

Следовательно возникает проблема сокращения множества планов многофакторного эксперимента с минимальным числом переходов уровней факторов для поиска оптимальных по стоимостным (временным) затратам на его реализацию.

### 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе [6] для исследования следящей системы приведены исходный план полного факторного эксперимента (табл. 1) и стоимости изменения значений уровней факторов (табл. 2).

Таблица 1 – Исходный и оптимальный планы эксперимента

Номер опыта	Исходный план			Полученный методом полного перебора		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1$	$X_2$	$X_3$
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

Таблица 2 – Стоимость изменения значений уровней факторов

Стоимость изменения значений уровней факторов	Обозначения факторов		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$
$m \in -1, n \in +1$ , усл. ед.	8,0	2,0	1,0
$m \in +1, n \in -1$ , усл. ед.	4,0	2,4	1,8

Оптимизация исходного плана эксперимента по стоимостным затратам на его реализацию осуществлялась методом полного перебора. При этом стоимость реализации эксперимента по оптимальному плану (см. табл. 1) составляет 13,6 усл. ед.

В данной статье оптимизация плана полного факторного эксперимента для исследования следящей системы осуществлялась методом, основанным на применении кода Грея [1].

Для синтеза множества планов эксперимента с минимальным числом переходов уровней факторов при поиске оптимального по стоимости (времени) реализации плана предложен метод, в основе которого лежит генерация вариантов двоичных кодов, анализ их характеристик и выбор последовательностей, отвечающих заданным требованиям. Формирование типовых планов эксперимента осуществляется по методу, в основе которого лежит генерация вариантов построения планов, определения классов эквивалентности относительно заданной группы  $\Gamma$  преобразований и формирование множества типовых представителей для выделенных классов эквивалентности.

### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

При оптимизации плана полного факторного эксперимента методом, основанным на применении кода Грея, получен вариант, приведенный в табл. 3.

Стоимость реализации этого плана составляет 17,6 усл. ед. Таким образом, план, полученный методом, основанным на применении кода Грея, оптимальный по числу переходов уровней факторов, но не оптимальный по стоимости реализации эксперимента.

Следовательно, возникает задача синтеза множества планов эксперимента с минимальным числом переходов уровней факторов для поиска оптимального плана по стоимостным (временным) затратам.

Таблица 3 – План эксперимента, построенный методом на основе кода Грея

Номер опыта	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
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

Для решения этой задачи авторами разработана компьютерная программа формирования вариантов кодов с минимальными изменениями [19], в основе которой лежит генерация вариантов двоичных кодов, анализ их характеристик и выбор последовательностей, которые отвечают заданным требованиям.

В программе возможно задание минимального и максимального количества изменений.

Авторами также разработана компьютерная программа формирования типовых планов многофактор-

ного эксперимента [20], в основе работы которой лежит генерация вариантов построения планов, определение классов эквивалентности относительно заданной группы Р преобразований и формирование множества типовых представителей для выделенных классов эквивалентности.

Разработанное программное обеспечение реализовано на языке «TURBO PASCAL», построено по модульному принципу и обеспечивает гибкую адаптацию для решения более широкого класса задач.

Работа с ЭВМ осуществляется в режиме диалога. Просчеты выполнялись на компьютере с процессором Intel Pentium G20 с частотой 2,60 ГГц.

### 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

С помощью программы [19] для  $k=3$ , где  $k$  – количество факторов, были построены 144 плана эксперимента (двоичные коды) с минимальным количеством изменений ( $2^k-1$ ). Фрагмент этого множества представлен в табл. 4 и включает также план ( $N_{exp} = 137$ ), построенный методом на основе кода Грея и план ( $N_{exp} = 57$ ) полного перебора.

Таблица 4 – Двоичные коды с минимальным количеством изменений ( $2^k-1$ ) для  $k=3$

57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67
+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	+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	-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	-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	-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
68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78
-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	-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	+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	+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	+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	+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
79	80	81	82	83	84	120	121	122	123	124
+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	+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	-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	-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	+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	+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	+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	+1 -1 -1	+1 -1 -1	+1 -1 -1	+1 -1 -1	+1 -1 -1	+1 -1 -1	+1 -1 -1	+1 -1 -1
125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135
+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	-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	-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	+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	+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	+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	+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
136	137	138	139	140	141	142	143	144		
+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	-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	-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		
+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	+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	+1 -1 -1	+1 -1 -1	+1 -1 -1	+1 -1 -1	+1 -1 -1	+1 -1 -1		

При использовании метода полного перебора для этого случая анализируется 40320 вариантов.

Программа [19] для  $k = 3$  позволила построить базу данных типовых кодов с минимальными изменениями (табл. 5), в которую также вошли планы эксперимента, полученные методами на основе кода Грея (№3) и полного перебора (№ 20).

### 6 ОБСУЖДЕНИЕ

При синтезе планов для исследования следящей системы показано, что планы многофакторного эксперимента, построенные с использованием кода Грея, имеют минимальное количество переходов уровней факторов, но не всегда оптимальны по стоимости реализации эксперимента.

Таблица 5 – Множество типовых представителей планов с минимальными изменениями

№	Номер опыта								№	Номер опыта							
	1	2	3	4	5	6	7	8		1	2	3	4	5	6	7	8
1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	2	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1
	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1		-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1
3	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	4	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1
	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1		-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1
5	-1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	6	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	-1
	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1		+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1
7	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	8	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1		+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1
9	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	10	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	-1
	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1		+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1
11	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	12	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	-1
	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1		+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
13	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	14	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	-1
	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1		+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
15	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	16	-1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1
	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1		-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1
17	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	18	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1
	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1		-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	-1
19	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	20	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1
	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1		+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1
21	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	22	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1
	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1		+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1
23	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	24	+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

В результате анализа множества планов эксперимента (см. табл. 4 и 5), полученных с помощью разработанного программного обеспечения, видно, что существенно сокращается множество планов эксперимента для поиска оптимального по стоимостным (временным) затратам, поскольку полученная база данных (см. табл. 5) включает всего 24 плана, а при использовании метода полного перебора анализируется 40320 вариантов.

#### ВЫВОДЫ

1. В работе решена актуальная проблема по сокращению множества планов эксперимента для поиска оптимального по стоимостным (временным) затратам.

2. Показано, что методы синтеза планов многофакторных экспериментов, основанные на применении кода Грея, не всегда дают оптимальный по стоимостным (временным) реализации план.

3. Разработаны компьютерные программы, которые формируют базы данных и значительно сокращают множество планов эксперимента для поиска оптимального по стоимостным (временным) затратам на его реализацию. Для  $k = 3$  множество включает 24 плана эксперимента вместо 40320 вариантов при полном переборе.

#### 4. Научная новизна работы:

– впервые предложен метод синтеза множества планов эксперимента с минимальным числом переходов уровней факторов, в основе которого лежит генерация вариантов двоичных кодов, анализ их характеристик и выбор последовательностей, отвечающих заданным требованиям, позволяющий сократить множество для поиска оптимальных по стоимостным (временным) затратам планов эксперимента;

– впервые предложен метод формирования типовых планов эксперимента, в основе которого лежит генерация вариантов построения планов, определения классов эквивалентности относительно заданной группы  $P$  преобразований и формирование множества типовых представителей для выделенных классов эквивалентности, позволяющий значительно сократить множество для поиска оптимальных по стоимостным (временным) затратам планов эксперимента.

5. **Практическая** значимость результатов работы в том, что разработанное программное обеспечение, реализующие предложенные методы, может найти широкое применение при исследовании технологических процессов, приборов и систем, на которых возможна реализация активного эксперимента, например, аппаратно-программный комплекс экспериментальной отработки процессов [21].

6. **Перспективы дальнейших исследований** состоят в применении разработанного программного обеспечения для исследования трехуровневых планов и композиционных планов второго порядка.

#### ЛИТЕРАТУРА/ЛІТЕРАТУРА

1. Кошовой Н. Д. Применение методов оптимизации, основанных на коде Грея, при исследовании технологических процессов и приборов / Н. Д. Кошовой, И. И. Козмак, Е. М. Костинко // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2018. – № 3, Том 2. – С. 241–245.
2. Haskins D.S. Combinatorics and Statistical Inference / D. S. Haskins // Applied Optimal Design. – 2007. – № 4. – P. 147–179.
3. 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.
4. Bailey R. A. Combinatorics of optimal designs / R. A. Bailey, P. G. Cameron // Surveys in Combinatorics. – 2009. – V. 365. – P. 19–73.
5. Керпенко А. П. Современные алгоритмы оптимизации. Алгоритмы, кодирующие графы: учебное пособие / А. П. Керпенко. – М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 446 с.
6. Кошовой Н. Д. Оптимальное по стоимостным и временным затратам планирование эксперимента / Н. Д. Кошовой, Е. М. Костинко. – Полтава: издательство Шенченко Р. В., 2013. – 317 с.
7. Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiments / D. C. Montgomery. – 9th ed. – Wiley, 2017. – 629 p.
8. Barros B. J. Design and analysis of time series experiments / B. J. Barros, R. Mc Cleary, D. Mc Dowall. – Oxford: Oxford University Press, 2017. – 393 p.
9. Berger P. D. Experimental Design with Applications in Management, Engineering and the Sciences / P. D. Berger, R. E. Moxter. – Cells New York: Springer, 2018. – 640 p.
10. Rodrigues M. I. Experimental Design and Process Optimization / M. I. Rodrigues, A. F. Jemna. – N.-Y.: CRC Press, 2016. – 336 p.
11. Wu C. F. J. Experiments: Planning, Analysis, and Optimization / C. F. J. Wu, M. S. Hamada. – Wiley, 2015. – 743 p.
12. Кошовой Н. Д. Применение алгоритма оптимизации роки частиц для минимизации стоимости проведения многофакторного эксперимента / Н. Д. Кошовой, А. А. Белая // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2018. – № 1. – С. 41–49. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-1-5.
13. Кошовой Н. Д. Сравнительный анализ методов оптимизации при исследовании нелинейной системы и терморегулятора / Н. Д. Кошовой, А. А. Белая // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2018. – № 4. – С. 179–187. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-4-17.
14. Гальченко В. Я. Застосування нейронної мережі на етапі побудови метамодель в процесі оптимального синтезу антен / В. Я. Гальченко, Р. В. Требуховича, В. В. Тучков // Вісник NTUU KPI: Серія Radiofizika Radioarobuduvannya. – 2018. – Issue 74. – P. 60–72. DOI: 10.20535/RADAP.2018.74.60-72.
15. Yakovlev S. Convex extensions in combinatorial optimization and their applications / S. Yakovlev // Springer Optimization and its Applications. – Springer, New York, 2017. – Vol. 130. – P. 567–584.
16. Yakovlev S. V. Properties of combinatorial optimization problems over polyhedral-spherical sets / S. V. Yakovlev, O. S. Pichugina // Cybernetics and Systems Analysis. – 2018. – No. 1, Vol. 54. – P. 99–109.
17. Ugrumov M. L. Network-characteristic calculation method of spatial boundary layer on bounding surface of interblade channel of turboset / M. L. Ugrumov, V. A. Men'shikov, V. V. Belik // Izvestiya Vyshtikh Uchebnykh Zavedenij. Aviatcionnaya Tekhnika. – 1992. – №1. – P. 38–41.
18. Stochastic optimization models and method in the turbomachines system improvement problem / [M. L. Ugrumov, V. E. Afanasjevskaja, A. A. Trenchuk, A. V. Myonyaykov] // ASME-

- JSMЕ-KSMЕ 2011 Joint Fluids Engineering Conference, AJK, – 2011. – № 1 (PARTS A, B, C, D). – P. 755–761.
19. Комп'ютерна програма «Програма формування варіантів кодія з мінімальним зміщенням» / [М. Д. Кошовий, І. І. Кошова, В. А. Дергачов та др.]; свід. про реєстр. автор. права на твір №74877. – Зареєстр. в Міністерстві економічного розвитку і торгівлі України 21.11.2017 р.
20. Комп'ютерна програма «Програма формування типових планів багатфакторного експерименту» / [М. Д. Кошовий, І. І. Кошова, В. А. Дергачов та др.]; свід. про реєстр. автор. права на твір №74881. – Зареєстр. в Міністерстві економічного розвитку і торгівлі України 21.11.2017 р.
21. Фирсов С. Н. Аппаратно-програмный комплекс экспериментальной отработки процессов управления, диагностирования и парирования отказов малых космических аппаратов / С. Н. Фирсов, О. В. Резникова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2014. – № 6. – С. 60–69. eLIBRARY ID: 22776434.

Стаття поступила в редакцію 25.01.2019.  
Після доработки 07.03.2019.

УДК 519.24

#### ДОСЛІДЖЕННЯ МНОЖИНИ ПЛАНІВ БАГАТОФАКТОРНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ З МІНІМАЛЬНИМ ЧИСЛОМ ПЕРЕХОДІВ РІВНІВ ФАКТОРІВ

**Кошовий М. Д.** – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри авіаційних приладів і вимірювань, Національний аерокосмічний університет ім. М. Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

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

**Павлик Г. В.** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри авіаційних приладів і вимірювань, Національний аерокосмічний університет ім. М. Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

**Кошова І. І.** – аспірант кафедри авіаційних приладів і вимірювань, Національний аерокосмічний університет ім. М. Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

**Рожнова Т. Г.** – канд. техн. наук, ст. викладач кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна.

#### АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** Вирішено актуальну задачу скорочення множини планів багатфакторних експериментів для пошуку оптимального за вартісними витратами.

**Мета роботи** – синтез та дослідження множини планів експерименту з мінімальним числом переходів рівнів факторів.

**Методи.** Застосування методів планування експерименту дозволяє зменшити вартісні та часові витрати при дослідженні різних технологічних процесів, приладів і систем.

Мінімізація кількості переходів рівнів факторів у плані експерименту, в свою чергу, призводить до зменшення вартості (часу) його реалізації. Одним із методів зменшення кількості переходів рівнів факторів є застосування коду Грея для побудови плану експерименту.

Підтверджується, що плани багатфакторних експериментів, побудовані з використанням коду Грея, мають мінімальну кількість переходів рівнів факторів, але не завжди оптимальні за вартістю (часом) реалізації експерименту.

Для синтезу множини планів експерименту з мінімальним числом переходів рівнів факторів для пошуку оптимального плану за вартісними (часовими) витратами запропоновано метод, в основі якого лежить генерація варіантів дійкових кодів, аналіз їх характеристик та вибір послідовностей, що відповідають заданим вимогам. Формування типових планів експерименту виконується по методу, в основі якого лежить генерація варіантів побудови планів, визначення класів еквівалентності відносно заданої групи  $P$  перетворень та формування множини типових представників для виділених класів еквівалентності.

**Результати.** Розроблено програмне забезпечення, що реалізує запропоновані методи, яке використовується для побудови множини планів експериментів для кількості факторів  $k=3$  з мінімальним числом переходів рівнів.

**Висновки.** Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованих методів та реалізуючого їх програмного забезпечення, які дозволяють скоротити множини планів експерименту для пошуку оптимального. Наукову новизну роботи становлять методи, які дозволяють синтезувати множини планів багатфакторних експериментів, що скорочують пошук оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів. Практична значимість результатів роботи в тому, що розроблене програмне забезпечення, яке реалізує запропоновані методи, може знайти широкі застосування для дослідження технологічних процесів, приладів та систем, на яких можлива реалізація активного експерименту.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** методи, оптимальний план експерименту, множина, програмне забезпечення, вартість.

UDC 519.24

#### RESEARCH OF MULTIPLE PLANS IN MULTI-FACTOR EXPERIMENTS WITH A MINIMUM NUMBER OF TRANSITIONS OF LEVELS OF FACTORS

**Koshevoy N. D.** – Dr. Sc., Professor, Head of Department, Department of aircraft instrumentation and measurements, National Aerospace University named after M. E. Zhukovskoho "NAI", Kharkov, Ukraine.

**Kostenko O. M.** – Dr. Sc., Associate Professor, Department of Technology and Equipment for Processing and Food Production, Poltava State Agrarian Academy, Poltava, Ukraine.

**Pavlyk A. V.** – Dr. Sc., Assistant of Professor, Department of Aircraft Instrumentation and measurements, National Aerospace University named after M. E. Zhukovskoho "NAI", Kharkov, Ukraine.

**Kosheva I. I.** – Postgraduate student Department of aircraft instrumentation and measurements, National Aerospace University named after M. E. Zhukovskoho "NAI", Kharkov, Ukraine.

**Rozhnova T. G.** – PhD, Assistant of Professor, Design Automation Department, Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkov, Ukraine.

#### ABSTRACT

**Context.** The actual problem of reducing the set of plans for multivariate experiments in searching for the best in price costs has been solved.

**Objective in the synthesis and study of a variety of experimental plans with a minimum number of transitions of factor levels.**

**Methods.** The use of experimental design methods allows reducing the price and time costs in the study of various technological processes, devices and systems.

Minimizing the number of transitions of levels of factors in terms of the experiment, in turn, leads to a decrease in the cost (time) of its implementation. One of the methods for reducing the number of transitions of levels of factors is the use of the Gray code when constructing a plan of an experiment.

It is shown that multi-factor experiments plans constructed using the Gray code have a minimum number of transitions of factor levels, but are not always optimal in terms of the cost (time) of the experiment.

For the synthesis of many experimental plans with a minimum number of transitions of levels of factors in searching for the optimal plan for cost (time) costs, a method based on the generation of binary code variants is proposed. Analysis of their characteristics and the choice of sequences that meet specified requirements were conducted. The formation of test plans for an experiment is carried out according to the method based on the generation of variants for constructing plans, determining equivalence classes with respect to a given group P of transformations and forming a set of typical representatives for the selected equivalence classes.

**Results.** Software that implements the proposed methods, which is used in the construction of a set of experimental plans for the number of factors  $K = 3$  with the minimum number of level transitions was developed.

**Conclusions.** The experiments, which were carried out, confirmed the efficiency of the proposed methods and the software implementing them makes it possible to reduce the set of experiment plans for finding the optimal one. The scientific originality of the research is presented by the methods which allow to synthesize many plans of multifactor experiments to reduce the search for optimal plans in price (time) cost. The practical significance of the research results is in the developed software which implements the proposed methods. It can be widely used in the study of technological processes, devices and systems, on which the implementation of an active experiment is possible.

**KEYWORDS:** methods, optimal experiment plan, set, software, cost.

#### REFERENCES

1. Koshevoj N. D., Kosheva I. I., Kostenko E. M. Primenenie metodov optimizatsii, osnovanykh na kode Greja, pri issledovanii tehnologicheskikh processov i priborov. *Viznik Herzonovskogo nacional'nogo iebnicheskogo universitetu*. 2018, No. 1, Tom 2, pp. 241–245.
2. Hoskins D. S. Combinatorics and Statistical Inference. *Applied Optimal Designs*, vol. 4, 2007, pp. 147–179.
3. Morgan J. P. Association Schemes: Designed Experiments, Algebra and Combinatorics. *Journal of the American Statistical Association*, 2005, Vol. 100, No. 471, pp. 1092–1093.
4. Bailey R. A., Cameron P. G. Combinatorics of optimal designs. *Surveys in Combinatorics*, Vol. 365, 2009, pp. 19–73.
5. Karpenko A. P. Sovremennyye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vvedeniye i primeneniye: uchebnoe posobie. Moscow, Izd-vo MGU im. N. Ye. Baubana, 2014, 446 p.
6. Koshevoj N. D., Kostenko E. M. Optimal'noe po stoimostyem i vremennym zhitatam planirovaniye jeksperimenta. *Poltava, izdatel' Shevchenko R. V.*, 2013, 317 p.
7. Montgomery D. C. *Design and Analysis of Experiments*, 9th ed. Wiley, 2017, 629 p.
8. Bartos B. J., Cleary R. Mc., Dowall D. Mc. *Design and analysis of time series experiments*. Oxford, Oxford University Press, 2017, 393 p.
9. Berger P. D., Manger R. E. *Experimental Design with Applications in Management, Engineering and the Sciences*. Cella New York, Springer, 2018, 640 p.
10. Rodrigues M. I., Jennia A. F. *Experimental Design and Process Optimization*. N.-Y., CRC Press, 2016, 336 p.
11. Wu C. F. J., Hamada M. S. *Experiments: Planning, Analysis, and Optimization*. Wiley, 2015, 743 p.
12. Koshevoj N. D., Beljaeva A. A. Primeneniye algoritma optimizatsii roem chaetich dlya minimizatsii stoimosti provedeniya mnogofaktornogo jeksperimenta. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2018, No. 1, pp. 41–49. DOI 10.15588/1607-3274-2018-1-5.
13. Koshevoj N. D., Beljaeva A. A. Sraznitel'nyy analiz metodov optimizatsii pri issledovanii vesicizmeritel'noj sistemy i termoregulyatora. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2018, No. 4, pp. 179–187. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-4-17. DOI:
14. Gal'chenko V. Ja., Trembovec'ka R. V., Tychkov V. V. Zastozhuvannya nejrokomputinga na etapi pobudovi testmodelej v procesi optimal'nogo stroyennya sistemu anodn. *Viznik NTUU KPI. Seriya Radiotekhnika Radioaparaturuvannia*, 2018, Issue 74, pp. 60–72. DOI: 10.20535/RADAP.2018.74.60-72.
15. Yakovlev S. *Convex extensions in combinatorial optimization and their applications*. *Springer Optimization and its Applications*. New York, Springer, 2017, Vol. 130, pp. 367–384.
16. Yakovlev S. V., Pichugina O. S. Properties of combinatorial optimization problems over polyhedral-spherical sets. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2018, No. 1, Vol. 54, pp. 99–109.
17. Ugryumov M. L., Mez'shikov V. A., Belik V. V. Network-characteristic calculation method of spatial boundary layer on bonding surface of interblade channel of turboset. *Izvestiya Fizicheskikh Uchebnykh Zavedeniy. Aviatcionnaya Tekhnika*, 1992, No. 1, pp. 38–41.
18. Ugryumov M. L., Afanasjevskaya V. E., Tretchuk A. A., Myrenyaylov A. V. Stochastic optimization models and method in the turbomachines system improvement problem. *ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference, ASEE*, 2011, No. 1 (PARTS A, B, C, D), pp. 755–761.
19. Koshevoj N. D., Kosheva I. I., Dergachov V. A., Pavlyk G. V., Kostenko O. M. Komp'yuterna programma "Programa formuvannya variantiv kodiv z minimal'ny'my' zminnany'my", zvid, pro reestr. avtor. prava na tvir №74877. Zareyestr. v Ministerstvi ekonomichnogo rovy'ku i torgivli Ukrainy' 21.11.2017r.
20. Koshevoj N. D., Kosheva I. I., Dergachov V. A., Pavlyk G. V., Kostenko O. M. Komp'yuterna programma "Programa formuvannya ty'povy'x planiv hahatofaktornogo ekapyer'menta", zvid, pro reestr. avtor. prava na tvir №74881. Zareyestr. v Ministerstvi ekonomichnogo rovy'ku i torgivli Ukrainy' 21.11.2017r.
21. Furov S. N., Reznikova O. V. Apparatno-programmnyy kompleks jeksperimental'noj otrobki processov upravleniya, diagnostuvannya i pastrovaniya otkazov malyh kosmicheskikh apparatov. *Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika*, 2014, No. 6, pp. 60–69. eLIBRARY ID: 22776434.