

УДК 519.242

doi: 10.32620/reks.2018.4.05

Н. Д. КОШЕВОЙ, В. В. МУРАТОВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА ПРЫГАЮЩИХ ЛЯГУШЕК ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПО СТОИМОСТНЫМ (ВРЕМЕННЫМ) ЗАТРАТАМ ПЛАНОВ ПОЛНОГО ФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Целью данной статьи является дальнейшее развитие методологии оптимального по стоимостным (временным) затратам планирования эксперимента, которая включает в себя комплекс методов оптимизации планов эксперимента и программно-аппаратные средства для их реализации. Объект исследования: процессы оптимизации по стоимостным затратам планов многофакторных экспериментов. Предмет исследования: метод оптимизации по стоимостным затратам планов экспериментов, основанный на применении метода прыгающих лягушек. Экспериментальные методы исследования все больше применяют для оптимизации производственных процессов. Планирование эксперимента позволяет получить их математические модели при минимальных стоимостных и временных затратах. При этом разработаны метод и программа на языке программирования C++ для построения оптимальных или близких к оптимальным планам полного факторного эксперимента с использованием алгоритма прыгающих лягушек. Это позволяет автоматизировать процесс решения задачи, уменьшить сроки разработки оптимальных планов эксперимента, повысить достоверность полученных результатов, уменьшить время и стоимость проведения экспериментов. Показана его эффективность в сравнении с другими методами оптимизации многофакторных планов эксперимента. Работоспособность и эффективность подтверждается совпадением или приближением оптимальных планов, полученных этим методом и методом полного перебора. Приведен ряд технологических объектов, на которых была проверена работоспособность разработанного метода и программного обеспечения, а именно: расход топлива в двигателе внутреннего сгорания, сварка пластин малой толщины, изготовление деталей горячей штамповкой, а также процесс обслуживания машин с числовым программным управлением. Проведен сравнительный анализ методов синтеза оптимальных по стоимостным (временным) затратам планов полного факторного эксперимента и показана эффективность метода прыгающих лягушек. Показано, что сложная задача уменьшения материальных и временных затрат при проведении экспериментальных исследований может решаться с помощью предложенного метода и реализующего его программного обеспечения.

**Ключевые слова:** алгоритм; метод; оптимальный план; алгоритм прыгающих лягушек; оптимизация; планирование эксперимента; стоимость; выигрывает.

### Введение

Наиболее важной составной частью научных исследований являются эксперименты. Это один из основных способов получить новые научные знания. От обычного, обыденного, пассивного наблюдения эксперимент отличается активным воздействием исследователя на изучаемое явление. Планирование эксперимента - раздел математической статистики, изучающий методы организации совокупности опытов с различными условиями для получения наиболее достоверной информации о свойствах исследуемого объекта при наличии неконтролируемых случайных возмущений [1 - 5]. Применение планирования эксперимента делает поведение экспериментатора целенаправленным и организованным, существенно способствует повышению производительности его труда и надежности полученных

результатов. Важным достоинством метода является его универсальность, пригодность в огромном большинстве областей исследования. Экспериментальные методы исследования широко применяют для оптимизации производственных процессов. Одной из главных целей эксперимента является получение максимального количества информации о влиянии исследуемых факторов на производственный процесс. Далее строится математическая модель исследуемого объекта. При этом получать модели целесообразно при минимальных стоимостных и временных затратах. Особенно это важно при исследовании длительных и дорогостоящих процессов. Задача оптимизации планов по стоимости (времени реализации) эксперимента является NP-полной, т.е. для своего решения требует затрат времени и большого количества вычислений, быстро растущих с увеличением размерности задачи [6 - 10]. По-

этому полный перебор всех возможных вариантов решения является затруднительным. В связи с этим необходимо находить решения с помощью приближенных алгоритмов.

### Постановка задачи

Задача нахождения минимальной стоимости проведения эксперимента является NP-трудной, и точное решение можно найти только для небольшого количества факторов. Для количества факторов  $k > 4$  число перестановок резко увеличивается и на современном уровне развития вычислительной техники точно решить задачу невозможно. В связи с этим становится актуальной разработка и исследование приближенных алгоритмов [6 - 10].

### Анализ исследований и публикаций

Известны комбинаторные методы оптимизации [11 - 14], но они не применяются для построения оптимальных по стоимостным и временным затратам планов многофакторных экспериментов. Известны также примеры построения многофакторных планов экспериментов, основанных на использовании следующих методов оптимизации [14, 15]:

- анализ перестановок;
- метод последовательного приближения;
- метод ветвей и границ;
- случайный поиск (перестановка строк матрицы планирования);
- симплекс-метод;
- муравьиный алгоритм;
- генетический алгоритм;
- метод отжига;
- жадный алгоритм;
- рой частиц.

Эффективность использования этих методов показана также при исследовании различных объектов: технологических процессов, приборов и систем [15, 16]. Указанные методы имеют как преимущества, так и недостатки. Например, при большом количестве факторов для полного перебора всех строк матрицы планирования нужно много времени, а другие алгоритмы позволяют получить оптимальный план эксперимента для ограниченного числа факторов  $k$ . При большом количестве факторов результаты оптимизации лишь приближаются к оптимальному плану эксперимента. Поэтому, целесообразно для сравнения результатов оптимизации применить метод прыгающих лягушек.

Цель работы - разработка метода и программного обеспечения для оптимизации по стоимостным

(временным) затратам планов полного факторного эксперимента с использованием алгоритма прыгающих лягушек [17].

### Основной материал исследования

Разработаны метод и программное обеспечение оптимизации планов полного факторного эксперимента по стоимостным (временным) затратам с использованием алгоритма прыгающих лягушек.

Сущность применения метода прыгающих лягушек заключается в следующем.

Шаг 1. В начале работы алгоритма вводится количество факторов  $k$ .

Шаг 2. Введение стоимости переходов между уровнями для каждого из факторов.

Шаг 3. В зависимости от выбранного количества факторов строится матрица планирования эксперимента.

Шаг 4. Вычисление начальной стоимости проведения эксперимента.

Шаг 5. Генерация матрицы сумм стоимостей переходов между уровнями для каждого из факторов.

Шаг 6. Сортировка индексов и генерация массива индексов для сумм стоимостей переходов между уровнями для каждого из факторов.

Шаг 7. Перестановки в столбцах в соответствии с массивом индексов для сумм стоимостей переходов между уровнями для каждого из факторов.

Шаг 8. Выполнение перебора между всеми блоками столбцов (мемплексов, в которых перемещается агент).

Шаг 9. Определение начальной точки для дальнейшего перебора, исходя из наименьшей суммы стоимостей переходов между уровнями для каждого из факторов.

Шаг 10. Выполнение поиска в рамках блока столбца, в котором находится агент по минимальному значению суммы стоимостей переходов между уровнями для каждого из факторов.

Шаг 11. Переход на следующую строку матрицы планирования и сравнение с предыдущей. Осуществляется поиск в блоке столбца с наименьшим значением суммы переходов между уровнями и установление соответствующего блока (перестановка местами в матрице планирования эксперимента).

Шаг 12. Построение оптимальной матрицы планирования эксперимента.

Шаг 13. Расчет общей стоимости реализации эксперимента.

Шаг 14. Расчет величины выигрыша  $B$ .

$$B = \frac{C_{исх}}{C_{опт}}$$

ной матрицей планирования эксперимента,  $C_{исх}$  – исходная стоимость матрицы планирования эксперимента,  $C_{опт}$  – стоимость оптимальной матрицы планирования эксперимента.

Шаг 15. Расчет времени  $t$ , затраченного на оптимизацию плана полного факторного эксперимента с использованием алгоритма прыгающих лягушек.

Программное обеспечение реализовано на языке программирования C++. Все необходимые просчеты выполнялись на компьютере с процессором Intel Pentium G620 с частотой 2,60 GHz. Необходимый объем памяти – 37 МБ. Количество факторов и стоимости переходов вводятся с клавиатуры. Таким образом, реализация метода прыгающих лягушек требует небольшого объема памяти ЭВМ и имеет высокое быстродействие решения задачи. Структура ПО: модуль ввода данных, модуль построения матрицы планирования эксперимента, модуль построения матрицы сумм стоимостей изменения значений уровней факторов, модуль оптимизации методом прыгающих лягушек, модуль построения оптимальной матрицы планирования эксперимента, модуль расчета выигрыша. Проверка работоспособности разработанного метода и программного обеспечения для оптимизации планов полного факторного эксперимента осуществлялась на ряде практических задач. Проведено сравнение разработанного метода прыгающих лягушек с методом полного перебора, который даёт наилучший результат для планов многофакторного эксперимента с количеством факторов  $k \leq 3$ .

Исходные данные для оптимизации планов эксперимента взяты из работы [14], в которой проводилось исследование системы для определения расхода топлива в двигателях внутреннего сгорания. При этом в качестве критерия оптимизации рассматривался расход топлива  $q$  в миллилитрах. Факторами, которые влияют на этот показатель, были выбраны:  $X_1$  – количество оборотов двигателя в минуту ( $n$ ), об/мин;  $X_2$  – температура двигателя ( $T$ ), °C. Стоимости изменения значений уровней факторов приведены в табл. 1 [14].

Таблица 1

Стоимости изменения значений уровней факторов

Стоимости изменения значений уровней факторов, усл. ед.	Обозначение факторов	
	$X_1$	$X_2$
Из «-1» в «+1»	0,32	0,16
Из «+1» в «-1»	0,22	0,48

Первоначальный план полного факторного эксперимента ( $k = 2$ ) и оптимальный по стоимости реализации план эксперимента, разработанный с помощью метода прыгающих лягушек, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Начальный план полного факторного эксперимента и оптимальный, разработанный при помощи метода прыгающих лягушек

Начальный план			Оптимальный план		
Номер опыта	Обозначение факторов		Номер опыта	Обозначение факторов	
	$X_1$	$X_2$		$X_1$	$X_2$
1	-1	-1	2	+1	-1
2	+1	-1	1	-1	-1
3	-1	+1	3	-1	+1
4	+1	+1	4	+1	+1

Стоимость оптимального плана эксперимента, полученного методом прыгающих лягушек, составляет 0,7 усл. ед., а стоимость плана, полученного методом полного перебора, также составляет 0,7 усл. ед. [14].

Поиск оптимального плана эксперимента, полученного методом прыгающих лягушек, был реализован за 0,001 с.

Выигрыш по сравнению с начальной матрицей планирования эксперимента также, как и в работе [14] составляет 1,46 раза. На рис. 1 изображено изменение выигрыша в стоимости реализации эксперимента по сравнению с методом полного перебора.

В работе [16] проводилось исследование технологического процесса сварки пластин малой толщины по определению оптимального режима сварки. В качестве факторов рассматривались:  $X_1$  – емкость конденсаторов, мкФ;  $X_2$  – коэффициент трансформации,  $X_3$  – усилие на электродах, Н. Стоимости изменения значений уровней факторов приведены в табл. 3 [14].

Таблица 3

Стоимости изменения значений уровней факторов

Стоимости изменения значений уровней факторов, усл. ед.	Обозначение факторов		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$
Из «-1» в «+1»	2,5	2,0	1,5
Из «+1» в «-1»	3,0	2,5	2,0

Первоначальный план полного факторного эксперимента ( $k = 3$ ) и оптимальный по стоимости

реализации план эксперимента, разработанный с помощью метода прыгающих лягушек, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Начальный план полного факторного эксперимента и оптимальный, разработанный при помощи метода прыгающих лягушек

Начальный план				Оптимальный план			
Но- мер опы- та	Обозначение факторов			Но- мер опы- та	Обозначение факторов		
	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
2	+1	-1	-1	5	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1	7	-1	+1	+1
4	+1	+1	-1	3	-1	+1	-1
5	-1	-1	+1	4	+1	+1	-1
6	+1	-1	+1	8	+1	+1	+1
7	-1	+1	+1	6	+1	-1	+1
8	+1	+1	+1	2	+1	-1	-1

Стоимость оптимального плана эксперимента, полученного методом прыгающих лягушек, составляет 14 усл. ед., а стоимость плана, полученного методом полного перебора, также составляет 14 усл. ед. [16].

Поиск оптимального плана эксперимента методом прыгающих лягушек был реализован за 0,03 с.

Выигрыш по сравнению с начальной матрицей планирования также, как и в работе [16] составляет 1,93 раза (рис. 1).

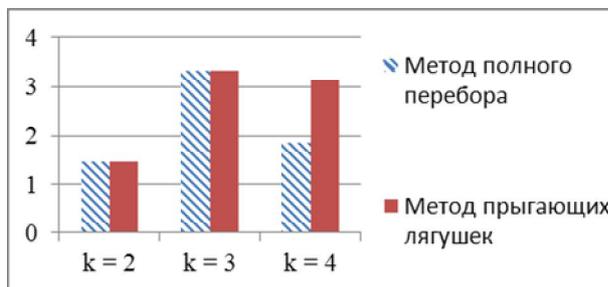


Рис. 1. Изменение выигрыша в стоимости реализации эксперимента

В работе [14] проводилось исследование технологического процесса изготовления деталей горячей штамповкой. На основании априорной информации в качестве критерия оптимизации процесса была выбрана толщина детали  $h_{\text{дет}}$ , а доминирующими – следующие факторы:  $X_1$  – температура

нагрева заготовки, °C;  $X_2$  – время нагрева заготовки, мин;  $X_3$  – температура нагрева штампа, °C. Время изменения значений уровней факторов приведены в табл. 5 [14].

Таблица 5

Стоимости изменения значений уровней факторов

Стоимости изменения значений уровней факторов, усл. ед.	Обозначение факторов		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
Из «-1» в «+1»	30	22	3,75
Из «+1» в «-1»	25	5	7,5

Первоначальный план полного факторного эксперимента ( $k = 3$ ) и оптимальный по времени реализации план эксперимента, разработанный с помощью метода прыгающих лягушек, приведены в табл. 6.

Таблица 6

Начальный план полного факторного эксперимента и оптимальный, разработанный при помощи метода прыгающих лягушек

Начальный план				Оптимальный план			
Но- мер опы- та	Обозначение факторов			Но- мер опы- та	Обозначение факторов		
	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	4	+1	+1	-1
2	+1	-1	-1	8	+1	+1	+1
3	-1	+1	-1	6	+1	-1	+1
4	+1	+1	-1	2	+1	-1	-1
5	-1	-1	+1	1	-1	-1	-1
6	+1	-1	+1	5	-1	-1	+1
7	-1	+1	+1	7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1	3	-1	+1	-1

Реализации эксперимента, полученного методом прыгающих лягушек, составляет 73,7 мин, а время по плану, полученным методом полного перебора, равно 72 мин [14].

Поиск оптимального плана эксперимента методом прыгающих лягушек был реализован за 0,01 с. Выигрыш во времени реализации по сравнению с начальной матрицей планирования составляет 3,34 раза, а в работе [14] выигрыш равен 3,37 раза (см. рис. 1).

В работе [14] проведено исследование участка цеха станков с числовым программным управлени-

ем. В качестве критерия оптимизации было выбрано суммарное время работы станков. Доминирующими факторами, которые влияют на этот показатель, были выбраны:  $X_1$  – время выполнения профилактики ( $t_n$ ), часов;  $X_2$  – число станков с числовым программным управлением  $u_{ц}$ ;  $X_3$  – время работы станков в течение суток  $t_c$ , часов;  $X_4$  – периодичность профилактики  $t_0$ , часов. Время изменения значений уровней факторов приведены в табл. 7 [14]. Первоначальный план полного факторного эксперимента ( $k = 4$ ) и оптимальный по времени реализации план эксперимента, разработанный с помощью метода прыгающих лягушек, приведены в табл. 8.

Таблица 7

Стоимости изменения значений уровней факторов

Стоимости изменения значений уровней факторов, усл. ед.	Обозначение факторов			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
Из «-1» в «+1»	7,0	6,0	16,0	100,0
Из «+1» в «-1»	3,0	2,0	12,0	50,0

Таблица 8

Начальный план полного факторного эксперимента и оптимальный, разработанный при помощи метода прыгающих лягушек

Начальный план					Оптимальный план				
Но-мер опыта	Обозначение факторов				Но-мер опыта	Обозначение факторов			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$		$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
1	-1	-1	-1	-1	16	+1	+1	+1	+1
2	+1	-1	-1	-1	14	+1	-1	+1	+1
3	-1	+1	-1	-1	13	-1	-1	+1	+1
4	+1	+1	-1	-1	15	-1	+1	+1	+1
5	-1	-1	+1	-1	11	-1	+1	-1	+1
6	+1	-1	+1	-1	9	-1	-1	-1	+1
7	-1	+1	+1	-1	10	+1	-1	-1	+1
8	+1	+1	+1	-1	12	+1	+1	-1	+1
9	-1	-1	-1	+1	4	+1	+1	-1	-1
10	+1	-1	-1	+1	2	+1	-1	-1	-1
11	-1	+1	-1	+1	1	-1	-1	-1	-1
12	+1	+1	-1	+1	3	-1	+1	-1	-1
13	-1	-1	+1	+1	7	-1	+1	+1	-1
14	+1	-1	+1	+1	5	-1	-1	+1	-1
15	-1	+1	+1	+1	6	+1	-1	+1	-1
16	+1	+1	+1	+1	8	+1	+1	+1	-1

Время реализации оптимального плана эксперимента, полученного методом прыгающих лягушек, составляет 76 часов.

Нахождение оптимального плана эксперимента методом прыгающих лягушек было осуществлено за 0,017 с.

Выигрыш по сравнению с начальной матрицей планирования эксперимента составляет 3,17 раза, а в работе [14] выигрыш, полученный методом ограниченного перебора, составляет 1,17 раза (см. рис. 1).

Таким образом, в результате исследования выбранных объектов показано, что метод прыгающих лягушек дает результаты близкие к оптимальным или оптимальные как в методе полного перебора, но за меньшее время счета благодаря уменьшению необходимых преобразований.

### Заключение

Разработаны метод и программа, которые реализуют оптимизацию по стоимостным (временным) затратам планов полного факторного эксперимента с применением алгоритма прыгающих лягушек. Доказана их работоспособность и эффективность на ряде примеров исследования систем и технологических процессов. Поиск оптимального или близкого к оптимальному плану, полученного этим методом, реализуется за малое время счета. Для оптимизации планов полного факторного эксперимента целесообразно использование метода прыгающих лягушек при исследовании объектов с количеством факторов  $2 \leq k \leq 7$ .

Научную новизну представляет предложенный метод прыгающих лягушек для оптимизации по стоимостным (временным) затратам планов полного факторного эксперимента, а практическую ценность - программное обеспечение для его реализации.

Применение метода прыгающих лягушек можно эффективно распространить на исследование различных объектов, позволяющих проведение активного эксперимента.

### Литература

1. *Design and Analysis of Experiments [Text] / D. C. Montgomery. – 9th ed. – J. Wiley & Sons, 2017. – 630 p. ISBN-10: 1119113474.*
2. *Bartos, B. J. Design and analysis of time series experiments [Text] / B. J. Bartos, R. McCleary, D. McDowall. – Oxford : Oxford University Press, 2017. – 393 p.*
3. *Berger, P. D. Experimental Design with Applications in Management, Engineering and the Sciences [Text] / P. D. Berger, R. E. Maurer, G. B. Celli. – New York : Springer, 2018. – 640 p.*

4. Rodrigues, M. I. *Experimental Design and Process Optimization [Text]* / M. I. Rodrigues, A. F. Iemma. – N.-Y. : CRC Press, 2016. – 336 p. e-ISBN: 978-1-4822-9956-4.

5. Wu, C. F. J. *Experiments: Planning, Analysis, and Optimization [Text]* / C. F. J. Wu, M. Hamada. – S. Wiley, 2015. – 743 p. ISBN: 0471699462, 9780471699460.

6. *Application of optimal planning methodologies for investigation of technological processes, devices and systems [Text]* / I. Kirichenko, E. M. Kostenko, N. D. Koshevoy, V. I. Rozhnova // TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture. – Lublin, 2013. – vol. 13, no. 3. – P. 90-97.

7. *Investigation into optoelectronic aviation angle meter by the design - of - experiments method [Text]* / A. S. Oganessian, M. V. Thehovsky, N. D. Koshevoy, V. A. Gordienko // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2010. – vol. 69, no. 9. – P. 839-845. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v69.i9.70

8. Соколовская, Е. И. Моделирование процесса получения пористых материалов с оптимальными механическими свойствами [Электронный ресурс] / Е. И. Соколовская // *Математическое моделирование*. – 2010. – № 1(22). – С. 43-45. – Режим доступа: <http://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/74/69/12st43-45.pdf>. – 12.05.2018.

9. Кошевой, Н. Д. Применение алгоритма оптимизации рою частиц для минимизации стоимости проведения многофакторного эксперимента [Текст] / Н. Д. Кошевой, А. А. Беляева // *Радиоэлектроника, информатика, управление*. – 2018. – №1. – С. 41-49. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-1-5.

10. Барабашук, В. И. Планирование эксперимента в технике [Текст] / В. И. Барабашук, Б. П. Крендер, В. И. Мирошниченко. – Киев : Техніка, 1984. – 200 с.

11. Hoskins, D. S. *Combinatorics and Statistical Inferencing [Text]* / D. S. Hoskins // *Applied Optimal Designs*. – 2007. – No. 4. – P. 147-179.

12. Morgan, J. P. *Association Schemes: Designed Experiments, Algebra and Combinatorics [Text]* / J. P. Morgan // *Journal of the American Statistical Association*. – 2005. – Vol. 100, No. 471. – P. 1092-1093.

13. Bailey, R. A. *Combinatorics of optimal designs [Text]* / R. A. Bailey, P. G. Cameron // *Surveys in Combinatorics*. – 2009. – Vol. 365. – P. 19-73.

14. Кошевой, Н. Д. Оптимальное по стоимостным и временным затратам планирование эксперимента [Текст] : монография / Н. Д. Кошевой, Е. М. Костенко. – Полтава : Издатель Шевченко П. В., 2013. – 317 с.

15. *Optimum planning of experiment in manufacturing the electronic equipment [Text]* / N. D. Koshevoy, E. M. Kostenko, V. A. Gordienko, V. P. Syroklyn // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2011. – Vol. 70, No. 8. – P. 731-734.

DOI: 10.1615/TelecomRadEng.V70.i8.60.

16. Koshevoy, N. D. *Optimization for the Design matrix realization value with the aim to investigate*

*technological processes [Text]* / N. D. Koshevoy, V. A. Gordienko, Ye. A. Sukhobrus // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2014. – Vol. 73, No. 15. – P. 1383-1386.

DOI: 10.1615/TelecomRadEng.V73.i15.60.

17. Карпенко, А. П. *Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой [Текст]* / А. П. Карпенко. – 2-е издание. – 2017. – 448 с.

18. *Aircraft system for measuring the angular deflections of control surfaces [Text]* / N. D. Koshevoy, E. M. Kostenko, A. S. Oganessian, M. V. Tsekhovskoi // *Russian Aeronautics*. – October 2013. – Volume 56, Issue 4. – P. 418-422.

DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068799813040168>.

## References

1. Montgomery, D. C. *Design and Analysis of Experiments*, 9th ed., J. Wiley & Sons Publ., 2017. 630 p. ISBN-10: 1119113474.

2. Bartos, B. J., McCleary, R., McDowall, D. *Design and analysis of time series experiments*. Oxford, Oxford University Press Publ., 2017. 393 p.

3. Berger, P. D., Maurer, R. E., Celli, G. B. *Experimental Design with Applications in Management, Engineering and the Sciences*. New York, Springer Publ., 2018. 640 p.

4. Rodrigues, M. I., Iemma, A. F. *Experimental Degree and Process Optimization*. N.-Y., CRC Press Publ., 2016. 336 p. e-ISBN: 978-1-4822-9956-4.

5. Wu, C. F. J., Hamada, M. S. *Experiments: Planning, Analysis, and Optimization*. S. Wiley Publ., 2015. 743 p. ISBN: 0471699462, 9780471699460.

6. Kirichenko, I., Kostenko, E., Koshevoy, N., Rozhnova, V. *Application of optimal planning methodologies for the investigation of technological processes, devices and systems*. TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture. Lublin, 2013, vol. 13, no. 3, pp. 90-97.

7. Oganessian, A. S., Thehovsky, M. V., Koshevoy, N. D., Gordienko, V. A. *Investigation into an experimental angle meter*. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2010, vol. 69, no. 9, pp. 839-845. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v69.i9.70

8. Sokolovskaja, E.I. *Modelirovanie processa poluchenija poristyh materialov s optimal'nymi mehanicheskimi svojstvami [Simulation process]*. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2010, no. 1 (22), pp. 43-45. Available at: <http://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/74/69/12st43-45.pdf>. (accessed 12.05.2018).

9. Koshevoy, N. D., Belyaeva, A. A. *Primenenie algoritma optimizacii roem chastic dlja minimizacii stoimosti provedenija mnogofaktornogo jeksperimenta [Application of the algorithm of optimization by a swarm of particles to minimize the cost of a multifactor experiment]*. *Radioelectronika, informatics, control*, 2018, no. 1, pp. 41-49. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-1-5.

10. Barabashhuk, V. I., Krender, B. P., Miroshnichenko, V. I. *Planirovanie jeksperimenta v tehnikе* [Planning the experimental technique]. Kyiv, Tehnika Publ., 1984. 200 p.
11. Hoskins, D. S. Combinatorics and Statistical Inferecing. *Applied Optimal Designs*, 2016, no. 4, pp. 147-179.
12. Morgan, J. P. Association Schemes: Designed Experiments, Algebra and Combinatorics. *Journal of the American Statistical Association*, 2015, vol. 100, no. 471, pp. 1092-1093.
13. Bailey, R. A., Cameron, P. G. Combinatorics of optimal designs. *Surveys in Combinatorics*, 2016, vol. 365, pp. 19-73.
14. Koshevoy, N. D., Kostenko, E. M. *Optimal'noe po stoimostnym i vremennym zatratam planirovanie jeksperimenta* [Optimal in terms of cost and time costs, experimental design]. Poltava, Shevchenko R. V. Publ., 2013. 317 p.
15. Koshevoy, N. D., Kostenko, E. M., Gordienko, V. A., Syroklyn, V. P. Optimum planning of an experiment in manufacturing the electronic equipment. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2011, vol. 70, no. 8, pp. 731-734. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.V70.i8.60.
16. Koshevoy, N. D., Gordienko, V. A., Sukhobrus, Ye. A. Optimization for the design of technological processes. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2014, vol. 73, no. 15, pp. 1383-1386. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.V73.i15.60.
17. Karpenko, A. P. *Modern algorithms for search engine optimization. Algorithms inspired by nature*, 2nd edition, 2017. 448 p.
18. Koshevoy, N. D., Kostenko, E. M., Oganesyanyan, A. S., Tsekhovskoi, M. V. Aircraft system for measuring the angular deflections of control surfaces. *Russian Aeronautics*, October 2013, vol. 56, iss. 4, pp. 418-422. DOI: 10.3103/S1068799813040168.

Поступила в редакцію 20.11.2018, рассмотрена на редколлегии 12.12.2018

## ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМУ СТРИБАЮЧИХ ЖАБ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЛАНІВ ПОВНОГО ФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

*М. Д. Кошовий, В. В. Муратов*

Метою даної статті є подальший розвиток методології оптимального за вартісними (тимчасовим) витратам планування експерименту, яка включає в себе комплекс методів оптимізації планів експерименту і програмно-апаратні засоби для їх реалізації. Об'єкт дослідження: процеси оптимізації за вартісними витратами планів багатфакторних експериментів. Предмет дослідження: метод оптимізації за вартісними витратами планів експериментів, заснований на застосуванні методу стрибаючих жаб. Експериментальні методи дослідження все більше застосовують для оптимізації виробничих процесів. Планування експерименту дозволяє отримувати їх математичні моделі при мінімальних вартісних і тимчасових витратах. При цьому розроблені метод і програма на мові програмування C++ для побудови оптимальних або близьких до оптимальних планів повного факторного експерименту з використанням алгоритму стрибаючих жаб. Це дозволяє автоматизувати процес вирішення завдання, зменшити терміни розробки оптимальних планів експерименту, підвищити достовірність отриманих результатів, зменшити час і вартість проведення експериментів. Показана його ефективність в порівнянні з іншими методами оптимізації багатфакторних планів експерименту. Працездатність і ефективність підтверджується збігом або наближенням оптимальних планів, отриманих цим методом і методом повного перебору. Наведено ряд технологічних об'єктів, на яких була перевірена працездатність розробленого методу та програмного забезпечення, а саме: витрата палива в двигуні внутрішнього згоряння, зварювання пластин малої товщини, виготовлення деталей гарячої штампуванням, а також процес обслуговування машин з числовим програмним управлінням. Проведено порівняльний аналіз методів синтезу оптимальних за вартісними (часовим) витрат планів повного факторного експерименту і показана ефективність методу стрибаючих жаб. Показано, що складна задача зменшення матеріальних і часових витрат при проведенні експериментальних досліджень може вирішуватися за допомогою запропонованого методу і реалізує його програмного забезпечення.

**Ключові слова:** алгоритм; метод; оптимальний план; алгоритм стрибаючих жаб; оптимізація; планування експерименту; вартість; вигреш.

## APPLICATION OF THE SHUFFLED FROG-LEAPING ALGORITHM FOR OPTIMIZATION OF PLANS OF FULL FACTOR EXPERIMENT

*N. D. Koshevoy, V. V. Muratov*

The purpose of this article is to further develop the methodology for the optimal cost (time) costs of experiment planning, which includes a set of methods for optimizing experiment plans and software and hardware for their implementation. The object of study: the optimization processes for the cost-based plans of multivariate experiments. The subject of research: the cost-optimization method of experimental design plans, based on the use of shuf-

fled frog-leaping method. Experimental research methods are increasingly used to optimize production processes. Planning an experiment allows you to get their mathematical models with minimal cost and time costs. At the same time, a method and a program in the C++ programming language were developed for constructing optimal or close to optimal plans for a full factorial experiment applying the shuffled frog-leaping algorithm. This allows you to automate the process of solving the problem, reduce the time to develop optimal plans for the experiment, increase the reliability of the results, reduce the time and cost of the experiments. Its effectiveness is shown in comparison with other methods for optimizing multi-factor experimental designs. The efficiency and effectiveness are confirmed by the coincidence or approximation of the optimal plans obtained by this method and the method of complete enumeration. A number of technological objects are presented on which the operability of the developed method and software was tested, namely: fuel consumption in an internal combustion engine, welding of small thickness plates, production of parts by hot stamping, as well as the process of servicing numerically controlled machines. A comparative analysis of the methods for the synthesis of cost-optimal (time) expenditure plans for a full factorial experiment was carried out and the effectiveness of the shuffled frog-leaping method was shown. It is shown that the difficult task of reducing material and time costs when conducting experimental studies can be solved using the proposed method and the software implementing it.

**Keywords:** algorithm; method; optimal plan; shuffled frog-leaping algorithm; optimization; experiment planning; cost; winnings.

**Кошевой Николай Дмитриевич** – д-р техн. наук, проф., зав. кафедры авиационных приборов и измерений, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Муратов Виктор Владимирович** – аспирант каф. авиационных приборов и измерений, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Koshevoi Nikolai Dmitrievich** – doctor of technical sciences, professor, head of Aviation Instrumentation and Measurements Chair, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: ndkoshevoy@rambler.ru.

ORCID Author ID: 0000-0001-9465-4467, Scopus Author ID 9532888400

**Muratov Viktor Vladimirovich** – PhD student of aviation instruments and measurements Chair, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: vmuratov77@gmail.com.

ORCID Author ID: 0000-0001-7684-5649.