

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РОЯ ЧАСТИЦ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТРЕХУРОВНЕВЫХ ПЛАНОВ МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

*Экспериментальные методы исследования все больше применяют для оптимизации производственных процессов. Планирование эксперимента позволяет получать их математические модели при минимальных стоимостных и временных затратах. Разработаны метод и программа оптимизации многофакторных планов эксперимента с варьированием факторов на трех уровнях с помощью алгоритма оптимизации роем частиц. 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 ветвей и границ. Проведен анализ известных методов синтеза оптимальных по стоимостным и временным затратам планов экспериментов с варьированием факторов на трех уровнях. Работоспособность метода оптимизации роем частиц доказана на примере исследования шероховатости поверхности кремния при процессах глубокого плазмохимического травления элементов микроэлектромеханических систем (МЭМС) и при исследовании метода измерения плотности тока гальванических ванн с использованием мерных датчиков.*

*Ключевые слова: рой частиц, оптимизация, планирование эксперимента, стоимость, оптимальный план.*

**Постановка задачи.** Планирование эксперимента позволяет решить задачу получения математической модели при минимальных стоимостных и временных затратах. На стоимость реализации эксперимента существенное влияние оказывает порядок чередования уровней изменения факторов. Таким образом, требуется найти порядок реализации опытов, обеспечивающий минимальную стоимость проведения многофакторного эксперимента. Эта задача становится особенно актуальной при исследовании длительных и дорогостоящих процессов.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Известны методы синтеза оптимальных по стоимостным и временным затратам планов экспериментов с варьированием факторов на трех уровнях [1], основанные на использовании следующих видов оптимизации:

анализ перестановок строк матрицы планирования, случайный поиск, метод ветвей и границ, метод табу-поиска [2].

Эффективность разработанных методов доказана при исследовании ряда различных технологических процессов, приборов и систем [1]. Однако их существенными недостатками являются: низкое быстродействие, не всегда находится оптимальное решение. Поэтому целесообразно проверить возможность применения метода роя частиц для оптимизации планов многофакторного эксперимента с варьированием факторов на трех уровнях.

**Цель статьи.** Разработка метода и программного обеспечения для оптимизации плана многофакторного эксперимента с варьированием факторов на трех уровнях с использованием алгоритма оптимизации роем частиц.

**Основные материалы исследования.** С использованием разработанного программного обеспечения исследовали шероховатость поверхности кремния при процессах глубокого плазмохимического травления элементов МЭМС. Исходный план эксперимента  $3^k$ , а также описание метода определения шероховатости поверхности кремния при процессах глубокого плазмохимического травления элементов МЭМС, приведены в работе [1]. При составлении плана эксперимента были учтены три входных фактора процесса, предположительно способных в наибольшей степени влиять на оптимизируемый параметр (среднее арифметическое отклонение профиля):  $X_1$  – отношение длительности стадий пассивации и травления;  $X_2$  – давление в реакторе, Па;  $X_3$  – температура электрода-подложкодержателя, °С.

Условия проведения эксперимента представлены в табл. 1.

Таблица 1

Условия проведения эксперимента

Наименование параметров	Обозначение	Входные факторы		
		$X_1$	$X_2$	$X_3$
Нулевой уровень	0	0,2	3	20
Интервал варьирования	$\Delta X_i$	0,1	1	10
Нижний уровень	-1	0,1	2	10
Верхний уровень	+1	0,3	4	30

В табл. 2 представлены стоимости изменений значений уровней факторов.

Режимы проведения процессов травления кремния задавали в соответствии с выбранным планом (табл.3), который представлял собой полный факторный эксперимент для трех факторов при их одновременном варьировании на трех уровнях: «+1», «-1», «0». Оптимальный план эксперимента, полученный с использованием разработанного программного обеспечения, реализующего алгоритм оптимизации роем частиц, также представлен в табл. 3.

Таблица 2

Стоимости изменений значений уровней факторов

Стоимости изменений, усл.ед.	Обозначение факторов		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$
из «0» в «-1»	3	7	8
из «0» в «+1»	2	5	10
из «-1» в «+1»	4	10	20
из «+1» в «-1»	6	14	16
из «-1» в «0»	2	5	10
из «+1» в «0»	3	7	8

Таблица 3

## Исходный и оптимальный план эксперимента

Исходный план				Оптимальный план			
Номер опыта	Обозначения факторов			Номер опыта	Обозначения 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	0	0	1	-1	0	0
2	-1	0	-1	19	0	0	0
3	+1	-1	-1	10	-1	-1	+1
4	0	0	+1	22	0	-1	+1
5	+1	0	0	7	-1	+1	+1
6	+1	+1	0	4	0	0	+1
7	-1	+1	+1	13	-1	+1	-1
8	+1	0	+1	25	+1	0	-1
9	+1	+1	+1	16	-1	-1	0
10	-1	-1	+1	26	0	-1	0
11	+1	+1	-1	2	-1	0	-1
12	0	0	-1	20	-1	0	+1
13	-1	+1	-1	23	0	+1	+1
14	+1	-1	+1	5	+1	0	0
15	0	+1	-1	15	0	+1	-1
16	-1	-1	0	6	+1	+1	0
17	0	-1	-1	18	+1	-1	0
18	+1	-1	0	3	+1	-1	-1
19	0	0	0	27	-1	+1	0
20	-1	0	+1	9	+1	+1	+1
21	1	-1	-1	17	0	-1	-1
22	0	-1	+1	8	+1	0	+1
23	0	+1	+1	11	+1	+1	-1
24	0	+1	0	14	+1	-1	+1
25	+1	0	-1	12	0	0	-1
26	0	-1	0	21	1	-1	-1
27	-1	+1	0	24	0	+1	0

Оптимизированный план эксперимента имеет значение стоимости реализации, равное 142 усл.ед., в то время как исходный план – 370 усл.ед. Выигрыш по стоимости составил 2,61 раза, в то время как при использовании метода ветвей и границ выигрыш составлял 1,28 раза. При этом на оптимизацию плана необходимо затратить 0,33 с, в то время как на реализацию метода ветвей и границ - 137 мин.

С использованием разработанного программного обеспечения исследовали метод измерения плотности тока гальванических ванн с мерными датчиками. Исходный план эксперимента  $3^k$ , а также описание метода измерения плотности тока гальванических ванн с использованием мерных датчиков, приведены в работе [1].

Методом роя частиц проведена оптимизация исходного плана по критерию суммарной стоимости реализации эксперимента. Стоимости изменений значений уровней факторов приведены в табл. 4. Порядок проведения опытов оптимального по стоимости реализации плана эксперимента представлен в табл. 5. Стоимость реализации эксперимента по этому

плану составляет 85 усл. ед., тогда как стоимость реализации исходной матрицы планирования – 174 усл. ед., а максимальная стоимость равна 225 усл. ед. Таким образом, достигнут выигрыш по стоимости реализации в 2,05 раза по сравнению с исходным планом проведения эксперимента и в 2,64 раза по сравнению с планом, обладающим максимальной стоимостью. Сравнение результатов при использовании усовершенствованного программного обеспечения по алгоритму оптимизации роем частиц и ранее разработанной программы [3] приведено в табл. 6.

Таблица 4

Стоимости изменений значений уровней факторов

Стоимости изменений, усл.ед.	Обозначение факторов		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
из «0» в «-1»	3	3	3
из «0» в «+1»	2	2	2
из «-1» в «+1»	5	5	5
из «+1» в «-1»	5	5	5
из «-1» в «0»	3	3	3
из «+1» в «0»	2	2	2

Таблица 5

Исходный и оптимальный планы эксперимента

Исходный план				Оптимальный план			
Номер опыта	Обозначения факторов			Номер опыта	Обозначения 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	0	0	1	-1	0	0
2	-1	0	-1	10	+1	+1	+1
3	+1	-1	-1	19	+1	-1	0
4	0	0	+1	20	0	0	0
5	+1	0	0	2	-1	0	-1
6	+1	+1	0	3	+1	-1	-1
7	-1	+1	0	21	-1	0	+1
8	-1	+1	+1	24	0	+1	+1
9	+1	0	+1	6	+1	+1	0
10	+1	+1	+1	4	0	0	+1
11	-1	-1	+1	22	-1	-1	-1
12	+1	+1	-1	13	0	0	-1
13	0	0	-1	14	-1	+1	-1
14	-1	+1	-1	23	0	-1	+1
15	+1	-1	+1	5	+1	0	0
16	0	+1	-1	15	+1	-1	+1
17	-1	-1	0	12	+1	+1	-1
18	0	-1	-1	11	-1	-1	+1
19	+1	-1	0	17	-1	-1	0
20	0	0	0	26	+1	0	-1
21	-1	0	+1	8	-1	+1	+1
22	-1	-1	-1	9	+1	0	+1

Исходный план				Оптимальный план			
Номер опыта	Обозначения факторов			Номер опыта	Обозначения 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>
23	0	-1	+1	27	0	-1	0
24	0	+1	+1	18	0	-1	-1
25	0	+1	0	16	0	+1	-1
26	+1	0	-1	25	0	+1	0
27	0	-1	0	7	-1	+1	0

Таблица 6

#### Результаты оптимизации планов эксперимента

Метод поиска	C <sub>исх.</sub> , усл.ед.	C <sub>min.</sub> , усл.ед.	C <sub>max.</sub> , усл.ед.	Выигрыш по сравнению с исходным планом эксперимента	Выигрыш по сравнению с планом, обладающим максимальной стоимостью
Метод оптимизации роением частиц	174	85	225	2,05	2,64
Табу-поиск	174	97	225	1,79	2,32
Случайный поиск	174	147	225	1,2	1,5

Таким образом, доказана работоспособность метода оптимизации роением частиц на примерах исследования шероховатости поверхности кремния при процессах глубокого плазмохимического травления элементов МЭМС и метода измерения плотности тока гальванических ванн с использованием мерных датчиков.

**Выводы:** Разработаны метод и программное обеспечение, реализующие оптимизацию с применением алгоритма роения частиц многофакторных планов экспериментов с варьированием факторов на трех уровнях. На конкретных примерах доказана работоспособность и эффективность метода.

Поиск оптимального или близкого к оптимальному плана эксперимента, полученного этим методом, реализуется за существенно меньшее время счета, чем при методе ветвей и границ и методе случайного поиска. Выигрыш в стоимости реализации планов экспериментов при использовании данного метода значительно больше, чем при методах случайного поиска и табу-поиска. Применение разработанного программного обеспечения, основанного на использовании алгоритма роения частиц, эффективно при количестве факторов  $k \geq 3$ .

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Кошевой Н.Д. Оптимальное по стоимостным и временным затратам планирование эксперимента/ Н.Д. Кошевой, Е.М. Костенко. – Полтава: издатель Шевченко Р.В., 2013. – 317 с.
2. Кошевой Н.Д. Применение метода табу-поиска для оптимизации трехуровневых планов многофакторного эксперимента /Н.Д.Кошевой, А.А.Беляева//Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім.Т.Г.Шевченка. – К.:ВІКНУ, 2016. – Вип.№53. – С.85-91.
3. Комп'ютерна програма «Програма пошуку оптимальних багаторівневих комбінаторних планів багатфакторного експерименту» / М.Д.Кошовий, О.М.Костенко, В.А.Дергачов: свід. про

реєстр. автор. права на твір №31824.- Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти і науки України 28.01.10.

#### REFERENCES:

1. Koshevoj N.D., Kostenko E.M. (2013). Optimal'noe po stoimostnym i vremennym zatratam planirovanie jeksperimenta. [Optimal cost and time planning of the experiment], Poltava : izdatel' Shevchenko R.V. 317 p.

2. Koshevoj N.D., Beliaieva A.A. (2016). Primenenie metoda tabu-poiska dlya optimizatsii trehurovnevnyih planov mnogofaktornogo eksperimenta. [Application of tabu search to optimize the three-level plans multivariate experiment], Kiev:ZbІrnik naukovih prats VIyskovogo Institutu KiYivskogo natsionalnogo unІversitetu Im.T.G.Shevchenka, vol.53, pp.85-91.

3. Комп'ютерна програма «Програма пошуку оптимальних багаторівневих комбінаторних планів багатofакторного експерименту» / М.Д.Косховий, О.М.Костенко, В.А.Дергачов: свид. про реєстр. автор. права на твір №31824. - Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін-ва освіти і науки України 28.01.10.

**Рецензент: д.т.н., проф. Лєнков С.В.,** начальник науково-дослідного центру Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка

д.т.н., проф. Кошовий М.Д., Беляєва А.А.

### ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМУ РОЯ ЧАСТОК ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРЬОХРІВНЕВИХ ПЛАНІВ БАГАТОФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

*Експериментальні методи дослідження все більше застосовують для оптимізації виробничих процесів. Планування експерименту дозволяє отримувати їх математичні моделі при мінімальних вартісних і часових витратах. Розроблено метод і програму оптимізації багаторівневих планів експерименту з варіюванням факторів на трьох рівнях за допомогою алгоритму оптимізації роєм часток. Показана ефективність в порівнянні з іншими методами оптимізації багаторівневих планів експерименту. Працездатність і ефективність підтверджується збігом або наближенням оптимальних планів, отриманих цим методом і методом гілок і меж. Проведено аналіз відомих методів синтезу оптимальних за вартісними і часовими витратами планів експериментів з варіювання факторів на трьох рівнях. Працездатність методу оптимізації роєм часток доведена на прикладі дослідження шорсткості поверхні кремнію при процесах глибокого плазмохімічного травлення елементів мікроелектромеханічних систем (MEMS) і при дослідженні методу вимірювання щільності струму гальванічних ванн з використанням мірних датчиків.*

*Ключові слова: рій часток, оптимізація, планування експерименту, вартість, оптимальний план.*

Prof. Koshevoj N.D., Beliaieva A.A.

### APPLYING THE ALGORITHM AND SEARCH OPTIMIZATION PLANS THREE-LEVEL MULTIVARIATE EXPERIMENT

*Experimental research methods are increasingly used to optimize production processes. Experimental Design provides a mathematical models with minimum cost and time. Develop method and software optimization multifactor experimental designs with a variation on three levels with the help of particle swarm optimization algorithm. The efficiency in comparison with other methods of optimization of multifactor experimental designs. The efficiency and effectiveness confirmed by coincidence or approximation of optimal plans obtained by this method and the method of branches and borders. Analysis of the known methods of synthesis of optimal cost and time planning of experiments with varying the factors on three levels. The efficiency of the method of particle swarm optimization is proved by the example of the study of roughness of the silicon surface during the processes of plasma-chemical etching of deep elements of microelectromechanical systems (MEMS) and in the study of the current density measurement method using electroplating baths dimensional sensors.*

*Keywords: particle swarm, optimization, design of experiments, cost, optimal plan.*