

УДК 519.24

д.т.н., проф. **Кошевой Н.Д.** (НАКУ им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»)
Беляева А.А. (НАКУ им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»)

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ТАБУ-ПОИСКА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТРЕХУРОВНЕВЫХ ПЛАНОВ МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Разработаны метод и программа оптимизации с помощью алгоритма табу поиска многофакторных планов эксперимента с варьированием на трех уровнях. Показана 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.

Ключевые слова: табу-поиск, оптимизация, планирование эксперимента, стоимость, оптимальный план.

Введение. В настоящее время широко используют различные методы планирования при проведении исследований. Планирование эксперимента предполагает одновременное измерение всех факторов, которые влияют на исследуемый процесс, что позволяет установить степень взаимодействия факторов и уменьшить количество опытов, а также построить математическую модель объекта исследования.

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 определить 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.

Эффективность разработанных методов доказана при исследовании ряда различных технологических процессов, приборов и систем. Однако их существенными недостатками являются: низкое быстродействие, не всегда находится оптимальное решение. Поэтому целесообразно проверить работоспособность метода табу-поиска для оптимизации планов многофакторного эксперимента с интервалами варьирования на трех уровнях.

Цель статьи. Разработка метода и программного обеспечения для оптимизации плана многофакторного эксперимента с варьированием факторов на трех уровнях с использованием алгоритма табу-поиска.

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

С использованием алгоритма табу-поиска проведена оптимизация исходного плана по критерию суммарной стоимости реализации эксперимента. Стоимости изменений значений уровней факторов приведены в табл. 1. Порядок проведения опытов оптимального по стоимости реализации плана эксперимента представлен в табл. 2. Стоимость реализации эксперимента по этому плану составляет 97 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 1,79 раза по сравнению с исходным планом проведения эксперимента и в 2,32 раза по сравнению с планом, обладающим максимальной стоимостью. Сравнение результатов при использовании усовершенствованного программного обеспечения по алгоритму табу-поиска и ранее разработанной программы [2] приведено в табл. 3.

Таблица 1

Стоимости изменений значений уровней факторов

Стоимости изменений, усл.ед.	Обозначение факторов		
	X ₁	X ₂	X ₃
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 2

Исходный и оптимальный планы эксперимента

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

Таблица 3

Результаты оптимизации планов эксперимента

Метод поиска	S _{исх.} , усл.ед.	S _{min.} , усл.ед.	S _{max.} , усл.ед.	Выигрыш по сравнению с исходным планом эксперимента	Выигрыш по сравнению с планом, обладающим максимальной стоимостью
Табу-поиск	174	97	225	1,79	2,32
Случайный поиск	174	147	225	1,2	1,5

В работе [1] исследована шероховатость поверхности кремния при процессах глубокого плазмохимического травления элементов МЭМС. 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. 4.

Таблица 4

Условия проведения эксперимента

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

Режимы проведения процессов травления кремния задавали в соответствии с выбранным планом (табл.5), 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 усовершенствованного программного обеспечения, реализующего алгоритм табу-поиска, представлен также в табл. 5.

Таблица 5

Исходный и оптимальный план эксперимента

Исходный план				Оптимальный план			
Номер опыта	Обозначения факторов			Номер опыта	Обозначения факторов		
	X_1	X_2	X_3		X_1	X_2	X_3
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	2	-1	0	-1
5	+1	0	0	11	+1	+1	-1
6	+1	+1	0	3	+1	-1	-1
7	-1	+1	+1	12	0	0	-1
8	+1	0	+1	9	+1	+1	+1
9	+1	+1	+1	24	0	+1	0
10	-1	-1	+1	21	1	-1	-1
11	+1	+1	-1	20	-1	0	+1
12	0	0	-1	23	0	+1	+1
13	-1	+1	-1	14	+1	-1	+1
14	+1	-1	+1	5	+1	0	0
15	0	+1	-1	17	0	-1	-1
16	-1	-1	0	15	0	+1	-1
17	0	-1	-1	6	+1	+1	0
18	+1	-1	0	8	+1	0	+1
19	0	0	0	26	0	-1	0
20	-1	0	+1	18	+1	-1	0
21	1	-1	-1	27	-1	+1	0
22	0	-1	+1	16	-1	-1	0
23	0	+1	+1	7	-1	+1	+1
24	0	+1	0	25	+1	0	-1

Исходный план				Оптимальный план			
Номер опыта	Обозначения факторов			Номер опыта	Обозначения факторов		
	X ₁	X ₂	X ₃		X ₁	X ₂	X ₃
25	+1	0	-1	22	0	-1	+1
26	0	-1	0	13	-1	+1	-1
27	-1	+1	0	4	0	0	+1

В табл. 6 представлены стоимости изменений значений уровней факторов.

Таблица 6

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

Оптимизированный план эксперимента имеет значение стоимости, равное 192 усл.ед., в то время как исходный план – 370 усл.ед. Выигрыш по стоимости составил 1,92 раза, в то время как при использовании метода ветвей и границ выигрыш составлял 1,28 раза. При этом на оптимизацию плана необходимо затратить 0,23 с, в то время как на реализацию метода ветвей и границ - 137 мин.

Таким образом, доказана работоспособность метода табу-поиска на примере исследования шероховатости поверхности кремния при процессах глубокого плазмохимического травления элементов МЭМС.

Выводы: Разработан метод и программное обеспечение, реализующие оптимизацию с применением алгоритма табу-поиска многофакторных планов проведения экспериментов с варьированием 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 (перестановки строк матрицы планирования). Применение усовершенствованного программного обеспечения, основанного на использовании алгоритма табу-поиска, эффективно при количестве факторов $k > 3$.

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. 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. Poltava : izdatel' Shevchenko R.V. 317 s.
2. Komp'juterna programa «Programa poshuku optymal'nyh bagatorivnevnyh kombinatorynyh planiv bagatofaktornogo eksperymentu» / M.D.Koshovyj, O.M.Kostenko, V.A.Dergachov: svid. pro rejestr. avtor.

права на tvir №31824.- Zarejestr. v Derzh. depart. intelektual'noi' vlasnosti Min-va osvity i nauky Ukrainy 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 ТАБУ-ПОШУКУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРЬОХРІВНЕВИХ ПЛАНІВ БАГАТОФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

Розроблено метод і програма оптимізації за допомогою алгоритму табу пошуку багатofакторних планів експерименту з варіюванням на трьох рівнях. Показана ефективність в порівнянні з іншими методами оптимізації багатofакторних планів експерименту. Працездатність і ефективність підтверджується збігом або наближенням оптимальних планів, отриманих цим методом і методом гілок і меж.

Ключові слова: табу-пошук, оптимізація, планування експерименту, вартість, оптимальний план.

Prof. Koshevoy N.D., Beliaieva A.A.

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

The method and program optimization algorithm tabu search multifactorial experiment with varying plans at three levels. The efficiency compared with other methods of multivariate optimization plans experiment. The efficiency and effectiveness confirmed by coincidence or approximation Optimalnyh plans obtained by this method and branch and bound.

Keywords: taboo search, optimization, experimental design, cost, optimal plan.

