

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИМПЛЕКС-МЕТОДА

Н. Д. Кошевой, д-р техн. наук, профессор;

Е. А. Сухобрус, аспирант,

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

E-mail: suhobruslena@mail.ru

Предложен метод поиска оптимальных планов эксперимента на основе симплекс-метода. Эффективность использования данного метода показана на примерах исследования процесса измерения плотности тока гальванических ванн, оптимизации параметров неравномерности покрытия проводников гальваническими осадками, исследования энергопотребления и точности устройства для контроля качества диэлектрических материалов.

***Ключевые слова:** измерение, точность, стоимость, анализ перестановок, случайный поиск, симплекс-метод.*

ВВЕДЕНИЕ

При исследовании качества длительных и дорогостоящих технологических процессов важное значение приобретает повышение эффективности этих исследований, направленных на получение адекватной математической модели процесса при минимальных временных и стоимостных затратах. В дальнейшем математические модели используются для поиска оптимальных режимов обработки, обеспечивающих необходимое качество продукции. Для решения этих задач целесообразно применять методы планирования эксперимента, достоинствами которых являются их универсальность и пригодность для исследования разнообразных технологических процессов.

Известна программа поиска оптимальных комбинаторных планов многофакторного эксперимента [1], позволяющая получать оптимальные по стоимости реализации планы двумя методами: анализ перестановок и случайный поиск. Недостатком данной программы является необходимость перебора множества вариантов перестановок, что требует значительных временных затрат и усложняет процесс поиска оптимального плана.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Актуальной является задача использования метода поиска оптимального плана эксперимента, обладающего более высокими показателями быстродействия.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Предложен метод поиска на основе симплекс-метода, позволяющий получать оптимальные и близкие к оптимальным по стоимости реализации многоуровневые планы многофакторного эксперимента. Для оптимизации процесса поиска реализовано программное обеспечение [2].

Эффективность программного обеспечения проверялась на примере исследования метода измерения плотности тока гальванических ванн с использованием мерных датчиков. Исходный план эксперимента 3^k приведен в работе [3]. Для определения влияния размещения мерных датчиков на величину отклонения измеренной плотности тока от заданной использовали устройство с применением трех датчиков, установленных в нескольких местах (X_1 , X_2 , X_3) ванны гальванического меднения. При осуществлении эксперимента применяли печатные платы, закрепленные на

линии «Модуль-Х», и задавали плотность тока, равную 3 А/дм². Мерные датчики крепили на специальном устройстве, а в процессе проведения опытов варьировали их расположение по плану 3^k, где k=3. Значения факторов, соответствующие обозначению «-1», означают, что свидетель закреплен в нижней части штанги, «1» - свидетель закреплен в верхней части, «0» - свидетель закреплен в середине.

Исходный план эксперимента был оптимизирован с использованием программ [1,2] следующими методами: анализ перестановок строк матрицы планирования, случайный поиск, симплекс-метод. Стоимости изменений значений уровней факторов приведены в табл. 1. Порядок проведения оптимизированных по стоимости реализации планов эксперимента представлен в табл. 2.

Таблица 1 – Стоимости изменений значений уровней факторов

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

Таблица 2 - Исходный и оптимальные планы эксперимента

Исходный план эксперимента				Оптимизированный план эксперимента											
				Анализ перестановок				Случайный поиск			Симплекс-метод				
Опыт	Факторы			Опыт	Факторы			Опыт	Факторы			Опыт	Факторы		
	X ₁	X ₂	X ₃		X ₁	X ₂	X ₃		X ₁	X ₂	X ₃		X ₁	X ₂	X ₃
1	-1	0	0	6	+1	+1	0	26	+1	0	-1	10	+1	+1	+1
2	-1	0	-1	7	-1	+1	0	3	+1	-1	-1	24	0	+1	+1
3	+1	-1	-1	8	-1	+1	+1	17	-1	-1	0	4	0	0	+1
4	0	0	+1	4	0	0	+1	27	0	-1	0	9	+1	0	+1
5	+1	0	0	9	+1	0	+1	20	0	0	0	5	+1	0	0
6	+1	+1	0	10	+1	+1	+1	19	+1	-1	0	20	0	0	0
7	-1	+1	0	11	-1	-1	+1	15	+1	-1	+1	25	0	+1	0
8	-1	+1	+1	1	-1	0	0	18	0	-1	-1	6	+1	+1	0
9	+1	0	+1	5	+1	0	0	22	-1	-1	-1	12	+1	+1	-1
10	+1	+1	+1	12	+1	+1	-1	23	0	-1	+1	16	0	+1	-1
11	-1	-1	+1	13	0	0	-1	9	+1	0	+1	13	0	0	-1
12	+1	+1	-1	2	-1	0	-1	10	+1	+1	+1	26	+1	0	-1
13	0	0	-1	14	-1	+1	-1	16	0	+1	-1	3	+1	-1	-1
14	-1	+1	-1	15	+1	-1	+1	13	0	0	-1	18	0	-1	-1
15	+1	-1	+1	16	0	+1	-1	24	0	+1	+1	22	-1	-1	-1
16	0	+1	-1	17	-1	-1	0	11	-1	-1	+1	2	-1	0	-1
17	-1	-1	0	18	0	-1	-1	21	-1	0	+1	14	-1	+1	-1
18	0	-1	-1	19	+1	-1	0	4	0	0	+1	7	-1	+1	0
19	+1	-1	0	20	0	0	0	5	+1	0	0	1	-1	0	0
20	0	0	0	21	-1	0	+1	6	+1	+1	0	21	-1	0	+1
21	-1	0	+1	22	-1	-1	-1	25	0	+1	0	8	-1	+1	+1
22	-1	-1	-1	23	0	-1	+1	1	-1	0	0	11	-1	-1	+1
23	0	-1	+1	24	0	+1	+1	8	-1	+1	+1	17	-1	-1	0
24	0	+1	+1	25	0	+1	0	7	-1	+1	0	27	0	-1	0
25	0	+1	0	26	+1	0	-1	14	-1	+1	-1	19	+1	-1	0
26	+1	0	-1	3	+1	-1	-1	2	-1	0	-1	15	+1	-1	+1
27	0	-1	0	27	0	-1	0	12	+1	+1	-1	23	0	-1	+1

В связи со значительными временными затратами на полный перебор вариантов перестановок строк матрицы при оптимизации исходного плана методами анализа перестановок и случайного поиска вводилось ограничение на анализ 10000000 вариантов.

В табл. 3 проведен сравнительный анализ различных методов оптимизации на примере измерения плотности тока гальванических ванн с использованием мерных датчиков по основным показателям: стоимости реализации планов по оптимальному ($S_{опт}$), исходному ($S_{исх}$) и плану с максимальной стоимостью (S_{max}), выигрыши при проведении эксперимента по оптимальному плану, время счета программ, количество рассмотренных вариантов перестановок.

Таблица 3 – Сравнительный анализ параметров оптимизации

Метод	Стоимость, усл. ед.			Выигрыш		Время счета, с	Количество вариантов, шт.
	$S_{исх}$	$S_{опт}$	S_{max}	$\frac{S_{исх}}{S_{опт}}$	$\frac{S_{max}}{S_{опт}}$		
Анализ перестановок	174	147	225	1,18	1,53	697	10000000
Случайный поиск	174	110	250	1,58	2,27	737	10000000
Симплекс-метод	174	61		2,85		<0,01	27

Как видно из табл. 3, наибольший выигрыш по стоимости реализации получаем в случае проведения эксперимента по плану, оптимизированному с использованием симплекс-метода. При этом оптимизация исходного плана с использованием симплекс-метода характеризуется наименьшими временными затратами, поскольку не требует полного перебора всех вариантов перестановок.

Эффективность программного обеспечения проверялась также на примере оптимизации параметров, характеризующих неравномерность покрытия проводников гальваническими осадками: максимальный разброс высоты проводников h , средний разброс $h_{ср}$ и параметр шероховатости поверхности проводников печатной платы R_z . В качестве факторов рассматривались: X_1 – концентрация $CuSO_4$ в электролите гальванической ванны, г/л; X_2 – концентрация H_2SO_4 в растворе, г/л; X_3 – плотность тока d в гальванической ванне, А/дм²; X_4 – время t обработки плат в данной ванне, часов [4].

Стоимости изменений значений факторов приведены в табл. 4. Порядок проведения оптимизированных по стоимости реализации планов эксперимента, полученных методами анализа перестановок, случайного поиска и симплекс-методом, представлен в табл. 5.

Таблица 4 – Стоимости изменений значений уровней факторов

Обозначение факторов	Стоимости изменений, усл. ед.	
	из «-1» в «+1»	из «+1» в «-1»
X_1	18,85	7,45
X_2	8,65	4,45
X_3	0,18	0,18
X_4	1,15	0,77

Таблица 5 – Исходный и оптимальные планы эксперимента

Исходный план эксперимента					Оптимизированный план эксперимента														
					Анализ перестановок				Случайный поиск				Симплекс-метод						
Опыт	Факторы				Опыт	Факторы				Опыт	Факторы				Опыт	Факторы			
	X_1	X_2	X_3	X_4		X_1	X_2	X_3	X_4		X_1	X_2	X_3	X_4		X_1	X_2	X_3	X_4
1	+1	+1	-1	+1	7	+1	+1	-1	-1	2	+1	+1	+1	+1	2	+1	+1	+1	+1
2	+1	+1	+1	+1	8	+1	-1	-1	-1	10	+1	-1	+1	+1	1	+1	+1	-1	+1
3	+1	-1	+1	-1	3	+1	-1	+1	-1	9	+1	-1	-1	+1	7	+1	+1	-1	-1
4	-1	-1	+1	+1	9	+1	-1	-1	+1	8	+1	-1	-1	-1	11	+1	+1	+1	-1
5	-1	+1	+1	-1	10	+1	-1	+1	+1	11	+1	+1	+1	-1	3	+1	-1	+1	-1
6	-1	+1	-1	-1	1	+1	+1	-1	+1	7	+1	+1	-1	-1	8	+1	-1	-1	-1
7	+1	+1	-1	-1	2	+1	+1	+1	+1	1	+1	+1	-1	+1	9	+1	-1	-1	+1
8	+1	-1	-1	-1	11	+1	+1	+1	-1	3	+1	-1	+1	-1	10	+1	-1	+1	+1
9	+1	-1	-1	+1	5	-1	+1	+1	-1	16	-1	-1	+1	-1	4	-1	-1	+1	+1
10	+1	-1	+1	+1	6	-1	+1	-1	-1	4	-1	-1	+1	+1	14	-1	-1	-1	+1
11	+1	+1	+1	-1	12	-1	+1	-1	+1	14	-1	-1	-1	+1	15	-1	-1	-1	-1
12	-1	+1	-1	+1	13	-1	+1	+1	+1	15	-1	-1	-1	-1	16	-1	-1	+1	-1
13	-1	+1	+1	+1	4	-1	-1	+1	+1	13	-1	+1	+1	+1	5	-1	+1	+1	-1
14	-1	-1	-1	+1	14	-1	-1	-1	+1	12	-1	+1	-1	+1	6	-1	+1	-1	-1
15	-1	-1	-1	-1	15	-1	-1	-1	-1	5	-1	+1	+1	-1	12	-1	+1	-1	+1
16	-1	-1	+1	-1	16	-1	-1	+1	-1	6	-1	+1	-1	-1	13	-1	+1	+1	+1

Сравнительный анализ рассмотренных методов оптимизации на примере исследования операции гальванического меднения печатных плат по основным показателям приведен в табл. 6.

Таблица 6 – Сравнительный анализ параметров оптимизации

Метод	Стоимость, усл. ед.			Выигрыш		Время счета, с.	Количество вариантов, шт.
	$S_{исх}$	$S_{опт}$	S_{max}	$\frac{S_{исх}}{S_{опт}}$	$\frac{S_{max}}{S_{опт}}$		
Анализ перестановок	72,19	30,46	261,8	2,37	8,59	527	10000000
Случайный поиск	72,19	41,8	300,45	1,73	7,19	491	10000000
Симплекс-метод	72,19	25,83		2,79		<0,01	16

Таким образом, целесообразно проведение эксперимента по исследованию гальванического меднения печатных плат по плану, полученному с использованием симплекс-метода, что позволит получить выигрыш по стоимости реализации в 2,79 раза по сравнению с исходным планом.

В работе [5] проводилось исследование устройства для контроля качества диэлектрических материалов. В качестве критериев оптимизации выбраны энергопотребление и абсолютная погрешность устройства. Доминирующими факторами, влияющими на энергопотребление устройства, были выбраны: X_1 – напряжение питания, $U_{пит}$; X_2 – значение начальной емкости эталонного конденсатора в плечах

мультивибратора, C_0 ; X_3 – число витков основной обмотки магниточувствительного преобразователя, W ; X_4 – число витков дополнительной мультивибраторной обмотки, W_1 (обмотка 3 или 4). При исследовании точности устройства в качестве фактора X_2 выбрано значение сопротивления, подсоединенного к выходу операционного усилителя. Факторы X_1 , X_3 и X_4 остаются такими же, как и при исследовании энергопотребления устройства.

Исходный план, по которому выполнялись исследования энергопотребления и точности устройства для контроля качества диэлектрических материалов, был оптимизирован по стоимости реализации с использованием методов анализа перестановок, случайного поиска и симплекс-метода. Стоимости изменений значений факторов приведены в табл. 7. Порядок проведения оптимизированных по стоимости реализации планов эксперимента представлен в табл. 8.

Таблица 7 – Стоимости изменений значений уровней факторов

Обозначение факторов	Стоимости изменений, усл. ед.	
	из «-1» в «+1»	из «+1» в «-1»
X_1	0,5	0,5
X_2	0,7	0,7
X_3	5,5	1,4
X_4	6,7	2,4

Таблица 8 - Исходный и оптимальные планы эксперимента

Исходный план эксперимента		Оптимизированный план эксперимента																	
		Анализ перестановок				Случайный поиск				Симплекс-метод									
		Опыт	Факторы				Опыт	Факторы				Опыт	Факторы						
	X_1	X_2	X_3	X_4		X_1	X_2	X_3	X_4		X_1	X_2	X_3	X_4		X_1	X_2	X_3	X_4
1	-1	-1	+1	+1	5	-1	-1	-1	+1	4	+1	+1	+1	+1	4	+1	+1	+1	+1
2	-1	+1	+1	+1	7	+1	-1	-1	+1	1	-1	-1	+1	+1	2	-1	+1	+1	+1
3	+1	-1	+1	+1	8	+1	+1	-1	+1	3	+1	-1	+1	+1	1	-1	-1	+1	+1
4	+1	+1	+1	+1	6	-1	+1	-1	+1	2	-1	+1	+1	+1	3	+1	-1	+1	+1
5	-1	-1	-1	+1	2	-1	+1	+1	+1	5	-1	-1	-1	+1	7	+1	-1	-1	+1
6	-1	+1	-1	+1	4	+1	+1	+1	+1	7	+1	-1	-1	+1	5	-1	-1	-1	+1
7	+1	-1	-1	+1	3	+1	-1	+1	+1	6	-1	+1	-1	+1	6	-1	+1	-1	+1
8	+1	+1	-1	+1	1	-1	-1	+1	+1	8	+1	+1	-1	+1	8	+1	+1	-1	+1
9	-1	-1	+1	-1	9	-1	-1	+1	-1	13	-1	-1	-1	-1	16	+1	+1	-1	-1
10	-1	+1	+1	-1	10	-1	+1	+1	-1	14	-1	+1	-1	-1	14	-1	+1	-1	-1
11	+1	-1	+1	-1	11	+1	-1	+1	-1	11	+1	-1	+1	-1	13	-1	-1	-1	-1
12	+1	+1	+1	-1	12	+1	+1	+1	-1	10	-1	+1	+1	-1	15	+1	-1	-1	-1
13	-1	-1	-1	-1	13	-1	-1	-1	-1	9	-1	-1	+1	-1	11	+1	-1	+1	-1
14	-1	+1	-1	-1	14	-1	+1	-1	-1	12	+1	+1	+1	-1	9	-1	-1	+1	-1
15	+1	-1	-1	-1	15	+1	-1	-1	-1	16	+1	+1	-1	-1	10	-1	+1	+1	-1
16	+1	+1	-1	-1	16	+1	+1	-1	-1	15	+1	-1	-1	-1	12	+1	+1	+1	-1

Сравнительный анализ по основным параметрам оптимизации приведенными методами на примере исследования энергопотребления и точности устройства для контроля качества диэлектрических материалов представлен в табл. 9.

Таблица 9 – Сравнительный анализ параметров оптимизации

Метод	Стоимость, усл. ед.			Выигрыш		Время счета, с.	Количество вариантов, шт.
	$S_{исх}$	$S_{опт}$	S_{max}	$\frac{S_{исх}}{S_{опт}}$	$\frac{S_{max}}{S_{опт}}$		
Анализ перестановок	24,7	19,1	114	1,29	5,97	494	10000000
Случайный поиск	24,7	23,4	124	1,05	5,30	501	10000000
Симплекс-метод	24,7	16,1		1,53		<0,01	16

Как видно из таблицы 9, наилучшими показателями по стоимости реализации и быстродействию обладает план, оптимизированный с использованием симплекс-метода.

Таким образом, проанализирован процесс оптимизации планов эксперимента различными методами на примерах исследования измерения плотности тока гальванических ванн с использованием мерных датчиков, оптимизации параметров, характеризующих неравномерность покрытия проводников гальваническими осадками, исследования энергопотребления и точности устройства для контроля качества диэлектрических материалов.

Динамика показателей стоимости реализации планов эксперимента, полученных с использованием методов анализа перестановок, случайного поиска и симплекс-метода, приведена на рис. 1.

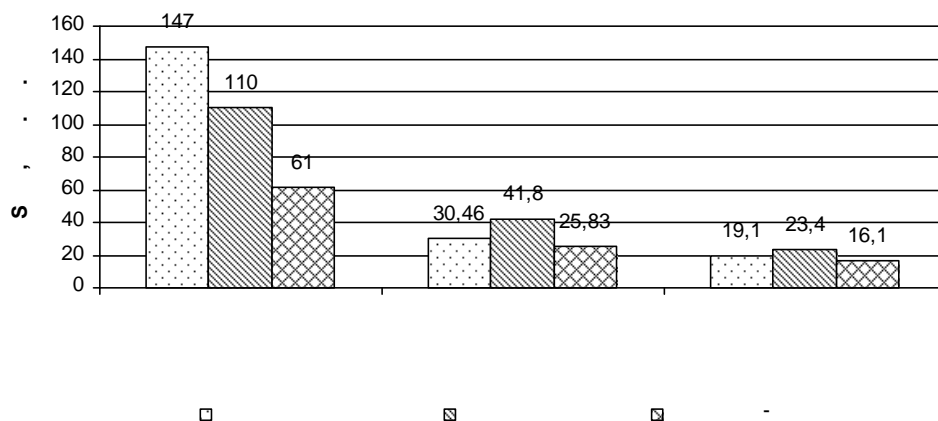


Рисунок 1 – Динамика показателей стоимости реализации эксперимента по оптимальным планам

Динамика показателей выигрышей по стоимости реализации планов эксперимента, полученных с использованием методов анализа перестановок, случайного поиска и симплекс-метода, приведена на рис. 2.

Показатели быстродействия программ, реализующих методы анализа перестановок, случайного поиска и симплекс-метод, приведены на рис. 3.

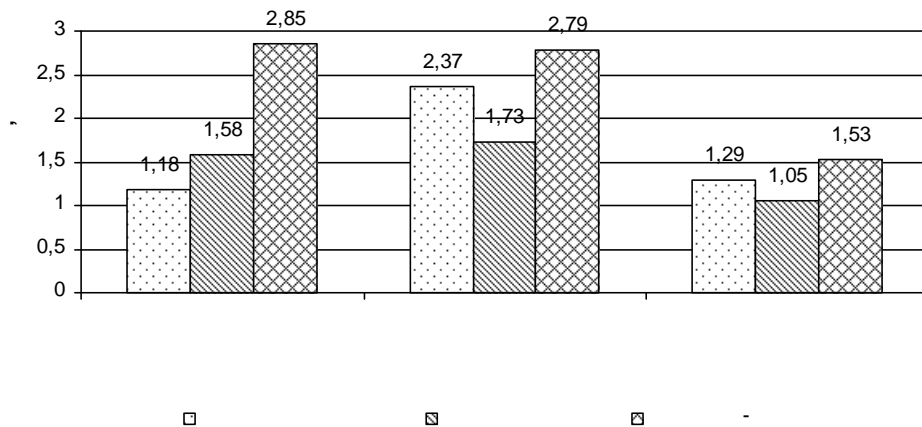


Рисунок 2 – Динамика показателей выигрышей

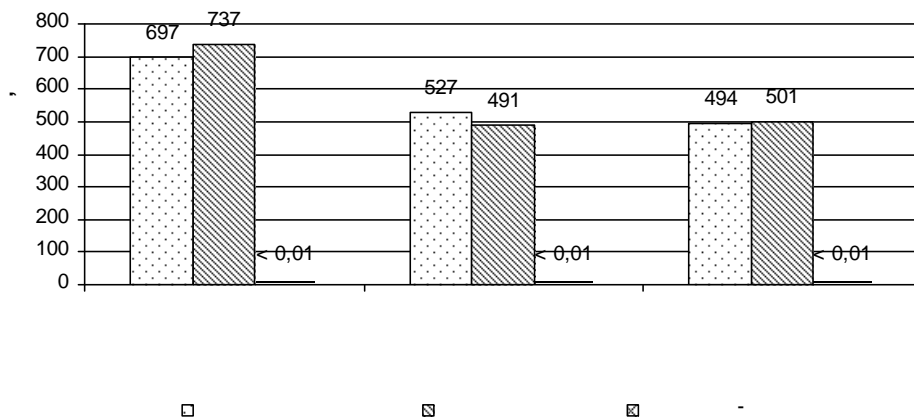


Рисунок 3 – Динамика показателей быстродействия программ

Показано, что среди рассмотренных методов оптимизации планов эксперимента наилучшими характеристиками обладает симплекс-метод, поскольку позволяет получить больший выигрыш по стоимости реализации при минимальных временных затратах на оптимизацию за счет отсутствия необходимости полного перебора всех вариантов перестановок.

ВЫВОДЫ

Проанализирован процесс оптимизации планов эксперимента различными методами на примерах исследования измерения плотности тока гальванических ванн с использованием мерных датчиков, оптимизации параметров, характеризующих неравномерность покрытия проводников гальваническими осадками, исследования энергопотребления и точности устройства для контроля качества диэлектрических материалов.

Показано, что среди рассмотренных методов оптимизации планов эксперимента наилучшими характеристиками обладает симплекс-метод. Наихудшие показатели по временным и стоимостным затратам получаются при использовании случайного поиска.

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ З ВИКОРИСТАННЯМ СИМПЛЕКС-МЕТОДУ

М. Д. Кошовий, О. А. Сухобрус,

Національний аерокосмічний університет ім. М. Е. Жуковського «ХАІ», м. Харків

Запропоновано метод пошуку оптимальних планів експерименту на основі симплекс-методу. Ефективність використання цього методу показана на прикладах дослідження процесу вимірювання щільності струму гальванічних ванн, оптимізації параметрів нерівномірності покриття провідників гальванічними опадами, дослідження енергоспоживання і точності пристрої для контролю якості діелектричних матеріалів

Ключові слова: *вимір, точність, вартість, аналіз перестановок, випадковий пошук, симплекс-метод.*

PROCESS OPTIMIZATION USING SIMPLEX METHOD

N. Koshevoy; E. Sukhobrus,

National Aerospace University named after N. E. Zhukovsky, "NAI", Kharkov, Ukraine

A method for finding the optimal experimental designs based on the simplex method are proposed. The effectiveness of this method is demonstrated on the examples of studies of measuring process of the plating baths' current density, the optimization of the parameters of the uneven coating of conductors by galvanic precipitates, the study of power and precision of the device to control the quality of dielectric materials.

Key words: *measurement, accuracy, cost, analysis of permutations, random search, the simplex method.*

СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. Комп'ютерна програма "Програма пошуку оптимальних багаторівневих комбінаторних планів багатofакторного 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. освіти і науки України; Реєстр. 28.01.2010 р.
2. Комп'ютерна програма "Програма пошуку оптимального або близького до оптимального за вартістю реалізації багаторівневого плану багатofакторного експерименту" / М. Д. Кошовий, О. А. Сухобрус: Свід. про реєстр. автор. права на твір № 43182. – Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін. освіти і науки України; Реєстр. 9.04.2012 р.
3. Оптимальное планирование эксперимента при исследовании качества технологических процессов / Кошевой Н. Д., Цеховской М. В., Дергачев В. А., Сытник В. В., Сухобрус Е. А., Костенко Е. М. // Якість технологій та освіти. – Х.: Українська інженерно-педагогічна академія, 2011. – Вип. 2 – С. 26-32.
4. Экспериментальное исследование, моделирование и оптимизация процесса гальванического меднения печатных плат / Кошевой Н. Д., Вестань С. Г., Кожевников Г. К., Кошевой О. Н., Доценко Н. В. // Математическое моделирование. – Днепродзержинск: Днепродзержинский государственный технический университет, 2001. – Вип. 1 – С. 28-30.
5. Кошевой Н. Д. Оптимальное планирование эксперимента при исследовании устройства для контроля качества диэлектрических материалов / Н. Д. Кошевой, Е. М. Костенко, А. В. Заболотный // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – Х.: Харьковский национальный университет радиоэлектроники, 2009. – Вип. 147 – С. 38-42.

Поступила в редакцию 24 июня 2012 г.