

ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Н. Д. Кошевой¹, М. В. Цеховской¹, В. А. Дергачев¹,
В. В. Сытник¹, Е. А. Сухобрус¹, Е. М. Костенко²

¹ Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»,
г. Харьков,

² Полтавская государственная аграрная академия, г. Полтава, Украина

Для повышения эффективности экспериментальных исследований разработаны программные средства, позволяющие получать математические модели технологических процессов при минимальных стоимостных и временных затратах. Эффективность программного обеспечения доказана при исследовании качества процессов нанесения гальванических покрытий и горячей штамповки изделий.

Ключевые слова: программное обеспечение, математическая модель, технологический процесс, качество, эффективность.

Постановка задачи

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.

Известные программы поиска оптимальных по стоимостным и временным затратам комбинаторных планов многофакторного эксперимента обеспечивают синтез таких планов для количества уровней факторов от 2 [1] до 5 [2]. Их основной недостаток отсутствие возможности анализа многоуровневых планов многофакторного эксперимента. Поэтому необходимо усовершенствовать программное обеспечение, позволяющее анализировать комбинаторные планы эксперимента с количеством уровней факторов от 2 до 8.

Основная часть

Усовершенствованное программное обеспечение, схема алгоритма работы которого представлена на рис.1, позволяет анализировать многоуровневые комбинаторные планы, поскольку количество уровней

факторов расширено до восьми. Алгоритм работы программного обеспечения следующий.

1. Осуществляется ввод исходных данных, содержащих информацию о количестве анализируемых факторов, матрицу исходного плана эксперимента и стоимости изменений значений факторов. Производится чтение исходных данных.

2. Выбирается режим поиска оптимального плана: случайный поиск или анализ перестановок.

3. Производится выбор количества анализируемых вариантов путем введения заданного количества N или введения «0». В последнем случае процесс поиска может быть прерван при нажатии клавиши «ESC».

4. Рассчитывается стоимость исходной матрицы планирования эксперимента $C_{исх}$.

5. В качестве оптимальной стоимости реализации $C_{опт}$ первоначально принимается стоимость реализации исходной матрицы планирования эксперимента $C_{исх}$. Оптимальный вариант перестановки $P_{опт}$ изначально принимается равным исходному варианту $P_{исх}$.

6. В качестве максимальной стоимости реализации C_{max} первоначально принимается стоимость реализации исходной матрицы планирования эксперимента $C_{исх}$. Максимальный вариант перестановки P_{max} изначально принимается равным исходному варианту $P_{исх}$.

7. Осуществляется генерация вариантов перестановок исходной матрицы $P_{тек}$. В режиме случайного поиска генерация производится с использованием функции Randomize. В режиме анализа перестановок используется алгоритм генерации перестановок с минимальным числом транспозиций соседних элементов.

8. Производится расчет стоимости полученной матрицы $C_{тек}$ и последующее сравнение её с оптимальным $C_{опт}$ и максимальным C_{max} значениями стоимости реализации. Если $C_{тек} < C_{опт}$, то в качестве оптимального значения принимается $C_{тек}$. Оптимальный вариант перестановки $P_{опт}$ приобретает значение $P_{тек}$. Если $C_{тек} > C_{max}$, то в качестве максимального значения принимается $C_{тек}$. Максимальный вариант перестановки P_{max} приобретает значение $P_{тек}$.

9. Производится проверка наличия сигнала остановки. При наличии сигнала происходит создание файла результата и переход к окончанию процесса поиска.

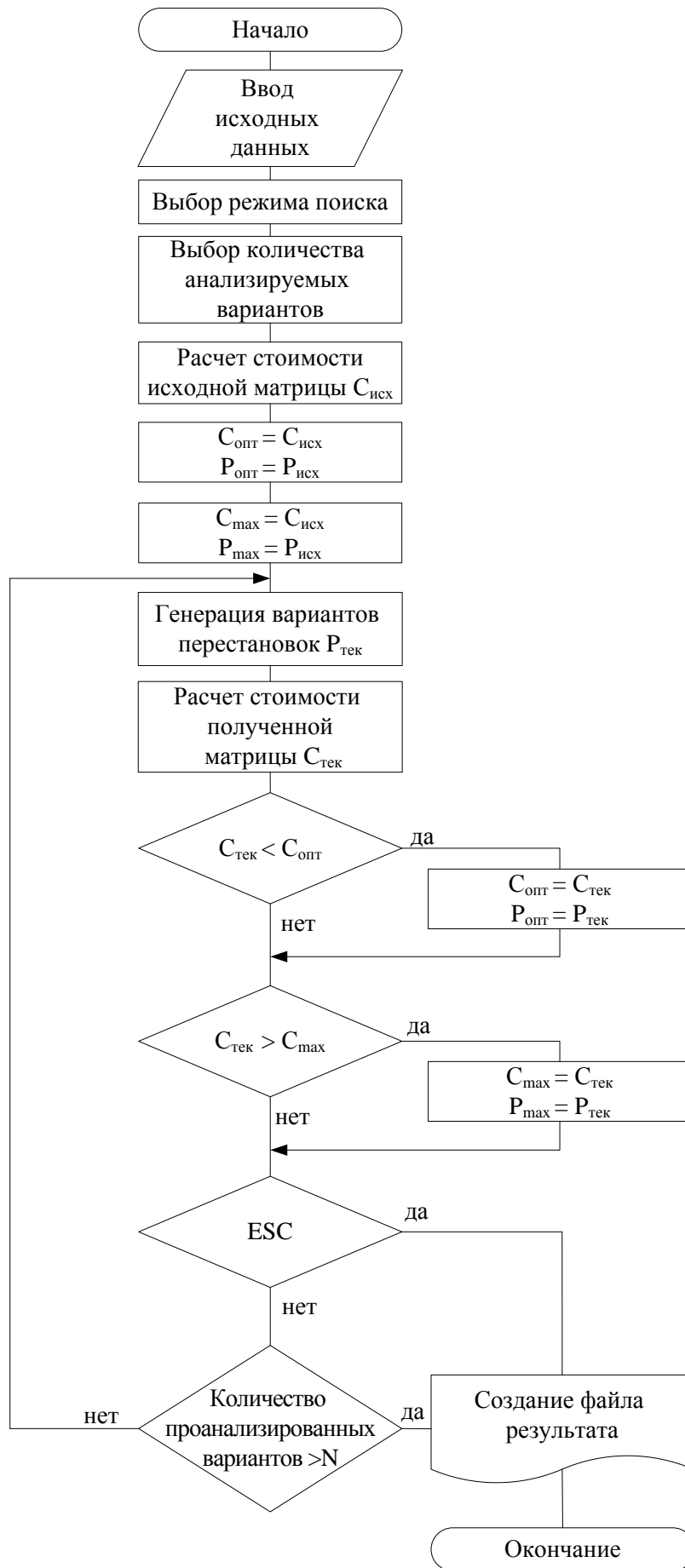


Рис. 1. Схема алгоритма работы программного обеспечения

10. Производится сравнение количества проанализированных вариантов с заданным количеством N . Если заданное количество анализируемых вариантов достигнуто, то осуществляется создание файла результата и переход к окончанию процесса поиска. В противном случае происходит переход к этапу 7 и повторению аналогичной процедуры.

При поиске оптимального по временным затратам на реализацию плана эксперимента алгоритм работает аналогично, только вместо параметра стоимости C рассматривается параметр времени t .

Эффективность усовершенствованного 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 датчиков, установленных в нескольких местах ванны гальванического меднения. При осуществлении эксперимента применяли печатные платы, закрепленные на линии «Модуль-Х», и задавали плотность тока, равную 3 А/дм^2 . 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 штанги, «0» - свидетель закреплен в середине штанги.

С использованием усовершенствованного программного обеспечения проведена оптимизация исходного плана по критерию суммарной стоимости реализации эксперимента. Стоимости изменений значений уровней факторов приведены в табл. 1. Порядок проведения оптимального по стоимости реализации плана эксперимента представлен в табл. 2. Стоимость реализации эксперимента по этому плану составляет 147 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 1,2 раза по сравнению с исходным планом эксперимента и в 1,5 раз по сравнению с планом, обладающим максимальной стоимостью.

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

Исходный и оптимальный планы эксперимента

Исходный план				Оптимальный план			
Номер опыта	Обозначение факторов			Номер опыта	Обозначение факторов		
	X_1	X_2	X_3		X_1	X_2	X_3
1	-1	0	0	6	1	1	0
2	-1	0	-1	7	-1	1	0
3	1	-1	-1	8	-1	1	1
4	0	0	1	4	0	0	1
5	1	0	0	9	1	0	1
6	1	1	0	10	1	1	1
7	-1	1	0	11	-1	-1	1
8	-1	1	1	1	-1	0	0
9	1	0	1	5	1	0	0
10	1	1	1	12	1	1	-1
11	-1	-1	1	13	0	0	-1
12	1	1	-1	2	-1	0	-1
13	0	0	-1	14	-1	1	-1
14	-1	1	-1	15	1	-1	1
15	1	-1	1	16	0	1	-1
16	0	1	-1	17	-1	-1	0
17	-1	-1	0	18	0	-1	-1
18	0	-1	-1	19	1	-1	0
19	1	-1	0	20	0	0	0
20	0	0	0	21	-1	0	1
21	-1	0	1	22	-1	-1	-1
22	-1	-1	-1	23	0	-1	1
23	0	-1	1	24	0	1	1
24	0	1	1	25	0	1	0
25	0	1	0	26	1	0	-1
26	1	0	-1	3	1	-1	-1
27	0	-1	0	27	0	-1	0

В результате проведения эксперимента по плану 3^k определено расположение мерных датчиков в гальванической ванне, при котором погрешность измерения минимальная ($\varepsilon = 6,3\%$, опыт № 13 [3]).

Эффективность усовершенствованного программного обеспечения проверялась также на примере исследования технологического процесса изготовления деталей горячей штамповкой.

На основании априорной информации [4] в качестве критерия оптимизации процесса была выбрана толщина детали $h_{\text{дет}}$, а доминирующими – следующие факторы: X_1 – температура нагрева заготовки, °C (1000,...,1200); X_2 – время нагрева заготовки, мин. (5,...,22); X_3 – температура нагрева штампа, °C (150,...,300). Исходная матрица планирования полного факторного эксперимента 2^3 представлена в табл. 3, а стоимости и время изменения уровней факторов – в табл. 4 и 5.

Таблица 3

Исходный и оптимальные по стоимостным и временным затратам
планы эксперимента

Планы эксперимента											
Исходный			Оптимальный по стоимости				Оптимальный по времени				
№	X_1	X_2	X_3	№	X_1	X_2	X_3	№	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	-1	8	+1	+1	+1	4	+1	+1	-1
2	+1	-1	-1	4	+1	+1	-1	8	+1	+1	+1
3	-1	+1	-1	2	+1	-1	-1	6	+1	-1	+1
4	+1	+1	-1	6	+1	-1	+1	2	+1	-1	-1
5	-1	-1	+1	5	-1	-1	+1	1	-1	-1	-1
6	+1	-1	+1	7	-1	+1	+1	3	-1	+1	-1
7	-1	+1	+1	3	-1	+1	-1	7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1	1	-1	-1	-1	5	-1	-1	+1

Таблица 4

Стоимости изменений уровней факторов

Стоимости изменений, усл.ед.	Обозначение факторов		
	X_1	X_2	X_3
из «0» в «+1»	60	14	15
из «0» в «-1»	50	3	7,5
из «-1» в «+1»	60	14	7,5
из «+1» в «-1»	50	3	3,75

Таблица 5

Время изменений уровней факторов

Время изменений, мин.	Обозначение факторов		
	X_1	X_2	X_3
из «0» в «+1»	30	22	7,5
из «0» в «-1»	25	5	3,75
из «-1» в «+1»	30	22	3,75
из «+1» в «-1»	25	5	7,5

Оптимальные по стоимостным и временным затратам планы эксперимента, полученные с использованием разработанного программного обеспечения, приведены в табл. 3.

Стоимость реализации эксперимента по оптимальному плану составляет 85 усл.ед., тогда как стоимость реализации исходной матрицы планирования – 428,5 усл.ед. Таким образом, достигнут выигрыш по стоимости реализации в 5 раз по сравнению с исходным планом.

Время реализации эксперимента по оптимальному плану составляет 72 мин., тогда как время реализации исходной матрицы планирования – 247,75 мин. Таким образом, достигнут выигрыш по времени реализации эксперимента в 3,4 раза по сравнению с исходным планом.

Результаты эксперимента, проведенного по оптимальному по стоимости реализации плану эксперимента, для детали (винт грузовой) представлены в табл. 6.

Таблица 6

Матрица планирования и результаты эксперимента

Номер опыта	Обозначение факторов			$\bar{h}_{\text{дет}}$
	X_1	X_2	X_3	
1	+1	+1	+1	10,81
2	+1	+1	-1	10,98
3	+1	-1	-1	10,99
4	+1	-1	+1	10,80
5	-1	-1	+1	10,54
6	-1	+1	+1	10,99
7	-1	+1	-1	11,06
8	-1	-1	-1	10,17

После обработки результатов эксперимента получена адекватная математическая модель технологического процесса:

$$h_{\text{дет}} = 10,7945 + 0,1020X_1 + 0,1668X_2 - 0,008X_3.$$

При оптимизации технологического процесса по математической модели с использованием градиентного метода получены оптимальные режимы обработки детали: $X_1 = 1140$ °С; $X_2 = 14,8$ мин.; $X_3 = 221,4$ °С. Данные режимы обработки обеспечивают толщину детали $h_{\text{дет}} = 11,02$ мм, которая находится в допустимых пределах (11;...;11,02).

Эффективность усовершенствованного программного обеспечения показана также на примере плана эксперимента для количества факторов $k=3$ и числа уровней, равного восьми, т.е. 8^3 . При этом время счета программы равно 40936,49 сек, в то время как для оптимизации планов 2^3 при исследовании технологического процесса горячей штамповки – 2,85 сек, а плана 3^3 при исследовании процесса измерения плотности тока гальванических ванн с помощью мерных датчиков – 554,52 сек.

Выводы

Усовершенствованно программное обеспечение, позволяющее оптимизировать по стоимостным и временным затратам на реализацию комбинаторные планы эксперимента с количеством уровней факторов от 2 до 8. Эффективность разработанного программного обеспечения доказана на примере исследования метода измерения плотности тока гальванических ванн с использованием мерных датчиков и технологического процесса изготовления деталей горячей штамповкой.

Работа выполнялась за счет бюджетных средств согласно гранту Президента Украины № GP/F32/075.

Литература

1. Кошовий М. Д. Оптимальне планування експерименту при дослідженні технологічних процесів, приладів і систем: навч. посібник / М. Д. Кошовий, О. М. Костенко, О. В. Заболотний та ін. – Х.: Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2010. – 161 с.

2. Кошевой Н. Д. Применение метода ветвей и границ для оптимизации композиционных планов второго порядка / Н. Д. Кошевой, Е. М. Костенко, А. С. Чуйко // Збірник наукових праць військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ. – Вип. 25. – 2010. – С. 95 – 101.

3. Кошевой Н. Д. Автоматизация экспериментальных исследований: Монография / Н.Д. Кошевой, В.А. Гаевой. – Х.: Факт, 2001. – 112 с.

4. Сытник В. В. Исследование технологического процесса горячей штамповки при изготовлении деталей / В. В. Сытник // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2010. – Вып. 46. – С. 109 – 113.

Н. Д. Кошовий, М. В. Цеховський, В. А. Дергачов, В. В. Ситник,
Е. А. Сухобрус, Є. М. Костенко

ОПТИМАЛЬНЕ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ЯКОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Для підвищення ефективності експериментальних досліджень розроблені програмні засоби, що дозволяють отримувати математичні моделі технологічних процесів при мінімальних вартісних та часових витратах. Ефективність програмного забезпечення доведена при дослідженні якості процесів нанесення гальванічних покриттів і гарячої штамповки виробів.

Ключові слова: програмне забезпечення, математична модель, технологічний процес, якість, ефективність.

N. D. Mishka, M. V. Tsehovskoy, V. A. Dergachev, V. V. Sytnik, E. A. Suhobrus,
E. M. Kostenko

OPTIMAL DESIGN OF EXPERIMENTS INVESTIGATION OF QUALITY PROCESS

To improve the efficiency of experimental researches software tools to obtain mathematical models of processes with minimum value and time costs are developed. The software efficiency in the investigation of quality process of galvanic covering drawings and hot-stamped items are proved.

Key words: software, mathematical model, technological process, quality, efficiency.

Сведения об авторах

Кошевой Николай Дмитриевич, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», кафедра авиационных приборов и измерений, заведующий кафедрой, д.т.н., профессор; 61070, г. Харьков, ул.

Чкалова 17, каф. 303; р.т. (057) 788-43-03; моб.т. 050-769-0-929; E-mail: kafedraapi@rambler.ru.

Цеховской Максим Владимирович, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», кафедра авиационных приборов и измерений, доцент кафедры, к.т.н., с.н.с.; 61070, г. Харьков, ул. Чкалова 17, каф. 303; р.т. (057) 788-46-12.

Костенко Елена Михайловна, Полтавская государственная аграрная академия, проректор по учебно-педагогической и инновационной работе, к.т.н., доцент; 36003, г. Полтава, ул. Сковороды, 1/3; р.т. (05322) 7-36-93; моб.т. 050-217-51-76.

Дергачёв Владимир Андреевич, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», кафедра авиационных приборов и измерений, доцент кафедры, к.т.н., доцент; 61070, г. Харьков, ул. Чкалова 17, каф. 303; р.т. (057) 788-46-12.

Сытник Виктория Викторовна, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», инженер I категории, учебно-методический отдел; 61070, г. Харьков, ул. Чкалова 17; р.т. (057) 788-48-80.

Сухобрус Елена Анатольевна, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», кафедра авиационных приборов и измерений, аспирант; 61070, г. Харьков, ул. Чкалова 17, каф. 303; р.т. (057) 788-47-12.