

Оптимальное планирование экспериментальных исследований технических устройств

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»,
Полтавская государственная аграрная академия*

Синтезированы оптимальные по стоимостным затратам планы эксперимента для исследования следящей системы и полупроводникового терморегулятора. Показана эффективность такого планирования эксперимента. При исследовании полупроводникового терморегулятора наилучшие результаты получены при использовании метода случайного поиска.

Ключевые слова: эксперимент, стоимость, терморегулятор, следящая система, оптимальный план.

Постановка проблемы. На современном уровне развития науки и техники технические устройства должны удовлетворять требованиям точности, чувствительности, технологичности, иметь малые массогабаритные характеристики, низкое энергопотребление и стоимость. Поэтому необходимость улучшения этих показателей весьма актуальна.

Для улучшения технико-экономических показателей таких устройств следует выполнять экспериментальные исследования, направленные на получение их математических моделей и оптимальных конструктивных параметров.

При этом оправдано стремление экспериментаторов решать указанные задачи при минимальных стоимостных и временных затратах.

Анализ последних исследований и публикаций. В работе [1] с привлечением методов планирования эксперимента выполнены исследования таких технических устройств, как следящая система, полупроводниковый терморегулятор.

Недостатком данных исследований является то, что в них не учтена стоимость проведения экспериментов, выполненных по соответствующим планам [1].

Известны методы и реализующее их программное обеспечение [2-4], которое позволяет синтезировать оптимальные по стоимостным затратам планы эксперимента.

Цель работы: синтезировать оптимальные по стоимостным затратам планы эксперимента для проведения данных исследований и показать эффективность оптимального по указанным затратам планирования.

Основные результаты исследований. При исследовании следящей системы в качестве критерия оптимизации выбрана точность установки исполнительного вала, которая характеризуется абсолютной погрешностью отработки заданного углового положения. Доминирующими факторами, влияющими на этот показатель, были выбраны: X_1 – скорость вращения вала вращающегося трансформатора ВТ2 ω , 1/мин; X_2 – угол поворота задающего вала вращающегося трансформатора ВТ1, °/мин; X_3 – время установки заданного углового положения вала ВТ1, с.

Исходный план полного факторного эксперимента (ПФЭ), по которому выполняли исследование следящей системы, представлен в табл.1.

Таблица 1

Исходный и оптимальный планы ПФЭ

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	-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

Проведем оптимизацию исходного плана ПФЭ по критерию суммарной стоимости реализации эксперимента. Стоимости изменений значений уровней факторов приведены в табл.2.

Таблица 2

Стоимости изменений значений уровней факторов

Стоимости изменений значений уровней факторов	Обозначение факторов		
	X_1	X_2	X_3
из «-1» в «+1», усл. ед.	8,0	2,0	1,0
из «+1» в «-1», усл. ед.	4,0	2,4	1,6
из «0» в «-1», усл. ед.	2,0	1,2	0,8
из «0» в «+1», усл. ед.	4,0	1,0	0,5

С помощью пакета прикладных программ [3, 4] синтезирован оптимальный по стоимости проведения план эксперимента (вариант плана 30549), полученный в результате реализации метода анализа перестановок (исследовано 40320 вариантов). Матрица планирования представлена в табл.1.

Стоимость реализации эксперимента по оптимальному плану составляет 13,6 усл. ед., в то время как стоимость исходного плана ПФЭ – 51,4 усл. ед., а максимальная стоимость – 64,0 усл. ед. (вариант плана 27379). Таким образом, выигрыш в стоимости реализации эксперимента составляет 3,78 раза по сравнению с исходным планом и 4,71 раза – по сравнению с планом эксперимента максимальной стоимости.

При исследовании полупроводникового терморегулятора [1] в качестве независимых переменных, влияющих на его работу, взяты обобщенные параметры: X_1 – напряжение питания измерительного моста U_m , В; X_2 – напряжение питания терморегулятора U_n , В; X_3 – температура воздушной среды в зоне датчика температуры t , °С; X_4 – сопротивление нагрузки терморегулятора R_n , кОм. В качестве параметра оптимизации выбрано напряжение на выходе терморегулятора $U_{вых}$, В.

Исходный план ПФЭ, по которому выполняли исследование полупроводникового терморегулятора, представлен в табл.3.

Таблица 3

Исходный и оптимальный планы ПФЭ

Исходный план					Оптимальный план (анализ перестановок)					Оптимальный план (случайный поиск)				
Но- мер опы- та	Обозначение факторов				Но- мер опы- та	Обозначение факторов				Но- мер опы- та	Обозначение факторов			
	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	6	+1	-1	+1	-1	6	+1	-1	+1	-1
2	+1	-1	-1	-1	5	-1	-1	+1	-1	7	-1	+1	+1	-1
3	-1	+1	-1	-1	7	-1	+1	+1	-1	13	-1	-1	+1	+1
4	+1	+1	-1	-1	8	+1	+1	+1	-1	16	+1	+1	+1	+1
5	-1	-1	+1	-1	2	+1	-1	-1	-1	15	-1	+1	+1	+1
6	+1	-1	+1	-1	1	-1	-1	-1	-1	8	+1	+1	+1	-1
7	-1	+1	+1	-1	9	-1	-1	-1	+1	14	+1	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1	-1	10	+1	-1	-1	+1	5	-1	-1	+1	-1
9	-1	-1	-1	+1	11	-1	+1	-1	+1	11	-1	+1	-1	+1
10	+1	-1	-1	+1	12	+1	+1	-1	+1	3	-1	+1	-1	-1
11	-1	+1	-1	+1	4	+1	+1	-1	-1	4	+1	+1	-1	-1
12	+1	+1	-1	+1	3	-1	+1	-1	-1	2	+1	-1	-1	-1
13	-1	-1	+1	+1	13	-1	-1	+1	+1	10	+1	-1	-1	+1
14	+1	-1	+1	+1	14	+1	-1	+1	+1	1	-1	-1	-1	-1
15	-1	+1	+1	+1	15	-1	+1	+1	+1	9	-1	-1	-1	+1
16	+1	+1	+1	+1	16	+1	+1	+1	+1	12	+1	+1	-1	+1

Проведем оптимизацию исходного плана ПФЭ по критерию суммарной стоимости реализации эксперимента. Стоимости изменений значений уровней факторов приведены в табл.4.

Таблица 4

Стоимости изменений значений уровней факторов

Стоимости изменений значений уровней факторов	Обозначение факторов			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
из «-1» в «+1», усл. ед.	2,0	2,4	60,0	1,6
из «+1» в «-1», усл. ед.	2,4	2,8	30,0	2,0
из «0» в «-1», усл. ед.	1,2	1,4	15,0	1,0
из «0» в «+1», усл. ед.	1,0	1,2	30,0	0,8

С помощью пакета прикладных программ [3, 4] синтезированы оптимальные

по стоимости проведения планы эксперимента, полученные в результате реализации следующих видов поиска: а) анализ перестановок (исследовано 1000001 вариант); б) случайный поиск (проанализировано 1007363 варианта). Матрицы планирования представлены в табл.3

Стоимость реализации эксперимента по плану, полученному путем перестановки строк матрицы, составляет 130,0 усл. ед. (вариант плана 58150), в то время как стоимость исходного плана ПФЭ – 202,4 усл. ед., а максимальная стоимость – 611,6 усл. ед. (вариант плана 298034). Таким образом, выигрыш в стоимости реализации эксперимента составляет 1,56 раза по сравнению с исходным планом и 4,7 раза – по сравнению с планом эксперимента максимальной стоимости.

Стоимость реализации эксперимента по плану, полученному методом случайного поиска, составляет 81,6 усл. ед. (вариант плана 6002), в то время как максимальная стоимость – 744,0 усл. ед. (вариант плана 1007131). Таким образом, выигрыш в стоимости реализации эксперимента по исследованию полупроводникового терморегулятора составляет 2,48 раза по сравнению с исходным планом и 3,68 раза – по сравнению с планом эксперимента максимальной стоимости. Поскольку полученная математическая модель оказалась неадекватной, было принято решение достроить план ПФЭ до плана ротатабельного центрального композиционного планирования (РЦКП) [1]. При этом оптимальный план ПФЭ, полученный методом случайного поиска, достраиваем методом итерационного планирования эксперимента [1,5] до плана РЦКП путем добавления исходной матрицы планирования, приведенной в табл.5.

Таблица 5

Исходная и оптимальная матрицы планирования

Исходный план					Оптимальный план (анализ перестановок)					Оптимальный план (случайный поиск)				
Но- мер опы- та	Обозначение факторов				Но- мер опы- та	Обозначение факторов				Но- мер опы- та	Обозначение факторов			
	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	-2	0	0	0	5	0	0	-2	0	5	0	0	-2	0
2	+2	0	0	0	1	-2	0	0	0	13	0	0	0	0
3	0	-2	0	0	6	0	0	+2	0	15	0	0	0	0
4	0	+2	0	0	7	0	0	0	-2	3	0	-2	0	0
5	0	0	-2	0	2	+2	0	0	0	1	-2	0	0	0
6	0	0	+2	0	8	0	0	0	+2	12	0	0	0	0
7	0	0	0	-2	9	0	0	0	0	8	0	0	0	+2
8	0	0	0	+2	10	0	0	0	0	4	0	+2	0	0
9	0	0	0	0	11	0	0	0	0	10	0	0	0	0
10	0	0	0	0	12	0	0	0	0	2	+2	0	0	0
11	0	0	0	0	13	0	0	0	0	14	0	0	0	0
12	0	0	0	0	14	0	0	0	0	11	0	0	0	0
13	0	0	0	0	3	0	-2	0	0	7	0	0	0	-2
14	0	0	0	0	15	0	0	0	0	9	0	0	0	0
15	0	0	0	0	4	0	+2	0	0	6	0	0	+2	0

Проведем оптимизацию исходной матрицы планирования по критерию суммарной стоимости реализации эксперимента. Стоимости изменений значений уровней факторов приведены в табл.6.

Таблица 6

Стоимости изменений значений уровней факторов

Стоимости изменений значений уровней факторов	Обозначение факторов			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
из «-1» в «-2», усл. ед.	1,2	1,4	15,0	1,0
из «+1» в «-2», усл. ед.	4,8	5,6	60,0	4,0
из «-1» в «+2», усл. ед.	4,0	4,8	120,0	3,2
из «+1» в «+2», усл. ед.	2,0	2,4	60,0	1,6
из «0» в «-2», усл. ед.	2,4	2,8	30,0	2,0
из «0» в «+2», усл. ед.	2,0	2,4	60,0	1,6
из «-2» в «0», усл. ед.	2,0	2,4	60,0	1,6
из «+2» в «0», усл. ед.	2,4	2,8	30,0	2,0
из «-2» в «+2», усл. ед.	8,0	9,6	240,0	6,4
из «+2» в «-2», усл. ед.	9,6	11,2	120,0	8,0
из «-1» в «0», усл. ед.	1,3	1,6	40,0	1,1
из «+1» в «0», усл. ед.	1,6	1,9	20,0	1,3

С помощью прикладной программы синтезированы оптимальные по стоимости реализации матрицы планирования эксперимента, полученные в результате реализации следующих видов поиска: а) анализ перестановок (исследовано 1047361 вариант); б) случайный поиск (проанализировано 1066251 вариант). Матрицы планирования представлены в табл.5.

Стоимость реализации эксперимента по плану, полученному путем перестановки строк матрицы, составляет 193,4 усл. ед. (вариант плана 489632), в то время как стоимость исходного плана – 384,0 усл. ед., а максимальная стоимость – 384,9 усл. ед. (вариант плана 3104). Таким образом, выигрыш в стоимости реализации эксперимента составляет 1,99 раза по сравнению с исходным планом и 1,99 раза – по сравнению с планом эксперимента максимальной стоимости.

Стоимость реализации эксперимента по плану, полученному методом случайного поиска, составляет 166,2 усл. ед. (вариант плана 8639), в то время как максимальная стоимость – 384,0 усл. ед. (вариант плана 1). Таким образом, выигрыш в стоимости реализации эксперимента составляет 2,31 раза по сравнению с исходным планом и 2,31 раза – по сравнению с планом эксперимента максимальной стоимости.

Выводы. На примерах исследования следящей системы и полупроводникового терморегулятора показана эффективность оптимального по стоимостным затратам планирования эксперимента. Причем наилучшие результаты получены при использовании метода случайного поиска.

Список литературы

1. Барабашук В.И. Планирование эксперимента в технике / В.И. Барабашук, Б.П. Креденцер, В.И. Мирошниченко. – К.:Техніка, 1984. – 200 с.
2. Кошевой Н.Д. Метод итерационного планирования оптимальных по стоимостным и временным затратам экспериментов / Н.Д. Кошевой, Е.М. Костенко // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2009. – Вип. №19. – С.44-48.
3. Комп'ютерна програма «Програма пошуку оптимальних планів багатofакторного експерименту» / М.Д. Кошовий, О.М. Костенко // Свідоцтво про реєстр. авторського права на твір №29920. – Зареєстр. Держ. департ. інтелектуальної власності М-ва освіти і науки України 17.08.2009 р.
4. Комп'ютерна програма «Програма пошуку оптимальних планів багатofакторного експерименту з заданими обмеженнями» / М.Д. Кошовий, О.М. Костенко // Свідоцтво про реєстр. авторського права на твір №29921. – Зареєстр. Держ. департ. інтелектуальної власності М-ва освіти і науки України 17.08.2009 р.
5. Кошевой Н.Д. Автоматизация экспериментальных исследований : моногр. / Н.Д. Кошевой, В.А. Гаевой. – Х.: Факт, 2001. – 112 с.

Рецензент: д.т.н., проф., зав. каф. Соколов А.Ю., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Поступила в редакцию 17.12.09

Оптимальное планирование экспериментальных исследований технических устройств

Синтезовані оптимальні за вартісними витратами плани експерименту для дослідження слідкуючої системи і напівпровідникового терморегулятора. Показана ефективність такого планування експерименту. При дослідженні напівпровідникового терморегулятора найкращі результати отримані із застосуванням методу випадкового пошуку.

Ключові слова: експеримент, вартість, терморегулятор, слідкуюча система, оптимальний план.

Optimal planning of experimental researches of technical units

Optimum experiment plans by price expenses for studying watching systems and semiconductor thermoregulator were systematized. Efficiency of optimum experiment planning by price expenses was shown. At the study of semiconductor thermoregulator the best results were received when the method of casual searching was used.

Keywords: experiment, cost, thermoregulator, watching systems, optimum plan.