

## **ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Для исследования устройства контроля качества диэлектрических материалов применяются методы оптимального по стоимостным затратам планирования эксперимента. Показывается эффективность этих методов, причем наилучшие результаты получаются при использовании итерационного метода планирования эксперимента, а наихудшие – при использовании метода случайного поиска.

**1. Постановка проблемы.** Сотрудниками кафедры авиационных приборов и измерений Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» разработано устройство для контроля качества диэлектрических материалов, позволяющее с высокой точностью измерять влагосодержание сыпучих и жидких материалов с диэлектрическими свойствами, октановые числа бензинов и цетановые числа дизельного топлива [1, 2]. По полученным с помощью аппарата теории планирования эксперимента математическим моделям, отражающим зависимость точности и энергопотребления от ряда схемных параметров устройства, проведена оптимизация устройства [2].

При этом целесообразно решать указанные задачи при минимальных стоимостных и временных затратах.

**2. Анализ последних исследований и публикаций.** В работе [2] с привлечением методов планирования экспериментов выполнены исследования и оптимизация устройства для контроля качества. Проведенные исследования и полученные математические модели позволяют осуществить выбор схмотехнических параметров устройства для контроля влажности диэлектрических материалов исходя из требуемых значений уровня энергопотребления и степени точности.

Недостатком данного исследования является то, что не учитывается стоимость проведения экспериментов, выполненных по планам полного факторного эксперимента (ПФЭ).

Цель работы: синтезировать оптимальные по стоимостным затратам планы эксперимента для проведения данных исследований.

**3. Основные результаты исследований.** При исследовании устройства для контроля качества диэлектрических материалов в качестве критериев оптимизации были выбраны следующие показатели: энергопотребление устройства  $P_{\text{потр.}}(В \cdot мА)$  и абсолютная погрешность устройства (%). Доминирующими факторами, влияющими на энергопотребление устройства, были выбраны [2]:  $X_1$  – напряжение питания,  $U_{\text{пит}}$ ;  $X_2$  – 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 ПФЭ, по которому выполнялись исследования энергопотребления и точности устройства для контроля качества диэлектрических материалов, представлен в табл. 1.

Проведем оптимизацию исходного плана ПФЭ по критерию суммарной стоимости реализации эксперимента.

Стоимости изменений значений уровней факторов при исследовании энергопотребления и точностных характеристик устройства приведены в табл. 2.

Таблица 1. Исходные и оптимальные планы экспериментов

Исходный план					Исследование энергопотребления									
					Оптимальный план (анализ перестановок)					Оптимальный план (случайный поиск)				
№ п/п	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	№ п/п	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	№ п/п	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
1	-1	-1	+1	+1	2	-1	+1	+1	+1	1	-1	-1	+1	+1
2	-1	+1	+1	+1	6	-1	+1	-1	+1	2	-1	+1	+1	+1
3	+1	-1	+1	+1	5	-1	-1	-1	+1	3	+1	-1	+1	+1
4	+1	+1	+1	+1	7	+1	-1	-1	+1	4	+1	+1	+1	+1
5	-1	-1	-1	+1	8	+1	+1	-1	+1	5	-1	-1	-1	+1
6	-1	+1	-1	+1	4	+1	+1	+1	+1	6	-1	+1	-1	+1
7	+1	-1	-1	+1	3	+1	-1	+1	+1	7	+1	-1	-1	+1
8	+1	+1	-1	+1	1	-1	-1	+1	+1	8	+1	+1	-1	+1
9	-1	-1	+1	-1	9	-1	-1	+1	-1	9	-1	-1	+1	-1
10	-1	+1	+1	-1	10	-1	+1	+1	-1	10	-1	+1	+1	-1
11	+1	-1	+1	-1	11	+1	-1	+1	-1	11	+1	-1	+1	-1
12	+1	+1	+1	-1	12	+1	+1	+1	-1	12	+1	+1	+1	-1
13	-1	-1	-1	-1	13	-1	-1	-1	-1	13	-1	-1	-1	-1
14	-1	+1	-1	-1	14	-1	+1	-1	-1	14	-1	+1	-1	-1
15	+1	-1	-1	-1	15	+1	-1	-1	-1	15	+1	-1	-1	-1
16	+1	+1	-1	-1	16	+1	+1	-1	-1	16	+1	+1	-1	-1

Продолжение табл. 1

Исходный план					Исследование точности									
					Оптимальный план (анализ перестановок)					Оптимальный план (случайный поиск)				
№ п/п	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	№ п/п	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	№ п/п	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
1	-1	-1	+1	+1	3	+1	-1	+1	+1	1	-1	-1	+1	+1
2	-1	+1	+1	+1	7	+1	-1	-1	+1	2	-1	+1	+1	+1
3	+1	-1	+1	+1	5	-1	-1	-1	+1	3	+1	-1	+1	+1
4	+1	+1	+1	+1	6	-1	+1	-1	+1	4	+1	+1	+1	+1
5	-1	-1	-1	+1	8	+1	+1	-1	+1	5	-1	-1	-1	+1
6	-1	+1	-1	+1	4	+1	+1	+1	+1	6	-1	+1	-1	+1
7	+1	-1	-1	+1	2	-1	+1	+1	+1	7	+1	-1	-1	+1
8	+1	+1	-1	+1	1	-1	-1	+1	+1	8	+1	+1	-1	+1
9	-1	-1	+1	-1	9	-1	-1	+1	-1	9	-1	-1	+1	-1
10	-1	+1	+1	-1	10	-1	+1	+1	-1	10	-1	+1	+1	-1
11	+1	-1	+1	-1	11	+1	-1	+1	-1	11	+1	-1	+1	-1
12	+1	+1	+1	-1	12	+1	+1	+1	-1	12	+1	+1	+1	-1
13	-1	-1	-1	-1	13	-1	-1	-1	-1	13	-1	-1	-1	-1
14	-1	+1	-1	-1	14	-1	+1	-1	-1	14	-1	+1	-1	-1
15	+1	-1	-1	-1	15	+1	-1	-1	-1	15	+1	-1	-1	-1
16	+1	+1	-1	-1	16	+1	+1	-1	-1	16	+1	+1	-1	-1

Таблица 2

Стоимости изменений значений уровней факторов

Стоимости изменений значений уровней факторов	Исследование энергопотребления				Исследование точности			
	Обозначение факторов				Обозначение факторов			
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
из «-1» в «+1», грн	0,5	0,7	5,5	6,7	0,5	0,7	5,5	6,7
из «+1» в «-1», грн	0,5	0,7	1,4	2,4	0,5	0,7	1,4	2,4
из «0» в «-1», грн	0,5	1,0	3,0	4,0	0,5	0,4	3,0	4,0
из «0» в «+1», грн	0,5	0,4	1,4	2,4	0,5	0,4	1,4	2,4

С помощью пакета прикладных программ синтезированы оптимальные по стоимости проведения планы эксперимента, полученные в результате реализации следующих видов поиска: анализ перестановок (для исследования энергопотребления проанализировано 131501 вариант), а для исследования точности устройства – 7777777 вариантов, случайный поиск (соответственно, 7143854 и 22654466 вариантов). Матрицы планирования этих планов приведены в табл. 1.

Стоимости реализации оптимальных планов, исходных планов и планов с максимальной стоимостью реализации для исследования энергопотребления и точности устройства приведены в табл. 3.

Таблица 3. Стоимости реализации исходных, оптимальных и с максимальной стоимостью реализации планов экспериментов

Стоимости реализации планов эксперимента	Исследование энергопотребления			Исследование точности		
	Исходный план	Анализ перестановок	Случайный поиск	Исходный план	Анализ перестановок	Случайный поиск
Стоимость исходных планов, грн	30,0	-	-	29,4	-	-
Стоимость оптимальных планов, грн	-	24,9	30,0	-	24,7	29,4
Максимальная стоимость реализации планов, грн	-	89,8	120,0	-	120,3	120,0

Выигрыши в стоимости реализации экспериментов по оптимальным планам приведены в табл. 4.

Таблица 4. Выигрыши в стоимости реализации экспериментов по оптимальным планам

Выигрыши в стоимости реализации	Исследование энергопотребления		Исследование точности	
	Анализ перестановок	Случайный поиск	Анализ перестановок	Случайный поиск
По сравнению с исходным планом, разы	1,20	1,00	1,19	1,00
По сравнению с планом с максимальной стоимостью реализации, разы	3,61	4,00	4,87	4,86

При исследовании итерационного метода планирования эксперимента [3] получен его исходный план при условии равноценности опытов матрицы планирования (табл. 5).

При этом адекватные математические модели [2] были получены на третьем шаге итерации: 1) план дробного факторного эксперимента (ДФЭ) с генерирующим соотношением  $X_4 = X_1 X_2$ ; 2) достройка плана ДФЭ до плана Рехтшафнера; 3) достройка проведенных ранее опытов до плана ПФЭ.

Оптимальные по стоимости реализации планы эксперимента, полученные с помощью пакета прикладных программ и с учетом стоимостей, приведенных в табл. 2, представлены в табл. 5.

Стоимости реализации экспериментов по оптимальным и исходным планам для исследования энергопотребления и точности устройства, а также выигрыши в стоимости реализации экспериментов по оптимальным планам приведены в табл. 6.

Таблица 5. Исходный и оптимальные планы, полученные методом итерационного планирования экспериментов

№ шага	Исходный план					Оптимальный план энергопотребления					Оптимальный план точности				
	№ п/п	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	№ п/п	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	№ п/п	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
1	1	+1	-1	-1	-1	4	+1	+1	+1	+1	4	+1	+1	+1	+1
	2	-1	+1	-1	-1	7	-1	-1	+1	+1	7	-1	-1	+1	+1
	3	-1	-1	-1	+1	3	-1	-1	-1	+1	3	-1	-1	-1	+1
	4	+1	+1	+1	+1	5	+1	+1	-1	+1	5	+1	+1	-1	+1
	5	+1	+1	-1	+1	2	-1	+1	-1	-1	2	-1	+1	-1	-1
	6	+1	-1	+1	-1	1	+1	-1	-1	-1	1	+1	-1	-1	-1
	7	-1	-1	+1	+1	6	+1	-1	+1	-1	6	+1	-1	+1	-1
	8	-1	+1	+1	-1	8	-1	+1	+1	-1	8	-1	+1	+1	-1
2	9	+1	+1	-1	-1	12	+1	+1	+1	-1	12	+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
	12	+1	+1	+1	-1	10	+1	-1	-1	+1	10	+1	-1	-1	+1
	13	-1	+1	-1	+1	13	-1	+1	-1	+1	13	-1	+1	-1	+1
	14	-1	+1	+1	+1	9	+1	+1	-1	-1	9	+1	+1	-1	-1
	15	-1	-1	-1	-1	15	-1	-1	-1	-1	15	-1	-1	-1	-1
3	16	-1	-1	+1	-1	16	-1	-1	+1	-1	16	-1	-1	+1	-1

Таблица 6. Стоимости реализации исходных и оптимальных планов эксперимента

Стоимости реализации планов эксперимента	Исследование энергопотребления		Исследование точности	
	Исходный план	Оптимальный план	Исходный план	Оптимальный план
Стоимость исходных планов, грн	86,1	-	85,5	-
Стоимость оптимальных планов, грн	-	40,4	-	40,4
Выигрыши	2,13		2,10	

**Выводы.** На примере исследования устройства для контроля качества диэлектрических материалов показана эффективность оптимального по стоимостным затратам планирования эксперимента, причем наилучшие результаты получаются при использовании итерационного метода планирования эксперимента, а наихудшие - при использовании метода случайного поиска.

**Список литературы:** 1. Пат. 53186 Україна. Пристрій для вимірювання вологості матеріалів / О.В. Заболотний, В.О. Заболотний, М.Д. Кошовий. Опубл. 2003. Бюл. №1. 2. *Заболотный А.В.* Разработка, исследование и оптимизация устройства для контроля качества диэлектрических покрытий / А.В. Заболотный, Н.Д. Кошевой // Приборы и системы. Управления, контроль, диагностика. 2004. № 1. С. 39 – 42. 3. *Кошевой Н.Д.* Автоматизация экспериментальных исследований: Монография / Н.Д. Кошевой, В.А. Гаевой. Харьков: Факт, 2001. 112с.

Поступила в редколлегию 25.06.2009

**Кошевой Николай Дмитриевич**, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Научные интересы: автоматизация экспериментальных исследований, проектирование измерительных преобразователей, автоматизация производственных процессов. Адрес: Украина, 61070, Харьков, ул. Чкалова, 17, тел. 8-057-707-43-03.

**Костенко Елена Михайловна**, канд. техн. наук, доцент, проректор по учебно-педагогической и инновационной работе, Полтавская государственная аграрная академия. Научные интересы: автоматизация экспериментальных исследований, охрана труда. Адрес: Украина, 36003, Полтава, ул. Сковороды, 1/3, тел. 8-05322-7-36-93.

**Заболотный Александр Витальевич**, канд. техн. наук, доцент, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Научные интересы: проектирование измерителей влажности материалов. Адрес: Украина, 61070, Харьков, ул. Чкалова, 17, тел. 8-057-707-42-69.