
УДК 519.24:62.50

Н.Д. КОШЕВОЙ, О.Л. БУРЛЕЕВ, Е.М. КОСТЕНКО

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ МНОГОФАКТОРНЫХ ПЛАНОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Показывается эффективность оптимального по стоимостным затратам планирования эксперимента на примерах исследования технологических процессов, приборов и систем. Доказывается, что синтез оптимальных планов для количества факторов $k > 3$ целесообразно осуществлять методом ветвей и границ, а при количестве факторов $k \leq 3$ оптимальные планы, полученные методом ветвей и границ и методом анализа перестановок строк матрицы планирования, совпадают.

Постановка проблемы. При решении задач оптимизации и управления различными объектами возникает проблема получения математических моделей указанных объектов. При этом целесообразно получать эти модели при минимальных стоимостных и временных затратах. Особенно эта задача актуальна при исследовании дорогостоящих и длительных процессов.

1. Анализ последних исследований и публикаций. Известны методы синтеза оптимальных по стоимостным и временным затратам планов эксперимента [1-3], основанные на использовании следующих видов оптимизации: анализ перестановок строк матрицы планирования, случайный поиск, метод ветвей и границ [4]. В работе [4] показано, что при количестве факторов $k \leq 3$ для исследования технологических процессов, приборов и систем оптимальные планы, полученные методом ветвей и границ и методом анализа перестановок строк матрицы планирования, совпадают. Целесообразно сравнить результаты, полученные различными методами оптимизации, для объектов исследования с количеством факторов $k > 3$.

Цель исследования: провести сравнительный анализ методов оптимизации многофакторных планов эксперимента.

2. Основные результаты исследований. В работе [5] синтезированы оптимальные планы для экспериментальных исследований вихретоковых преобразователей. В исследование были включены следующие факторы: X_1 – диаметр сердечника, мм; X_2 – высота сердечника, мм; X_3 – количество витков; X_4 – частота питающего напряжения, Гц. По убыванию стоимости реализации эти планы можно ранжировать следующим образом: план, полученный методом анализа перестановок строк матрицы планирования (112,85 усл. ед.); план, полученный методом случайного поиска (101,8 усл. ед.); план, полученный методом итерационного планирования эксперимента (86,3 усл. ед.).

При оптимизации исходного плана эксперимента методом ветвей и границ получен оптимальный план (табл.1), стоимость реализации которого составляет 53,05 усл. ед.

Таблица 1

Оптимальные планы эксперимента для исследования вихретоковых преобразователей

Метод итерационного планирования эксперимента (анализ перестановок)					Метод ветвей и границ				
Номер опыта	Обозначение факторов				Номер опыта	Обозначение факторов			
	X_1	X_2	X_3	X_4		X_1	X_2	X_3	X_4
4	+1	+1	+1	+1	4	+1	+1	+1	+1
5	+1	+1	-1	+1	5	+1	+1	-1	+1
2	-1	+1	-1	-1	9	+1	+1	-1	-1
8	-1	+1	+1	-1	12	+1	+1	+1	-1
7	-1	-1	+1	+1	14	-1	+1	+1	-1
3	-1	-1	-1	+1	8	-1	+1	+1	-1
1	+1	-1	-1	-1	13	-1	+1	-1	+1
6	+1	-1	+1	-1	2	-1	+1	-1	-1
11	+1	-1	+1	+1	3	-1	-1	-1	+1
10	+1	-1	-1	+1	15	-1	-1	-1	-1
9	+1	+1	-1	-1	7	-1	-1	+1	+1
12	+1	+1	+1	-1	16	-1	-1	+1	-1
14	-1	+1	+1	+1	11	+1	-1	+1	+1
13	-1	+1	-1	+1	6	+1	-1	+1	-1
15	-1	-1	-1	-1	10	+1	-1	-1	+1
16	-1	-1	+1	-1	1	+1	-1	-1	-1

При исследовании технологического процесса меднения печатных плат в качестве доминирующих факторов были выбраны: X_1 – концентрация $CuSO_4$ в растворе электролита, г/л; X_2 – концентрация H_2SO_4 в растворе электролита, г/л; X_3 – плотность тока в гальванической ванне, А/дм²; X_4 – время обработки плат в гальванической ванне, мин. В работе [6] синтезированы оптимальные планы для исследования данного технологического процесса, которые получены с использованием следующих методов: анализ перестановок строк матрицы планирования (стоимость оптимального плана 86,62 усл. ед., проанализирован 102741 вариант); случайный поиск (стоимость оптимального плана 70,15 усл. ед., проанализирован 42601 вариант). При оптимизации исходного плана методом ветвей и границ получен оптимальный план (табл.2), стоимость реализации которого составляет 43,84 усл. ед.

При исследовании устройства для контроля качества диэлектрических материалов 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.

Таблица 2

Оптимальные планы эксперимента для исследования технологического процесса меднения печатных плат

Метод случайного поиска					Метод ветвей и границ				
Номер опыта	Обозначение факторов				Номер опыта	Обозначение факторов			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
15	-1	-1	-1	-1	16	-1	-1	+1	-1
7	-1	-1	+1	+1	15	-1	-1	-1	-1
14	-1	+1	+1	+1	3	-1	-1	-1	+1
8	-1	+1	+1	-1	7	-1	-1	+1	+1
2	-1	+1	-1	-1	13	-1	+1	-1	+1
13	-1	+1	-1	+1	14	-1	+1	+1	+1
11	+1	-1	+1	+1	8	-1	+1	+1	-1
6	+1	-1	+1	-1	2	-1	+1	-1	-1
10	+1	-1	-1	+1	9	+1	+1	-1	-1
9	+1	+1	-1	-1	12	+1	+1	+1	-1
12	+1	+1	+1	-1	4	+1	+1	+1	+1
5	+1	+1	-1	+1	5	+1	+1	-1	+1
4	+1	+1	+1	+1	10	+1	-1	-1	+1
1	+1	-1	-1	-1	11	+1	-1	+1	+1
3	-1	-1	-1	+1	6	+1	-1	+1	-1
16	-1	-1	+1	-1	1	+1	-1	-1	-1

В работе [8] синтезированы оптимальные планы для исследования энергопотребления и точности данных устройств, которые получены с использованием следующих методов: анализ перестановок строк матрицы планирования (стоимость оптимального плана для исследования энергопотребления – 24,9 усл. ед., проанализирован 131501 вариант; стоимость оптимального плана для исследования точности – 24,7 усл. ед., проанализировано 7777777 вариантов); случайный поиск (стоимость оптимального плана для исследования энергопотребления – 30,0 усл. ед., проанализировано 7143854 варианта; стоимость оптимального плана для исследования точности 29,4 усл. ед., проанализировано 22654466 вариантов).

Использование метода итерационного планирования эксперимента дало оптимальные планы эксперимента, реализация которых составляет 40,4 усл. ед.

При оптимизации исходного плана эксперимента методом ветвей и границ получены оптимальные планы: для исследования энергопотребления (табл.3) стоимостью реализации 20,8 усл. ед.; для исследования точности (табл.4) стоимостью реализации 20,8 усл. ед.

Выводы. На примерах исследования технологических процессов, приборов и систем доказана эффективность оптимального по стоимостным затратам планирования эксперимента. Показано, что для исследования объектов с количеством факторов $k > 3$ оптимальные планы эксперимента целесообразно получать методом ветвей и границ, а при количестве факторов $k \leq 3$ оптимальные планы, полученные методом ветвей и границ и методом анализа перестановок строк матрицы планирования, совпадают.

Список литературы: 1. 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. 2. Кошевой Н.Д. Оптимальное планирование эксперимента для исследования динамических объектов / Н.Д. Кошевой, Е.М. Костенко // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. К.: ВІКНУ, 2009. Вип. №20. С.57-62. 3. Кошевой Н.Д. Метод оптимального по стоимостным и временным затратам последовательного планирования эксперимента / Н.Д. Кошевой, Е.М. Костенко, В.А. Дергачев // Автоматизация: проблемы, поиски, решения. Материалы межд. научн.-техн. конф., 7-12 сентября 2009. Севастополь: изд. Сев. НГУ, 2009. С.21-23. 4. Кошевой Н.Д. Применение метода ветвей и границ для оптимизации многофакторных экспериментов / Н.Д. Кошевой, О.Л. Бурлеев, Е.М. Костенко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. 2010. №1(42). С.67–70. 5. Кошевой Н.Д. Оптимальное планирование экспериментальных исследований вихретоковых преобразователей / Н.Д. Кошевой, В.А. Дергачев, Е.М. Костенко, М.В. Цеховской //

Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. научн. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Харьков, 2009. Вып. 42. С.147-151. 6. *Koshevoy N.D.* Appraisal of optimum efficiency by cost expenses of the experiment's planning / N.D. Koshevoy, V.A. Dergachev, E.M. Kostenko // Вісник Черкаського державного технологічного університету. 2009. Спецвипуск. С.132-134. 7. *Заболотный А.В.* Разработка, исследование и оптимизация устройства для контроля качества диэлектрических покрытий / А.В. Заболотный, Н.Д. Кошевой // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2004. №1. С.39-42. 8. *Кошевой Н.Д.* Оптимальное планирование эксперимента при исследовании устройства для контроля качества диэлектрических материалов / Н.Д. Кошевой, Е.М. Костенко, А.В. Заболотный // АСУ и приборы автоматики. 2009. Вып. 147. С. 38-41.

Таблица 3

Оптимальные планы для исследования энергопотребления устройств для контроля качества диэлектрических материалов

Анализ перестановок					Метод ветвей и границ				
Номер опыта	Обозначение факторов				Номер опыта	Обозначение факторов			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
2	-1	+1	+1	+1	2	-1	+1	+1	+1
6	-1	+1	-1	+1	4	+1	+1	+1	+1
5	-1	-1	-1	+1	3	+1	-1	+1	+1
7	+1	-1	-1	+1	1	-1	-1	+1	+1
8	+1	+1	-1	+1	5	-1	-1	-1	+1
4	+1	+1	+1	+1	7	+1	-1	-1	+1
3	+1	-1	+1	+1	8	+1	+1	-1	+1
1	-1	-1	+1	+1	6	-1	+1	-1	+1
9	-1	-1	+1	-1	14	-1	+1	-1	-1
10	-1	+1	+1	-1	16	+1	+1	-1	-1
11	+1	-1	+1	-1	15	+1	-1	-1	-1
12	+1	+1	+1	-1	13	-1	-1	-1	-1
13	-1	-1	-1	-1	9	-1	-1	+1	-1
14	-1	+1	-1	-1	11	+1	-1	+1	-1
15	+1	-1	-1	-1	12	+1	+1	+1	-1
16	+1	+1	-1	-1	10	-1	+1	+1	-1

Таблица 4

Оптимальные планы для исследования точности устройств для контроля качества диэлектрических материалов

Анализ перестановок					Метод ветвей и границ				
Номер опыта	Обозначение факторов				Номер опыта	Обозначение факторов			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
3	+1	-1	+1	+1	3	+1	-1	+1	+1
7	+1	-1	-1	+1	1	-1	-1	+1	+1
5	-1	-1	-1	+1	2	-1	+1	+1	+1
6	-1	+1	-1	+1	4	+1	+1	+1	+1
8	+1	+1	-1	+1	8	+1	+1	-1	+1
4	+1	+1	+1	+1	6	-1	+1	-1	+1
2	-1	+1	+1	+1	5	-1	-1	-1	+1
1	-1	-1	+1	+1	7	+1	-1	-1	+1
9	-1	-1	+1	-1	15	+1	-1	-1	-1
10	-1	+1	+1	-1	13	-1	-1	-1	-1
11	+1	-1	+1	-1	14	-1	+1	-1	-1
12	+1	+1	+1	-1	16	+1	+1	-1	-1
13	-1	-1	-1	-1	12	+1	+1	+1	-1
14	-1	+1	-1	-1	10	-1	+1	+1	-1
15	+1	-1	-1	-1	9	-1	-1	+1	-1
16	+1	+1	-1	-1	11	+1	-1	+1	-1

Поступила в редколлегию 01.03.2010

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. 057-707-43-03.

Бурлеев Олег Леонидович, магистр, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Научные интересы: автоматизация экспериментальных исследований, проектирование измерительных преобразователей. Адрес: Украина, 61070, Харьков, ул. Чкалова, 17, тел. 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. 05322-7-36-93.

УДК 681. 325 (088. 8)

Л.В. ЛАРЧЕНКО, В.Г. ЛОБОДА

ЦИФРОВОЙ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДВУХ ЧАСТОТ

В настоящее время преобразование двух входных частот в выходную, равную корню квадратному из суммы их квадратов, осуществляется в преобразователях последовательно во времени посредством выполнения четырех арифметических операций. В предлагаемом устройстве это преобразование осуществляется за время выполнения трех из них при более простой технической реализации.

1. Введение

В [1] предложен метод непрерывного формирования приращений ступенчатых функций с числоимпульсной формой представления аргумента, а в [2] – его техническая реализация на примере специализированного цифрового вычислителя для извлечения корня квадратного из суммы квадратов. Его достоинством является возможность воспроизведения и вычисления значений функций в реальном масштабе времени в темпе формирования кода аргумента при более простой технической реализации. Там же названы некоторые цифровые измерительные приборы, в которых рассмотренный вычислитель фиксирует результат измерения соответствующей физической величины в цифровом коде. Однако выполняемая им функция не ограничивает названную в [2] область его применения. Известны, например, цифровые преобразователи частотно-импульсных сигналов, в которых реализуемая устройством функция выполняется не над кодами входных чисел, а над их частотами. В качестве примера можно назвать преобразователи для формирования выходной частоты f , определяемой выражением

$$f = \sqrt{f_1^2 + f_2^2}, \quad (1)$$

где f_1 и f_2 – входные частоты преобразователя.

Такие устройства широко применяются в векторных анализаторах с частотными входами и выходом, при частотном представлении модуля рассогласования двух процессов, а также при построении преобразователей форм представления информации с промежуточным время-импульсным преобразованием для специализированных устройств обработки информации, цифровых контрольно-измерительных приборах, в системах автоматического управления и регулирования, работающих в комплексе с ЭВМ, повышая быстродействие всей системы.

Анализ функции (1) показывает, что в таких преобразователях в качестве основного узла может быть использована модификация предложенного в [2] вычислителя. Полученное при этом техническое решение функционального преобразователя частоты по сравнению с известными устройствами аналогичного назначения [3-5] проще в реализации и обеспечивает минимально возможное время преобразования частот f_1 и f_2 входных сигналов в выходную частоту f следования импульсов.