

6. Гоцуленко В. В. Демпфирование автоколебаний вибрационного горения проточными динамическими демпферами / В. В. Гоцуленко,

В. Н. Гоцуленко // *Авиационно-космическая техника и технология*. — 2011. — № 3(80). — С. 53—57.

пост.18.04.13

## Оптимальное планирование эксперимента с использованием генетических алгоритмов

*Н. Д. КОШЕВОЙ, Е. А. СУХОБРУС*

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»

Проанализирована эффективность применения классического генетического алгоритма и параллельных генетических алгоритмов для оптимизации технологических процессов по стоимости реализации. Для автоматизации процесса поиска разработано программное обеспечение на языке «Free Pascal».

Проаналізовано ефективність застосування класичного генетичного алгоритму і паралельних генетичних алгоритмів для оптимізації технологічних процесів за вартістю реалізації. Для автоматизації процесу пошуку розроблено програмне забезпечення на мові «Free Pascal».

The efficiency of the classic genetic algorithm and parallel genetic algorithms for implementation value optimization of technology processes was analyzed. To automate the process of search the software in the language of «Free Pascal» was developed.

**Постановка задачи.** Для повышения эффективности исследований технологических процессов большое значение имеет получение адекватной математической модели процесса по результатам многофакторных экспериментов при минимальных временных и стоимостных затратах. В работе исследуется эффективность применения генетических алгоритмов (ГА) для оптимизации технологических процессов по стоимости реализации.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Стандартный ГА в условиях большого пространства поиска или сложного ландшафта может быть неэффективен по критерию времени. Эту проблему позволяют решить параллельные ГА, среди которых для анализа эффективности применения выбраны островная модель и ячеистый ГА. Исследования ячеистой модели показали, что для сложных задач она способна обеспечить лучшие решения, чем стандартный ГА [1]. Также подчеркнута эффективность принципа элитизма, позволяющего не потерять хорошее промежуточное решение, и двухточечного скрещивания [2].

**Цель статьи.** Анализ процесса оптимизации различных технологических процессов по стоимости реализации с использованием классического генетического алгоритма и параллельных генетических алгоритмов.

**Основная часть.** На основании проведенного анализа публикаций, для поиска оптимальных по стоимости реализации планов эксперимента выбраны следующие методы: классический ГА, параллельные ГА (островная модель и ячеистый ГА). Учитывая рекомендацию, данные в [2], алгоритм поиска оптимального по стоимости реализации плана эксперимента с использованием генетических алгоритмов дополнен принципом элитарного отбора, а для процедуры скрещивания используются операторы двухточечного скрещивания: PMX и MPX [3].

Для автоматизации процесса поиска реализовано программное обеспечение с использованием данных методов. Алгоритм программного обеспечения работает следующим образом:

Шаг 1. Объявление переменных, используемых в программном обеспечении, присвоение им начальных значений.

Шаг 2. Считывание из входного файла данных о количестве анализируемых факторов, матрице исходного плана эксперимента, стоимости изменений значений факторов и количестве реализуемых поколений. В режиме классического ГА дополнительно вводится размер популяции. В режиме островной модели дополнительно вводятся значения размера популяции для каждого острова, количества островов и задается частота миграции индивидов между островами. В режиме ячеистого ГА дополнительно вводится количество строк и столбцов решетки популяции.

Шаг 3. Производится оценка стоимости реализации исходной матрицы планирования.

Шаг 4. Генерируется начальная популяция с заданным количеством индивидов. Под индивидом популяции подразумевается набор генов (строк матрицы планирования), кодирующий последовательность проведения эксперимента. В режиме островной модели генерация начальной популяции производится отдельно для каждого острова. В режиме ячеистого ГА генерация начальной популяции индивидов производится на решетке заданной размерности, в каждой ячейке решетки содержится один индивид.

Шаг 5. Для каждого индивида популяции вычисляется значение функции приспособленности. В качестве функции приспособленности в программе используется стоимость реализации матрицы планирования согласно порядку генов индивида.

Шаг 6. Производится упорядочивание индивидов популяции по значению функции приспособленности. Вычисляется среднее значения функции приспособленности.

собственности для текущей популяции. В режиме ячеистого ГА упорядочивание индивидов популяции не производится, процесс поиска индивида с наилучшим значением функции приспособленности распараллеливается на количество процессов, равное половине количества столбцов решетки популяции.

Шаг 7. Реализуется принцип элитарного отбора - особь с лучшим значением функции приспособленности переносится в следующее поколение без скрещивания.

Шаг 8. Из оставшихся особей популяции случайным образом выбирается 2 особи для скрещивания. В режиме ячеистого ГА шаги 7 и 8 не выполняются.

Шаг 9. В режимах классического ГА и островной модели скрещивание выбранных особей производится с использованием РМХ кроссовера, в результате чего образуется 2 потомка. В режиме ячеистого ГА для каждого индивида популяции производится процедура скрещивания с использованием МРХ кроссовера с четырьмя ближайшими соседями в решетке (сверху, снизу, слева и справа), в результате образуется 4 потомка.

Производится вычисление значения функции приспособленности для потомков, если оно лучше или совпадает со значением функции приспособленности для родителей, то происходит замена родительской особи потомком, в обратном случае потомок удаляется.

Шаг 10. Повтор шагов 8 и 9 до тех пор, пока популяция следующего поколения будет заполнена. В режиме островной модели по достижению заданного значения частоты миграции между островами происходит обмен одной особью с наилучшим значением функции приспособленности. В режиме ячеистого ГА повтор шага 9 осуществляется до тех пор, пока не будет реализован проход по всей решетке популяции.

Шаг 11. Повтор шагов 7-10 до достижения заданного количества поколений. Остановка процесса поиска также возможна по нажатию клавиши «ESC».

Шаг 12. Запись в выходной файл данных особи с наилучшим значением функции приспособленности, выходной матрицы планирования с порядком проведения опытов, соответствующим последовательности генов особи. В выходной файл также заносятся данные о стоимости реализации исходной и выходной матриц планирования, соотношение этих стоимостей и время счета программы.

Эффективность программного обеспечения проверялась на примерах исследования процессов измерения плотности тока гальванических ванн с использованием мерных датчиков [4], оптимизации параметров, характеризующих неравномерность покрытия проводников гальваническими осадками [5], исследования энергопотребления и точности устройства для контроля качества диэлектрических материалов [6].

Стоимости изменений значений уровней факторов приведены в табл. 1. Исходный план эксперимента по измерению плотности тока гальванических ванн с использованием мерных датчиков приведен в табл. 2. 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/дм<sup>2</sup>. Мерные датчики крепили на спе-

циальном 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.

Исходный план эксперимента был оптимизирован следующими методами: анализ перестановок строк матрицы планирования (АП) [7], случайный поиск (СП), классический ГА (КГА), островная модель (ОМ) и ячеистый ГА (ЯГА). Порядок проведения оптимизированных по стоимости реализации планов эксперимента, полученных различными методами оптимизации, представлен в табл. 2.

В связи со значительными временными затратами на полный перебор вариантов перестановок строк матрицы, при оптимизации исходных планов анализируемых технологических процессов методами анализа перестановок и случайного поиска вводилось ограничение на анализ 10000000 вариантов.

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

Таблица 2. Исходная матрица планирования и порядок реализации эксперимента по оптимизированным планам

Опыт	Факторы			Порядок оптимизированного по стоимости реализации плана эксперимента				
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	АП	СП	КГА	ОМ	ЯГА
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
1	-1	0	0	6	26	23	14	1
2	-1	0	-1	7	3	27	2	2
3	1	-1	-1	8	17	20	13	14
4	0	0	1	4	27	4	26	22
5	1	0	0	9	20	24	5	18
6	1	1	0	10	19	25	6	27
7	-1	1	0	11	15	6	10	23
8	-1	1	1	1	18	10	9	17
9	1	0	1	5	22	9	4	11
10	1	1	1	12	23	5	24	21
11	-1	-1	1	13	9	26	8	8
12	1	1	-1	2	10	12	7	7
13	0	0	-1	14	16	16	1	25
14	-1	1	-1	15	13	14	21	20
15	1	-1	1	16	24	2	11	13
16	0	1	-1	17	11	22	17	3
17	-1	-1	0	18	21	17	22	19
18	0	-1	-1	19	4	11	18	15
19	1	-1	0	20	5	21	3	9
20	0	0	0	21	6	8	19	4
21	-1	0	1	22	25	7	15	24
22	-1	-1	-1	23	1	1	23	10
23	0	-1	1	24	8	13	27	6

24	0	1	1	25	7	18	20	5
25	0	1	0	26	14	3	25	26
26	1	0	-1	3	2	19	16	12
27	0	-1	0	27	12	15	12	16

Эффективность программного обеспечения проверялась также на примере оптимизации параметров, характеризующих неравномерность покрытия проводников гальваническими осадками: максимальный разброс высоты проводников  $\Delta h$ , средний разброс  $\Delta h_{cp}$  и параметр шероховатости поверхности проводников печатной платы  $Rz$ . 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/дм<sup>2</sup>;  $X_4$  – время  $t$  обработки плат в данной ванне, час [5].

Стоимости изменений значений факторов приведены в табл. 3. Исходная матрица планирования и порядок проведения оптимизированных по стоимости реализации планов эксперимента, полученных различными методами оптимизации, представлен в табл. 4.

Таблица 3. Стоимости изменений значений уровней факторов

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

Таблица 4. Исходная матрица планирования и порядок реализации эксперимента по оптимизированным планам

Опыт	Факторы				Порядок оптимизированного по стоимости реализации плана эксперимента				
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	АП	СП	КГА	ОМ	ЯГА
1	+1	+1	-1	+1	7	2	8	8	1
2	+1	+1	+1	+1	8	10	3	3	2
3	+1	-1	+1	-1	3	9	10	10	11
4	-1	-1	+1	+1	9	8	9	9	7
5	-1	+1	+1	-1	10	11	1	1	8
6	-1	+1	-1	-1	1	7	2	2	3
7	+1	+1	-1	-1	2	1	11	11	10
8	+1	-1	-1	-1	11	3	7	7	9
9	+1	-1	-1	+1	5	16	6	6	14
10	+1	-1	+1	+1	6	4	5	5	4
11	+1	+1	+1	-1	12	14	13	13	16
12	-1	+1	-1	+1	13	15	12	12	15
13	-1	+1	+1	+1	4	13	14	14	6
14	-1	-1	-1	+1	14	12	4	4	5
15	-1	-1	-1	-1	15	5	16	16	13
16	-1	-1	+1	-1	16	6	15	15	12

В работе [6] 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.

Стоимости изменений значений факторов приведены в табл. 5. Исходная матрица планирования и порядок проведения оптимизированных по стоимости реализации планов эксперимента, полученных различными методами оптимизации, представлен в табл. 6.

Таблица 5. Стоимости изменений значений уровней факторов

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

Таблица 6. Исходная матрица планирования и порядок реализации эксперимента по оптимизированным планам

Опыт	Факторы				Порядок оптимизированного по стоимости реализации плана эксперимента				
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	АП	СП	КГА	ОМ	ЯГА
1	-1	-1	+1	+1	5	4	3	8	4
2	-1	+1	+1	+1	7	1	1	6	2
3	+1	-1	+1	+1	8	3	2	5	1
4	+1	+1	+1	+1	6	2	4	7	3
5	-1	-1	-1	+1	2	5	8	3	7
6	-1	+1	-1	+1	4	7	6	1	5
7	+1	-1	-1	+1	3	6	5	2	6
8	+1	+1	-1	+1	1	8	7	4	8
9	-1	-1	+1	-1	9	13	15	12	16
10	-1	+1	+1	-1	10	14	13	10	14
11	+1	-1	+1	-1	11	11	14	9	13
12	+1	+1	+1	-1	12	10	16	11	15
13	-1	-1	-1	-1	13	9	12	15	11
14	-1	+1	-1	-1	14	12	10	13	9
15	+1	-1	-1	-1	15	16	9	14	10
16	+1	+1	-1	-1	16	15	11	16	12

Сравнительный анализ методов оптимизации по основным показателям на примерах рассматриваемых технологических процессов приведен в табл. 7.

Как видно из таблицы 7, наилучшими показателями по стоимости реализации и быстродействию при оптимизации технологических процессов обладают планы, оптимизированные с использованием генетических алгоритмов. Наихудшие показатели по временным и стоимостным затратам получаются при оптимизации методом случайного поиска.

На рис. 1 показана динамика показателей выигрышей по стоимости реализации планов эксперимента, полученных анализируемыми методами.

Как видно из рис. 1, ГА позволяют получить больший выигрыш по стоимости реализации эксперимента с меньшими временными затратами по

сравнению с методами анализа перестановок строки матрицы планирования и случайного поиска.

Таблица 7. Сравнительный анализ показателей оптимизации

Технологический процесс	Метод	Стоимость реализации исходной матрицы планирования, усл. ед.	Оптимизированная стоимость, усл. ед.	Выигрыш по стоимости реализации, раз	Время счета, сек.
Измерение плотности тока гальванических ванн	Анализ перестановок	174	147	1,18	697
	Случайный поиск		110	1,58	737
	Классический ГА		64	2,72	3,64
	Островная модель		61	2,85	5,8
	Ячеистый ГА		70	2,49	11,37
Гальваническое меднение печатных плат	Анализ перестановок	72,19	30,46	2,37	527
	Случайный поиск		41,8	1,73	491
	Классический ГА		25,83	2,79	2,42
	Островная модель		25,83	2,79	3,01
	Ячеистый ГА		25,83	2,79	3,2
Контроль качества диэлектрических материалов	Анализ перестановок	24,7	19,1	1,29	494
	Случайный поиск		23,4	1,06	501
	Классический ГА		16,1	1,53	1,44
	Островная модель		16,1	1,53	3,32
	Ячеистый ГА		16,1	1,53	3,53

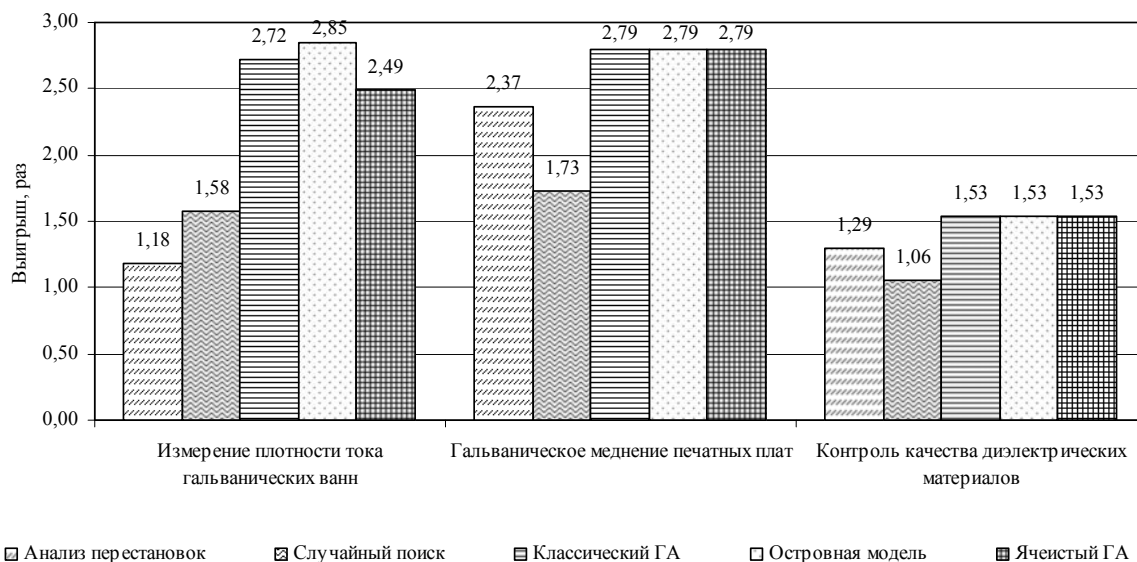


Рис. 1. Динамика показателей выигрышей

С точки зрения времени реализации и числа поколений, затрачиваемых на поиск оптимального по стоимости реализации плана эксперимента, параллельные генетические алгоритмы, в частности, такие как островная модель и ячеистый генетический алгоритм, оказываются эффективнее классического генетического алгоритма. Параллельный поиск целесообразно применять для оптимизации многоуровневых планов многофакторного эксперимента.

**Выводы**

Проанализирован процесс оптимизации различных технологических процессов по стоимости реализации с использованием классического генетического алгоритма и параллельных генетических алгоритмов. Показано, что среди рассмотренных методов оптимизации наилучшие показатели по временным и стоимостным

ным затратам получают при использовании островной модели генетического алгоритма.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Барсегян А. А. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining / А. А. Барсегян, М. С. Куприянов, В. В. Степаненко, И. И. Холод // Учебное пособие — СПб : БХВ-Петербург. — 2004.
2. Яминов Б. Генетические алгоритмы: Дискретная математика: алгоритмы / Б. Яминов // Санкт-Петербургский государственный университет. — 2005.
3. P. Larran Aga. Genetic Algorithms for the Travelling Salesman Problem: A Review of Representations and Operators / P. Larran Aga, C.M.H. Kuijpers, R.H. Murga, I. Inza, S. Dizdarevic // Artificial Intelligence Review 13 — Netherlands : Kluwer Academic Publishers. — 1999 — pp. 129—170.
4. Кошевой Н. Д. Оптимальное планирование эксперимента при исследовании качества технологических процессов / Н. Д. Кошевой, М. В. Цеховской, В. А. Дергачев, В. В. Сытник, Е. А. Сухобрус, Е. М. Костенко // Якість технологій та освіти. — Х. : Українська інженерно-педагогічна академія, 2011 г. — Вып. 2. — С. 26—32.
5. Кошевой Н. Д. Экспериментальное исследование, моделирование и оптимизация процесса гальванического меднения печатных плат / Н. Д. Кошевой, С. Г. Бестань, Г. К. Кожевников, О. Н. Кошевой, Н. В. Доценко // Математическое моделирование. — Днепропетровск : Днепропетровский государственный технический университет, 2001 г. — Вып. 1. — С. 28—30.
6. 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 г. — Вып. 147. — С. 38—42.
7. Кошовий М. Д. Комп'ютерна програма "Програма пошуку оптимальних багаторівневих комбінаторних планів багатофакторного 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.

пост.26.04.2013