

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ И ТЕРМОРЕГУЛЯТОРА

Кошевой Н. Д. – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой авиационных приборов и измерений, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Костенко Е. М. – д-р техн. наук, доцент, Полтавская государственная аграрная академия, Украина, Полтава.

Беляева А. А. – аспирант кафедры авиационных приборов и измерений, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Впервые предложено применение методов табу-поиска, случайного поиска, роя частиц для построения оптимальных по стоимости планов эксперимента при исследовании весоизмерительной системы и терморегулятора.

Цель работы – провести сравнительный анализ разработанных методов оптимизации, таких как табу-поиск, случайный поиск, рой частиц при поиске оптимальных планов проведения эксперимента во время исследования весоизмерительной системы и терморегулятора.

Метод. Предложены методы построения оптимальной по стоимости реализации матрицы планирования эксперимента с использованием алгоритмов роя частиц, табу-поиска и случайного поиска. В начале вводится количество факторов и стоимости переходов для каждого уровня факторов. Затем с учетом введенных данных формируется исходная матрица планирования эксперимента. При использовании алгоритма табу-поиска на каждом шаге итерации в качестве нового текущего решения выбирается лучшее решение в окрестности текущего и осуществляется проверка не находится ли оно в списке табу. Таким образом происходят вычисления, пока алгоритм не достигнет заданного числа итераций. Список табу формируется из решений, имеющих минимальную стоимость. Метод случайного поиска основан на перестановке столбцов матрицы планирования. Количество итераций алгоритма задается пользователем. Метод роя частиц основан на моделировании поведения популяции частиц. В каждой точке, где побывала частица, рассчитывается значение стоимости проведения эксперимента. При этом каждая частица запоминает, какое (и где) лучшее значение стоимости эксперимента она лично нашла и где расположена точка, являющаяся лучшей среди всех точек, которые разведали частицы. На каждой итерации частицы корректируют свою скорость (модуль и направление). Через некоторое количество итераций частицы собираются вблизи наиболее хорошей точки. Затем среди всех новых точек осуществляется проверка, не нашли ли мы новую глобально лучшую точку, и, если нашли, запоминаем ее координаты и значение стоимости проведения эксперимента в ней. Затем рассчитывается выигрыш по сравнению с исходной стоимостью проведения эксперимента.

Результаты. Разработано программное обеспечение, реализующее предложенные методы, которое использовано для проведения вычислительных экспериментов по исследованию свойств этих методов при исследовании весоизмерительной системы и терморегулятора. Синтезированы оптимальные по стоимости реализации планы экспериментов, а также приведены выигрыши в результатах оптимизации по сравнению с исходной и максимальной стоимостями проведения эксперимента.

Выводы. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенных методов и реализующего их программного обеспечения, а также позволяют рекомендовать их для применения на практике при построении оптимальных матриц планирования экспериментов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метод, оптимизация, рой частиц, планирование экспериментов, табу-поиск, оптимальный план, случайный поиск, стоимость.

НОМЕНКЛАТУРА

δ – погрешность измерения, %;

S – чувствительность (коэффициент передачи);

α – угол наклона весоизмерительного лотка, град;

W – влажность сыпучего материала, %;

f_d – коэффициент трения сыпучего материала в движении;

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$ – коэффициенты математической модели при исследовании весоизмерительной системы;

U_m – напряжение питания измерительного моста, В;

U_n – напряжение питания терморегулятора, В;

T – температура воздушной среды в зоне датчика температуры, °С;

R_n – сопротивление нагрузки терморегулятора, кОм;

$U_{\text{вых}}$ – напряжение на выходе терморегулятора, В;

G – граф;

N – множество вершин графа;

t – время работы программы, с;

B – выигрыш;

C_{\min} – минимальная стоимость проведения эксперимента, усл.ед.;

$C_{\text{исх}}$ – исходная стоимость проведения эксперимента, усл.ед.;

S_{ij} – стоимость перехода от i -го опыта к j -му, усл.ед. о бщая стоимость проведения эксперимента, усл.ед.;

k – количество факторов.

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные методы широко используются как в науке, так и в промышленности. При этом глав-

ное значение – повышение эффективности экспериментальных исследований, которые направлены на получение адекватной математической модели процесса. Применение планирования эксперимента делает поведение экспериментатора организованным и целенаправленным, способствует существенному повышению надежности полученных результатов и производительности труда экспериментатора. Объект исследования: процессы оптимизации по стоимостным затратам планов многофакторного эксперимента для исследования весоизмерительной системы и терморегулятора. Предмет исследования: результаты исследования методов оптимизации планов многофакторных экспериментов при изучении весоизмерительной системы и терморегулятора. Цель исследования: получение наибольшего объема информации о воздействии исследуемых факторов на производственный процесс. После этого происходит построение математической модели исследуемого объекта. А также получить эти модели нужно с минимальными стоимостными и временными затратами. Особенно важное значение это приобретает при исследовании дорогостоящих и длительных процессов.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача оптимизации по стоимостным затратам планов экспериментов является NP-сложной, поэтому для своего решения требует значительных времени и большого объема вычислений, которые быстро растут с увеличением размерности задачи. В общем случае задачу выбора оптимального плана многофакторного эксперимента можно сформулировать следующим образом.

Имеется полный взвешенный ориентированный граф G с множеством вершин $N = \{1, 2, \dots, n\}$, где $n = 2^k$, k -количество факторов. Веса всех дуг неотрицательны, необходимо найти путь с минимальной длиной. Стоимость перехода от i -го опыта к j -му равна $S_{i,j}$. Необходимо найти стоимость проведения эксперимента $S_{\text{общ}}$ такую, что

$$S_{\text{общ}} = \sum_{j=2^i=1}^n \sum_{i=1}^k S_{i,j} \rightarrow \min.$$

Оптимальным решением задачи выступает такая перестановка строк матрицы планирования эксперимента, которая позволяет найти минимальную стоимость проведения эксперимента. С увеличением числа факторов (k) количество преобразований значительно возрастает. Следовательно целесообразно пытаться найти решения с помощью приближенных алгоритмов, таких как алгоритм случайного поиска, табу-поиска, роя частиц.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Для решения этой задачи возможно применение методов комбинаторной оптимизации [1–5]. Известны примеры построения многофакторных планов эксперимента, которые основаны на использовании таких методов оптимизации как: полный перебор [6], случайный поиск [6]. Была доказана эффективность применения этих методов при исследовании весоизмерительной системы и терморегулятора. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки. Их основными недостатками выступают: низкие показатели быстродействия, и то что не всегда найденное решение является точным, а удается найти только близкое к оптимальному решение.

Поэтому целесообразно для сравнения результатов оптимизации планов эксперимента применить следующие алгоритмы оптимизации: рой частиц, табу-поиск, случайный поиск (перестановки столбцов матрицы планирования). Обширное исследование приложений метода роя частиц сделано Поли [7, 8], В. Я. Гальченко и А. Н. Якимовым [9], а также Ши [10].

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве весоизмерительной системы применяется система [11], которая обеспечивает возможность моделирования процессов измерения весового расхода сыпучих материалов и дает повышение точности измерения. На рис. 1 приведена функциональная схема весоизмерительной системы, а конструкция измерительного лотка и общий вид системы показаны на рис. 2.

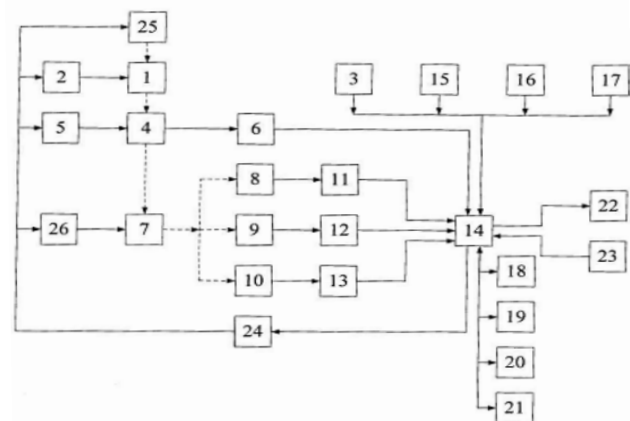


Рисунок 1 – Функциональная схема весоизмерительной системы

Весоизмерительная система включает в себя бункер 1 с дозируемым компонентом, электровибратор 2 и датчик влажности материала 3 расположены в бункере. Под бункером установлен ленточный конвейер 4 с электроприводом 5. Также в состав входит датчик скорости движения 6 ленты конвейера. Лоток 7 закреплен под конвейером. Измерительный лоток соединен с помощью шарнирных соединений с тензорезистивными датчиками силы 8, 9, 10, которые подключены к аналого-цифровым преобразователям 11, 12, 13, которые соединены с микропроцессором 14.

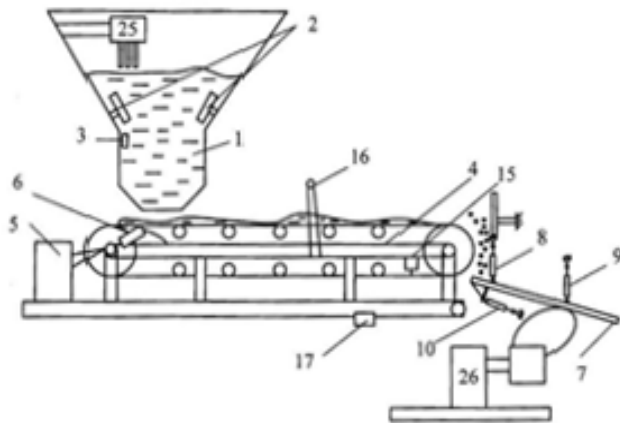


Рисунок 2 – Общий вид системы и конструкция измерительного лотка

Датчик растяжения ленты 15, концевые выключатели 16, датчик скорости движения ленты конвейера, закрепленные на конвейере, и датчик температуры 17 подключены к микропроцессору, который соединен с адресным дешифратором 18, накопителем памяти 19, а также с оперативным запоминающим устройством 20, регистром адреса 21, блоком индикации 22, функциональной клавиатурой 23, цифро-аналоговым преобразователем 24, который в свою очередь подключен к электроприводу 5 и электровибратору 2.

Через цифро-аналоговый преобразователь 24 к микропроцессору 14 подключены дозатор 25, который расположен в бункере 1, и электропривод 26 измерительного лотка 7.

На ленточный конвейер 4 поступает шихта из бункера 1, а затем – на измерительный лоток 7. С помощью концевых выключателей 16, размещенных под поверхностью конвейера 4, контролируется поступление сыпучего материала на ленточный конвейер. Если сыпучий материал поступает в необходимом количестве на ленточный конвейер 4, то не срабатывают концевые выключатели 16, а если в меньшем количестве, то они срабатывают. Если срабатывают концевые выключатели 16, то сигнал подается на микропроцессор 14, а затем с него через цифро-аналоговый преобразователь 24 сигнал поступает на электровибратор 2. В случае если поступление сыпучего материала не началось, то микропроцессор 14 подает сигнал на электропривод 5 ленточного конвейера 4, чтобы осуществить его остановку, и на блок индикации 22 – сигнал аварийной остановки ленточного конвейера 4.

Сыпучий материал с конвейера поступает на измерительный лоток 7. Сыпучий материал, который движется по измерительному лотку 7, воздействует на тензорезистивные датчики силы растяжения (ТДС) 8, 9, 10. Сигналы с ТДС посредством аналого-цифровых преобразователей 11, 12, 13 преобразовываются в цифровые и обрабатываются микропроцессором 14. В предлагаемой системе используется шарнирное крепление всех узлов, что обеспечивает возможность избавления от попереч-

ных сил и моментов, возникающих в результате деформации и температурного влияния отдельных деталей и узлов монтажа.

Чтобы обеспечить учет влияния влажности сыпучего материала применяется датчик влажности 3, который соединен с микропроцессором 14. В случае, когда влажность материала отличается от заданной, микропроцессор 14 сигнализирует оператору о необходимости изменения угла наклона измерительного лотка 7.

Чтобы учесть влияние температуры используется микроэлектронный температурный датчик 17, который соединен с микропроцессором 14. Количество шихты, поступающей на измерительный лоток 7, регулируется изменением скорости движения ленты конвейера 4. Чтобы это осуществить в системе применяют датчик скорости движения конвейерной ленты.

В случае, когда расход шихты недостаточный, микропроцессор 14 выдает сигнал на электропривод 5 конвейера 4 с целью повышения скорости движения конвейерной ленты. А в случае, когда расход шихты превышает требуемое значение, микропроцессор 14 выдает сигнал на электропривод 5 конвейера 4, чтобы уменьшить скорость движения конвейерной ленты. Выполнение этих действий происходит до тех пор, пока расход материала не будет соответствовать заданной величине.

В микропроцессоре 14 сохраняется матрица планирования эксперимента. В качестве критериев оптимизации были выбраны такие технические показатели весоизмерительной системы: погрешность измерения δ , %; чувствительность (коэффициент передачи) S . Факторы, которые влияют на эти показатели: X_1 – угол наклона весоизмерительного лотка, α , град; X_2 – влажность сыпучего материала, W , %; X_3 – коэффициент трения сыпучего материала в движении, f_d .

Для установки значений уровней факторов, которые задаются первой строкой матрицы планирования, микропроцессор 14 через цифро-аналоговый преобразователь 24 подает сигнал на электропривод 26, который устанавливает соответствующий угол α наклона измерительного лотка 7. Влажность сыпучего материала, которая измеряется датчиком 3, в микропроцессоре 14 сравнивается с требуемым значением, которое задается первой строкой матрицы планирования. В случае рассогласования этих значений микропроцессор 14 через цифро-аналоговый преобразователь 24 выдает сигнал на дозаторы 25 для изменения влажности W материала. Изменение коэффициента трения f_d достигается за счет замены типа материала, погружаемого в бункер 1.

Сразу после установки значений уровней факторов, которые задаются первой строкой матрицы планирования, вес сыпучего материала вычисляется микропроцессором 14. В микропроцессоре еще вычисляется и погрешность измерения δ . Потом устанавливаются значения уровней факторов, которые задаются второй строкой матрицы планирования эксперимента. После выполнения всех опытов плана эксперимента в

микропроцессоре 14 вычисляются коэффициенты математической модели:

$$\delta = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3.$$

Используя математическую модель, определяют оптимальные параметры α , W , f_d , которые обеспечивают минимальную погрешность δ весоизмерительной системы.

Высокопроизводительная, безопасная и экономичная работа различных приборов и устройств требует применения современных методов и средств измерения параметров, которые характеризуют ход производственного процесса и состояние оборудования. Температура – один из важнейших параметров технологических процессов. Она обладает некоторыми важнейшими особенностями, что обуславливает необходимость использования большого числа методов и технических средств для ее точного измерения. При изготовлении различных приборов, деталей также необходимо обеспечить возможность ее регулировать для поддержки заданных температурных режимов, которые заложены в технологическом процессе. При исследовании полупроводникового терморегулятора [6, 13] в качестве независимых переменных, которые влияют 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 $U_{\text{вых}}$, В.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Было разработано программное обеспечение, реализующее методы табу-поиска (Свід. про реєстрацію авторського права на твір №63466) случайного поиска (Свід. про реєстрацію авторського права на твір №63747), роя частиц (Свід. про реєстрацію авторського права на твір №71243). Язык программирования – Java. Просчеты выполнялись на компьютере с процессором Intel Pentium G620 с частотой 2.60 GHz. Количество факторов и стоимости переходов уровней факторов вводятся с клавиатуры. Для выявления закономерностей дозирования и нахождения оптимальных режимов и конструктивных параметров весоизмерительной системы был выбран начальный план ПФЭ типа 2^k (число факторов $k=3$, число опытов $N=8$). Матрица планирования такого эксперимента приведена в таблице 1. С учетом того, что опыты дорогостоящие, принято решение оптимизировать начальный план по критерию минимума стоимостных затрат на его реализацию. Стоимости изменений значений уровней факторов от «-1» к «+1» и от «+1» к «-1» представлены в таблице 2, а стоимости начальной установки уровней факторов – в табл. 3.

Таблица 1 – Матрица планирования начального эксперимента

| Номер опыта | Фактор | | |
|-------------|--------|-------|-------|
| | X_1 | X_2 | X_3 |
| 1 | -1 | -1 | -1 |
| 2 | +1 | -1 | -1 |
| 3 | -1 | +1 | -1 |
| 4 | +1 | +1 | -1 |
| 5 | -1 | -1 | +1 |
| 6 | +1 | -1 | +1 |
| 7 | -1 | +1 | +1 |
| 8 | +1 | +1 | +1 |

Таблица 2 – Стоимости изменений значений уровней факторов

| Фактор | Стоимость изменения, усл.ед. | |
|---------------|------------------------------|----------------|
| | От «-1» к «+1» | От «+1» к «-1» |
| $X_1(\alpha)$ | 12,0 | 8,0 |
| $X_2(W)$ | 16,0 | 24,0 |
| $X_3(f_d)$ | 10,0 | 10,0 |

Таблица 3 – Стоимости начальной установки уровней факторов

| Фактор | Стоимость изменения, усл.ед. | |
|---------------|------------------------------|---------------|
| | От «0» к «+1» | От «0» к «-1» |
| $X_1(\alpha)$ | 6,0 | 4,0 |
| $X_2(W)$ | 8,0 | 12,0 |
| $X_3(f_d)$ | 10,0 | 10,0 |

Матрица планирования эксперимента при исследовании полупроводникового терморегулятора [12] приведена в табл. 4. Стоимости изменений значений уровней факторов представлены в табл. 5.

Таблица 4 – Матрица планирования начального эксперимента

| Номер опыта | Фактор | | | |
|-------------|--------|-------|-------|-------|
| | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 |
| 1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 2 | +1 | -1 | -1 | -1 |
| 3 | -1 | +1 | -1 | -1 |
| 4 | +1 | +1 | -1 | -1 |
| 5 | -1 | -1 | +1 | -1 |
| 6 | +1 | -1 | +1 | -1 |
| 7 | -1 | +1 | +1 | -1 |
| 8 | +1 | +1 | +1 | -1 |
| 9 | -1 | -1 | -1 | +1 |
| 10 | +1 | -1 | -1 | +1 |
| 11 | -1 | +1 | -1 | +1 |
| 12 | +1 | +1 | -1 | +1 |
| 13 | -1 | -1 | +1 | +1 |
| 14 | +1 | -1 | +1 | +1 |
| 15 | -1 | +1 | +1 | +1 |
| 16 | +1 | +1 | +1 | +1 |

Таблица 5 – Стоимости изменений значений уровней факторов

| Стоимости изменений значений уровней факторов, усл.ед. | Обозначение факторов | | | |
|--|----------------------|-------|-------|-------|
| | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 |
| из «-1» в «+1» | 2,0 | 2,4 | 60,0 | 1,6 |
| из «+1» в «-1» | 2,4 | 2,8 | 30,0 | 2,0 |
| из «0» в «-1» | 1,2 | 1,4 | 15,0 | 1,0 |
| из «0» в «+1» | 1,0 | 1,2 | 30,0 | 0,8 |

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность методов: табу-поиск, случайный поиск (перестановки столбцов матрицы планирования), роя частиц. Для стоимостей изменения уровней факторов при исследовании весоизмерительной системы, представленных в табл. 2 и табл. 3, получены результаты оптимизации, отраженные в табл. 6. Сравнительная характеристика методов при исследовании весоизмерительной системы представлена в табл. 7.

Для стоимостей изменения уровней факторов при исследовании полупроводникового терморегулятора, представленных в табл. 5, получены результаты оптимизации, отраженные в табл. 8 и табл. 9. Сравнительная характеристика предложенных методов при исследовании полупроводникового терморегулятора представлена в таблице 10. При этом исходная стоимость проведения эксперимента 202,4 усл.ед., а максимальная 611,6 усл.ед.

Таблица 6 – Планы эксперимента для исследования весоизмерительной системы дозирования сыпучих материалов

| Полный перебор | | | | Алгоритм табу-поиска | | | | Метод роя частиц | | | |
|----------------|----------------------|-------|-------|----------------------|----------------------|-------|-------|------------------|----------------------|-------|-------|
| Номер опыта | Обозначение факторов | | | Номер опыта | Обозначение факторов | | | Номер опыта | Обозначение факторов | | |
| | X_1 | X_2 | X_3 | | X_1 | X_2 | X_3 | | X_1 | X_2 | X_3 |
| 1 | -1 | -1 | -1 | 7 | 1 | 1 | -1 | 5 | 1 | -1 | -1 |
| 2 | -1 | -1 | 1 | 3 | -1 | 1 | -1 | 7 | 1 | 1 | -1 |
| 6 | 1 | -1 | 1 | 4 | -1 | 1 | 1 | 3 | -1 | -1 | 1 |
| 5 | 1 | -1 | -1 | 8 | 1 | 1 | 1 | 4 | -1 | 1 | 1 |
| 7 | 1 | 1 | -1 | 6 | 1 | -1 | 1 | 8 | 1 | 1 | 1 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 5 | 1 | -1 | -1 | 6 | 1 | -1 | 1 |
| 4 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 2 | -1 | -1 | 1 |
| 3 | -1 | 1 | -1 | 2 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 |

Таблица 7 – Сравнительная характеристика методов при исследовании весоизмерительной системы

| Метод оптимизации | Стоимость реализации эксперимента, усл.ед. | Время счета программы t , с | Выигрыш, раз |
|-------------------|--|-------------------------------|--------------|
| Рой частиц | 104 | 0,01 | 1,59 |
| Табу-поиск | 108 | 0,52 | 1,53 |
| Полный перебор | 102 | 10 | 1,61 |
| Случайный поиск | 102 | 25 | 1,61 |

Таблица 8 – Исходный и оптимальные планы (табу-поиск, случайный поиск) ПФЭ при исследовании терморегулятора

| Исходный план | | | | | Табу-поиск | | | | | Случайный поиск(перестановка столбцов матрицы планирования) | | | | |
|---------------|----------------------|-------|-------|-------|-------------|----------------------|-------|-------|-------|---|----------------------|-------|-------|-------|
| Номер опыта | Обозначение факторов | | | | Номер опыта | Обозначение факторов | | | | Номер опыта | 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 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 2 | +1 | -1 | -1 | -1 | 9 | -1 | -1 | -1 | +1 | 6 | +1 | -1 | +1 | -1 |
| 3 | -1 | +1 | -1 | -1 | 11 | -1 | +1 | -1 | +1 | 5 | -1 | -1 | +1 | -1 |
| 4 | +1 | +1 | -1 | -1 | 3 | -1 | +1 | -1 | -1 | 10 | +1 | -1 | -1 | +1 |
| 5 | -1 | -1 | +1 | -1 | 4 | +1 | +1 | -1 | -1 | 14 | +1 | -1 | +1 | +1 |
| 6 | +1 | -1 | +1 | -1 | 12 | +1 | +1 | -1 | +1 | 9 | -1 | -1 | -1 | +1 |
| 7 | -1 | +1 | +1 | -1 | 16 | +1 | +1 | +1 | +1 | 2 | +1 | -1 | -1 | -1 |
| 8 | +1 | +1 | +1 | -1 | 15 | -1 | +1 | +1 | +1 | 8 | +1 | +1 | +1 | -1 |
| 9 | -1 | -1 | -1 | +1 | 8 | +1 | +1 | +1 | -1 | 16 | +1 | +1 | +1 | +1 |
| 10 | +1 | -1 | -1 | +1 | 7 | -1 | +1 | +1 | -1 | 4 | +1 | +1 | -1 | -1 |
| 11 | -1 | +1 | -1 | +1 | 5 | -1 | -1 | +1 | -1 | 3 | -1 | +1 | -1 | -1 |
| 12 | +1 | +1 | -1 | +1 | 13 | -1 | -1 | +1 | +1 | 11 | -1 | +1 | -1 | +1 |
| 13 | -1 | -1 | +1 | +1 | 14 | +1 | -1 | +1 | +1 | 12 | +1 | +1 | -1 | +1 |
| 14 | +1 | -1 | +1 | +1 | 5 | -1 | -1 | +1 | -1 | 15 | -1 | +1 | +1 | +1 |
| 15 | -1 | +1 | +1 | +1 | 2 | +1 | -1 | -1 | -1 | 7 | -1 | +1 | +1 | -1 |
| 16 | +1 | +1 | +1 | +1 | 10 | +1 | -1 | -1 | +1 | 13 | -1 | -1 | +1 | +1 |

Таблица 9 – Исходный и оптимальный планы (рой частиц) ПФЭ при исследовании терморегулятора

| Исходный план | | | | | Рой частиц | | | | |
|---------------|----------------------|-------|-------|-------|-------------|----------------------|-------|-------|-------|
| Номер опыта | Обозначение факторов | | | | Номер опыта | Обозначение факторов | | | |
| | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 |
| 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 2 | +1 | -1 | -1 | -1 | 13 | -1 | -1 | +1 | +1 |
| 3 | -1 | +1 | -1 | -1 | 8 | +1 | +1 | +1 | -1 |
| 4 | +1 | +1 | -1 | -1 | 15 | -1 | +1 | +1 | +1 |
| 5 | -1 | -1 | +1 | -1 | 3 | -1 | +1 | -1 | -1 |
| 6 | +1 | -1 | +1 | -1 | 7 | -1 | +1 | +1 | -1 |
| 7 | -1 | +1 | +1 | -1 | 11 | -1 | +1 | -1 | +1 |
| 8 | +1 | +1 | +1 | -1 | 16 | +1 | +1 | +1 | +1 |
| 9 | -1 | -1 | -1 | +1 | 12 | +1 | +1 | -1 | +1 |
| 10 | +1 | -1 | -1 | +1 | 4 | +1 | +1 | -1 | -1 |
| 11 | -1 | +1 | -1 | +1 | 14 | +1 | -1 | +1 | +1 |
| 12 | +1 | +1 | -1 | +1 | 10 | +1 | -1 | -1 | +1 |
| 13 | -1 | -1 | +1 | +1 | 9 | -1 | -1 | -1 | +1 |
| 14 | +1 | -1 | +1 | +1 | 5 | -1 | -1 | +1 | -1 |
| 15 | -1 | +1 | +1 | +1 | 6 | +1 | -1 | +1 | -1 |
| 16 | +1 | +1 | +1 | +1 | 2 | +1 | -1 | -1 | -1 |

Так как полученная математическая модель оказалась неадекватной [13], то было принято решение достроить план ПФЭ до плана ротатбельного центрального композиционного планирования (РЦКП) [11]. При этом оптимальный план ПФЭ, полученный методом роя частиц, достраиваем методом итерационного планирования эксперимента до плана РЦКП посредством добавления строк. Оптимальные и исходный планы РЦКП, в соответствии с которым проводили исследование, приведен в табл. 11. Стоимости изменений значений уровней факторов приведены в табл. 12.

Сравнительная характеристика предложенных методов при исследовании полупроводникового терморегулятора представлена в таблице 13. Стоимость

исходного плана – 384,0 усл.ед., а максимальная стоимость – 384,9 усл.ед.

Таблица 10 – Сравнительная характеристика методов при исследовании терморегулятора

| Метод оптимизации | Стоимость реализации эксперимента, усл.ед. | Выигрыш, раз |
|--|--|--------------|
| Анализ перестановок | 130 | 1,56 |
| Случайный поиск (перестановка строк матрицы планирования) | 81,6 | 2,48 |
| Рой частиц | 69 | 2,93 |
| Табу-поиск | 72 | 2,81 |
| Случайный поиск (перестановка столбцов матрицы планирования) | 124 | 1,6 |

Таблица 11 – Исходный и оптимальные планы ОЦКП

| Исходный план | | | | | Оптимальный план (табу-поиск) | | | | | Оптимальный план(рой частиц) | | | | |
|---------------|----------------------|-----------|-----------|-----------|-------------------------------|----------------------|-----------|-----------|-----------|------------------------------|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| Номер опыта | Обозначение факторов | | | | Номер опыта | Обозначение факторов | | | | Номер опыта | 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 | $-\alpha$ | 0 | 0 | 0 | 1 | $-\alpha$ | 0 | 0 | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | $-\alpha$ |
| 2 | $+\alpha$ | 0 | 0 | 0 | 8 | 0 | 0 | 0 | $+\alpha$ | 2 | $+\alpha$ | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | $-\alpha$ | 0 | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | $-\alpha$ | 6 | 0 | 0 | $+\alpha$ | 0 |
| 4 | 0 | $+\alpha$ | 0 | 0 | 2 | $+\alpha$ | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | $-\alpha$ | 0 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | $-\alpha$ | 0 |
| 6 | 0 | 0 | $+\alpha$ | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | $-\alpha$ | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | $-\alpha$ | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | $+\alpha$ | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | $+\alpha$ | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | $+\alpha$ | 0 | 0 | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | $-\alpha$ | 0 | 0 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 | $+\alpha$ | 0 | 1 | $-\alpha$ | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | $-\alpha$ | 0 | 8 | 0 | 0 | 0 | $+\alpha$ |

Таблица 12 – Стоимости изменений значений уровней факторов

| Стоимости изменений значений уровней факторов | Обозначение факторов | | | |
|---|----------------------|-------|-------|-------|
| | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 |
| из «-1» в «-a» | 1,2 | 1,4 | 15,0 | 1,0 |
| из «+1» в «-a» | 4,8 | 5,6 | 60,0 | 4,0 |
| из «-1» в «+a» | 4,0 | 4,8 | 120,0 | 3,2 |
| из «+1» в «+a» | 2,0 | 2,4 | 60,0 | 1,6 |
| из «0» в «-a» | 2,0 | 2,4 | 60,0 | 1,6 |
| из «0» в «+a» | 2,0 | 2,4 | 60,0 | 1,6 |
| из «-a» в «0» | 2,0 | 2,4 | 60,0 | 1,6 |
| из «+a» в «0» | 2,4 | 2,8 | 30,0 | 2,0 |
| из «-a» в «+a» | 8,0 | 9,6 | 240,0 | 6,4 |
| из «+a» в «-a» | 9,6 | 11,2 | 120,0 | 8,0 |
| из «-1» в «0» | 1,3 | 1,6 | 40,0 | 1,1 |
| из «+1» в «0» | 1,6 | 1,9 | 20,0 | 1,3 |

Таблица 13 – Сравнительная характеристика методов при исследовании полупроводникового терморегулятора

| Метод оптимизации | Стоимость реализации эксперимента, усл.ед. | Выигрыш, раз |
|---------------------|--|--------------|
| Анализ перестановок | 193,4 | 1,99 |
| Случайный поиск | 166,2 | 2,31 |
| Рой частиц | 147,1 | 2,61 |
| Табу-поиск | 152,3 | 2,53 |

6 ОБСУЖДЕНИЯ

Разработанные программы позволяют найти минимальную стоимость проведения многофакторного эксперимента (МФЭ), последовательность реализации опытов, выигрыш по сравнению с исходной матрицей планирования и время счета. При исследовании весоизмерительной системы для значения стоимостей изменения уровней факторов, приведенных в табл. 2, получены результаты оптимизации планов эксперимента полным перебором, табу-поиском и методом оптимизации роем частиц (табл. 6). Как видно из табл. 7, выигрыши в результатах оптимизации при использовании метода полного перебора больше, чем при методах табу-поиска и роя частиц, и одинаковые с методом случайного поиска. Однако быстродействие выполнения вычислений при использовании метода полного перебора значительно ниже, чем при использовании методов табу-поиска и роя частиц.

При исследовании полупроводникового терморегулятора получены последовательности проведения опытов (табл. 8, 9), при которых стоимости проведения эксперимента имеют меньшие значения, чем при использовании метода ограниченного перебора.

Так как полученная математическая модель при исследовании полупроводникового терморегулятора оказалась неадекватной [13], было принято решение достроить план ПФЭ до плана ротатабельного центрального композиционного планирования (РЦКП). При этом оптимальный план ПФЭ, полученный методом роя частиц, был достроен методом итерационного планирования эксперимента до плана РЦКП путем добавления строк (табл. 11). Как видно из табл. 13

наибольший выигрыш при оптимизации этой достройки позволяет получить метод роя частиц.

ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования была решена актуальная задача получения последовательности опытов при проведении многофакторного эксперимента, которая дает возможность получить его минимальную стоимость.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые предложено применение методов: роя частиц, табу-поиска, случайного поиска для оптимизации по стоимости реализации планов многофакторного эксперимента. На примерах исследования весоизмерительной системы и терморегулятора доказана работоспособность и эффективность предложенных методов. Наше исследование показало, что поиск оптимального или близкого к оптимальному плана эксперимента при исследовании весоизмерительной системы с использованием метода случайного поиска дал наилучшие результаты. При исследовании полупроводникового регулятора наибольшие выигрыши позволил получить метод роя частиц. Также этот метод обладает большими показателями быстродействия, чем метод табу-поиска и метод случайного поиска.

Исследование может быть полезно научным работникам, которые интересуются методами планирования экспериментов, а также различными методами оптимизации параметров системы. Разработанное программное обеспечение, реализующее предложенные методы, а также проведенные эксперименты, которые подтверждают его работоспособность, можно рекомендовать для формирования оптимальных матриц планирования эксперимента.

Кроме исследования весоизмерительной системы и терморегулятора, рассмотренных в данной работе, по нашему мнению было бы интересно изучить применение разработанных методов на более широком наборе практических задач планирования экспериментов, таких как технологические процессы изготовления РЭА, процесс получения пористых материалов, изготовление деталей горячей штамповкой и др.

ЛИТЕРАТУРА/ЛІТЕРАТУРА

1. Hoskins D. S. Combinatorics and Statistical Inferecing / D. S. Hoskins // *Applied Optimal Designs*. – 2007. – Vol. 4. – P. 147–179.
2. Morgan J. P. Association Schemes: Designed Experiments, Algebra and Combinatorics. // *Journal of the American Statistical Association*. – 2005. – Vol. 100, No. 471. – P. 1092–1093.
3. Bailey R. A. Combinatorics of optimal designs / R. A. Bailey, P. G. Cameron // *Surveys in Combinatorics*. – 2009. – Vol. 365. – P. 19–73.
4. Optimum planning of experiment in manufacturing the electronic equipment. / [N. D. Koshevoy, E. M. Kostenko, V. A. Gordienko, V. P. Syroklyn] // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2011. – Vol. 170, No. 8. – P. 731–734.
5. Koshevoy N. D. Optimization for the design matrix realization value with the aim to investigate technological processes / N. D. Koshevoy, V. A. Gordienko, Ye. A. Sukhobrus // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2014. – Vol. 73, No. 15. – P. 1383–1386.
6. Кошевой Н. Д. Оптимальное по стоимостным и временным затратам планирование эксперимента / Н. Д. Кошевой., Е. М. Костенко. – Полтава : издатель Р.В. Шевченко, 2013. – 317 с.
7. Poli R. An analysis of publications on particle swarm optimisation applications. Technical Report CSM-469 (Department of Computer Science, University of Essex, UK). – may 2007.
8. Poli, R. Analysis of the publications on the applications of particle swarm optimisation / R. Poli // *Journal of Artificial Evolution and Applications*. – 2008. – P. 1–10. DOI: 10.1155/2008/685175.
9. Гальченко В. Я. Популяционные метаэвристические алгоритмы оптимизации роём частиц : учебное пособие / В. Я. Гальченко, А. Н. Якимов. – Черкассы : ФЛП Третьяков А. Н., 2015. –160 с.
10. Shi X. H. Particle swarm optimization based algorithms for TPS and generalized TPS / X. H. Shi, Y. C. Liang, H. P. Lee // *Information Processing Letters*. – 2007. – Vol. 103. – P. 169–176.
11. Пат. №58098, Україна, МПК G01F 11/00. Ваговимірювальна система / М. Д. Кошовий, О. М. Костенко ; Заявник і патентоволодар Нац. аерокосм. ун-т ім. М.С. Жуковського «ХАІ». – №U201013004; заявл. 01.11.2010; опубл. 25.03.2011, Бюл. № 6. – 4 с.
12. Барабашук В. И. Планирование эксперимента в технике / В. И. Барабашук, Б. П. Креденцер, В. И. Мирошниченко. – К. : Техника, 1984. – 200 с.

Стаття надійшла до редакції 02.02.2018.
Після доробки 15.04.2018.

УДК 519.24

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ВАГОВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ТА ТЕРМОРЕГУЛЯТОРА

Кошовий М. Д. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри авіаційних приладів і вимірювань, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

Костенко Е.М. – д-р техн. наук, доцент, Полтавська державна аграрна академія, Полтава, Україна.

Беляєва А.А. – аспірант кафедри авіаційних приладів і вимірювань, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Вперше запропоновано використання методів табу-пошуку, випадкового пошуку, рою часток для побудови оптимальних за вартістю планів експерименту при дослідженні ваговимірювальної системи і терморегулятора.

Мета роботи – провести порівняльний аналіз розроблених методів оптимізації, таких як табу-пошук, випадковий пошук, рою часток, при пошуку оптимальних планів проведення експерименту під час дослідження ваговимірювальної системи і терморегулятора.

Метод. Запропоновано методи побудови оптимальної за вартістю реалізації матриці планування експерименту з використанням алгоритмів рою частинок, табу-пошуку і випадкового пошуку. На початку вводиться кількість чинників і вартості переходів для кожного рівня факторів. Потім з урахуванням введених даних формується вихідна матриця планування експерименту. При використанні алгоритму табу-пошуку на кожному кроці ітерації в якості нового поточного рішення вибирається краще рішення в околиці поточного і здійснюється перевірка чи не перебуває воно в списку табу. Таким чином відбуваються обчислення, поки алгоритм не досягне заданого числа ітерацій. Список табу формується з рішень, що мають мінімальну вартість. Метод випадкового пошуку заснований на перестановці стовпців матриці планування. Кількість ітерацій алгоритму задається користувачем. Метод рою часток заснований на моделюванні поведінки популяції частинок. У кожній точці, де побувала частинка, розраховується значення вартості проведення експерименту. При цьому кожна частка запам'ятовує, яке (і де) краще значення вартості експерименту вона особисто знайшла і де розташована точка, яка є кращою серед усіх точок, які розвідали частки. На кожній ітерації частки коректують свою швидкість (модуль і напрямок). Через деяку кількість ітерацій частки збираються поблизу найбільш хорошої точки. Потім серед усіх нових точок здійснюється перевірка, чи не знайшли ми нову глобально кращу точку, і, якщо знайшли, запам'ятовуємо її координати і значення вартості проведення експерименту в ній. Потім розраховується виграш в порівнянні з вихідною вартістю проведення експерименту.

Результати. Розроблено програмне забезпечення, що реалізує запропоновані методи, яке використано для проведення обчислювальних експериментів з дослідження властивостей цих методів при дослідженні ваговимірювальної системи і терморегулятора. Синтезовані оптимальні за вартістю реалізації плани експериментів, а також наведені виграші в результатах оптимізації в порівнянні з вихідною і максимальною вартостями проведення експерименту.

Висновки. Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованих методів і програмного забезпечення, що їх реалізує, а також дозволяють рекомендувати їх для застосування на практиці при побудові оптимальних матриць планування експериментів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: метод, оптимізація, рій частинок, планування експериментів, табу-пошук, оптимальний план, випадковий пошук, вартість.

UDC 519.24

COMPARATIVE ANALYSIS OF OPTIMIZATION METHODS IN THE INVESTIGATION OF A WEIGH-MEASURING SYSTEM AND THERMOREGULATOR

Koshevoy N. D. – Dr. Sc., Professor, Head of Department of Aircraft Instrumentation and Measurements, National Aerospace University named after M. E. Zhukovskoho “HAI”, Kharkiv, Ukraine.

Kostenko E. M. – Doctor of Technical Science, Associate Professor, Poltava State Agrarian Academy, Poltava, Ukraine.

Beliaieva A. A. – Post-graduate student of Department of Aircraft Instrumentation and Measurements, National Aerospace University named after M. E. Zhukovskoho “HAI”, Kharkiv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. For the first time, the use of taboo-search methods, random search, a swarm of particles for the construction of cost-effective experiment plans for the study of a weighing system and a temperature regulator was proposed.

Objective – to carry out a comparative analysis of the developed optimization methods, such as taboo search, random search, particle swarm when searching for the optimal plans for the experiment during the study of the weighing system and thermostat.

Method. Methods for constructing the experimentally optimal implementation matrix for the experiment using algorithms of a swarm of particles, taboo search and random search are proposed. In the beginning, the number of factors and cost of transitions for each level of factors is introduced. Then, taking into account the input data, the initial experimental design matrix is formed. When using the taboo search algorithm at each iteration step, the best solution in the neighborhood of the current solution is chosen as the new current solution and the check is made whether it is in the taboo list. Thus, calculations occur until the algorithm reaches the specified number of iterations. The list of taboos is formed from decisions that have a minimum cost. The random search method is based on permuting the columns of the planning matrix. The number of iterations of the algorithm is specified by the user. The method of the particle swarm is based on modeling the behavior of the particle population. At each point where the particle visited, the value of the experiment is calculated. In this case, each particle remembers which (and where) the best value of the cost of the experiment, she personally found and where the point is located, which is the best among all the points that explored the particles. At each iteration, the particles correct their velocity (modulus and direction). After a certain number of iterations, the particles are collected near the best point. Then, among all the new points, we check whether we have found a new globally better point, and if found, remember its coordinates and the value of the cost of conducting the experiment in it. Then the gain is calculated in comparison with the initial cost of the experiment.

Results. The software that implements the proposed methods was developed, which was used to conduct computational experiments to study the properties of these methods in the study of a weighing system and a temperature regulator. Optimized for the cost of implementation of the experiment plans were synthesized, as well as the gains in optimization results as compared to the initial and maximum costs of the experiment.

Conclusions. The conducted experiments confirmed the efficiency of the proposed methods and the software that implements them, and also allow them to be recommended for application in practice when constructing optimal experimental design matrices.

KEYWORDS: method, optimization, particle swarm, experiment planning, taboo-search, optimal plan, random search, cost.

REFERENCES

1. Hoskins D. S. *Combinatorics and Statistical Inferecing. Applied Optimal Designs*, 2007, Vol. 4, pp. 147–179.
2. Morgan J. P. *Association Schemes: Designed Experiments, Algebra and Combinatorics*, *Journal of the American Statistical Association*, 2005, Vol. 100, No. 471, pp. 1092–1093.
3. Bailey R. A., Cameron P. G., *Combinatorics of optimal designs*, *Surveys in Combinatorics*, 2009, Vol. 365, pp. 19–73.
4. Koshevoy N. D., Kostenko E. M., Gordienko V. A., Syrokyln V. P. *Optimum planning of experiment in manufacturing the electronic equipment*, *Telecommunications and Radio Engineering*, 2011, Vol. 170, No. 8, pp. 731–734.
5. Koshevoy N. D., Gordienko V. A., Sukhobrus Ye. A., *Optimization for the design matrix realization value with the aim to investigate technological processes*, *Telecommunications and Radio Engineering*, 2014, Vol. 73, No. 15, pp. 1383–1386.
6. Koshevoj N. D., Kostenko E. M., *Optimal'noe po stoimostnym i vremennym zatratam planirovanie jeksperimenta*. Poltava, izdatel' Shevchenko R. V., 2013, 317 p.
7. Poli, R. *An analysis of publications on particle swarm optimisation applications*. Technical Report CSM-469 (Department of Computer Science, University of Essex, UK). may 2007.
8. Poli R. *Analysis of the publications on the applications of particle swarm optimisation*, *Journal of Artificial Evolution and Applications*, 2008, pp. 1–10. DOI:10.1155/2008/685175.
9. Gal'chenko V. Ja., Jakimov A. N., 2015. *Populjacionnye metajevresticheskie algoritmy optimizacii roem chastic: Uchebnoe posobie*. Cherkassy, FLP Tretjakov A. N., 160 p.
10. Shi X. H., Liang Y. C., Lee H. P., *Particle swarm optimization based algorithms for TPS and generalized TPS*, *Information Processing Letters*, 2007, Vol. 103, pp. 169–176.
11. Koshevoj N. D., Kostenko E. M., *Weighing system*. Patent 58098 UA, MPK: G01F 11/00, 2010.
12. Barabashhuk V. Y', Kredencer B. P., *Plany'rovany'e ekspery'menta v texny'ke*. Kiev, Tehnika, 1984, 200 p.