

## ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННЫХ РЕСУРСОВ

*Исследованы свойства комбинаторных планов многофакторного эксперимента. Разработаны алгоритм оптимизации по стоимостным (временным) затратам многофакторных планов эксперимента с использованием метода вложенных разбиений и реализующее его программное обеспечение, основанные на перестановке столбцов матрицы планирования эксперимента. Показана его эффективность в сравнении с методами анализа перестановок, случайного поиска, классического и ячеистого генетических алгоритмов. Эффективность использования данного алгоритма показана на примерах технологических процессов оптимизации параметров неравномерности покрытия проводников гальваническими осадками и точности устройства для контроля качества диэлектрических материалов. Работоспособность алгоритма на основе метода вложенных разбиений подтверждается приближением оптимальных планов, полученных этим методом и методом перестановки строк матрицы планирования.*

*Ключевые слова: метод вложенных разбиений, планирование эксперимента, оптимальный план, быстроедействие.*

**Постановка задачи.** Рост эффективности производственных процессов непосредственно связан с построениями адекватных математических моделей. В дальнейшем модели используют для поиска оптимальных режимов обработки, способных обеспечить необходимое качество продукции. Особо остро вопрос повышения эффективности исследований стоит для дорогостоящих и длительных технологических процессов. Для решения задачи оптимизации применяют различные способы повышения результативности экспериментальных методов исследования.

Изменение порядка проведения опытов существенно влияет на затраты по проведению эксперимента. Увеличение количества рассматриваемых вариантов усложняет поиск плана. Основная трудность состоит в быстром росте количества вариантов перестановок в зависимости от количества факторов и количества их уровней. При современном уровне развития вычислительной техники точно решить задачу не представляется возможным. В связи с этим становится актуальной разработка и исследование приближенных алгоритмов.

**Анализ последних исследований и литературных источников.** Известны примеры построения оптимальных многофакторных планов, основанные на использовании следующих методов оптимизации: анализ перестановок [1], случайный поиск [1], классический (КГА) и ячеистый (ЯГА) генетические алгоритмы [2], жадный алгоритм [3], имитации отжига [4]. Эти приближенные методы позволяют находить близкий к оптимальному план эксперимента.

Эффективность их применения доказана при исследовании ряда различных объектов: технологических процессов, приборов, систем. Но при большом количестве факторов для перебора всех возможных вариантов необходимо много времени.

Ввиду этого целесообразно для сравнения результатов применить метод вложенных разбиений. На сегодняшний день актуальной также остается задача использования метода поиска оптимального плана эксперимента, обладающего более высокими показателями быстрогодействия.

**Цель статьи.** Анализ процессов оптимизации различных технологических процессов по стоимости реализации и времени поиска оптимального плана эксперимента с использованием метода вложенных разбиений.

**Основные результаты.** Разработаны алгоритм и программное обеспечение оптимизации планов многофакторного эксперимента по стоимостным затратам с использованием алгоритма вложенных разбиений (рис. 1).

Сущность применения алгоритма заключается в следующем.

Шаг 1. В начале работы алгоритма производится ввод количества факторов  $X$ .

Шаг 2. Затем производится ввод количество переходов.

Шаг 3. Вводятся стоимости переходов между уровнями для каждого из факторов.

Шаг 4. В зависимости от выбранного количества факторов строится матрица планирования эксперимента.

Шаг 5. Вычисляются стоимостные затраты для начального плана эксперимента.

Шаг 6. Выполняется проверка, если число оставшихся операций больше 1, то выполняется следующий шаг. Если нет, то осуществляется переход к шагу 23.

Шаг 7. Происходит вычисление затрат  $S_1$  при переходе от  $i$ -ого перехода к  $(i+1)$ -ому.

Шаг 8. Выполняется проверка на наличие количества оставшихся нерассмотренных вариантов переходов. Если это количество больше 1, то выполняем переход к шагу 9. В противном случае – переход к шагу 11.

Шаг 9. Происходит вычисление затрат  $S_2$  при переходе от  $i$ -ого перехода к  $(i+2)$ -ому.

Шаг 10. Выполняется сравнение затрат  $S_1$  и  $S_2$ , получаемых на шагах 6 и 8, соответственно. Если  $S_2$  больше  $S_1$ , то переход к шагу 11, если нет, то к шагу 20.

Шаг 11. Присвоение переменной  $\min_1$  значение  $S_1$ .

Шаг 12. Происходит вычисление затрат  $S_3$  при переходе от  $i$ -ого перехода к  $(i+3)$ -ому.

Шаг 13. Выполняется проверка на наличие количества оставшихся нерассмотренных вариантов переходов. Если это количество больше 1, то переход к шагу 14, в противном случае – переход к шагу 16.

Шаг 14. Происходит вычисление затрат  $S_4$  при переходе от  $i$ -ого перехода к  $(i+4)$ -ому.

Шаг 15. Выполняется сравнение затрат  $S_3$  и  $S_4$ , получаемых на шагах 12 и 14, соответственно. Если  $S_4$  больше  $S_3$ , то переход к шагу 16, если нет, то к шагу 21.

Шаг 16. Присвоение переменной  $\min_2$  значение  $S_3$ .

Шаг 17. Выполняется сравнение полученных минимальных затрат при переходах. Если  $\min_2$  больше  $\min_1$ , то переход к шагу 18, в противном случае - к шагу 22.

Шаг 18. Переходу, которому соответствует значение  $\min_1$ , присваивается первая позиция в оптимизированном плане.

Шаг 19. Запись первого пункта в оптимальный план и исключение этого перехода из списка записей.

Шаг 20. Присвоение переменной  $\min_1$  значения  $S_2$ .

Шаг 21. Присвоение переменной  $\min_2$  значения  $S_4$ .

Шаг 22. Переходу, которому соответствует значение  $\min_1$ , присваивается вторая позиция в оптимизированном плане.

Шаг 23. Запись последнего перехода.

Проверка работоспособности разработанного алгоритма и программного обеспечения для оптимизации многофакторных планов эксперимента осуществлялась на следующих технологических процессах:

- 1) оптимизации параметров неравномерности покрытия проводников гальваническими осадками [5];
- 2) точности устройства для контроля качества диэлектрических материалов [6].

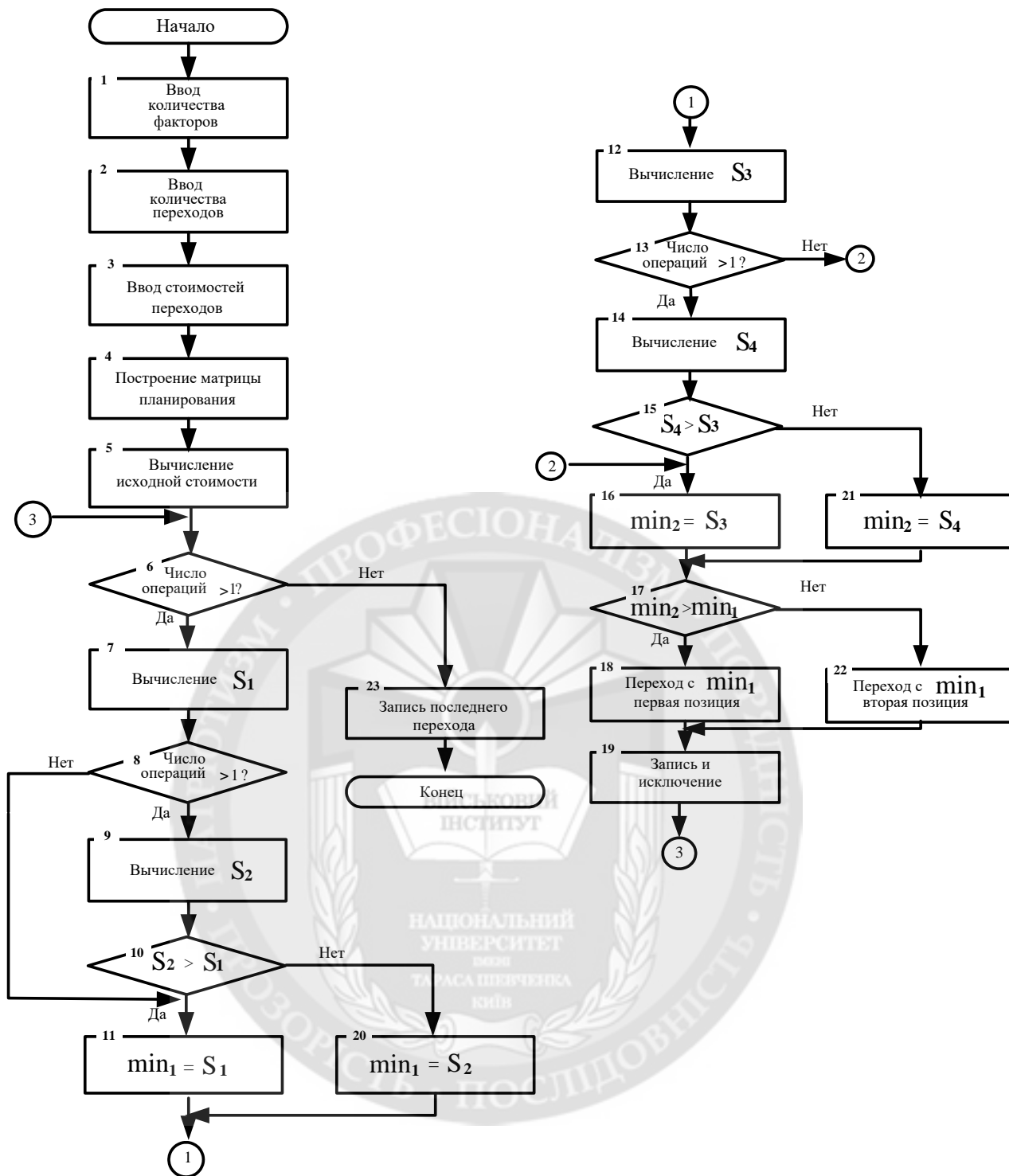


Рис. 1. Схема алгоритма, реализующая оптимизацию по стоимостным затратам планов многофакторного эксперимента по методу вложенных разбиений

Эти задачи были решены методами анализа перестановок, случайным поиском, КГА, ЯГА. Сравнение результатов представлено в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение по критерию стоимости результатов оптимизации планов экспериментов различными методами

| Технологический процесс | Стоимость начального плана, у.е. | Методы              |              |                 |              |                 |               |                 |               |                     |               |
|-------------------------|----------------------------------|---------------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|---------------------|---------------|
|                         |                                  | Анализ перестановок |              | Случайный поиск |              | КГА             |               | ЯГА             |               | Вложенных разбиений |               |
|                         |                                  | Стоимость, у.е.     | Выигрыш, раз | Стоимость, у.е. | Выигрыш, раз | Стоимость, у.е. | Выигрыш, раз. | Стоимость, у.е. | Выигрыш, раз. | Стоимость, у.е.     | Выигрыш, раз. |
| 1                       | 24,7                             | 19,1                | 1,3          | 23,4            | 1,06         | 16,1            | 1,5           | 16,1            | 1,5           | 16,1                | 1,5           |
| 2                       | 72,2                             | 30,5                | 2,4          | 41,8            | 1,7          | 25,8            | 2,8           | 25,8            | 2,8           | 25,8                | 2,8           |

При поиске оптимальных комбинаторных планов эксперимента методом вложенных разбиений было затрачено менее 0,1 с. для исследования устройства для контроля качества диэлектрических материалов и менее 0,1 с. для оптимизации параметров, характеризующих неравномерность покрытия проводников гальваническими осадками (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение по времени счета результатов оптимизации планов экспериментов различными методами

| Метод               | Время счета для ТП, с.                |  |
|---------------------|---------------------------------------|--|
|                     | гальваническое меднения печатных плат | контроль качества диэлектрических материалов |
| Анализ перестановок | 527                                   | 494  |
| Случайный поиск     | 491                                   | 501  |
| Классический ГА     | 2,4                                   | 1,4  |
| Ячеистый ГА         | 3,2                                   | 3,5  |
| Вложенных разбиений | 0,1                                   | 0,1  |

**Выводы.** Разработан алгоритм и программное обеспечение, реализующие оптимизацию многофакторных планов экспериментов с применением метода вложенных разбиений. Доказана работоспособность и эффективность метода при исследовании технологических процессов.

Показано, что разработанное программное обеспечение позволяет без полного перебора всех вариантов перестановок получить оптимальные или близкие к оптимальным по стоимости реализации многоуровневые планы многофакторного эксперимента за время счета менее 0,1 сек.

Недостатком применения данного алгоритма является, то что при одних и тех же данных результаты оптимизации могут быть разными. Несмотря на это, его использование будет эффективным, так как при большом быстродействии программа выдаст результат,

приближенный к оптимальному плану, а при количестве факторов  $n \leq 3$  результат будет оптимальным.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Кошевой Н.Д. Оптимальное по стоимостным и временным затратам планирование эксперимента / Н.Д. Кошевой, Е.М. Костенко. – Полтава: издатель Шевченко Р.В., 2013. – 317 с.
2. Кошевой Н.Д. Оптимальное планирование эксперимента с использованием генетических алгоритмов / Н.Д. Кошевой, Е.А. Сухобрус // Математичне моделювання. – 2013. – № 2(29). – С. 36-40.
3. Кошевой Н. Д. Применение жадного алгоритма для оптимизации многофакторных экспериментов / Н.Д. Кошевой, А.В. Бельмега // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. –К.: ВІКНУ, 2014. – № 47. – С. 29-37.
4. Кошевой Н. Д. Применение алгоритма имитации отжига для оптимизации многофакторных планов эксперимента / Н. Д. Кошевой, А. В. Бельмега // Системи обробки інформації. – 2015. – № 6(131). – С. 103-106.
5. 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. – 2001 г. – № 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. - 2009. – № 147. – С. 38 – 42.

#### REFERENCES:

1. Koshevoy N.D. Optimal'noye po stoimostnym i vremennym zatratam planirovaniye eksperimenta / N.D. Koshevoy, Ye.M. Kostenko. – Poltava: izdatel' Shevchenko R.V., 2013. – 317 s.
2. Koshevoy N.D. Optimal'noye planirovaniye eksperimenta s ispol'zovaniyem geneticheskikh algoritmov / N. D. Koshevoy, Ye. A. Sukhobrus//Matematichne modelyuvannya. – 2013. – № 2(29). – S. 36-40.
3. Koshevoy N.D. Primeneniye zhadnogo algoritma dlya optimizatsii mnogofaktornykh eksperimentov / N.D. Koshevoy, A.V. Bel'mega // Zbírnik naukovikh prats' Viys'kovogo ínstytutu Kiïvs'kogo natsíonal'nogo uníversitetu ím. Tarasa Shevchenka. – 2014. – № 47. – S. 29-37.
4. Koshevoy N.D. Primeneniye algoritma imitatsii otzhiga dlya optimizatsii mnogofaktornykh planov eksperimenta / ND. Koshevoy, A.V. Bel'mega //Sistemi obrobki ínformatsiï. – 2015. – № 6(131). – S. 103-106.
5. Eksperimental'noye issledovaniye, modelirovaniye i optimizatsiya protsessa gal'vanicheskogo medneniya pechatnikh plat / N.D. Koshevoy, S.G. Bestan', G.K. Kozhevnikov, O.N. Koshevoy, N.V. Dotsenko // Matematicheskoye modelirovaniye, 2001 g. – № 1. – S. 28–30.
6. Koshevoy N.D. Optimal'noye planirovaniye eksperimenta pri issledovanii ustroystva dlya kontrolya kachestva dielektricheskikh materialov / N.D. Koshevoy, Ye. M. Kostenko, A.V. Zabolotnyy // Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya i pribory avtomatiki, 2009. – № 147. – S. 38-42.

**Рецензент:** д.т.н., проф. Угрюмов М. Л., профессор кафедры информатики Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

д.т.н., проф. Кошовий М.Д., Стадник А.С.

### ОПТИМАЛЬНЕ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНИХ РЕСУРСІВ

*Досліджено властивості комбінаторних планів багатofакторного експерименту. Розроблено алгоритм оптимізації за вартісними (часовими) витратами багатofакторних планів експерименту з використанням методу вкладених розбиттів і програмне забезпечення для його реалізації, що базуються на перестановці стовпців матриці планування експерименту. Показана його ефективність в порівнянні з методами аналізу перестановок, випадкового пошуку, класичного і клітинного генетичних алгоритмів. Ефективність використання даного алгоритму показана на прикладах технологічних процесів оптимізації параметрів нерівномірності покриття провідників гальванічним осадом і точності пристрою для контролю*

*якості діелектричних матеріалів. Працездатність алгоритму на основі методу вкладених розбиттів підтверджується наближенням оптимальних планів, отриманих цим методом і методом перестановки рядків матриці планування.*

*Ключові слова: метод вкладених розбиттів, планування експерименту, оптимальний план, швидкодія.*

**prof. Koshevoy N.D., Stadnik A.S.**

## **OPTIMAL PLANNING EXPERIMENTS IN CONDITIONS OF LIMITED RESOURCES**

*Properties of experiment combinatorial plans are investigated. The methods and program optimization multifactor experimental in cost (timing) designs by means method of embedded partitions are developed and software for its implementation, based on the permutation matrix column experiment planning. Its effectiveness in comparison with the methods of analysis permutations, random search of classic and cellular genetic algorithms of optimization for multifactor experimental designs is shown. The effectiveness of this method is demonstrated on the examples the optimization of the parameters of the uneven coating of conductors by galvanic precipitates and precision of the device to control the quality of dielectric materials. The efficiency of the algorithm of embedded partitions approach confirmed plans obtained by this method and and the method of row permutation of planning matrix.*

*Keywords: method of embedded partitions, experimental design, optimal plan time spent, speed.*