# Математичні моделі та методи

УДК 519.24

Л.Г. Раскин, О.В. Серая

*Национальный технический университет «ХПИ», Харьков*

## ПЛАНИРОВАНИЕ МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ РАЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ТЕСТИРОВАНИЯ СИСТЕМ

*Решена задача отыскания гамильтонова пути на полнодоступном графе полного факторного эксперимента. Рассмотрен вариант постановки задачи, когда качество маршрута определяется только числом изменений уровня факторов. Анализируется возможность решения этой задачи методом ветвей и границ. Показано, что этот метод не может быть использован для решения задачи, в которой число факторов превышает четыре. Предложен простой непереборный метод точного решения сформулированной задачи. Рассмотрены другие, более сложные варианты этой задачи, приводящие к двухкритериальной схеме. При этом для решения задачи предложен Парето-подход. Приводятся примеры.*

***Ключевые слова**: многофакторный эксперимент, полнодоступный граф, гамильтонов путь, метод построения оптимального маршрута, двухкритериальная оптимизация маршрута, Парето-множество решений.*

### Введение

Пусть тестируемая система состоит из $n$ независимо функционирующих подсистем. Каждая из этих подсистем может работать в одном из двух режимов (основном или альтернативном). В процессе тестирования системы необходимо исследовать и оценить ее эффективность для всех возможных ее конфигураций, число которых равно $2^n$. При этом важными являются вопросы оценки информационной безопасности процесса функционирования системы, анализа информационных рисков и т.п. Технология решения этой задачи определяется возможностями использования для ее решения методов теории планирования экспериментов. Соответствующая математическая модель описывается следующим образом. Пусть эффективность (качество, безопасность и т.п.) системы зависит от $n$ факторов $F_1, F_2, ..., F_n$, каждый из которых может принять значение на одном из двух уровней (0 или 1). При этом все множество экспериментов задается совокупностью $2^n$ вершин гиперкуба с номерами, начиная от нулевого до $2^n - 1$. Если, например, $n = 3$, то число вершин равно $2^3 = 8$ и их номера образуют матрицу $M$.

Обход вершин можно начать с любой из них и возникающий при этом маршрут есть разомкнутый гамильтонов путь. При переходе из одной вершины в другую возникает необходимость изменения уровня для одного или нескольких факторов. Например, в маршруте $M$ при переходе из вершины с номером 0 в вершину с номером 1 нужно уровень фактора $F_1$ изменить с 0 на 1, а при переходе из вершины 3 в вершину 4 требуется изменить уровень всех трех факторов $F_1, F_2, F_3$. Каждое изменение сопряжено с затратами (материальными или временными). Задача состоит в выборе маршрута, обеспечивающего минимум затрат.

$M =$

| $F_3$ | $F_2$ | $F_1$ | № вершины |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 2 |
| 0 | 1 | 1 | 3 |
| 1 | 0 | 0 | 4 |
| 1 | 0 | 1 | 5 |
| 1 | 1 | 0 | 6 |
| 1 | 1 | 1 | 7 |

**Цель статьи.** Целью работы является разработка метода построения маршрута обхода вершин графа полного факторного эксперимента с учетом различий в затратах при переходе с одной вершины на другую.

**Постановка задачи.** Рассмотрим сначала простейшую из возникающих здесь задач, когда затраты, связанные с изменением уровня фактора, одинаковы для всех факторов и не зависят от того, с какого уровня и на какой происходит изменение. Тогда качество маршрута определяется только общим числом переходов с уровня на уровень для всех факторов. Например, маршрут $M$, реализующий обход вершин в соответствии с порядком их номеров, содержит один переход для фактора $F_3$, три переходе для $F_2$ и семь переходов для $F_1$. Общее число переходов равно 11. Оптимальный порядок обхода теоретически может быть найден простым перебором. Однако, общее число вариантов маршрутов для $N = 2^n$ вершин равно $R = \left(2^n\right)!$ и очень быстро растет с увеличением числа факторов. В частности, для $n = 2$, $N = 2^2 = 4$, $R = 4! = 24$; для $n = 3$, $N = 2^3 = 8$, $R = 8! = 40320$; для $n = 4$, $N = 2^4 = 16$, $R = 16! \cong 2,092 \cdot 10^{13}$; для $n = 5$, $N = 2^5 = 32$, $R = 2,6 \cdot 10^{35}$; для $n = 6$, $N = 2^6 = 64$, $R = 64! = 1,2 \cdot 10^{89}$. Таким образом, уже для четырех факторов шаблонный перебор не реализуем. Возможности наиболее эффективного из квазипереборных методов решения задачи – метода ветвей и границ [1 – 3] практически ограничиваются задачей с четырьмя факторами. Известные попытки решения этой задачи другими приближенными методами [4 – 8] к успеху не привели. Единственный реальный путь приближенного решения задачи – генетический алгоритм, применение которого обеспечивает получение решения, качество которого оценить не представляется возможным. Возможная причина отсутствия серьезных достижений в рассматриваемой задаче состоит в том, что ее формулировали как обычную задачу коммивояжера. Вместе с тем, эта конкретная задача, безусловно, являясь задачей коммивояжера, обладает принципиальной упрощающей особенностью: здесь необходимо отыскать гамильтонов путь на специальном наборе точек – совокупности вершин равностороннего гиперкуба. Это обстоятельство позволяет построить искомый кратчайший маршрут, обеспечивающий число переходов, равное теоретическому минимуму, равному как легко видеть, $R = 2^n - 1$. Рассмотрим соответствующую процедуру.

## Основные результаты

Построение гамильтонова пути. Пусть число факторов равно двум и соответствующее число вершин гиперкуба равно $R = 2^2 = 4$ с координатами (0,0), (0,1), (1,0), (1,1). Выберем каким-либо образом начальную вершину, а затем последующие определяем так, чтобы при переходе от одной из вершин к другой изменялся уровень только для одного из факторов. Это легко сделать и даже не одним способом. Например, введем маршруты

$$M_1^{(2)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}; \ M_2^{(2)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$M_3^{(2)} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}; \ M_4^{(2)} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Если запись в каждой строке этих матриц трактовать, как двоичное разложение номера вершины, а номер строки определяет порядковое место этой вершины на маршруте, то этим матрицам соответствуют маршруты с номерами вершин

$$S_{M_1^{(2)}} = \{0;1;3;2\}, \ S_{M_2^{(2)}} = \{0;2;3;1\},$$

$$S_{M_3^{(2)}} = \{1;0;2;3\}, \ S_{M_4^{(2)}} = \{1;3;2;0\}.$$

Во всех этих случаях при переходе от одной вершины к другой изменяется уровень только одного фактора и суммарное число изменений уровня равно трем. Общее число подобных маршрутов равно восьми. Используя любой из них, легко построить оптимальный маршрут для трех факторов. Выберем, например, маршрут $M_1$. К четырем строкам матрицы $M_1$ добавим еще четыре строки, зеркально отображенные к имеющимся, а затем припишем к ним каким- либо способом еще один столбец, состоящий из нулей и единиц, но с единственным изменением уровня. Возможные варианты:

$$M_{11}^{(3)} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & 0 & 0 \\ \mathbf{0} & 0 & 1 \\ \mathbf{0} & 1 & 1 \\ \mathbf{0} & 1 & 0 \\ \mathbf{1} & 1 & 0 \\ \mathbf{1} & 1 & 1 \\ \mathbf{1} & 0 & 1 \\ \mathbf{1} & 0 & 0 \end{pmatrix}; \ M_{12}^{(3)} = \begin{pmatrix} \mathbf{1} & 0 & 0 \\ \mathbf{1} & 0 & 1 \\ \mathbf{1} & 1 & 1 \\ \mathbf{1} & 1 & 0 \\ \mathbf{0} & 1 & 0 \\ \mathbf{0} & 1 & 1 \\ \mathbf{0} & 0 & 1 \\ \mathbf{0} & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$M_{13}^{(3)} = \begin{pmatrix} 0 & \mathbf{0} & 0 \\ 0 & \mathbf{0} & 1 \\ 1 & \mathbf{0} & 1 \\ 1 & \mathbf{0} & 0 \\ 1 & \mathbf{1} & 0 \\ 0 & \mathbf{1} & 1 \\ 0 & \mathbf{1} & 1 \\ 0 & \mathbf{1} & 0 \end{pmatrix}; \ M_{14}^{(3)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \mathbf{0} \\ 0 & 1 & \mathbf{0} \\ 1 & 1 & \mathbf{0} \\ 1 & 0 & \mathbf{0} \\ 1 & 0 & \mathbf{1} \\ 1 & 1 & \mathbf{1} \\ 0 & 1 & \mathbf{1} \\ 0 & 0 & \mathbf{1} \end{pmatrix}.$$

Этим вариантам соответствуют маршруты с номерами вершин

$$S_{M_{11}} = \{0;1;3;2;6;7;5;4\},$$

$$S_{M_{12}} = \{4;5;7;6;2;3;1;0\},$$

$$S_{M_{13}} = \{0;1;5;4;6;7;3;2\},$$

$$S_{M_{14}} = \{0;2;6;4;5;7;3;1\}.$$

Добавленный столбец набран жирным шрифтом. Во всех этих вариантах переход для любой пары вершин сопряжен с изменением уровня только одного фактора и общее число изменений равно теоретическому минимуму, равному $2^3 - 1 = 7$. Общее число маршрутов для трех факторов, порождаемых одним двухфакторным маршрутом, равно шести.

Дальнейшая процедура повторяет описанную.

Для построения оптимального четырехфакторного маршрута достаточно, выбрав любой оптимальный трехфакторный маршрут, сначала приписать к соответствующей матрице ее зеркальное отображение, а затем любым из возможных способов добавить столбец, содержащий восемь нулей и столько же единиц с единственным переходом. Этот добавляемый столбец может быть поставлен первым слева, может находиться между первым и вторым столбцами, между вторым и третьим и, наконец, может быть последним справа. Кроме того, в этом столбце может варьироваться расположение нулей и единиц.

Запишем несколько возможных вариантов построения таких маршрутов, порождаемых, например, маршрутом $M_{11}^{(3)}$,

$$M_{111}^{(4)}=\begin{pmatrix}\mathbf{0}&0&0&0\\\mathbf{0}&0&0&1\\\mathbf{0}&0&1&1\\\mathbf{0}&0&1&0\\\mathbf{0}&1&1&0\\\mathbf{0}&1&1&1\\\mathbf{0}&1&0&1\\\mathbf{0}&1&0&0\\\mathbf{1}&1&0&0\\\mathbf{1}&1&0&1\\\mathbf{1}&1&1&1\\\mathbf{1}&1&1&0\\\mathbf{1}&0&1&0\\\mathbf{1}&0&1&1\\\mathbf{1}&0&0&1\\\mathbf{1}&0&0&0\end{pmatrix};\quad M_{112}^{(4)}=\begin{pmatrix}\mathbf{1}&0&0&0\\\mathbf{1}&0&0&1\\\mathbf{1}&0&1&1\\\mathbf{1}&0&1&0\\\mathbf{1}&1&1&0\\\mathbf{1}&1&1&1\\\mathbf{1}&1&0&1\\\mathbf{1}&1&0&0\\\mathbf{0}&1&0&0\\\mathbf{0}&1&0&1\\\mathbf{0}&1&1&1\\\mathbf{0}&1&1&0\\\mathbf{0}&0&1&0\\\mathbf{0}&0&1&1\\\mathbf{0}&0&0&1\\\mathbf{0}&0&0&0\end{pmatrix};$$

$$M_{113}^{(4)}=\begin{pmatrix}0&\mathbf{0}&0&0\\0&\mathbf{0}&0&1\\0&\mathbf{0}&1&1\\0&\mathbf{0}&1&0\\1&\mathbf{0}&1&0\\1&\mathbf{0}&1&1\\1&\mathbf{0}&0&1\\1&\mathbf{0}&0&0\\1&\mathbf{1}&0&0\\1&\mathbf{1}&0&1\\1&\mathbf{1}&1&1\\1&\mathbf{1}&1&0\\0&\mathbf{1}&1&0\\0&\mathbf{1}&1&1\\0&\mathbf{1}&0&1\\0&\mathbf{1}&0&0\end{pmatrix};\quad M_{114}^{(4)}=\begin{pmatrix}0&\mathbf{1}&0&0\\0&\mathbf{1}&0&1\\0&\mathbf{1}&1&1\\0&\mathbf{1}&1&0\\1&\mathbf{1}&1&0\\1&\mathbf{1}&1&1\\1&\mathbf{1}&0&1\\1&\mathbf{1}&0&0\\1&\mathbf{0}&0&0\\1&\mathbf{0}&0&1\\1&\mathbf{0}&1&1\\1&\mathbf{0}&1&0\\0&\mathbf{0}&1&0\\0&\mathbf{0}&1&1\\0&\mathbf{0}&0&1\\0&\mathbf{0}&0&0\end{pmatrix};$$

$$M_{115}^{(4)}=\begin{pmatrix}0&0&\mathbf{1}&0\\0&0&\mathbf{1}&1\\0&1&\mathbf{1}&1\\0&1&\mathbf{1}&0\\1&1&\mathbf{1}&0\\1&1&\mathbf{1}&1\\1&0&\mathbf{1}&1\\1&0&\mathbf{1}&0\\1&0&\mathbf{0}&0\\1&0&\mathbf{0}&1\\1&1&\mathbf{0}&1\\1&1&\mathbf{0}&0\\0&1&\mathbf{0}&0\\0&1&\mathbf{0}&1\\0&0&\mathbf{0}&1\\0&0&\mathbf{0}&0\end{pmatrix};\quad M_{116}^{(4)}=\begin{pmatrix}0&0&0&\mathbf{0}\\0&0&1&\mathbf{0}\\0&1&1&\mathbf{0}\\0&1&0&\mathbf{0}\\1&1&0&\mathbf{0}\\1&1&1&\mathbf{0}\\1&0&1&\mathbf{0}\\1&0&0&\mathbf{0}\\1&0&0&\mathbf{1}\\1&0&1&\mathbf{1}\\1&1&1&\mathbf{1}\\1&1&0&\mathbf{1}\\0&1&0&\mathbf{1}\\0&1&1&\mathbf{1}\\0&0&1&\mathbf{1}\\0&0&0&\mathbf{1}\end{pmatrix}.$$

Этим вершинам соответствуют маршруты:

$S_{M_{111}}=\{0;1;3;2;6;7;5;4;12;13;15;14;10;11;9;8\}$,

$S_{M_{112}}=\{8;9;11;10;14;15;13;12;4;5;7;6;2;3;1;0\}$,

$S_{M_{1;3}}=\{0;1;3;2;10;11;9;8;12;13;15;14;6;7;5;4\}$,

$S_{M_{114}}=\{4;5;7;6;14;15;13;12;8;9;11;10;2;3;1;0\}$;

$S_{M_{115}}=\{2;3;7;6;14;15;11;10;8;9;13;12;4;5;1;0\}$,

$S_{M_{116}}=\{0;2;6;4;12;14;10;8;9;11;15;13;5;7;3;1\}$.

Таким образом, каждый трехфакторный маршрут дает возможность построить восемь оптимальных четырехфакторных маршрутов с минимальным числом изменений уровня факторов, равным теоретическому минимуму $2^4-1=15$.

Усложним задачу с учетом возможных различий в затратах, связанных с изменением уровня для каждого из факторов. В соответствии с этим введем $s_i$ – затраты на изменение уровня для $i$ -го фактора, $i=1,2,...,n$. При этом маршруты, оптимальные и равноценные по числу переходов, будут различны по величине суммарных затрат.

Отметим два важных обстоятельства. Во-первых, матрицы, соответствующие разным маршрутам, могут быть получены путем использования комбинации: перестановка столбцов и зеркальное отображение строк. Во-вторых, все эти матрицы обладают общим свойством: расположение нулей и единиц в каждом из $n$ столбцов (по числу факторов) однозначно определяет значение уровня соответствующего фактора в каждой точке маршрута и число изменений уровня этого фактора, равное одному из возможных значений: $2^0, 2^1, 2^2, ..., 2^{n-1}$.

Таким образом, суммарное число изменений уровня для всех факторов при реализации любого маршрута одинаково и равно $2^0+2^1+2^2+...+2^{n-1}=2^n-1$. Порядок обхода вершин для выбранного маршрута определяется расположением строк, распределение нулей и единиц в которых задает двоичное представление номера соответствующих вершин. Вектор, определяющий порядок обхода вершин для заданной маршрутной матрицы, вычисляется как скалярное произведение этой матрицы на вектор, составленный из чисел, представляющих собой степени двойки и устанавливающий желаемый порядок следования столбцов. Поясним сказанное примером, соответствующим трехфакторной задаче.

В качестве начальной матрицы используем $M_{11}^{(3)}$. В этой матрице общее число изменений уровня факторов равно семи. При этом число изменений уровня фактора, соответствующего первому столбцу, равно единице; для фактора, соответствующего второму столбцу, равно двум и, наконец, для третьего фактора число изменений равно четырем. При составлении маршрута с учетом различий в затратах необходимо совместно учитывать число изменений уровня факторов и соответствующие им величины затрат. Если, например, в какой-то конкретной системе соотношение затрат при изменении уровня фактора соответствует неравенству $s_3>s_2>s_1$, то первому столбцу целесообразно приписать самый затратный фактор $F_3$, второму – фактор $F_2$ и третьему столбцу с наименьшим числом изменений – фактор $F_1$. Определим рациональный маршрут обхода $M_1$, используя соотношение

$$\begin{pmatrix}0&0&0\\0&0&1\\0&1&1\\0&1&0\\1&1&0\\1&1&1\\1&0&1\\1&0&0\end{pmatrix}\times\begin{pmatrix}2^2\\2^1\\2^0\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0\\1\\3\\2\\6\\7\\5\\4\end{pmatrix}.$$

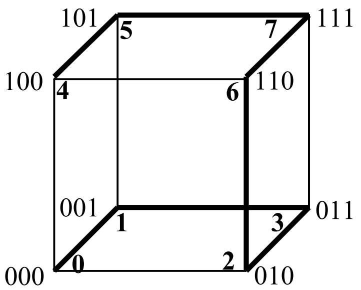


Рис. 1. Маршрут $M_1$

Если же соотношение затрат определяется соотношением $s_3<s_2<s_1$, то оптимальный маршрут обхода будет другим:

$$\begin{pmatrix}0&0&0\\0&0&1\\0&1&1\\0&1&0\\1&1&0\\1&1&1\\1&0&1\\1&0&0\end{pmatrix}\times\begin{pmatrix}2^0\\2^1\\2^2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0\\4\\6\\2\\3\\7\\5\\1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0&0&0\\1&0&0\\1&1&0\\0&1&0\\0&1&1\\1&1&1\\1&0&1\\0&0&1\end{pmatrix}.$$

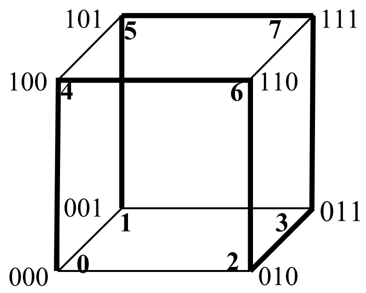


Рис. 2. Маршрут $M_2$

Отметим, что полученная матрица, являющаяся результатом вычисления, не просто определяет целесообразный порядок обхода вершин, но и наглядно показывает, что в соответствии с этим маршрутом наиболее затратный фактор $F_1$ изменяет свой уровень всего один раз, более затратный $F_2$ – два раза, а наименее затратный $F_3$ – четыре раза.

Таким образом, правило отыскания искомого гамильтонова пути, обеспечивающее минимум затрат состоит из двух пунктов:

для заданного числа $n$ факторов формируется искомая матрица с минимальным суммарным числом изменений уровня факторов, равным $2^n-1$;

эта матрица скалярно умножается на вектор, составленный из степеней двоек, порядок следования которых определяется значениями затратности факторов.

Рассмотрим, наконец, еще одно осложнение задачи, связанное с возможной необходимостью учитывать при изменении уровня факторов не только стоимостные, но и временные затраты. В соответствии с этим каждый фактор будет характеризоваться не одним, а парой чисел $(s_i,T_i)$, $i=1,2,...,n$. При этом может оказаться, что результаты ранжирования факторов по уровню стоимостных и временных затрат будут не совпадать.

Другими словами, маршрут, который оптимален по стоимости, не обязательно будет оптимален по времени. Возможный путь преодоления возникающей при этом трудности – поиск компромиссного решения, например, с помощью Парето-оптимального множества.

Парето-множество выберем как подмножество из базового множества всех планов, обеспечивающих теоретический минимум, равный $2^n - 1$, числа изменений уровня факторов. Это базовое множество, как легко доказать, для $k$ факторов содержит $R_k = 2^k k!$ маршрутов. Для каждого из этих маршрутов стоимостные и временные затраты различны. Процедура формирования Парето-множества планов состоит в следующем. Вычислим значения суммарных стоимостных $s_\Sigma^{(i)}$ и временных $T_\Sigma^{(i)}$ затрат для каждого из них, $i = 1, 2, ..., R_k$. Введем понятие мажорирования. Будем считать, что план $i_1$ мажорирует план $i_2$, если $s_\Sigma^{(i_1)} \le s_\Sigma^{(i_2)}$, $T_\Sigma^{(i_1)} \le T_\Sigma^{(i_2)}$, причем хотя бы одно из этих неравенств выполняется строго. Теперь, используя правило мажорирования, выделим искомое Парето-множество. Полученное множество позволяет найти план, удовлетворяющий выбранным требованиям. Например, требуется найти план минимальный по стоимостным затратам из всех планов, для которых временные затраты не выше заданных, или, наоборот, план, наилучший по временным затратам, из планов, у которых стоимостные затраты не превышают заданных. Наконец, может быть найден план, для которого, например, произведение значений стоимостных и временных затрат минимально.

## Выводы

Таким образом, предложена методика выбора маршрута обхода множества вершин плана полного факторного эксперимента для различных вариантов затрат, связанных с изменением значения уровня факторов при переходе от одной вершины плана к другой. Получено простое правило формирования плана, минимизирующего суммарные затраты. Рассмотрена возможность применения этого правила в случае, когда при прохождении маршрута стоимостные и временные затраты различны. Для решения задачи в этом случае используется Парето-множество планов.

## Список литературы


*1. Литтл Дж. Алгоритмы для решения задач о коммивояжере: пер. с англ. / Дж. Литтл, М.Г. Мурти, Д. Суини, К. Кэрел // Экономика и математические методы. – 1965. – Т. 1, № 1. – С. 204-212.*

*2. Раскин Л.Г. Анализ сложных систем и элементы теории оптимального управления / Л.Г. Раскин. – М.: Сов. радио, 1976. – 344 с.*

*3. Корбут А.А. Дискретное программирование / А.А. Корбут, Ю.Ю. Финкельштейн. – М.: Наука, 1969. – 382 с.*

*4. Серая О.В. Многомерные модели логистики в условиях неопределенности: монография / О.В. Серая. – Х.: ФОП Стеценко И.И., 2010. – 512 с.*

*5. Раскин Л.Г. Многоиндексные задачи линейного программирования / Л.Г. Раскин, И.О. Кириченко. – М.: Радио и связь, 1982. – 240 с.*

*6. Кошевой Н.Д. Оптимальное по стоимостным и временным затратам планирование эксперимента / Н.Д. Кошевой, Е.М. Костенко. – Х.: «ХАИ», 2013. – 316 с.*

*7. Кошевой Н.Д. Применение метода ветвей и границ для оптимизации композиционных планов второго порядка / Н.Д. Кошевой, Е.М. Костенко, А.С Чуйко // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2010. – №25. – С. 95-101.*

*8. Кошевой Н.Д. Применение метода ветвей и границ для оптимизации многофакторных планов эксперимента / Н.Д. Кошевой, О.Л. Бурлеев, Е.М. Костенко // радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – № 2. – С. 67-70.*


*Поступила в редколлегию 25.02.2016*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г.А. Кучук, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### ПЛАНУВАННЯ БАГАТОФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ ПРИ РАЦІОНАЛЬНІЙ ОРГАНІЗАЦІЇ ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМ

Л.Г. Раскін, О.В. Сіра

*Розв'язана задача відшукання гамильтонова шляху на повнодоступному графі повного факторного експерименту. Розглянуто варіант постановки задачі, коли якість маршруту визначається тільки числом змін рівня факторів. Аналізується можливість вирішення цього завдання методом гілок і меж. Показано, що цей метод не може бути використаний для вирішення завдання, в якому число факторів перевищує чотири. Запропоновано простий непереборний метод точного рішення сформульованої задачі. Розглянуто інші, більш складні варіанти цього завдання, що призводять до двухкрітеріальної схеми. При цьому для вирішення завдання запропонований Парето-підхід. Наводяться приклади.*

***Ключові слова**: багатофакторний експеримент, повнодоступний граф, гамильтонов шлях, метод побудови оптимального маршруту, двохкритерійна оптимізація маршруту, Парето-множина рішень.*

### PLANNING MULTIVARIATE EXPERIMENT WITH RATIONAL ORGANIZATION OF TEST SYSTEMS

L.G. Raskin, O.V. Sira

*The problem of finding a Hamiltonian path in the graph-blocking full factorial experiment. A variant formulation of the problem, when a route is determined only by the number of quality factors of level changes. The possibility of solving this problem by the branch and bound. It is shown that this method can not be used to solve the problem, in which the number exceeds four factors. A simple method nonexhaustive exact solution of our problem. We consider other, more complex variants of this problem, leading to a two-criteria scheme. At the same time to solve the problem proposed by Pareto approach. Examples.*

***Keywords**: multivariable experiment, fullaccessible count, гамильтонов way, method of construction of optimum route, twocriterion optimization of route, Pareto-great number of decisions.*