УДК 004.715

Довженко Т.П., аспірант; **Сторчак К.П.**, к.т.н.

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИКО-СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРЕДСКАЗАНИЯ КОЛИЧЕСТВА ОТБРОШЕННЫХ И ПОТЕРЯННЫХ ПАКЕТОВ ДЛЯ СЕТИ TCP/IP ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ DSREM-АЛГОРИТМА

Dovzhenko T.P., Storchak K.P. Building a mathematical and statistical prediction model number of dropped and lost packets network TCP / IP with the use of DSREM algorithm. The paper deals with the issue of building a complete factorial experiment which produces predictive models for discarded and lost packets in the TCP / IP network using the method of active management of the router buffer queue dynamically splittable characteristic probability discharge/marking packets based on REM-method (DSREM). A simulation of TCP / IP-network with the plan 2^3 has been performed. The coefficients of the regression equations were calculated by the least squares method. In addition to test the significance of the factors and determine the adequacy of the constructed models were calculated statistical criteria Student and Fisher and compared with tabulated values. Regression models were built in coded and natural coordinate system. It is concluded that the using of methods of planning the experiment improves efficiency by reducing the number of experiments which can reduce the necessary time and other expenses.

Keywords: TCP/IP network, DSREM-algorithm, full factorial experiment, the variance of the adequacy.

Довженко Т.П., Сторчак К.П. Побудова математико-статистичних моделей передбачення кількості відкинутих та втрачених пакетів для мережі TCP/IP з використання DSREM-алгоритма. В роботі розглядається питання побудови повного факторного експерименту для отримання прогнозуючої моделі по відкинутим і втраченим пакетам в мережі TCP / IP. При моделюванні був застосований план 2^3. Коефіцієнти для рівнянь регресії розраховувались по методу найменших квадратів. Крім того для перевірки значимості отриманих коефіцієнтів та визначення адекватності побудованих моделей були розраховані статистичні критерії Ст'юдента та Фішера і проведено їх порівняння з табличними значеннями. Моделі регресії побудовані в кодованій та натуральній системі координат.

Ключові слова: TCP/IP мережа, DSREM-алгоритм, повний факторний експеримент, дисперсія адекватності.

Довженко Т.П., Сторчак К.П. Построение математико-статистических моделей предсказания количества отброшенных и потерянных пакетов для сети TCP/IP при использовании DSREM-алгоритма. В работе рассматривается вопрос построения полного факторного эксперимента для получения предсказывающей модели по отброшенным и потерянным пакетам в сети TCP/IP. При моделировании был применен план 2^3. Коэффициенты для уравнений регрессии рассчитывались по методу наименьших квадратов. Кроме того для проверки значимости полученных коэффициентов и определения адекватности построенных моделей были рассчитаны статистические критерии Стьюдента и Фишера и проведено их сравнение с табличными значениями. Модели регрессии построены в кодированной и натуральной системе координат.

Ключевые слова: TCP/IP сеть, DSREM-алгоритм, полный факторный эксперимент, дисперсия адекватности.

Введение

Для построения математико-статистических моделей всегда требуется проведение экспериментальных исследований. При этом для поставленных целей моделирования можно выделить ряд следующих этапов [1 - 3]:

1. Выбор выходных величин - параметров оптимизации, выбор независимых входных величин, воздействующих на объект исследования - факторов.
2. Сбор априорной информации и использование ее перед проведением эксперимента, а также составление схемы проведения опытов эксперимента.
3. Выполнение эксперимента.
4. Статистическая обработка полученных результатов.
5. Заключение по результатам эксперимента.

При получении информация, после каждого этапа, определяется дальнейшая стратегия эксперимента. Отсюда появляется возможность оптимального управления экспериментом. При планировании эксперимента позволяется варьировать одновременно всеми факторами и получать количественные оценки основных эффектов и эффектов взаимодействия. Сами эффекты определяются с меньшей ошибкой, чем при традиционных методах исследования.

Постановка задачи. Основной задачей данной работы является построение модели регрессии для предсказания количества отброшенных и потерянных пакетов в сети TCP/IP с использованием DSREM алгоритма.

Построение плана полного факторного эксперимента 2^3. При проведении планирования по схеме полного факторного эксперимента (ПФЭ) план 2^3 реализует все возможные комбинации трех факторов на двух выбранных для исследования уровнях [1-4, 7, 8]. При этом необходимое количество опытов в общем случае можно определить по формуле:

$$N = \mathrm{n}^{\mathrm{k}}, \tag{1}$$

где n - количество уровней; к - число факторов.

Для факторов выбраны уровни, которые представляют собой нижнюю и верхнюю границы исследуемой области по данному параметру. В табл. 1 представлена расширенная матрица полного факторного эксперимента 2^3.

В табл. 1 двойной линией выделен сам план эксперимента 2^3.

Табл. 1. Расширенная матрица планирования полного факторного эксперимента 2^3

Номер опыта	Кодированные значения переменных								Y1 - количество отброшенных	Y2 - количество потерянных
	x0	x1	x2	x3	x1x2	x1x3	x2x3	x1x2x3		
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	Y11	Y21
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	Y12	Y22
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	Y13	Y23
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	Y14	Y24
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	Y15	Y25
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	Y16	Y26
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	Y17	Y27
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	Y18	Y28

Само построение плана эксперимента сводится к выбору экспериментальных точек, симметричных относительно основного уровня рис. 1 [1, 3, 5 - 7].

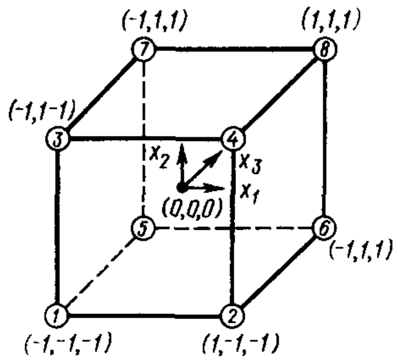

Рис. 1. Полный факторный эксперимент 2^3

Полный факторный эксперимент типа $2^к$ обладает свойствами симметричности, нормировки, ортогональности, ротатабельности (для линейной модели).

При исследовании в качестве параметров оптимизации были выбраны следующие характеристики функционирования сети TCP/IP:

– Y1 - количество отброшенных пакетов;
– Y2 - количество потерянных пакетов.

Независимыми входными величинами, воздействующими на объект исследования - факторами были определены:

– X1 - пропускная способность канала связи (узлов передачи данных) в Мбит/с;
– X2 - нагрузка (количество узлов передачи данных);
– X3 - начальное (желаемое) значение очереди, пакет.

Для выбора локальной области факторного пространства была проведена первая серия опытов. После тщательного анализа априорной информации об изменении параметров оптимизации и результатов первых опытов были определены границы областей определения факторов, значения которых занесены в табл. 2 [1-8]:

– X1min = 20 пак; X1max = 200 пак;
– X2min = 5 ; X2max = 95;
– X3min = 5 Мбит/с; X3max = 15 Мбит/с.

Табл. 2. Матрица планирования полного факторного эксперимента 2^3 в натуральных значения факторов

Номер опыта	Натуральные значения факторов			Y1 - количество отброшенных пакетов	Y2 - количество потерянных пакетов
	X1	X2	X3		
1	5	5	20	63	137
2	15	5	20	0	100
3	5	95	20	3414	3494
4	15	95	20	7267	7404
5	5	5	200	76	160
6	15	5	200	0	100
7	5	95	200	3054	3135
8	15	95	200	6310	6444

Основные (нулевые) уровни для каждого из факторов можно определить исходя из соотношений

$$x_1^0 = \frac{\mathrm{X1max+X1min}}{2};\ x_2^0 = \frac{\mathrm{X2max+X2min}}{2};\ x_3^0 = \frac{\mathrm{X3max+X3min}}{2}.$$

Тогда $x_1^0 = \frac{200+20}{2} = 110;\ \ x_2^0 = \frac{95+5}{2} = 50;\ \ x_3^0 = \frac{15+5}{2} = 10.$

Интервалы варьирования факторов определяем следующим образом

$$\Delta x_j = \frac{\mathrm{Xmax_j - Xmin_j}}{2}.$$

Подставив значение каждого из факторов получим такие числовые значения интервалов:

$$\Delta x_1 = \frac{200-20}{2} = 90;\ \Delta x_2 = \frac{95-5}{2} = 45;\ \Delta x_3 = \frac{15-5}{2} = 5.$$

Чтобы перейти от натуральных значений факторов к кодированным значениям необходимо выполнить следующее линейное преобразование:

$$x_j = \frac{\mathrm{X_j} - x_j^0}{\Delta x_j};\ j = 1,2 \dots, k. \qquad (2)$$

Для переменных $x_1, \dots, x_k$ верхний уровень получит значение +1, а нижний уровень -1. При этом координаты центра плана равны нулю. План полного факторного эксперимента 2^3 с кодированными значениями факторов представлен в табл.1. Полная матрица ПФЭ 2^3 кроме столбцов факторов включает также столбец для фиктивной переменной и четыре столбца для взаимодействий факторов ($x_1x_2, x_1x_3, x_2x_3, x_1x_2x_3$).

Результаты выполненных опытов согласно ПФЭ 2^3 помещены в два последних столбца табл. 2.

Свойства полного факторного эксперимента типа 2^3

Рассмотрим подробнее общие свойства матрицы планирования [1, 2, 6]. Здесь будем иметь в виду те из них, которые конкретно определяют качество модели, так как эксперимент планируется для того, чтобы получить модель обладающую определенными оптимальными свойствами. При этом оценки коэффициентов модели должны быть наилучшими и точность предсказания параметра оптимизации не должна зависеть от направления в факторном пространстве, поскольку заранее не ясен предстоящий путь движения в поисках оптимума. Наличие этих свойств позволяют к тому же быстро и просто рассчитать целевую функцию:

1. Свойство ортогональности - произведение любых двух различных вектор-столбцов факторов равно нулю,

$$\sum_{i=1}^{N} x_{ui}x_{ji} = 0;\ \ u, j = 0,1, \dots, k.$$

   Для нашей матрицы планирования имеем:
   - столбцы '1-2' - (-1)(-1)+(+1)(-1)+(-1)(+1)+(+1)(+1)+ (-1)(-1)+(+1)(-1)+(-1)(+1)+(+1)(+1) = 0;
   - столбцы '1-3' - (-1)(-1)+(+1)(-1)+(-1)(-1)+(+1)(-1)+ (-1)(+1)+(+1)(+1)+(-1)(+1)+(+1)(+1) = 0;
   - столбцы '2-3' - (-1)(-1)+(-1)(-1)+(+1)(-1)+(+1)(-1)+ (-1)(+1)+(-1)(+1)+(+1)(+1)+(+1)(+1) = 0.

   Это свойство позволяет упростить процедуры расчета коэффициентов уравнения регрессии, так как матрица коэффициентов нормальных уравнений (X^TX) становится диагональной и ее диагональные элементы равны числу опытов в матрице планирования N.

2. Свойство нормировки - сумма квадратов элементов столбца каждого из факторов равна числу опытов

$$\sum_{i=1}^{N} x_{ji}^2 = \mathrm{N};\ \ j = 0,1, \dots, k.$$

   Проверяем это свойство для нашей матрицы:
   - столбец 1 – $(-1)^2+(+1)^2+(-1)^2+(+1)^2+(-1)^2+(+1)^2+(-1)^2+(+1)^2 = 8$;
   - столбец 2 – $(-1)^2+(-1)^2+(+1)^2+(+1)^2+(-1)^2+(-1)^2+(+1)^2+(+1)^2 = 8$;
   - столбец 3 – $(-1)^2+(-1)^2+(-1)^2+(-1)^2+(+1)^2+(+1)^2+(+1)^2+(+1)^2 = 8$.

3. Свойство ротатабельности - дисперсии предсказанных значений параметра оптимизации одинаковы на равных расстояниях от нулевого уровня.

4. Симметричность относительно нулевого уровня, иными словами алгебраическая сумма элементов столбца каждого фактора, равна нулю

$$\sum_{i=1}^{N} x_{ji} = 0;\ \ j = 1,2, \dots, k; j \neq 0.$$

   Для матрицы 2^3 это свойство выглядит следующим образом:
   - столбец 1 – (-1)+(+1)+(-1)+(+1)+(-1)+(+1)+(-1)+(+1) = 0;
   - столбец 2 – (-1)+(-1)+(+1)+(+1)+(-1)+(-1)+(+1)+(+1) = 0;
   - столбец 3 – (-1)+(-1)+(-1)+(-1)+(+1)+(+1)+(+1)+(+1) = 0.

Обработка результатов эксперимента

Главная цель проведения эксперимента - это получение по его результатам модели, которая адекватно описывает поведение исследуемого объекта, то есть определить структуру уравнения и найти значения неизвестных коэффициентов модели [2, 4, 6].

Согласно уравнения (1) для ПФЭ 2^3 можно определить восемь коэффициентов для нашей модели (уравнения регрессии):

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3. \quad (3)$$

Для проверки воспроизводимости опыта в центре плана эксперимента было поставлено три повторных опыта. Результаты представлены в табл. 3.

Табл. 3. Повторные опыты в центре плана эксперимента

Номер опыта	X1	X2	X3	Y1 количество отброшенных пакетов	Y2 количество потерянных пакетов
1	9	49	109	3414	3517
2	10	50	110	3459	3569
3	11	51	111	3520	3628

Расчет дисперсии воспроизводимости для параметров оптимизации Y1 и Y2 производится по следующим формулам:

$$S^2_{\{Y1\}} = \frac{1}{m-1}\sum_{u=1}^{m}\left(Y1_u - \overline{Y1}\right)^2,\ u = 1,..,m\,, \quad (4)$$

$$S^2_{\{Y2\}} = \frac{1}{m-1}\sum_{u=1}^{m}(Y2_u - \overline{Y2})^2,\ u = 1,\dots,m\,, \quad (5)$$

где m – количество повторяемых опытов; $\overline{Y1}, \overline{Y2} -$ средние арифметические значения параметров оптимизации при m повторяющихся опытах.

Подставив числовые значения в формулы (4) и (5) получим следующее

$$S^2_{\{Y1\}} = 2830\,,\quad S^2_{\{Y2\}} = 3084.$$

Коэффициенты для уравнения (3) вычисляем по методу наименьших квадратов (МНК), запись которого в матричной форме соответствует следующему выражению

$$Y = XB,$$

а сам вектор коэффициентов

$$B = (X^TX)^{-1}X^TY. \quad (6)$$

Для нашего плана эксперимента 2^3 и модели (3) получим в матричной форме выражения для X и параметра оптимизации Y:

$$X = \begin{bmatrix} +1 & -1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 & -1 & -1 & +1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 & -1 & +1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & -1 & +1 & +1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & +1 & +1 & -1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \\ Y_6 \\ Y_7 \\ Y_8 \end{bmatrix}.$$

Результатом перемножения матриц X^T и X будет:

$$X^T X = \begin{bmatrix} 8 & & & & & & & \\ & 8 & & & & & & \\ & & 8 & & & & & \\ & & & 8 & & & & \\ & & & & 8 & & & \\ & & & & & 8 & & \\ & & & & & & 8 & \\ & & & & & & & 8 \end{bmatrix},$$

где на главной диагонале в каждой ячейке находится число опытов, а все остальные ячейки равны нулю.

Обратная матрица $(X^T X)^{-1}$ в каждой ячейке главной диагонали содержит 1/8, а все остальные ячейки равны нулю.

Расчет коэффициентов матричного уравнения (6) произведем в интерактивной системе Matlab. После выполнения расчетов получим следующие значения коэффициентов уравнения (3) для $Y1$

$b_0 = 2523$; $b_1 = 871{,}25$; $b_2 = 2488$; $b_3 = -163$;
$b_{12} = 906$; $b_{13} = -76{,}25$; $b_{23} = -166{,}25$; $b_{123} = -73$

и $Y2$

$b_0 = 2622$; $b_1 = 890{,}25$; $b_2 = 2498$; $b_3 = -162$;
$b_{12} = 914{,}5$; $b_{13} = -78$; $b_{23} = -167{,}75$; $b_{123} = -72{,}25$.

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии

Значимость коэффициентов уравнения регрессии можно проверить по критерию Стьюдента для каждого коэффициента по отдельности [5, 7, 8]. Так как элементы главной диагонали ковариационной матрицы $(X^T X)^{-1}$ одинаковы, то и коэффициенты уравнения будут определяться с одинаковой точностью:

$$S^2_{\{b_i\}} = \frac{1}{N} S^2_{\{Y\}},$$

где $S^2_{\{b_i\}}$ –дисперсия коэффициентов уравнения регрессии,
$S^2_{\{Y\}}$ – дисперсия воспроизводимости.

Теперь для полученных коэффициентов уравнения (3) рассчитаем t – критерий Стьюдента:

$$t = \frac{|b_i|}{\sqrt{S^2_{\{b_i\}}}}.$$

Таким образом для каждого коэффициента параметра оптимизации $Y1$ t – критерий Стьюдента будет имет следующие значения:

$$t_1 = \frac{|b_1|}{\sqrt{S^2_{\{b_1\}}}} = 134{,}135;\ t_2 = \frac{|b_2|}{\sqrt{S^2_{\{b_2\}}}} = 46{,}32;\ t_3 = \frac{|b_3|}{\sqrt{S^2_{\{b_3\}}}} = 132{,}288;\ t_4 = \frac{|b_4|}{\sqrt{S^2_{\{b_4\}}}} = 8{,}666;$$

$$t_5 = \frac{|b_5|}{\sqrt{S^2_{\{b_5\}}}} = 46{,}168;\ t_6 = \frac{|b_6|}{\sqrt{S^2_{\{b_6\}}}} = 4{,}054;\ t_7 = \frac{|b_7|}{\sqrt{S^2_{\{b_7\}}}} = 8{,}839;\ t_8 = \frac{|b_8|}{\sqrt{S^2_{\{b_8\}}}} = 3{,}881.$$

Теперь если полученное значение критерия Стьюдента будет меньше критического (полученного из таблицы) $t_\alpha(f)$ с числом степеней свободы $f = m - 1$ и выбранным уровнем значимости α , то даный коэффициент будет незначимо отличаться от нуля и его необходимо удалить из уравнения регрессии.

Табличное значение критерия Стьюдента при уровне значимости α = 0,05 и числе степеней свободы $f = m - 1$ = 3 – 1 =2 будет $t_{кр}$= 4,3.

Следовательно коэффициенты уравнения регрессии b_{13} и b_{123} для параметра оптимизации Y1 незначимо отличаются от нуля и их необходимо удалить из полученного уравнения.

Тогда уравнение регрессии Y1 будет иметь следующий вид:

$$\widehat{y1} = 2523 + 871{,}25x_1 + 2488x_2 - 163x_3 + 906x_1x_2 - 166{,}25x_2x_3 \quad (7)$$

Таким же образом производиться проверка коэффициентов для параметра оптимизации Y2. Находим значения критерия Стьюдента для каждого коэффициента

$$t_1 = 133{,}523;\ t_2 = 45{,}339;\ t_3 = 127{,}195;\ t_4 = 8{,}25;$$
$$t_5 = 46{,}574;\ t_6 = 3{,}972;\ t_7 = 8{,}543;\ t_8 = 3{,}68.$$

После чего сравниваем каждое полученное значение с табличным и делаем соответствующие выводы по значимости полученных коэффициентов регрессии для параметра оптимизации Y2.

Как видно из полученных данных в уравнении Y2 также незначимы коэффициенты b_{13} и b_{123}. Тогда данное уравнение примет вид:

$$\widehat{y2} = 2622 + 890{,}25x_1 + 2498x_2 - 162x_3 + 914{,}5x_1x_2 - 167{,}75x_2x_3 \quad (8)$$

Проверка адекватности уравнения регрессии

Полученное в процессе эксперимента уравнение соединяет различные уровни факторов со значением параметра оптимизации, тем самым позволяя вычислять значения Y в любых точках внутри заданной области [4, 6 - 8].

Адекватность модели проверяется по F – критерию Фишера. Для этого вычисляется статистика

$$\mathrm{F} = \frac{S^2_{\text{ад}}}{S^2_{\{Y\}}}, \quad (9)$$

где $S^2_{\{Y\}}$- дисперсия воспроизводимости,

$S^2_{\text{ад}}$ - дисперсия адекватности.

Дисперсия адекватности рассчитывается по следующей формуле

$$S^2_{\text{ад}} = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(Y_i - \hat{Y}\imath\right)^2}{N-K}, \quad (10)$$

где N – количество проводимых опытов; K – количество коэффициентов в уравнении регрессии.

Подставляя значения дисперсий адекватности и воспроизводимости в формулу (9) получим расчетное значение критерия Фишера. Табличное значение F – критерия Фишера найдем при уровне значимости α = 0,05 и числах степеней свободы $\mathrm{f}_{\text{ад}} = N - K$ = 8 – 6 = 2 и $\mathrm{f} = m - 1$ = 3 – 1 = 2. Получим значение F = 19.

По формуле (10) вычисляем дисперсию адекватности для первого и второго уравнений. Для уравнения Y1 полученное значение $S^2_{\text{ад}}$= 44570, а для уравнения Y2 значение $S^2_{\text{ад}}$= 45220.

Полученный критерий Фишера для уравнений (7) и (8) равен 15,7. Сравнивая эти значения критерия Фишера с табличным значением 15,7 < 19 приходим к выводу адекватности полученных уравнений исходным данным.

Так как данные модели представлены в кодированной системе координат, то для перехода к натуральным значениям необходимо использовать формулу перехода (2). Тогда уравнение (7) примет вид:

$$\widehat{y1} = 2523 + 871{,}25\frac{\mathrm{X}_1 - x_1^0}{\Delta x_1} + 2488\frac{\mathrm{X}_2 - x_2^0}{\Delta x_2} - 163\frac{\mathrm{X}_3 - x_3^0}{\Delta x_3} + 906\frac{\mathrm{X}_1 - x_1^0}{\Delta x_1}\frac{\mathrm{X}_2 - x_2^0}{\Delta x_2} - 166{,}25\frac{\mathrm{X}_2 - x_2^0}{\Delta x_2}\frac{\mathrm{X}_3 - x_3^0}{\Delta x_3},$$

а уравнение (8)

$$\widehat{y2} = 2622 + 890{,}25\frac{\mathrm{X}_1 - x_1^0}{\Delta x_1} + 2498\frac{\mathrm{X}_2 - x_2^0}{\Delta x_2} - 162\frac{\mathrm{X}_3 - x_3^0}{\Delta x_3} + 914{,}5\frac{\mathrm{X}_1 - x_1^0}{\Delta x_1}\frac{\mathrm{X}_2 - x_2^0}{\Delta x_2} - 67{,}75\frac{\mathrm{X}_2 - x_2^0}{\Delta x_2}\frac{\mathrm{X}_3 - x_3^0}{\Delta x_3}.$$

Выводы

В результате проведенных опытов с применением полного факторного эксперимента 2^3 получены уравнения регрессии для предсказания количества отброшенных и потерянных пакетов для сети TCP/IP при использовании DSREM алгоритма.

Уравнения адекватно описывают область изменения целевой функции при изменениях факторов в заданных пределах.

Так как полный факторный эксперимент типа $2^к$ обладает свойствами симметричности, нормировки, ортогональности и ротатабельности полученные оценки коэффициентов уравнений показывают степень влияния факторов и их взаимодействия на выходную величину.

Таким образом использование методов планирования эксперимента дает возможность пользоваться обоснованными правилами вместо интуитивных действий. При этом эффективность эксперимента повышается, если четко придерживаться выбранной стратегии, что позволяет сократить число опытов и тем самым уменьшить необходимые временные и иные затраты.

Литература

1. Ахназарова С.Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии : Учеб. пособие / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров – Москва : Высшая школа, 1985. - 327 с.

2. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В.Маркова, Ю.В. Грановский – Москва : Наука, 1976. - 277 с.

3. Грановский Ю.В. Основы планирования экстремального эксперимента для оптимизации многофакторных технологических процессов : Учеб. пособие / Ю.В. Грановский - Москва, МИНХ им. Плеханова, 1971. - 73 с.

4. Володарский Е.Т. Планирование и организация измерительного эксперимента / Е.Т. Володарский, Б.Н.,Малиновский, Ю.М. Туз – Киев : Вища школа,1987. - 280 с.

5. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании и оптимизации технологических процессов. / А. А. Спиридонов, Н. Г. Васильев. – Свердловск : УПИ им. С. М. Кирова, 1975. - 184 с.

6. Иванова В.М. Математическая статистика / В.М. Иванова, В.Н. Калинина, Л.А. Нешумова – Москва : Высшая школа,1981. - 371 с.

7. Лисенков А.Н. Математические методы планирования многофакторных медико-биологических экспериментов / А.Н. Лисенков – Москва : Медицина,1979.- 344 с.

8. Барабащук В.И. Планирование эксперимента в технике / В.И. Барабащук, Б.П. Креденцер, В.И. Мирошниченко – Киев : Техніка, 1984. - 200 с.

Автори статті

Сторчак Каміла Павлівна – к.т.н., доцент, професор кафедри комутаційних систем, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна. Тел. +38 097 946 08 09. E-mail: kpstorchak@ukr.net

Довженко Тимур Павлович - аспірант кафедри комутаційних систем, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна. Тел.: +38 096 689 41 05. E-mail: timurdov@ukr.net

Authors of the article

Storchak Kamila Pavlivna - candidate of science (technic), Associate Professor, Professor of Department of Switching Systems, Kyiv, Ukraine. Tel. +38 097 946 08 09. E-mail: kpstorchak@ukr.net

Dovzhenko Timur Pavlovich - post-graduate student of Department of Switching Systems, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine. Tel. +38 096 689 41 05. E-mail: timurdov@ukr.net

Дата надходження в редакцію: 17.03.2016 р. Рецензент: д.т.н., проф. К.С. Сундучков