

11. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

11.1. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ КОНТЕЙНЕРНЫХ ГРУЗОВ НА ОСНОВЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПЛАНОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Зубарев Ю.Я., д.т.н., профессор кафедры вычислительных систем и информатики Государственного университета водных коммуникаций;
 Русинов И.А., к.т.н., доцент кафедры экономики и основ управления Государственной морской академии имени адмирала С.О. Макарова

Формализуется задача идентификации процессов переработки контейнерных грузов в классе полиномиальных моделей на основе вычислительного эксперимента. Предлагаются оптимальные планы вычислительного эксперимента 2-го и 3-го порядков, позволяющие существенно повысить точность расчета показателей качества процессов в различных режимах функционирования.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Увеличение объемов контейнерных перевозок предъявляет все более жесткие требования к качеству функционирования специализированных терминалов, в которых осуществляется переработка грузов, прибывающих на морских и речных судах. Неотъемлемая часть специализированного терминала – каналы переработки грузов, которыми в частных случаях являются морские и речные причалы.

В [1] были рассмотрены модели процессов переработки контейнерных грузов в предельных стационарных (установившихся) и динамических режимах. Однако применение этих моделей при оперативном принятии оптимальных решений встречает определенные затруднения в связи со сложностью оптимизации в установившихся режимах и определению характеристик процессов в динамических (переходных) режимах. Для повышения эффективности оперативного управления процессами переработки грузов возникает необходимость в создании комплекса согласованных и информационно совместимых полиномиальных моделей, представляющих собой полиномиальные зависимости так называемых функций отклика Y_1, Y_2, \dots, Y_m от управляемых факторов x_1, x_2, \dots, x_n . Функции отклика представляют собой численные характеристики целей исследования. Полиномиальные модели можно условно разделить на две группы. К первой относятся модели, у которых функции отклика представляют собой показатели качества процессов переработки контейнерных грузов в установившихся и переходных режимах. В установившихся режимах показателями процессов являются приведенные значения средних времен ожидания судов в очереди $\bar{t}_{ож}$ и пребывания в терминале \bar{t}_Σ и математические ожидания числа судов, находящихся в очереди \bar{d} и в терминале d_Σ . При идентификации динамических (переходных) режимов функциями отклика являются математические ожидания значений отрезков времени, за которые указанные выше показатели достигают уста-

новившихся или специально заданных значений. Факторами в указанных моделях являются характеристики процессов, к которым относятся коэффициент загрузки терминала φ и число причалов S . Применение вышеописанных моделей позволяет оперативно определять значения показателей качества процессов. Кроме того, эти модели могут быть положены в основу аналитических методов оптимизации процессов обработки грузов.

Во второй группе моделей в качестве функций отклика рассматриваются оптимальные значения характеристик процессов, в частности коэффициентов загрузки терминала и приведенной плотности прихода судов в порт. Факторами в этих моделях являются как отдельные характеристики процессов, например, число каналов, так и предельно допустимые значения показателей качества процессов, в частности среднее приведенное время ожидания. Таким образом, эти модели представляют собой зависимости значений отдельных характеристик оптимальных режимов системы обработки грузов от значений других характеристик и формализованных требований, предъявляемых к системе.

Определение коэффициентов полиномиальных моделей представляет собой задачу активной идентификации, которая решается с помощью методов планирования активного вычислительного эксперимента.

Планирование вычислительного эксперимента, осуществляемого с помощью компьютеров на основе вычислительных моделей процессов, и обработка результатов эксперимента согласно обобщенному методу наименьших квадратов позволяет определять значения указанных коэффициентов, обеспечивающих достаточно высокую адекватность полиномиальных моделей.

Вопросами планирования эксперимента посвящено большое число работ отечественных и зарубежных авторов. Однако большинство указанных работ посвящено планированию регрессионного эксперимента, предназначенного для натуральных испытаний реальных систем, а не вычислительных моделей. Вопросы планирования вычислительного эксперимента и синтеза оптимальных планов вычислительного эксперимента применительно к задачам исследования и оптимизации сложных технических систем рассмотрены в [2]. Однако использование предлагаемых в этих работах оптимальных планов активного эксперимента встречают определенные затруднения, связанные со спецификой процесса обработки судов.

Прежде всего следует учитывать целочисленность отдельных характеристик (число причалов, максимальное число судов в очереди), что ограничивает возможность варьирования значений факторов. Кроме того, ввиду специфики требований к точности модели, необходимо рассматривать различные законы распределения непрерывных и целочисленных факторов, что существенно осложняет синтез оптимальных планов вычислительного эксперимента, минимизирующих интегральную оценку аппроксимации (смещение).

Поэтому синтез планов активного вычислительного эксперимента для идентификации процессов обработки контейнерных грузов в классе полиномиальных моделей должен производиться с учетом вышеприведенных особенностей этого процесса.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ

Полиномиальные модели (ПМ) переработки грузов в общем случае могут быть представлены следующим образом:

$$K(\bar{x}, \bar{B}) = f^T(\bar{x})\bar{B}, \quad (1)$$

где

\bar{x} – вектор нормированных значений факторов;

$f^T(\bar{x})\bar{B}$ – вектор базисных функций ПМ;

$\bar{B} = [b_0, b_1, \dots, b_L]^T$ – вектор коэффициентов ПМ.

Будем считать, что в каждом конкретном случае может быть выбрана так называемая аппроксимируемая ПМ вида (1), которая с необходимой точностью описывает зависимость показателей процесса от исследуемых параметров. Однако определение этой модели во многих случаях не представляется возможным или целесообразным. Определяется аппроксимирующая модель процесса, который соответствует подвектор базисных функций $f_1(\bar{x})$, не содержащий отдельные компоненты вектора $f(\bar{x})$. Основные компоненты вектора $f(\bar{x})$, не вошедшие в подвектор базисных функций $f_1(\bar{x})$, объединяются в подвектор $f_2(\bar{x})$.

Для повышения точности аппроксимирующих ПМ необходимо выбрать планы вычислительного эксперимента (ПВЭ) таким образом, чтобы обеспечить необходимую идентификацию процесса, то есть минимизировать интегральную оценку ошибки аппроксимации, усредненную по заданным областям изменения фактора с учетом их закона распределения. Матрица моментов плана эксперимента представляется в виде:

$$M = \begin{bmatrix} M_{I,I} & M_{I,II} \\ M_{II,I} & M_{II,II} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $M_{I,I}$ и $M_{II,II}$ – подматрицы, соответствующие векторам $f_1(\bar{x})$, $f_2(\bar{x})$.

Необходимые и достаточные условия оптимальной идентификации записываются в виде матричного уравнения:

$$M^{-1}_{I,I} * M_{I,II} = A^{-1}_{I,I} * A_{I,II}, \quad (3)$$

где $A_{I,I}$ и $A_{I,II}$ – подматрицы матрицы моментов A закона распределения факторов. Структура матрица аналогична структуре матрицы M .

Ввиду сложности решения уравнения (3), в работах по планированию эксперимента рекомендуется использовать достаточные условия оптимальности, что существенно ужесточает требования к оптимальным планам. В настоящей работе формулируется задача определения в явном виде необходимых и достаточных условий оптимальной идентификации, упрощающих построение оптимальных планов.

В основу вычислительного эксперимента положены квазисимметричные планы, у которых все нечетные моменты планов равны нулю, а четные моменты, соответствующие непрерывным и целочисленным факторам, отличаются друг от друга. Будем считать, что непрерывным факторам процесса соответствует непрерывное симметричное распределение (равномерное, нормальное или трапециидальное), а целочисленным – дискретное симметричное. Авторами получены в явном виде

условия минимизации интегральной оценки ошибки распределения, выраженные через соотношения между соответствующими моментами плана и закона распределения. Опуская громоздкие преобразования, связанные с перемножением и обращением матриц моментов, запишем указанные соотношения. Если аппроксимируемая модель представляет собой полином третьего, а аппроксимирующая полином второго порядка, то соотношения между моментами плана 2-го порядка и моментами распределений примут следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_{4(1)}}{\lambda_{2(1)}} &= \frac{\alpha_{4(1)}}{\alpha_{2(1)}}; & \frac{\lambda_{4(2)}}{\lambda_{2(2)}} &= \frac{\alpha_{4(2)}}{\alpha_{2(2)}}; \\ \frac{\lambda_{22(1)}}{\lambda_{2(1)}} &= \frac{\alpha_{22(1)}}{\alpha_{2(1)}}; & \frac{\lambda_{22(2)}}{\lambda_{2(2)}} &= \frac{\alpha_{22(2)}}{\alpha_{2(2)}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\lambda_{2(1)}$, $\lambda_{4(1)}$, $\lambda_{22(1)}$, $\lambda_{2(2)}$, $\lambda_{4(2)}$ и $\lambda_{22(2)}$ – 2-й и 4-й моменты плана соответствующие непрерывным и дискретным параметрам;

$\alpha_{2(1)}$, $\alpha_{4(1)}$, $\alpha_{22(1)}$, $\alpha_{2(2)}$, $\alpha_{4(2)}$ и $\alpha_{22(2)}$ – 2-й и 4-й моменты плана, соответствующие непрерывному и дискретному закону распределения.

Если аппроксимируемая модель является неполным полиномом 4-го, а аппроксимирующая – полиномом третьего порядка, то соотношения между моментами можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_{42(1)}}{\lambda_{22(1)}} &= \frac{\alpha_{42(1)}}{\alpha_{22(1)}}; & \frac{\lambda_{42(2)}}{\lambda_{22(2)}} &= \frac{\alpha_{42(2)}}{\alpha_{2(2)}}; \\ \frac{\lambda_{42(2,1)}}{\lambda_{22(1,2)}} &= \frac{\alpha_{42(2,1)}}{\alpha_{22(1,2)}}; & \frac{\lambda_{42(1,2)}}{\lambda_{24(1,2)}} &= \frac{\alpha_{42(1,2)}}{\alpha_{22(1,2)}}; \\ \frac{\lambda_{222(1)}}{\lambda_{22(1)}} &= \frac{\alpha_{222(1)}}{\alpha_{22(1)}}; & \frac{\lambda_{222(2)}}{\lambda_{22(2)}} &= \frac{\alpha_{222(2)}}{\alpha_{22(2)}}; \\ \frac{\lambda_{222(1,1,2)}}{\lambda_{22(1,2)}} &= \frac{\alpha_{222(1,1,2)}}{\alpha_{22(1,2)}}; & \frac{\lambda_{222(2,2,1)}}{\lambda_{22(2,1)}} &= \frac{\alpha_{222(2,2,1)}}{\alpha_{22(2,1)}}; \\ \frac{\lambda_{222(1,2,2)}}{\lambda_{22(1,2)}} &= \frac{\alpha_{222(1,2,2)}}{\alpha_{22(1,2)}}. \end{aligned} \quad (5)$$

На основе соотношений (4) и (5) был произведен синтез планов 2-го и 3-го порядков, минимизирующих интегральную оценку ошибки аппроксимации.

Условия оптимальности аппроксимации наиболее просто наиболее просто могут быть удовлетворены при разработке непрерывных планов вычислительного эксперимента. Пусть процесс характеризуется факторами $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$. Непрерывным нормированным планом называется совокупность величин вида:

$$E = \left\{ \begin{matrix} \bar{x}_1^{(1)} & \dots & \bar{x}^{(u)} & \dots & \bar{x}^{(N)} \\ \xi_1 & \dots & \xi_u & \dots & \xi_N \end{matrix} \right\},$$

где x_u – значение фактора процесса в различных точках спектра плана;

ξ_u – величины, называемые относительными весами или частотами проведения наблюдений (эксперимента) в соответствующих точках плана;

Q – область изменения параметров.

Частоты наблюдения эксперимента ξ_u представляют собой долю наблюдений в u_{oi} точке при общем числе

наблюдений, принятом за единицу. Соответственно соблюдается равенство $\sum_{u=1}^N \xi_u = 1$.

Как известно, при расчетах на персональных компьютерах в одних и тех же точках спектра плана обеспечивается полная повторяемость результатов. Поэтому при использовании непрерывных планов вычислительного эксперимента отпадает необходимость в поиске соответствующих дискретных планов. Учет частот проведения вычислительного эксперимента (ВЭ) при разработке осуществляется путем использования обобщенного критерия наименьших квадратов, предусматривающего минимизацию суммы взвешенных квадратов отклонений:

$$S = \sum_{u=1}^N \xi_u [K(\bar{x}_u) - \hat{K}(\bar{x}_u)]^2, \tag{6}$$

где $K(\bar{x}_u)$ и $\hat{K}(\bar{x}_u)$ – значения показателей процесса в u_{oi} точке спектра плана, полученных соответственно в результате ВЭ и на основе ПМ.

Приравнявая к нулю векторную производную от суммы (6) и переходя к матричной форме записи, можно представить выражения для векторов коэффициентов ПМ в виде:

$$B = (X^T \xi X)^{-1} X^T \xi K, \tag{7}$$

где X – матрица наблюдений ПВЭ;

\bar{K} – вектор-столбец значений показателей в точках спектра ПВЭ;

$\xi = \text{diag}\{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N\}$ – диагональная матрица частот проведения эксперимента.

Квазисимметричные ПВЭ, как правило, состоят из отдельных квазисимметричных конфигураций, которые определяют подмножества точек спектра плана, соответствующие характерным точкам геометрических фигур, в частности вершинам или центрам граней параллелепипеда, звездным или центральным (нулевым) точкам.

Задача синтеза непрерывных квазисимметричных планов заключается в выборе типовых конфигураций, определения их размеров и частоты проведения экспериментов в точках спектров отдельных конфигураций, исходя из условий оптимальности, определяемых выбранным критерием. При этом предполагается, что точки спектра одной конфигурации имеют одинаковую частоту проведения экспериментов.

Нечетные моменты симметричных композиционных планов равны нулю, а величины четных моментов будут зависеть от видов конфигураций, входящих в план, частот проведения экспериментов в точках спектров этих конфигураций и от числа исследуемых факторов.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ КОНТЕЙНЕРНЫХ ГРУЗОВ В СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ

При решении этой задачи определяется первый тип моделей, когда в качестве функций отклика рассматриваются показатели процесса переработки грузов, в частности приведенное среднее время ожидания судна и время пребывания судна в терминале, а также среднее число судов в очереди и в терминале. Указанные модели могут быть использованы как при оперативной оценке качества процессов обработки контейнерных грузов, так и для реализации аналитических методов оптимизации исследуемых процессов.

В работе рассмотрены полиномиальные модели 3-го и 2-го порядков. Каждая из указанных моделей может быть использована для решения тех или иных задач оперативной оценки ситуации или поиска оптимального решения.

Будем считать, что величина коэффициента загрузки причала φ меняется от 0,5 до 0,9. Меньшие и большие значения φ не представляют интереса. Число причалов S меняется от трех до семи. Тогда нормированные значения факторов определяются выражениями:

$$x_1 = \frac{\varphi - \varphi_0}{\Delta\varphi} = \frac{\varphi - 0,75}{0,15}; \tag{8}$$

$$x_2 = \frac{S - S_0}{\Delta S} = \frac{S - 5}{2};$$

Рассмотрим полиномиальные модели 3-го порядка. Полиномиальные модели 3-го порядка указанных показателей можно представить в виде:

$$K(x_1, x_2) = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 = b_{111} x_1^3 + b_{222} x_2^3 + b_{122} x_1 x_2^2 + b_{211} x_2 x_1^2. \tag{9}$$

Здесь и далее $K(x_1, x_2)$ представляет собой значение показателя процесса обработки контейнерных грузов. В зависимости от решаемой задачи $K(x_1, x_2)$ может обозначать, как $\bar{r}_{ож}$ и \bar{r}_Σ , так и \bar{d} и \bar{d}_Σ . Произведем выбор размера конфигураций. Факторы в плане 3-го порядка должны иметь не менее пяти уровней. Такое же число значений имеет целочисленный параметр – число причалов S . Поэтому диапазон изменения коэффициентов загрузки причалов разобьем на четыре одинаковых интервала, что соответствует пяти уровням. Результаты нормирования, которые осуществлялись в соответствии с (8), сведем в первые три строки табл. 1.

Таблица 1

НОРМИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ

Параметры	Значения	Значения	Значения	Значения	Значения
x	-1	-0,5	0	+0,5	+0,7
S	3	4	5	6	7
$0,5 \leq \varphi \leq 0,9$	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90
$0,5 \leq \varphi \leq 0,7$	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70
$0,7 \leq \varphi \leq 0,9$	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90

Для повышения точности полиномиальных моделей целесообразно изменения коэффициента загрузки $\varphi(0,5 \div 0,9)$ разбить на два поддиапазона $(0,5 \div 0,7)$ и $(0,7 \div 0,9)$. При реализации вычислительных экспериментов, соответствующих указанным поддиапазнам в планах экспериментов меняются только значения параметров φ , которые в отдельных точках плана будут принимать значения, в соответствии с четвертой и пятой строками табл. 1.

Из условий оптимальности (5) следует, что основу двухфакторного плана 3-го порядка, минимизирующую смещение, составляют вершины двух пересекающихся прямоугольников. Стороны этих прямоугольников равны двойным размерам a_{11} и a_{21} , соответствующим нормированным значениям непрерывного фактора φ , и a_{12} и a_{22} , соответствующим нормированным значениям дискретного фактора S . Размеры, соответствующие норми-

рованными значениям дискретных факторов могут принимать только значения $a_{12} = 1$ и $a_{22} = 0,5$, а размеры, соответствующие непрерывным факторам, и значения приведенных частот определяются соотношениями:

$$4a^2_{11} + a^2_{21} = 3; \xi_1 = \frac{1}{30a^2_{11}}; \xi_2 = \frac{1}{30a^2_{21}}; \quad (10)$$

Возьмем $a_{21} = 1$. Тогда согласно (10):

$$a_{11} = 0,707; \xi_1 = \frac{1}{15}; \xi_2 = \frac{1}{30}.$$

Кроме того, необходимо ввести в план один комплект звездных точек, размер которого и частоты проведения эксперимента в этих точках выбираются произвольным образом. Возьмем $a_3 = 1$ и $\xi_3 = \frac{3}{20}$. Тогда

$$4\xi_1 + 4\xi_2 + 4\xi_3 = 1.$$

В верхней части табл. 1 приведен план эксперимента и значения показателей в точках плана в исследуемых режимах. Аналогичные результаты получаются для двух поддиапазонов коэффициента загрузки φ .

После обработки результатов вычислительного эксперимента на основе выражения (7) с учетом частот проведения эксперимента в отдельных точках плана получим полиномиальные модели 3-го порядка исследуемых показателей (табл. 2).

Коэффициенты полиномиальных моделей 3-го порядка среднего времени $\bar{t}_{ок}$ для различных диапазонов изменения коэффициента φ приведены в верхней части табл. 3. Столбцы табл. 3 соответствуют нормированным значениям компонентов векторов базисных функций (ВБФ) полиномиальных моделей указанных показате-

телей. В остальных столбцах приведены коэффициенты полиномиальных моделей, соответствующих различным планам и диапазонам изменения значения коэффициента φ , в основу которых положен один и тот же вектор базисных функций. Коэффициенты полиномов, приведенные в каждой строке таблицы, соответствуют одному и тому же компоненту ВБФ.

Для сравнительной оценки точности идентификации был рассмотрен стандартный план 3-го порядка для трех диапазонов изменения коэффициента загрузки φ . План включал в себе три конфигурации: вершины гиперкуба ($a_i = 1$) и два комплекта звездных точек ($a_2 = 1; a_3 = 0,5$). Значения коэффициентов полиномиальных моделей 3-го порядка, соответствующих стандартному плану, приведены в табл. 3.

Рассмотрим полиномиальные модели 2-го порядка. Они обладают несколько меньшей точностью, чем модели 3-го порядка. Однако анализ этих моделей позволяет наглядно оценить характер влияния отдельных параметров на значения показателей качества обработки контейнерных грузов. Кроме того, использование этих моделей в процессе оптимизации позволяет получить хотя и приближенные, но достаточно простые выражения для оптимальных значений параметров.

Для повышения точности указанных моделей при их определении используется план 2-го порядка, минимизирующий смещение. План включает в себя вершины квадрата, одну пару звездных точек, соответствующую непрерывному параметру φ , и две пары звездных точек, соответствующих целочисленному параметру S . Размер квадрата $a_i = 1$, а звездных точек a_3 и a_4 , соответствующих S , равны:

$$a_3 = 1; a_4 = 0,5.$$

Таблица 2

ОПТИМАЛЬНЫЕ ПЛАНЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ТРЕТЬЕГО И ВТОРОГО ПОРЯДКОВ ($0,5 \leq \varphi \leq 0,9$)

№	x_1	x_2	φ	S	Без учета взаимопомощи				С учетом взаимопомощи			
					$t_{ок}$	t_{Σ}	\bar{d}	d_{Σ}	t	t_{Σ}	d	d_{Σ}
План III порядка												
1	-1	-0,5	0,5	4	0,08696	1,086957	0,17391	2,173913	0,05940	0,83343	0,11881	1,666865
2	+1	-0,5	0,9	4	1,96938	2,969383	7,08978	10,68978	1,85567	2,81214	6,68041	10,12371
3	-1	+0,5	0,5	6	0,03305	1,033048	0,09914	3,099143	0,02314	0,84911	0,06942	2,547343
4	+1	+0,5	0,9	6	1,23354	2,233543	6,66113	12,06113	1,17562	2,14643	6,34833	11,59071
5	-0,707	-1	0,5586	3	0,22912	1,229118	0,38396	2,059756	0,17044	0,95877	0,28562	1,606711
6	+0,707	-1	0,8414	3	1,50444	2,50444	3,79751	6,321708	1,37019	2,29445	3,45863	5,791648
7	-0,707	+1	0,5586	7	0,03977	1,039772	0,15551	4,065715	0,03057	0,90562	0,11954	3,541136
8	+0,707	+1	0,8414	7	0,51975	1,519749	3,06122	8,951015	0,48578	1,44856	2,86115	8,531746
9	-1	0	0,5	5	0,05215	1,052149	0,13037	2,630371	0,03569	0,83461	0,08923	2,086515
10	+1	0	0,9	5	1,52499	2,524986	6,86244	11,36244	1,44323	2,40681	6,49455	10,83066
11	0	-1	0,7	3	0,54705	1,547049	1,14880	3,248804	0,45316	1,30929	0,95164	2,749505
12	0	+1	0,7	7	0,14321	1,143209	0,70172	5,601724	0,12327	1,04642	0,60403	5,127472
13	0	0	0,7	5	0,25189	1,251892	0,88162	4,381623	0,20779	1,09278	0,72725	3,824747
План II порядка												
1	-1	-1	0,5	3	0,15789	1,157895	0,23684	1,736842	0,11186	0,16779	0,87248	0,251678
2	+1	-1	0,9	3	2,72354	3,723537	7,35355	10,05355	2,57143	6,94286	3,52381	18,74571
3	-1	+1	0,5	7	0,02177	1,021771	0,07620	3,576198	0,01578	0,05522	0,86767	0,193257
4	+1	+1	0,9	7	1,02851	2,02851	6,47962	12,77962	0,98810	6,22501	1,96540	39,21759
5	-0,45	0	0,61	5	0,12755	1,127545	0,38901	3,439013	0,09743	0,94459	0,29717	2,881015
6	+0,45	0	0,79	5	0,50952	1,509518	2,01260	5,962596	0,44939	1,37069	1,77508	5,414244
7	0	-1	0,7	3	0,54705	1,547049	1,14880	3,248804	0,45316	1,30929	0,95164	2,749505
8	0	+1	0,7	7	0,14321	1,143209	0,70172	5,601724	0,12327	1,04642	0,60403	5,127472
9	0	-0,5	0,7	4	0,35721	1,357212	1,00019	3,800193	0,29214	1,15843	0,81799	3,243611
10	0	+0,5	0,7	6	0,18665	1,186654	0,78395	4,983948	0,15690	1,06171	0,65900	4,459181

Таблица 3

КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ $\bar{\tau}_{ож}$

ВБФ	Значения коэффициентов											
	Без взаимопомощи						С взаимопомощью					
	стандартный план			оптимальный план			стандартный план			оптимальный план		
	0,5-0,9	0,5-0,7	0,7-0,9	0,5-0,9	0,5-0,7	0,7-0,9	0,5-0,9	0,5-0,7	0,7-0,9	0,5-0,9	0,5-0,7	0,7-0,9
3-й порядок												
1	0,20801	0,11706	0,55231	0,21277	0,11700	0,55201	0,35382	0,08685	0,55167	0,33180	0,08823	0,55128
x1	0,33590	0,09634	0,44183	0,33590	0,09634	0,44183	0,30238	0,07737	0,42146	0,30238	0,08331	0,42146
x2	-0,16011	-0,08868	-0,30066	-0,16011	-0,08868	-0,30066	-0,12534	-0,06521	-0,30128	-0,12534	-0,06315	-0,30128
x1*x1	0,59799	0,03429	0,34130	0,58446	0,03496	0,33890	0,47138	0,03671	0,34113	0,44624	0,03347	0,33796
x1*x1*x1	0,40052	0,00353	0,19472	0,40052	0,00353	0,19472	0,40139	0,00868	0,21254	0,40139	0,00274	0,21254
x1*x1*x2	-0,25587	-0,01614	-0,13626	-0,25587	-0,01614	-0,13626	-0,25491	-0,01637	-0,13554	-0,25491	-0,01586	-0,13554
x1*x2	-0,38973	-0,06274	-0,27919	-0,38973	-0,06364	-0,27849	-0,37181	-0,05845	-0,27939	-0,37181	-0,05507	-0,27865
x2*x2	0,16554	0,06164	0,16094	0,16395	0,06115	0,16167	0,03110	0,05169	0,16178	0,01788	0,04981	0,16273
x2*x2*x1	0,15668	0,02437	0,11286	0,15668	0,02437	0,11286	0,15420	0,02615	0,12400	0,15420	0,02231	0,12400
x2*x2*x2	-0,04181	-0,02966	-0,06511	-0,04181	-0,02966	-0,06511	-0,03961	-0,02491	-0,06472	-0,03961	-0,02697	-0,06472
2-й порядок												
1	0,20695	0,11592	0,53393	0,22121	0,11604	0,53191	0,65416	0,07933	0,08719	0,79335	0,08131	0,08731
x1	0,84087	0,12441	0,74038	0,76255	0,10992	0,62830	0,80657	0,10416	0,10911	0,72949	0,07791	0,09530
x2	-0,37250	-0,12698	-0,45961	-0,30856	-0,11972	-0,40839	-0,33488	-0,09876	-0,09876	-0,27119	-0,09185	-0,09185
x1*x1	0,60409	0,04046	0,39343	0,57472	0,04083	0,38751	0,30461	0,03244	0,03912	0,01757	0,02607	0,03946
x1*x2	-0,38973	-0,06693	-0,32280	-0,38973	-0,06693	-0,32280	-0,37181	-0,05845	-0,05845	-0,37181	-0,05845	-0,05845
x2*x2	0,16065	0,06115	0,18254	0,15021	0,06083	0,18763	-0,14663	0,06245	0,04975	-0,24855	0,06175	0,04945

Величина звездного плеча параметра φ и приведенные частоты проведения эксперимента в точках плана, соответствующих различным конфигурациям, определяются исходя из значения моментов, соответствующих равномерному и пятиуровневому дискретному распределениям. В результате получим следующие значения для характеристик плана:

$$a_2 = 0,45; \xi_1 = 0,0255; \xi_2 = 0,0255; \xi_3 = 0,0918; \xi_4 = 0,122.$$

В нижней части табл. 2 приведен план 2-го порядка, минимизирующий смещение, и значения среднего времени ожидания в точках планов, соответствующих исследуемым режимам и диапазону изменения коэффициента загрузки причалов $0,5 \leq \varphi \leq 0,9$

Значения коэффициентов полиномиальных моделей второго порядка для значений среднего времени ожидания в очереди соответствующих оптимальным и стандартным планам, приведены в нижней части табл. 3.

Полученные полиномиальные модели могут быть использованы для оперативной оценки показателей качества стационарных процессов обработки контейнерных грузов и выбора оптимальных характеристик, исходя из требований, предъявленным указанным процессам.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ

Произведем сравнительную оценку точности на основе метода статистических испытаний. С этой целью выберем случайным образом 500 точек, предполагая при этом, что величина φ распределена по равномерному закону, а величина S может принимать с равной вероятностью целочисленные значения от трех до семи. Тогда ошибка полиномиальной модели ΔK , представляющая собой разницу значений соответствующего показателя, полученных на основе вычислительной и

полиномиальной моделей, будет также случайной величиной. В качестве показателя рассматривалось приведенное среднее время ожидания в очереди $\bar{\tau}_{ож}$. Выражения для статистических характеристик выражения ошибки имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \alpha_2^*(\Delta\tau_{ож}) &= J^*(\Delta\bar{\tau}_{ож}) = \frac{1}{N} \sum_{w=1}^w (\bar{\tau}_{ож} - \hat{\tau}_{ож})^2; \\ M^*(\Delta\tau_{ож}) &= \frac{1}{N} \sum_{w=1}^w (\bar{\tau}_{ож} - \hat{\tau}_{ож}); \\ D^*(\Delta\tau_{ож}) &= \alpha_2(\Delta\bar{\tau}_{ож}) - [M(\Delta\bar{\tau}_{ож})]^2; \\ \delta^*(\Delta\tau_{ож}) &= \sqrt{D^*(\Delta\tau_{ож})}. \end{aligned} \tag{11}$$

где $M^*(\Delta\tau_{ож})$ – статистическая оценка математического ожидания среднего приведенного времени ожидания в очереди;

α_2^* – статистическая оценка 2-го центрального момента, а следовательно, и интегральной квадратичной оценки ошибки аппроксимации;

$D^* = \delta^*$ – оценки дисперсии и средней квадратической оценки.

Для сравнительной оценки точности аппроксимации была определена аппроксимируемая модель 4-го порядка.

Результаты расчетов статистических характеристик сведены в табл. 4.

В табл. 4 приведены значения статистических характеристик для 15 различных моделей 4-го, 3-го и 2-го порядков, полученных на основе оптимальных и стандартных планов вычислительного эксперимента, соответствующих трем различным диапазонам изменения коэффициента загрузки причала φ .

Рассмотрим первый диапазон изменения $0,5 \leq \varphi \leq 0,9$. Как и следовало ожидать, наибольшую точность обеспечивает план 4-го порядка.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОЧНОСТИ ПМ

Характеристики	Диапазон	4-й порядок	3-й порядок		2-й порядок	
			Оптимальный	Стандартный	Оптимальный	Стандартный
<i>M</i>	0,5-0,9	-0,004505485	-0,024184257	-0,035451117	-0,038521956	-0,039565570
<i>J</i>		0,000539304	0,003202758	0,005769533	0,013077800	0,034882653
δ		0,022781668	0,051165221	0,067177016	0,107674782	0,182530048
<i>M</i>	0,5-0,7	0,000022767	-0,000370980	-0,001029324	-0,001344426	-0,000872526
<i>J</i>		0,000000151	0,000007297	0,000007527	0,000095181	0,000160766
δ		0,000387968	0,002675634	0,002543151	0,009663023	0,012649285
<i>M</i>	0,7-0,9	0,008402980	0,003772739	0,036461816	0,059372679	0,158802749
<i>J</i>		0,000112092	0,000382507	0,002088054	0,013863115	0,034660171
δ		0,006440628	0,019190453	0,027542521	0,101675957	0,097169222

Статистическая оценка среднеквадратического отклонения модели 4-го порядка не превышает 0,23 и, как видно из (рис. 1-3) в большинстве случаев не превышает 0,05. Модели 3-го порядка дают худшую точность, причем оценки математического ожидания и среднеквадратичного отклонения ПМ ($\varphi = 0,5 \div 0,9$), построенного на основе стандартного плана, соответственно на 40% и 30% больше, чем у модели, построенной на основе оптимального плана.

Из рис. 1 соответствующего стандартному плану 3-го порядка, видно, что в этом случае существует определенная вероятность достаточно большой ошибки. Таким образом, как видно из табл. 4 и рис. 1-3, применение оптимального плана, минимизирующего квадратичную оценку ошибки аппроксимации, значительно повышает точность полиномиальной модели.

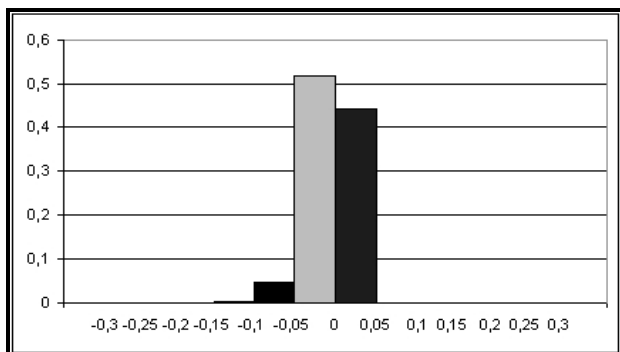


Рис. 1. Статистические плотности распределения ошибки аппроксимации (ПМ 4-го порядка)

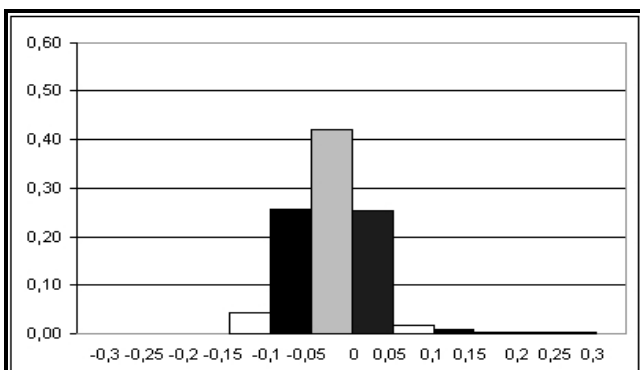


Рис. 2. Статистические плотности распределения ошибки аппроксимации (оптимальная ПМ 3-го порядка)

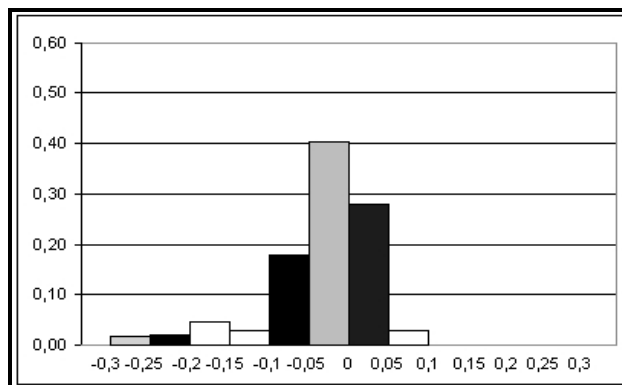


Рис. 3. Статистические плотности распределения ошибки аппроксимации (стандартная ПМ)

Разбиение диапазона φ на два поддиагона также существенно повышает точность полиномиальных моделей. Так, для поддиагона $0,5 \leq \varphi \leq 0,7$ все статистические оценки ошибки аппроксимации имеют достаточно малые значения. Это объясняется сравнительно малыми значениями $\bar{\tau}_{ож}$ в указанном поддиапазоне. Наибольший интерес представляет собой следующий диапазон $0,7 \leq \varphi \leq 0,9$, которому, как было показано в [1], соответствует большинство оптимальных значений коэффициента загрузки причалов φ , полученных на основе различных критериев оптимальности. Как видно из табл. 4, статистическое математическое ожидание ошибок, соответствующая моделям, полученным на основе стандартных планов, значительно превышает математические ожидания ошибок, полученных на основе оптимальных планов. Это наглядно иллюстрируется статистическими плотностями распределения ошибок, изображенными на (рис. 4-6). Увеличение математического ожидания ошибки приводит к существенному увеличению интегральной квадратичной оценки ошибки аппроксимации.

Ошибка оптимальной полиномиальной модели 3-го порядка с вероятностью $p = 0,98$ не превышает 0,04 от среднего времени обработки судна, что значительно меньше величины разброса этой величины в условиях эксплуатации контейнерного терминала. Поэтому как для оперативной оценки показателей качества процесса переработки контейнерных грузов, так и для аналитических методов оптимизации целесообразно пользоваться оптимальными методами 3-го порядка, соответствующими двум поддиапазонам изменения

φ . Оптимальные модели 2-го порядка можно применять для ориентировочной оценки оптимального значения φ на основе более простых выражений.

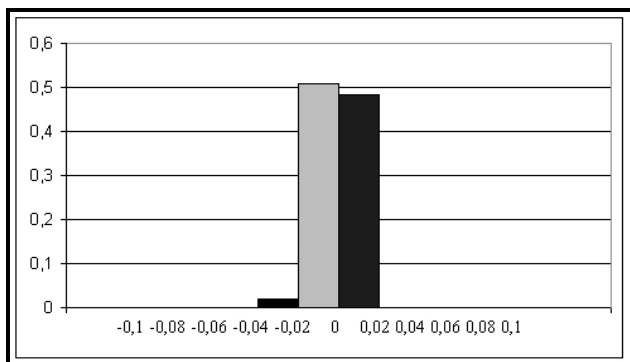


Рис. 4. Статистические плотности распределения ошибки ($\varphi = 0,7 \div 0,9$) (МП 4-го порядка)

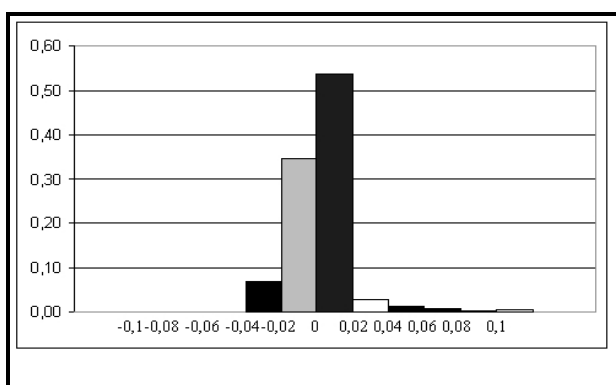


Рис. 5. Статистические плотности распределения ошибки ($\varphi = 0,7 \div 0,9$) (оптимальная МП 3-го порядка)

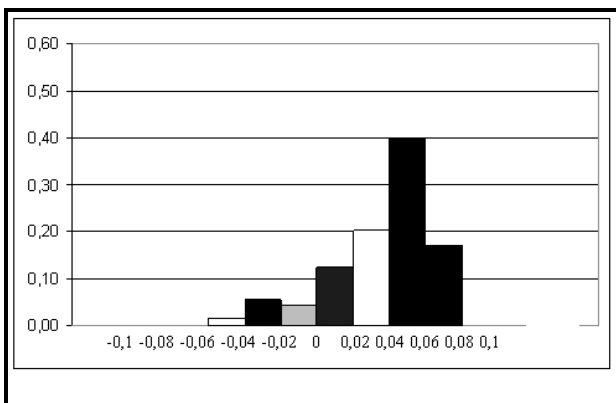


Рис. 6. Статистические плотности распределения ошибки ($\varphi = 0,7 \div 0,9$) (стандартная МП 3-го порядка)

Литература

1. Русинов И.А. Идентификация процессов переработки контейнерных грузов на основе технико-экологических критериев // Аудит и финансы. – 2008. – №4.
2. Зубарев Ю.Я. и др. Планирование вычислительного эксперимента в электроэнергетике. – СПб.: Энергоатомиздат, 2000. – 327 с.

Русинов Игорь Александрович

Зубарев Юрий Яковлевич

РЕЦЕНЗИЯ

Увеличение объема перевозок требует создания методов исследования и оптимизации процессов переработки контейнерных грузов на специализированных терминалах.

Решение этих задач на основе моделей массового обслуживания может осуществляться только численными методами, что во многих случаях приводит к большому объему вычислений и не обеспечивает наглядности полученных результатов. Поэтому тематика рецензируемой работы, посвященной определению полиномиальных моделей показателей качества процессов, является актуальной и представляет несомненный практический интерес.

Использование полиномиальных моделей позволяет решать оптимизационные задачи аналитическими методами, причем решения получаются в общем виде, т.е. в виде аналитических зависимостей. Это существенно упрощает процесс оптимизации и дает возможность оценить влияние различных внешних факторов на оптимальные значения параметров.

В работе предлагаются оптимальные непрерывные планы вычислительного эксперимента, обработка которых на основе обобщенного метода наименьших квадратов, позволяет существенно повысить точность полиномиальных моделей. Приводится детальный статистический анализ погрешностей полиномиальных моделей в различных подобластях изменения параметров.

Достаточно высокий теоретический уровень работы и ее практическая значимость позволяет рецензенту рекомендовать ее к изданию.

Марлей В.Е. д.т.н. профессор, заведующий кафедрой вычислительных систем и информатики СПГУВК.

11. COMPUTING MACHINERY AND INFORMATION SCIENCE

11.1. IDENTIFICATION OF PROCESSES OF HANDLING OF CONTAINER CARGOES ON THE BASIS OF OPTIMUM PLANS OF COMPUTING EXPERIMENT

J.J. Zubarev, Doctor of Science (Technical), Chairs of Computing Systems and Computer Science of the State University of Water Communications;

I.A. Rusinov, Candidate of science (Technical), the Senior Lecturer of Chair of Economy and Bases of Control of the State Marine Academy of a name of Admiral S.O. Makarov

There are considered the task of identification of processes of handling of container cargoes in a class polynomial models is formalized on the basis of computing experiment. Optimum plans of computing experiment of the second and third orders are offered, allowing essentially to increase accuracy of calculation of parameters of quality of processes in various modes of functioning.

Literature

1. I.A. Rusinov «Identification of processes of processing of container cargoes on the basis of technical and economic criteria. Audit and the Finance № 5, 2008.
2. Y.Y.Zubarev, etc. «Planning of computing experiment with electric power industry». Energoatomizdat, SPb, 2000. – 327 p.