

### 3.9. АНАЛИЗ МЕТОДОВ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ ГРУЗОВ В КОНТЕЙНЕРАХ

Русинов И.А., к.т.н.,

кафедра экономики и основ управления

*Государственная морская академия  
им. адмирала С.О. Макарова*

Разработаны технико-экономические критерии, связывающие экономические показатели (прибыль, затраты) с показателями качества переработки грузов (среднее число судов в очереди, среднее время ожидания судна в очереди, приведенная плотность, интенсивность прихода судов в порт). Эти разработки позволяют решать задачу выбора оптимального числа причалов специализированных терминалов для переработки планируемого объема перевозок. Автор дает корректное решение указанной задачи, исходя из критерия минимизации затрат.

В процессе эксплуатации и проектирования перегрузочных терминалов возникает ряд оптимизационных задач, среди которых необходимо отметить следующие:

- определение оптимального числа причалов и числа судов, исходя из планируемого объема перевозок каботажных грузов;
- планирование оптимальной загрузки перегрузочного терминала, в частности, определение оптимальной результирующей интенсивности потока прихода каботажных судов в порт;
- обоснование программы развития производственных мощностей перегрузочного терминала;
- проверка эффективности функционирования терминала.

Формализация задач оптимизации вызывает определенные сложности в связи с многокритериальностью процессов обработки каботажных грузов и, во многих случаях, отсутствием априорной информации, необходимой для получения численных решений этих задач.

Рассмотрим показатели качества процессов, которые необходимо учитывать при определении оптимальных решений. Наиболее известным и традиционным показателем качества работы терминала является коэффициент использования причального фронта, характеризующий количество грузов, переработка которых за единицу времени приходится на единицу длины причальной линии. Однако при известной интенсивности обработки каботажных судов, определяемых материально-техническими ресурсами, квалификацией персонала, расположением складских помещений и подъездных путей, максимальный коэффициент причального фронта достигается только при условии непрерывной замены одного судна другим, т.е. при стремлении коэффициента загрузки причала к единице. Такая организация работы терминала возможна лишь при наличии постоянной очереди судов, т.е. при увеличении времени ожидания (простоя) судов, что значительно ухудшает качество услуг, предоставляемых судоходным компаниям, и во многих случаях в соответствии с условиями контрактов может стать причиной для выставления штрафных санкций. Если же перегрузочный терминал и суда принадлежат одной компании, например как в случае с ОАО «ГМК «Норильский никель», то простой судов приводит к прямым убыткам этой компании. Поэтому коэффициент использования причальной линии является важнейшим, но далеко не единственным показателем работы

перегрузочного терминала. Кроме того, вычисление этого коэффициента требует большого объема исходных данных, которые не всегда бывают известны. Поэтому в большинстве случаев целесообразно использовать коэффициент загрузки причалов, который при заданной интенсивности обработки каботажных судов дает достаточно корректную косвенную оценку коэффициента использования причальной линии.

Большое значение имеют группы показателей, характеризующих среднее время ожидания судна и среднее время пребывания судна в терминале, а также пропорциональные этим показателям – средние значения судов, находящихся в очереди или в терминале. Эти показатели характеризуют качество услуг, так как ожидание судов в очереди приводит, как указывалось выше, к существенным потерям, которые определяются приведенными эксплуатационными расходами и потерями провозной способности судна, а их величина оценивается с помощью штрафных санкций, либо размером прямых убытков, как в случае с ОАО «ГМК «Норильский никель».

В результате, несмотря на увеличение грузооборота, излишнее увеличение коэффициента загрузки причалов становится экономически нерентабельным. При этом величина убытков возрастает с увеличением числа судов, простаивающих в ожидании освобождения причалов.

Третьей группой показателей являются экономические показатели, к которым относятся капитальные, текущие и приведенные затраты, а также показатели, характеризующие размеры текущих финансовых доходов. К последним относятся приведенные доходы, реальные доходы и, наконец, прибыль терминала. Анализ указанных экономических показателей выявил, что именно прибыль наиболее полно отражает коммерческую деятельность перегрузочного терминала, так как максимальная прибыль возможна только при его оптимальном функционировании. В случае, если производственная программа терминала задана (известны число судов и интенсивности входных потоков этих судов), т.е. известны ожидаемые приведенные доходы, то максимальной прибылью будут соответствовать минимальные приведенные затраты. Такие задачи возникают, например, при определении оптимального числа причалов. Учет всех групп показателей вызывает определенные сложности. Наиболее корректно задача решается в тех случаях, когда прибыль терминала или приведенные затраты могут быть выражены через коэффициент загрузки причалов и среднее число судов, находящихся в очереди. Однако в случае отсутствия необходимого объема исходных данных или неадекватности полученных оптимальных решений рассматриваемой оптимизационной задачи приходится пользоваться эвристическими методами, более гибко отражающими специфику задачи.

Оптимальные решения, полученные в результате проведенных расчетов, могут быть положены в основу любой из вышеперечисленных задач оптимизации процессов переработки грузов.

Формализация задач определения оптимальных решений с учетом нескольких показателей качества (задача многокритериальной оптимизации) является предметом теории принятия решений.

При этом предполагается известным конечное число вариантов решений. Тогда задача многокритериальной оптимизации сводится к сравнительной оценке указанных вариантов на основе критерия оптимальности

(функции предпочтения), под которым обычно понимается правило, обеспечивающее сопоставление различных вариантов решений и выбор оптимального варианта, например, числа судов и числа причалов. Указанное правило должно отражать все основные требования, предъявляемые к качеству процесса переработки грузов. Функция предпочтения основана на условиях предпочтительности сравниваемых вариантов решений.

Применение математических методов при принятии решений предполагает выбор специальной математической модели предпочтений, формализовано представляющей задачу многокритериальной оптимизации. В многокритериальных задачах оптимизации сравнительная эвристическая оценка вариантов по предпочтительности осуществляется не непосредственно, а при помощи заданных показателей качества, представляющих собой числовые функции  $K_1, K_2, \dots, K_l$  от оптимизируемых параметров  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Эти функции обычно называют показателями или критериями качества, специфика которых применительно к процессу переработки контейнерных грузов, была описана выше.

Показатели качества процессов называются однородными, если они имеют общую шкалу. Однако в практических задачах показатели качества процессов, как правило, заданы в шкалах отношений и имеют различные размерности. Поэтому при решении задач многокритериальной оптимизации неоднородные шкалы преобразуют в однородные, используя при этом метод нормирования (нормализации). В настоящее время используются различные способы нормирования показателей качества, более или менее отличающиеся друг от друга. Пусть на значение сравнительных показателей качества наложены односторонние ограничения. Тогда в зависимости от выбранного показателя качества его экстремальное значение может быть либо минимальным, либо максимальным.

Рассмотрим сначала вопросы нормирования минимизируемых показателей качества процесса (суммарное время пребывания в терминале, время ожидания), а затем по аналогии – максимизируемых показателей (коэффициент загрузки причала).

Определим правила нормирования минимизируемого показателя. Пусть для нормированных значений показателя справедливы следующие соотношения  $Z_j = 1$  при  $K_p = K_{pmax}$  и  $Z_j = 0$  при  $K_p = K_{pmin}$ .

Рассмотрим наиболее распространенный способ пропорционального нормирования показателя качества. В этом случае нормированные значения минимизируемого показателя будут определяться выражением:

$$Z_p = \frac{K_{pmax} - K_p}{K_{pmax} - K_{pmin}} \quad (1)$$

Соответственно нормированное значение максимизируемого показателя:

$$Z_p = \frac{K_p - K_{pmin}}{K_{pmax} - K_{pmin}} \quad (2)$$

Таким образом, в ряде случаев при выборе оптимальных решений, вместо значений показателей  $K_1, K_2, \dots, K_l$ , рассматриваются их нормированные значения  $Z_1, Z_2, \dots, Z_l$ . Нормированные показатели считаются однородными, если они имеют общую шкалу, т.е. для каждого показателя определены одинако-

вые замкнутые множества нормированных значений показателей  $Z_p (p = 1, 2, \dots, m)$ .

Рассмотрим бесконечное множество вариантов  $R$ , под которым будем понимать прямое произведение множеств  $Z_1, Z_2, \dots, Z_l$ , т.е.  $R = Z_1 * Z_2 * \dots * Z_l$ , где указанное произведение представляет собой множество всевозможных векторов  $[Z_1, Z_2, \dots, Z_l]^T$ . Функция предпочтения  $Y$  для исходной первоначально не формализованной ситуации может быть, построена самыми различными способами, причем следует стремиться, чтобы эти функции в наибольшей степени отражали предпочтения при выборе оптимальных решений.

### Критерии оптимальности процессов переработки грузов

Будем считать, что на значения показателей качества процессов переработки грузов накладываются односторонние ограничения вида:

$$K_p(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq K_{pmin}, \quad p = 1, 2, \dots, l_1;$$

$$K_p(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq K_{pmax}, \quad p = l_1 + 1, l_1 + 2, l_1 + \dots + l. \quad (3)$$

Кроме того, на значения оптимизируемых параметров процессов накладываются двухсторонние ограничения:

$$X_{imin} \leq X_i \leq X_{imax}. \quad (4)$$

Ограничения (3) и (4) определяют множество (область) допустимых значений параметров.

Оптимальное решение выбирается из всех допустимых решений. Предполагается, что оно обладает наилучшими с точки зрения принятого критерия оптимальности значения вектора  $\bar{Y}$  нормированных показателей качества.

В указанной постановке решение  $S'$  является наилучшим на множестве  $S$ , если справедливо неравенство:

$$Z_p(S') \geq Z_p(S''); \quad S'' \in S; \quad p = 1, 2, \dots, l. \quad (5)$$

Если существует несколько таких решений, то они эквивалентны. Если хотя бы для одного показателя неравенство (5) выполняется строго, то наилучшее решение является единственным. Если наилучшее решение технически реализуемо и удовлетворяет ограничениям (3) и (4), то оно принадлежит допустимому множеству решений  $L_d$ . Разобьем допустимое множество решений систем на два подмножества. К 1-му подмножеству будем относить неэффективные (худшие) решения. Решение  $X(S')$  называется неэффективным, если на множестве  $L_d$  существует хотя бы одно решение  $X(S'')$ , обладающее лучшим, в смысле безусловного критерия оптимальности, значением вектора нормированных показателей качества. В противном случае назовем решение эффективным (не худшим) и отнесем его ко 2-му подмножеству эффективных вариантов  $L_3$ , обладающему тем свойством, что все решения, принадлежащие ему, не могут быть улучшены с точки зрения принципа оптимальности по Парето.

Проблема выбора условного критерия оптимальности обычно сводится к отображению вектора нормированных показателей качества  $\bar{Z} = [Z_1, Z_2, \dots, Z_l]^T$  на функцию предпочтения (целевую функцию)  $Y = F(Z_1, Z_2, \dots, Z_l)$ , представляющую собой скалярную функцию оптимизи-

руемых показателей. Выбор оптимального решения заключается в определении допустимого решения, соответствующего экстремальному значению функции предпочтения. Выбор условного критерия качества в каждом конкретном случае определяется специфическими особенностями процесса обработки грузов.

Оптимальный вариант процесса  $S_0$  должен являться эффективным вариантом, входящим в множество эффективных вариантов  $L_3$ .

В настоящее время все более широкое распространение находят методы, основанные на принципе гибкого приоритета.

Принцип гибкого приоритета в общем случае сводится к дополнительному нормированию пространства показателей, что позволяет в разумных пределах учесть степень предпочтения одного показателя перед другим. При этом предполагается, что влияние каждого  $p$ -го единичного показателя на величину функции предпочтения зависит не только от нормированного значения этого показателя, но и от некоторого весового коэффициента  $M_p$ , характеризующего степень важности показателя. Тогда функция предпочтения может быть представлена в виде функции от нормированных значений единичных показателей  $Z_p$  и весовых коэффициентов  $M_p$ . В настоящее время известен ряд самых различных видов функций предпочтения, учитывающих принцип гибкого приоритета, среди которых наиболее широкое распространение получили функции вида:

$$Y = \left[ \sum_{p=1}^n M_p Z_p^V \right]^{1/V} \quad (6)$$

При этом предполагается, что весовые коэффициенты также пронормированы, т.е.  $\sum_{p=1}^m M_p = 1$ . Изменяя значения  $V$  в выражении (6), можно получить различные модификации функций предпочтения.

Если взять  $V = 1$ , то получим аддитивную функцию вида:

$$Y = \sum_{p=1}^m M_p Z_p \quad (7)$$

Эта функция, основанная на среднеарифметической оценке, нашла наиболее широкое применение при решении задач многокритериальной оптимизации. Последнее объясняется как простотой интерпретации этой функции предпочтения, так и тем обстоятельством, что ее применение может быть обосновано с точки зрения теории аддитивной полезности. При этом, как и ранее, учитываются не только ограничения на диапазон изменения параметров (4), но и ограничения на значения единичных показателей вида (3). Однако может оказаться, что оптимальное решение будет лежать на границе области, определяемой неравенствами (3), то есть недостаточный уровень некоторых показателей будет компенсирован за счет высокого уровня других показателей. Такой подход может оказаться неприемлемым во многих практических случаях.

Для семейства выражений (6) достаточно распространенной является функция предпочтения, основанная на средней геометрической оценке вида:

$$Y = \prod_{p=1}^m Z_p^{M_p} \quad (8)$$

которая получена при  $V \rightarrow 0$ .

Как видно из выражения (8), эта функция предпочтения существенно уменьшается, а затем обращается в нуль при стремлении к нулю любого из единичных показателей.

В настоящее время в методиках по комплексной оценке качества рекомендуется при большом разбросе нормированных значений единичных показателей пользоваться среднегеометрической, а при малом – среднеарифметической оценками. Аналогичным образом могут быть получены выражения для других видов функций предпочтения, характеризующихся различными значениями  $V$ .

В настоящей статье предлагается критерий, основанный на нелинейной неаддитивной функции предпочтения.

В отличие от рассмотренных выше функций предпочтения, указанная функция обладает большей потенциальной адекватностью, что позволяет учесть нелинейность зависимости функции предпочтения от единичных показателей и взаимное влияние различных единичных показателей.

## Литература

1. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания [Текст] / Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко. – М.: Наука, 1987. – 336 с.
2. Кузин Л.Т. Основы кибернетики [Текст]: в 2 т. / Л.Т. Кузин. – М.: Энергия, 1979. Т. 2. – 584 с.
3. Русинов И.А. Обработка и хранение рефрижераторных грузов на специализированном терминале [Текст] / И.А. Русинов. – СПб.: СПБИИ РАН, 2005. – 168 с.

## Ключевые слова

Многокритериальная оптимизация; грузовые терминалы; причалы; суда; планирование.

*Русинов Игорь Александрович*

## РЕЦЕНЗИЯ

В настоящее время возможности экстенсивного роста большинства существующих портов исчерпаны, так как все они в той или иной степени «зажаты» активно развивающейся в последнее время городской инфраструктурой. В связи с этим дальнейшее развитие таких портов возможно только за счет оптимизации работы действующих терминалов в целях повышения интенсивности погрузочно-разгрузочных работ и максимального сокращения сроков обработки морских судов. При этом наиболее важной задачей является оптимизация процессов переработки контейнерных грузов, исходя из определенных критериев оптимальности. Поэтому тематика статьи, посвященная оптимизации процессов переработки грузов, является актуальной и представляет как теоретический, так и практический интерес.

Теоретической основой работы являются разработанные технико-экономические критерии, при формулировании которых автор связал экономические показатели (прибыль, затраты) с показателями качества переработки грузов (среднее число судов в очереди, среднее время ожидания судна в очереди, приведенная плотность, интенсивность прихода судов в порт). Такой подход позволяет решать самые различные задачи. Первой из важнейших задач, возникающих при переработке контейнерных грузов, является выбор оптимального числа причалов в специализированных терминалах, обеспечивающих переработку планируемого объема перевозок. Автор дает корректное решение указанной задачи, исходя из критерия минимизации затрат.

Второй оптимизационной задачей, рассмотренной в статье, является выбор оптимальной загрузки терминала при заданном числе причалов. Автор определяет такую интенсивность потока прихода судов в порт, при котором величина прибыли была бы максимальной.

Решение этих задач в процессе проектирования и эксплуатации контейнерных терминалов позволяет существенно повысить эффективность их использования.

Считаю полезным и целесообразным публикацию рецензируемой работы в журнале «Аудит и финансовый анализ» в разделе, содержащем статьи по управлению и информатике.

*Зубарев Ю.Я., д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский Государственный Университет Водных Коммуникаций*

### 3.9. ANALYSIS OF METHODS MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF PROCESSES OF CARGO HANDLING IN CONTAINERS

I.A. Rusinov, Candidate of Sciences (Technical),  
Associate Professor Department  
«Economy and Bases of Management»

*State Maritime Academy named after Admiral Makarov*

In course of service and designing of cargo terminals there is a number optimization problems, in particular:

- definition optimum numbers of berths and numbers of vessels;
- planning of optimum loading of the cargo terminal;
- substantiation of the program of development of capacities of the cargo terminal.

Check of efficiency of functioning of the cargo terminal.

The analysis of methods multi-objective is given to optimization of processes of cargo handling in containers in article.

#### **Literature**

1. B.V. Gnedenko, Irina Kovalenko. «Introduction to the theory of queuing» M., Science, 1987, 336 p.
2. L.T. Kuzin. «Fundamentals of Cybernetics,» Book 2, M., Energy, 1979, 584 p.
3. I.A. Rusinov. «The processing and storage of refrigerated cargo on a specialized terminal», SPB, SPbII Russian Academy of Sciences, 2005. 168 p.

#### **Keywords**

Multi-objective optimization; cargo terminals; berths; vessels; planning.