

УДК62-192:873

Зубко Н.Ф., к.т.н.; Немчук А.О., к.т.н.

Одесский национальный морской университет

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЗЕРВА ПАРКА ПОРТОВЫХ ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ МАШИН

***Аннотация.** Предложена математическая модель решения оптимизационной задачи резервирования в составе парка перегрузочных машин порта. Модель является достаточно универсальной и может быть легко приспособлена к парку технических средств большинства производственных объектов. Целевая функция существенно упрощается применительно к отдельным специализированным комплексам, которые обычно содержат небольшое число типов основных машин.*

***Ключевые слова:** перегрузочная машина, эксплуатационные состояния, надёжность, резервирование, критерий оптимизации.*

***Анотація.** Запропоновано математичну модель рішення оптимізаційної задачі резервування в складі парку перевантажувальних машин порту. Модель є досить універсальною і може бути легко пристосована до парку технічних засобів більшості виробничих об'єктів. Цільова функція зазнає суттєвого спрощення стосовно окремих спеціалізованим комплексам, які зазвичай містять невелику кількість типів основних машин.*

***Ключові слова:** перевантажувальна машина, експлуатаційні стану, надійність, резервування, критерій оптимізації.*

***Annotation.** A mathematical model is proposed for solving the optimization task of reserving in the fleet of port handling machines. The model is quite versatile and can be easily adapted to the fleet of technical facilities of most objects of production. The objective function is greatly simplified with respect to individual specialized complexes, which usually contain a small number of types of main machines.*

***Key words:** reloading machine, operational states, reliability, reservation, optimization criterion.*

**Постановка задачи.** Задачей данного исследования является разработка математической модели оптимизации резерва парка портовых перегрузочных машин с учётом их надёжности и условий технологического использования.

**Материалы исследования.** Оптимальный резерв парка портовых перегрузочных машин (ППМ) зависит от показателей их надёжности, характера и интенсивности использования в порту,

соотношения числа машин и грузооборота, структуры грузооборота и производительности машин, а также от ряда других факторов. Например, простой по техническим причинам ППМ, занятых обработкой судов, приводит, как правило, к большим потерям, чем простой ППМ на складе. Следовательно, и резервы для каждой группы машин должны быть разными. Важными факторами влияния на уровень резервирования различных групп машин в составе парка являются их неодинаковые стоимости и затраты на эксплуатацию.

В зависимости от комплексности задачи (для транспортного узла, порта или для отдельного технологического комплекса) могут быть использованы разные критерии оптимизации. Независимо от этого применительно к нашей задаче критерий оптимизации  $J$  удобно представить в следующей форме:

$$J = \sum_{i=1}^{\omega} E_i (\overline{P\{i\}} - P\{i\}) \pm C_m \quad (1)$$

где  $i = \overline{1, \omega}$  — символы состояния ППМ (в состоянии использования, в состоянии отказа и т. д.);  $E_i$  — компоненты критерия оптимизации (расходы на эксплуатацию, доходы от перегрузочных работ и т. п.), соответствующие состоянию  $i$ ;  $\overline{P\{i\}}, (P\{i\})$  — в предположении стационарного периода эксплуатации системы вероятности того, что машина находится (не находится) в состоянии  $i$ ;  $C_m$  — суммарные затраты на приобретение машин (знак «-» или «+» выбирается в зависимости от конкретного содержания критерия оптимизации, например: «прибыль» или «эксплуатационные затраты»).

Введем следующие обозначения:  $j = \overline{1, d}$  — код модели ППМ;  $d$  — число моделей ППМ;  $g_j$  - число машин данной модели  $j$ ;  $C_j$  — стоимость одной машины модели  $j$ .

Вероятности  $P\{i\}$  зависят от многих факторов: технических характеристик машин, показателей их надежности, структуры грузооборота и др. Будем полагать, что все характеристики и показатели, определяющие  $P\{i\}$ , известны и для расчётных условий эксплуатации системы являются постоянными величинами. В частности, применительно к парку машин это финальные вероятности пребывания его с заданным числом работоспособных машин. В этом случае значение критерия оптимизации (1) будет изменяться только с изменением общего количества  $N_c$  и соотношения моделей машин:

$$N_c = \sum_{j=1}^d (n_j + m_j + s_j). \text{ Здесь } n_j - \text{число машин каждой модели,}$$

необходимое для освоения планового грузооборота перегрузочного комплекса, рассчитанное по действующим для данной отрасли нормам технологического проектирования (в дальнейшем будем называть *числом рабочих машин*);  $m_j$  и  $s_j$  - соответственно, число машин нагруженного и ненагруженного резерва.

Суммарные затраты на приобретение машин составляют:

$$C_M = \sum_{j=1}^d c_j (n_j + m_j + s_j). \quad (2)$$

При указанных предположениях задачу оптимизации числа резервных машин каждой модели можно сформулировать следующим образом:

найти значения  $m_j$  и  $s_j$ , доставляющие

$$\min (\max) J = \sum_{i=1}^{\omega} E_i (\bar{P}\{i\} - P\{i\}) \pm \sum_{j=1}^d c_j (n_j + m_j + s_j), \quad (3)$$

при условии, что

$$\sum_{j=1}^d c_j (n_j + m_j + s_j) \leq C_o,$$

где  $C_o$  — допускаемые затраты на приобретение машин.

В дальнейшем группы машин или технологические линии будем называть системой. Возможные состояния машин системы применительно к рассматриваемой задаче:

$i = 1$  - машина находится в работоспособном состоянии и используется на объекте;  $i = 2$  - в работоспособном состоянии, но в ожидании использования;  $i = 3$  - в плановом ТО и имеется заявка на использование;  $i = 4$  - то же, но заявка на использование отсутствует;  $i = 5$  - в плановом ремонте, имеется заявка на использование;  $i = 6$  - то же, но заявки на использование нет;  $i = 7$  - в состоянии отказа.

В практике эксплуатации машин, иногда одновременно с устранением отказов, выполняют некоторые плановые работы по ТО и ремонту. Однако при этом суммарное время плановых ТО или ремонтов за достаточно длительный период эксплуатации существенно не меняется. Следовательно, не меняются существенно и соответствующие стационарные вероятности  $P\{i\}$ .

Условия технологического использования ППМ в первую очередь характеризуются видом груза и вариантом работ. Эти два фактора существенно влияют на показатели надежности машины, режимы ТО и плановых ремонтов, т. е. определяют значения вероятностей  $P\{i\}$ . От видов грузов и вариантов работ зависят также значения компонент  $E_i$  критерия оптимизации. Для учета указанных

факторов введем дополнительные символы:  $\beta$  — код наименования груза;  $v$  — число наименований грузов;  $x$  — код варианта работы машины;  $r_\beta$  — число вариантов работы с грузом  $\beta$ .

С учетом введенных символов из формулы (3) математическая форма целевой функции оптимизационной задачи принимает вид;

$$\min(\max) \left\{ \left( \sum_{i=1}^7 \sum_{\beta=1}^v \sum_{x=1}^{r_\beta} \sum_{j=1}^{d_{\beta x}} E_{i\beta x j} P_{\beta x j} \{i\} \right) K_{zj} + \right. \\ \left. + \left[ \sum_{\beta=1}^v \sum_{x=1}^{r_\beta} \sum_{j=1}^{d_{\beta x}} E_{8\beta x j} P_{\beta x j} \{i=1\} + E_{9\beta x j} [1 - P_{\beta x j} \{i=1\}] \right] \times \right. \\ \left. \times [1 - K_{zj}] \pm \sum_{j=1}^d c_j (n_j + m_j + s_j); \right. \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^d c_j (n_j + m_j + s_j) \leq C_o. \quad (6)$$

В формуле (5) показатель  $K_{zj}$  соответствует коэффициенту готовности группы машин модели  $j$ , занятых переработкой груза  $\beta$ . Эта группа машин рассматривается как восстанавливаемая система скользящего резервирования. Коэффициент готовности системы зависит от уровня и вида резервирования [2]. Поскольку варьируемые параметры  $n_j$ ,  $m_j$  и  $s_j$  при прочих равных условиях однозначно определяют значение критерия оптимальности (3), целевая функция (5) и линейное ограничение (6) являются обобщенной математической формой рассматриваемой задачи. Знак «+» или «-» перед последним слагаемым в (5) выбирается исходя из содержания критерия оптимизации.

В современных условиях хозяйственной деятельности предприятий наиболее эффективным критерием оптимальности при решении подобных задач является прибыль. При обосновании структуры парка перегрузочных машин порта плановая прибыль от использования машин модели  $j$  при перегрузке груза вида  $\beta$ :

$$E = \sum_{\beta} \sum_j \delta_{\beta j} D_{\beta} (T_{\beta}) K_{zj} - \sum_i \sum_{\beta} \sum_x \sum_j R_{i\beta x j} \bar{P} \{i\} - \\ - \sum_{j=1}^d c_j (n_j + m_j + s_j), \quad (7)$$

где  $\delta_{\beta j}$  — доля суммарного дохода от груза  $\beta$ , приходящаяся на машины типа  $j$ ;  $D_{\beta} (T_{\beta})$  — плановый доход от груза  $\beta$ ;  $R_{i\beta x j}$  — эксплуатационные расходы в  $i$  - м состоянии машины с учетом вида груза и варианта работ;  $\bar{P} \{i\}$  — вероятность  $i$  - го состояния машины.

Доход порта от использования перегрузочных машин зависит от освоенного грузооборота, его структуры по видам грузов и тарифных ставок за перегрузочные работы. Иногда порты получают доход также от передачи машин в аренду или перегрузочных операций с наземным транспортом по договорам с предприятиями. Однако эти доходы составляют лишь незначительную долю доходов от основной деятельности, и в рассматриваемой задаче мы их учитывать не будем, учтем только премии за сокращение стояночного времени транспортных средств под грузовыми операциями. Применительно к флоту эти премии могут быть достаточно большими. Исходя из этого, плановый доход порта от груза  $\beta$  будем находить по формуле:

$$\text{Или} \left. \begin{aligned} D_{\beta}(T_{\beta}) &= k_{\phi\beta} C_{\beta} \alpha_{\beta} A_{\beta p}(T_{\beta}), \\ D_{\beta}(T_{\beta}) &= k_{\phi\beta} C_{\beta} \sum_{j=1}^{d_{\pi\beta}} k_{\beta j}^0 Q_{\beta j} n_{\beta j} T_{\beta j}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где  $k_{\phi\beta}$  — коэффициент увеличения дохода вследствие сокращения стояночного времени флота под грузовыми операциями;  $C_{\beta}$  — тарифная ставка за перегрузочные работы;  $\alpha_{\beta}$  — доля общего грузооборота порта, приходящаяся на груз вида  $\beta$ ;  $A_{\beta p}(T_{\beta})$  — общий плановый грузооборот порта на расчетный период  $T_{\beta}$ ;  $k_{\beta j}^0$  — коэффициент использования машины по времени с грузом  $\beta$ ;  $d_{\pi\beta}$  — число моделей причальных машин, участвующих в переработке груза  $\beta$ , т. е. машин, чья суммарная выработка составляет грузооборот порта, исключая дополнительные тонно – операции с этим грузом внутри порта.

Очевидно, что все ППМ, имеющиеся в порту, точнее, находящиеся в эксплуатации, участвуют в создании дохода. Однако доля этого участия не во всех случаях одинакова. Например, при наличии большой складской площади простой части складских машин не всегда приводит к срыву выполнения планового грузооборота порта или задержке судов под грузовыми операциями. Некоторые из моделей машин в случае их остановки можно заменить другими. Имеются также машины, остановка которых неизбежно приводит к заметным экономическим потерям. Чтобы учесть эти обстоятельства, в уравнение компонент  $E_{ij}^{\pi}$  (7) введен коэффициент  $\delta_{\beta j}$ . Точное определение этого коэффициента практически невозможно. Влияние качества работы разных машин зависит не только от их технических характеристик, но также от квалификации портовых рабочих, места и варианта преимущественного использования машин, уровня

организации работ и многих других факторов. Поэтому можно рекомендовать значения  $\delta_{\beta j}$  находить методом экспертных оценок с участием специалистов по технической эксплуатации машин, технологии, организации и экономике перегрузочных процессов.

Если полагать, что влияние всех моделей машин на доход от перегрузочных работ одинаково, то  $\delta_j = 1/d$ . Напомним,  $d$  — общее число моделей машин. Ясно, что независимо от метода нахождения значений  $\delta_j$  их сумма

$$\sum_{j=1}^d \delta_j = 1.$$

Проектное (плановое) время использования машины модели  $j$  с грузом вида  $\beta$  по варианту работы  $x$  за период эксплуатации  $T_{\beta j}$

$$t_{\beta x j}^0 = \frac{\alpha_{\beta} a_{\beta x j} A_{z p}(T_{\beta j})}{Q_{\beta x j} n_j}, \quad (9)$$

где  $a_{\beta x j}$  — коэффициент перевалки груза  $\beta$  по варианту  $x$ ;  $Q_{\beta x j}$  — технологическая производительность машины для соответствующего груза и варианта работ.

Значения  $a_{\beta x j}$  и  $Q_{\beta x j}$  всегда известны, поскольку служат исходными данными для проектирования или планирования работы порта (технологического комплекса).

Коэффициент использования машины по времени с грузом  $\beta$  по варианту  $x$

$$k_{\beta x j}^0 = t_{\beta x j}^0 / T_{\beta j}.$$

Доля времени пребывания машины в состоянии  $i$  за расчетный период эксплуатации, то есть вероятности состояний машин в системе перегрузочных линий определяется по формулам :

$$\begin{aligned} P_{\beta x i} \{i=1\} &= K_{z j}; & P_{\beta x j} \{i=2\} &= 1 - K_{z j}; \\ P_{\beta x i} \{i=3\} &= a_{TO j} (k_{\beta x j}^0)^2; & P_{\beta x i} \{i=4\} &= a_{TO j} k_{\beta x j}^0 (1 - k_{\beta x j}^0); \\ P_{\beta x i} \{i=5\} &= a_{IP j} (k_{\beta x j}^0)^2; & P_{\beta x i} \{i=6\} &= a_{IP j} k_{\beta x j}^0 (1 - k_{\beta x j}^0); \\ P_{\beta x i} \{i=7\} &= k_{\beta x j}^0 (1/K_{z j} - 1); \end{aligned} \quad (10)$$

Удельные нормы времени на ТО и ремонты, соответственно,  $a_{ТО}$  и  $a_{пр}$ , вычисляются из отраслевых руководящих документах по технической эксплуатации машин. При этом допускается их корректировка применительно к конкретным условиям производства работ. Если указывается норма «чистого» времени ремонта, то ее необходимо привести к календарному времени простоя машины в ТО (ремонте) по формуле:

$$a_{ТО(пр)} = \frac{24 a_{ТО(пр)}^0}{n_{см} t_{см}}, \quad (11)$$

где  $a_{ТО(пр)}^0$  — норма «чистого» времени ТО (ремонта), как если бы работы проводились непрерывно в течение суток, в относительных единицах измерения: ч/м-ч;  $n_{см}, t_{см}$  — число и продолжительность смен при выполнении работ.

Разработка этих формул основана на том, что  $t_{\beta x j}^0$  (следовательно, и  $k_{\beta x j}^0$ ) имеет фиксированное значение, обязательное для выполнения планового задания [см. формулу (9)]. Это значит, что  $k_{\beta x j}^0$  — есть стационарное значение вероятности наличия заявки на использование машины. Поэтому время нахождения машины в плановом ТО  $t_{\beta x j}^{ТО} = a_{ТО j} t_{\beta x j}^0$ , соответствующий коэффициент времени (стационарная вероятность пребывания в этом состоянии)  $k_{\beta x j}^{ТО} = a_{ТО j} k_{\beta x j}^0$ , стационарная вероятность пребывания в техническом обслуживании и наличия заявки на использование  $P_{\beta x j} \{i = 3\} = k_{\beta x j}^{ТО} k_{\beta x j}^0 = a_{ТО j} (k_{\beta x j}^0)^2$ .

Подставляя компоненты стационарных вероятностей пребывания системы в состоянии  $i$  (10) в формулу (7) с учётом (8), (9), (11) и приведенных выше замечаний. После ряда преобразований окончательно получаем следующую целевую функцию задачи оптимизации резерва машин в зависимости от их типов, моделей, режимов эксплуатации и показателей надёжности:

$$\begin{aligned} \max \left\{ \sum_{\beta} \sum_j \delta_{\beta j} D_{\beta}(T_3) K_{2j} - \sum_{\beta} \sum_x \sum_j \left\{ R_{2\beta x j} + \right. \right. \\ \left. \left. + k_{\beta x j}^0 \left[ R_{\beta x j}^{1-7} + a_{ТО j} \left( R_{\beta x j}^{4-2} + k_{\beta x j}^0 R_{\beta x j}^{3-4} \right) + a_{пр j} \left( R_{\beta x j}^{6-2} + \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + k_{\beta x j}^0 R_{\beta x j}^{5-6} \right) + \frac{1}{K_{2j}} R_{\beta x j}^{7-3} \right] \right\} K_{2j} - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - \sum_{\beta} \sum_x \sum_j (R_{9\beta x j} + k_{\beta x j}^0 R_{\beta x j}^{8-9}) [1 - K_{\epsilon j}] - \\
 & - \sum_{j=1}^d c_j (n_j + m_j + s_j). \tag{12}
 \end{aligned}$$

В этой формуле верхние индексы при  $R_{\beta x j}$  означают разность соответствующих значений  $R_{i\beta x j}$ , например  $R_{\beta x j}^{1-7} = R_{1\beta x j} - R_{7\beta x j}$ ,  $R_{\beta x j}^{4-2} = R_{4\beta x j} - R_{2\beta x j}$  и т.п.

В общем случае достаточно учесть только основные затраты  $R_i$  (индекс  $\beta x j$  условно опустим):

$$\left. \begin{aligned}
 R_1 &= S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6; & R_2 &= S_1; \\
 R_3 &= S_1 + S_7 + S_{12}; & R_4 &= S_1 + S_7; & R_5 &= S_1 + S_8 + S_{12}; \\
 R_6 &= S_1 + S_8; & R_7 &= S_1 + S_8 + S_{12}; & R_8 &= S_1 + S_{12}; & R_9 &= S_1.
 \end{aligned} \right\} \tag{13}$$

В этой формуле приняты следующие обозначения:  $S_1$  — отчисления на амортизацию машин,  $S_2$  — заработная плата в период грузовых операций,  $S_3$  — затраты на электроэнергию и топливо,  $S_4$  — затраты на малоценные и быстроизнашивающиеся материалы,  $S_5$  — затраты на содержание оперативно – распорядительского и обслуживающего персонала,  $S_6$  — затраты на содержание административно – управленческого персонала,  $S_7$  — затраты на ТО машин,  $S_8$  — затраты на ремонт машин.

Значения этих затрат рассчитываются согласно методике расчета экономической эффективности портовой техники. Потери из-за невыполнения плановых работ применительно к рассматриваемой задаче сводятся практически к штрафам за сверхнормативный простой транспортных средств. Поэтому

$$S_{12} = \sum_{f=1}^{\pi_{\beta x j}} a_{ш f} (T_{f\beta x j} - T_f^H), \tag{14}$$

где  $a_{ш f}$  — штраф за один час сверхнормативного простоя транспортного средства;  $T_{f\beta x j}$  — время грузовой обработки транспортного средства, определяемое по формуле:

$$T_{f\beta x j} = \frac{\alpha_{f\beta x j} A_{\epsilon p}(T_{\epsilon})}{\psi_{\beta x j}^m \psi_{\beta x j}^m n_{f\beta x j} Q_{f\beta x j}}. \tag{15}$$

В формуле (15)  $\alpha_{f\beta x j}$  — доля грузооборота порта  $A_{\epsilon p}(T_{\epsilon})$  за расчетный период  $T_{\epsilon}$ ; приходящаяся на транспорт типа  $f$  по



соответствующему варианту работ;  $\Psi_{\beta x j}^m$ ,  $\Psi_{\beta x j}^m$  коэффициенты соответственно простоев по метеорологическим и технологическим причинам;  $n_{f \beta x j}$ ,  $Q_{f \beta x j}$  — число и производительность машин, занятых обработкой транспорта типа  $f$  для данного груза и варианта работ.

Компоненты затрат также, как и доходов в формуле (13) должны корректироваться в зависимости от системы хозяйствования принятой на предприятии.

**Выводы.** Представленная в этой работе математическая модель решения оптимизационной задачи резервирования в составе парка перегрузочных машин порта является достаточно обобщённой и универсальной, поэтому может быть легко приспособлена к парку технических средств большинства производственных объектов. Целевая функция существенно упрощается в задаче оптимального резервирования применительно к отдельным специализированным перегрузочным комплексам, которые обычно содержат небольшое число типов основных машин, видов грузов и вариантов работ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – М.: Наука. Гл. ред. физ. мат. лит. – 1991. – 384с.
2. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К, Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. М.; Наука, 1965. 524 с.
3. Зубко Н.Ф. Надёжность и планирование эксплуатации машин: Учебное пособие для ВУЗов. -Одесса: ОНМУ. 2013. – 279 с.
4. Надёжность технических систем: Справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др.; Под ред. И. А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985. 608 с.