

УДК 658.012.122

Н.А. Малаксиано

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫХ ОЦЕНОК
ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ РИСКОВ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ РЕМОНТОВ
И ЗАМЕН СЛОЖНОГО ПОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ,
ФУНКЦИОНИРУЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОСТЬЮ
ОПРЕДЕЛЕННОГО ГРУЗОПОТОКА**

Изучается математическая модель, использующая многокритериальные оценки для поиска экономически обоснованных стратегий ремонтов и замен сложного портового оборудования, сокращающих риски, связанные с невозможностью точного прогнозирования грузопотока.

Ключевые слова: стратегия ремонтов и замен оборудования, физический износ оборудования, неполностью определенная загрузка оборудования, многокритериальные оценки.

Досліджується математична модель, що використовує багатокритеріальні оцінки для пошуку економічно обґрунтованих стратегій ремонтів і заміни складного портового обладнання, які зменшують ризики, пов'язані з неможливістю точного прогнозування вантажопотоку.

Ключові слова: стратегія ремонтів і заміни обладнання, фізичний знос обладнання, неповністю визначене завантаження обладнання, багатокритеріальні оцінки.

The multiobjective mathematical model is introduced to investigate the problem of the optimal repair and replacement schedule finding for complex port equipment that reduces the risks associated with the inability to predict the exact level of employment.

Keywords: repairs and retirements strategy, wear and tear of equipment, stochastic process of equipment employment, multiobjective evaluation.

Введение. Важнейшей задачей при планировании работы портов, помимо обеспечения высокого уровня ожидаемых экономических показателей, является обеспечение устойчивости этих показателей к возможным изменениям внешних условий. Это непростая задача, поскольку ожидаемая структура грузопотока и его интенсивность зачастую носят сложный случайный характер, а изменение производственных мощностей порта требует длительного времени и больших капиталовложений. Для того чтобы принимать взвешенные управленческие решения, необходимо оценивать не только средние ожидаемые доходы (или расходы) портов, но и исследовать риски, связанные с этими решениями. Поэтому в некоторых случаях имеет смысл отказаться от стратегий, максимизирующих ожидаемый доход (или минимизирующих ожидаемые расходы, или максимизирующих ожидаемую прибыль) в пользу других стратегий, имеющих в среднем несколько худшие ожидаемые экономические показатели, но при этом сопряженных с меньшими рисками.

Поскольку значительную часть расходов портов составляют расходы на оборудование, большое значение для эффективной работы портов имеет экономически обоснованное планирование ремонтов и замен технических средств. Одним из важнейших факторов, влияющих на скорость физического старения оборудования, является интенсивность его использования. Поэтому большой практический интерес представляет построение математических моделей, на основании которых можно было бы создавать экономически обоснованные планы ремонтов и замен сложного портового оборудования и при этом минимизировать риски, связанные с неравномерностью и неполной определенностью будущей загрузки.

Несмотря на то, что в настоящее время удалось достичь значительных результатов в анализе показателей работы предприятий различных отраслей в условиях неопределенности [1-3] и в исследовании процессов старения оборудования, в том числе портового, планировании его ремонтов и замен [4-6], исследования в этом направлении активно продолжаются, а ряд практиче-

ски важных вопросов до сих пор остается недостаточно изученными.

Постановка задачи. Целью данной статьи является изучение математической модели, использующей многокритериальные оценки для поиска экономически оптимальных стратегий ремонтов и замен сложного портового оборудования, сокращающих риски, связанные с неполной определенностью грузопотока.

Результаты исследования. В условиях случайно изменяющегося грузопотока стратегии ремонтов и замен оборудования, дающие наилучшие в среднем экономические показатели, могут быть сопряжены с большими рисками, а наилучшие в смысле стабильности и отсутствия рисков стратегии могут давать далеко не самые хорошие средние экономические показатели. И ожидать того, что будет существовать наилучшая во всех отношениях стратегия, вообще говоря, нельзя. Поэтому наиболее подходящим и корректным в данной ситуации является поиск наилучших стратегий ремонтов и замен оборудования, основанный на использовании многокритериальных методов оптимизации.

Для дальнейшего анализа, прежде всего, необходимо выбрать количественные показатели, с помощью которых будет оцениваться экономическая эффективность и уровень рисков, связанных с каждой выбранной стратегией ремонтов и замен оборудования в условиях случайно изменяющейся загрузки. В данной статье в качестве показателя экономической эффективности будем рассматривать математическое ожидание суммарных средних расходов за единицу времени работы оборудования. В качестве показателя уровня нестабильности и риска, связанных с выбранной стратегией ремонтов и замен оборудования в условиях случайно изменяющейся интенсивности загрузки, будем рассматривать корень p -ой степени из центрального момента p -го порядка суммарных средних расходов за единицу времени работы оборудования в период от начала его эксплуа-

тации до списания. Выбор порядка p ($p \geq 1$) должен определяться отношением лица, принимающего решение, к риску: чем менее желательны значительные отклонения средних расходов за единицу времени работы оборудования от среднего значения, тем большее значение p следует выбирать.

Для того чтобы количественно оценивать суммарные средние расходы за единицу времени работы оборудования в период от начала его эксплуатации до списания при различных сценариях изменения коэффициента занятости, используем модификацию математической модели, предложенной в [7]. В соответствии с этой моделью будем рассматривать показатель неустранимого износа $u_1 = u_1(t)$, ($0 \leq u_1 \leq 1$), характеризующий интенсивность эксплуатационных расходов в момент времени t при полной занятости оборудования, которые невозможно или нецелесообразно уменьшить посредством ремонтов или модернизаций, а также показатель устранимого износа $u_2 = u_2(t)$, ($0 \leq u_2 \leq 1$), характеризующий интенсивность эксплуатационных расходов в момент времени t при полной занятости оборудования, которые могут быть уменьшены посредством ремонтов или модернизаций. Общий износ будем считать как сумму $u = u_1 + (1 - u_1) \cdot u_2$. Определяемые таким образом показатели устранимого, неустранимого и общего износа положительны и, возрастая с течением времени, приближаются к своему предельному значению 1. Для совместного моделирования устранимого и неустранимого износа рассмотрим динамическую модель, описываемую следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} u_1' = (\alpha_1 \cdot s(t) + \alpha_4) \cdot u_1 + (\alpha_2 \cdot s(t) + \alpha_5) \cdot u_2 + \alpha_3 \cdot s(t) + \alpha_6; \\ u_2' = (\alpha_7 \cdot s(t) + \alpha_{10}) \cdot u_1 + (\alpha_8 \cdot s(t) + \alpha_{11}) \cdot u_2 + \alpha_9 \cdot s(t) + \alpha_{12}. \end{cases} \quad (1)$$

В качестве примера рассмотрим кривую изменения износа, которая типична для портовых контейнерных перегружате-

лей. Эту кривую можно описать с помощью динамической модели (1) с начальными условиями $u_1(0) = 0,03$, $u_2(0) = 0,001$ и вектором параметров

$$\bar{\alpha} = (0,03; 0,08; 0,03; 0,001; 0,06; 0,001; 0,001; 0,06; 0,02; 0,01; 0,03; 0,02) \cdot$$

Поскольку в данной статье рассматривается сложное портовое оборудование, имеющее длительные сроки службы, все расходы будем дисконтировать (к моменту начала эксплуатации оборудования). Единицей измерения времени по умолчанию будем считать год. Для облегчения восприятия результатов моделирования далее все расходы будем указывать в процентах от текущей стоимости нового образца этого оборудования. Будем рассматривать только капитальные ремонты, проведение которых уменьшает уровень устранимого износа до минимума. Средние эксплуатационные расходы за единицу времени работы машины в период от начала эксплуатации до момента времени t можно найти по формуле

$$P_s(t) = \frac{1}{\int_0^t s(\tau) d\tau} \int_0^t \left(\frac{P_{nep} \cdot u(\tau)}{u(0)} \cdot s(\tau) + P_{nocm} \right) \cdot e^{\delta \tau} d\tau, \quad (2)$$

где $u(t)$ – показатель общего износа в момент времени t ;

$s(t)$ – коэффициент занятости в момент времени t ;

P_{nocm} – постоянные эксплуатационные расходы оборудования за единицу времени;

P_{nep} – переменные эксплуатационные расходы нового оборудования за единицу времени при полной занятости;

$e^{\delta t}$ – множитель наращивания при непрерывном начислении процентов;

δ – сила роста ($\delta = \ln(1+i)$, где i – годовая ставка процентов при ежегодном наращивании).

Средние капитальные расходы за единицу времени работы машины в период от начала эксплуатации до момента времени t будем искать по формуле

$$R_a(t) = \frac{1}{\int_0^t s(\tau) d\tau} \left(R_0 + \sum_{t_k \leq t} R_k \cdot e^{\delta t_k} \right), \quad (3)$$

где $R_0 = 100\%$ – цена нового оборудования,

R_k – расходы на капитальный ремонт, запланированный на момент времени t_k .

Тогда суммарные средние расходы за единицу времени работы оборудования в период от начала эксплуатации до момента времени t равны

$$R(t) = R_s(t) + R_a(t). \quad (4)$$

Будем считать, что средняя стоимость капитального ремонта составляет 35 % от стоимости нового оборудования, годовая ставка процентов при ежегодном наращивании равна 3 %, постоянные эксплуатационные расходы за единицу времени работы составляют 7 % от стоимости нового оборудования, а переменные эксплуатационные расходы нового оборудования за единицу времени работы при полной занятости составляют 2,8 % от его стоимости и изменяются пропорционально текущим значениям коэффициента износа и коэффициента занятости.

Если коэффициент занятости будет постоянным $s = s(t) \equiv 0,5$, то суммарные средние расходы за единицу времени работы оборудования в период от начала эксплуатации до списания станут минимальными, если стратегия ремонтов и замены будет состоять из двух капитальных ремонтов через $t_{рем1} = 4,62$ и $t_{рем2} = 9,76$ лет и замены через $t_{зам} = 17,22$ лет после начала эксплуатации. На рис. 1 приведены кривые износа оборудования, а на рис. 2 – кривые изменения средних затрат за единицу времени работы оборудования при данной оптимальной стратегии ремонтов и замен.

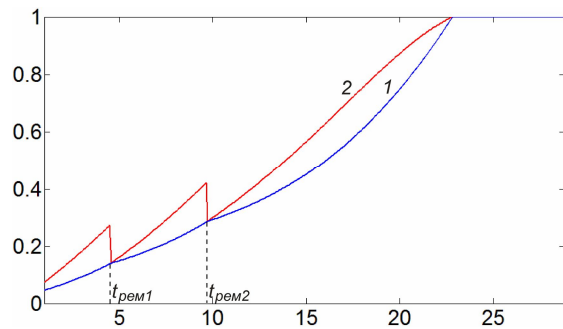


Рис. 1. Кривые износа оборудования при $s(t) = 0,5$:
1 – кривая неустраняемого износа; 2 – кривая общего износа

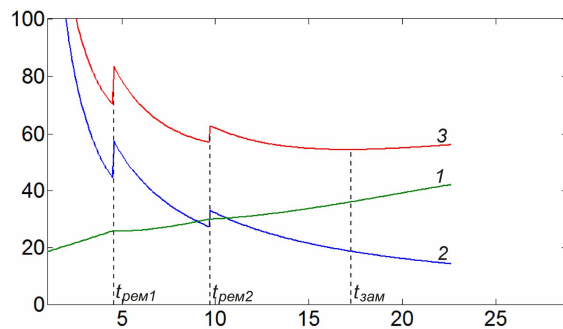


Рис. 2. Средние затраты за единицу времени работы
оборудования при $s(t) = 0,5$:
1 – средние эксплуатационные затраты;
2 – средние капитальные затраты;
3 – суммарные средние затраты

Но для всестороннего исследования эффективности выбранной стратегии ремонтов и замен сложного портового оборудования, функционирующего в условиях неопределенной загрузки, нельзя ограничиваться рассмотрением лишь одной ус-

редненной траектории изменения коэффициента занятости. Необходимо учитывать специфику процесса случайных изменений грузопотока. В одной математической модели невозможно учесть все особенности и условия эксплуатации разных типов оборудования. Однако в ряде случаев, когда на изменение уровня загрузки оборудования влияет много случайных, мало связанных между собой факторов, для моделирования процесса загрузки оборудования можно использовать диффузионный случайный процесс. На практике, как правило, известна функция ожидаемого среднего уровня коэффициента занятости $s_c = s_c(t)$, функции $s_g = s_g(t)$ и $s_n = s_n(t)$, соответствующие наиболее оптимистичному и наиболее пессимистичному сценарию изменения коэффициента занятости и являющиеся соответственно верхней и нижней границами для всех возможных траекторий изменения коэффициента.

Для моделирования изменений коэффициента занятости будем рассматривать диффузионный случайный процесс $s = s(t, \omega)$, являющийся решением стохастической модели состояния в форме Ито

$$\begin{cases} ds(t, \omega) = a(s(t, \omega), t)dt + \sqrt{b(s(t, \omega), t)} dW(t, \omega), \\ s(t_0, \omega) = s_0(\omega), \end{cases} \quad (5)$$

где $\omega \in \Omega$, а (Ω, A, P) – вероятностное пространство; $W(t, \omega)$ – винеровский процесс, выходящий из 0; Функция сноса имеет вид

$$a(x, t) = l \cdot (s_c(t) - x) + s'_c(t), \quad (6)$$

а функция диффузии –

$$b(x, t) = q^2 \cdot (s_g(t) - x) \cdot (x - s_n(t)) \quad (7)$$

с параметрами $l, q > 0$. Можно проверить, что при таком выборе функций сноса и диффузии случайный процесс изменения коэффициента занятости $s = s(t, \omega)$, получаемый при помощи стохастической задачи Коши (5), ограничен функциями $s_g = s_g(t)$ и $s_n = s_n(t)$ и имеет математическое ожидание $m_s(t) = s_c(t)$. На рис. 3 пунктиром изображены некоторые траектории случайного процесса $s = s(t, \omega)$, являющегося решением стохастической задачи Коши (5) с функциями сноса и диффузии, заданными формулами (6) и (7), и параметрами $l = 0,1$ и $q = 0,3$; сплошными линиями изображены функции $s_c = s_c(t)$, $s_g = s_g(t)$ и $s_n = s_n(t)$.

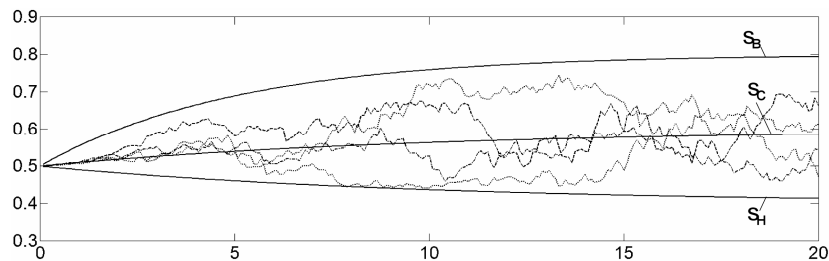


Рис. 3. Некоторые траектории случайного процесса $s = s(t, \omega)$

Теперь, имея математическую модель для описания случайного процесса изменения загрузки оборудования и модель для оценки суммарных средних расходов за единицу времени работы оборудования при различных сценариях изменения коэффициента занятости, перейдем к исследованию задачи многокритериальной оптимизации при выборе стратегии ремонтов и замен оборудования. Обозначим через Ψ множество всех допустимых стратегий ремонтов и замен оборудования. Тогда нашу задачу многокритериальной оптимизации можно записать в виде

$$\underset{\psi \in \Psi}{\text{minimize}} \bar{F}(\psi), \quad (8)$$

где $\bar{F}(\psi) = (F_1(\psi), F_2(\psi))$ – векторная целевая функция, первая координата которой является функцией

$$F_1(\psi) = M[R(s(t, \omega), \psi)] = \int_{\Omega} R(s(t, \omega), \psi) P(d\omega), \quad (9)$$

выражающей зависимость математического ожидания суммарных средних расходов за единицу времени работы оборудования в период от начала эксплуатации до списания $R(s(t, \omega), \psi)$ от стратегии его ремонтов и замен ψ . Вторая координата

$$F_2(\psi) = \left(\mu_p [R(s(t, \omega), \psi)] \right)^{\frac{1}{p}} = \left(M \left[(R(s(t, \omega), \psi) - M[R(s(t, \omega), \psi)])^p \right] \right)^{\frac{1}{p}} \quad (10)$$

является функцией, выражающей корень p -й степени из центрального момента p -го порядка суммарных средних расходов за единицу времени работы оборудования в период от начала его эксплуатации до списания. В частности, при $p = 2$ функция $F_2(\psi)$ выражает среднеквадратическое отклонение суммарных средних расходов за единицу времени работы оборудования $F_2(\psi) = \sigma [R(s(t, \omega), \psi)]$.

Поскольку $\bar{F}(\psi) = (F_1(\psi), F_2(\psi))$ – векторная функция, то компоненты $F_1(\psi)$ и $F_2(\psi)$ являются конкурирующими и, вообще говоря, отсутствует единое решение поставленной задачи (8). Поэтому вводится концепция множества точек неулучшаемых решений [8] (так называемая оптимальность по Парето). Неулучшаемое решение есть такое решение, в котором улучшение в одной из целей приводит к некому ухудшению другой. Более строго определение неулучшаемой стратегии ремонтов и

замен оборудования можно сформулировать следующим образом: стратегия $\psi^* \in \Psi$ является неулучшаемой, если для некоторой окрестности $U(\psi^*)$ не существует таких стратегий $\psi \in U(\psi^*)$, что

$$F_1(\psi) \leq F_1(\psi^*), F_2(\psi) \leq F_2(\psi^*)$$

и

$$F_k(\psi) < F_k(\psi^*), \text{ для } k=1 \text{ или } k=2.$$

Очевидно, что для использования на практике представляют интерес только неулучшаемые стратегии.

Множество неулучшаемых стратегий ремонтов и замен оборудования можно наглядно изобразить, если ограничиться рассмотрением стратегий, состоящих только из одного ремонта и списания. Для этого достаточно на одном графике (рис. 4) построить линии уровня функций F_1 и F_2 . Далее, если специально не оговорено, будем рассматривать $F_2(\psi) = \sigma [R(s(t, \omega), \psi)]$. На рис. 4 по оси абсцисс отложены сроки списания оборудования, а по оси ординат – сроки ремонта. Линии уровня функции F_2 изображены пунктиром, а линии уровня функций F_1 – сплошные. По линиям уровня на рис. 4 легко увидеть, что в точках A_1, A_2, \dots, A_5 и во всех других точках кривой, проведенной жирной линией, градиенты функций F_1 и F_2 противоположно направлены, а значит, каждая точка на этой кривой соответствует некоторой неулучшаемой стратегии.

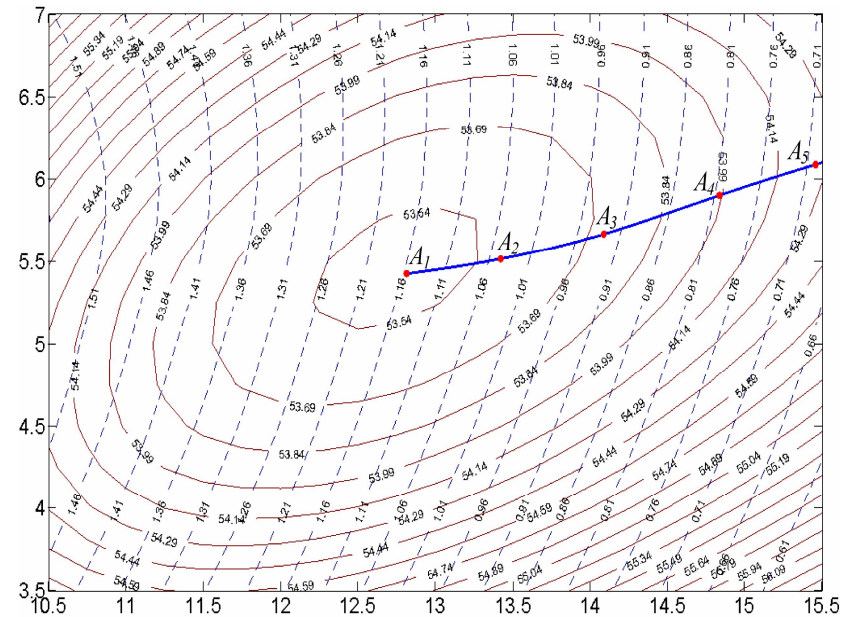


Рис. 4. Линии уровня функций F_1 и F_2 и кривая, точки которой соответствуют неулучшаемым стратегиям

В табл. 1 приведены неулучшаемые стратегии, соответствующие точкам A_1, A_2, \dots, A_5 , и соответствующие им значения целевых функций F_1 и F_2 . На рис. 5 представлена кривая точек неулучшаемых значений целевых функций при соответствующих оптимальных стратегиях ремонта и замены оборудования. Вдоль оси абсцисс отложены значения функции F_1 , а вдоль оси ординат – значения функции F_2 .

Таблиця 1

*Некоторые неуплучшаемые стратегии,
состоящие из одного ремонта и списания,
и соответствующие им значения целевых функций*

Точки, соответствующие неуплучшаемым стратегиям	Параметры неуплучшаемых стратегий ψ		Значения целевых функций	
	сроки ремонта	сроки списания	$F_1(\psi) =$ $M[R(s(t, \omega), \psi)]$	$F_2(\psi) =$ $\sigma[R(s(t, \omega), \psi)]$
A_1	5,42	12,81	53,502	1,168
A_2	5,51	13,42	53,549	1,061
A_3	5,66	14,08	53,701	0,940
A_4	5,90	14,83	53,950	0,817
A_5	6,08	15,45	54,236	0,707

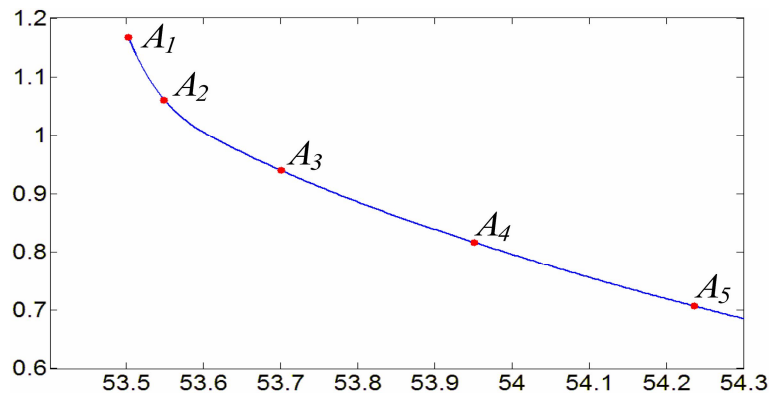


Рис. 5. Кривая точек неуплучшаемых значений целевых функций в случае одного ремонта при соответствующих оптимальных стратегиях ремонта и замены оборудования

Рис. 4 и 5 удобны для восприятия и дают лицу, принимающему решение, достаточно информации, что значительно облегчает выбор одной из ряда найденных неуплучшаемых стратегий. В общем случае, когда стратегии ремонтов и замен могут содержать более одного ремонта, представить решение задачи многофакторной оптимизации в таком наглядном виде нельзя. Существует ряд аналитических методов нахождения множества неуплучшаемых решений. Наиболее простым среди них является метод, в соответствии с которым многокритериальная задача минимизации вектора $\bar{F}(\psi) = (F_1(\psi), F_2(\psi))$ сводится к скалярной задаче путем построения взвешенной суммы его координат, и далее к полученной скалярной задаче применяется один из стандартных алгоритмов оптимизации. Однако в случае, когда граница множества значений вектор-функции $\bar{F}(\psi)$ невыпукла, нахождение всего множества неуплучшаемых стратегий с использованием данного метода может оказаться невозможным. Поскольку для рассматриваемой нами вектор-функции $\bar{F}(\psi)$ довольно сложно исследовать выпуклость ее множества значений, то для поиска множества неуплучшаемых стратегий мы используем так называемый метод достижения цели [9]. В рамках данного метода лицу, принимающему решение, необходимо выбрать множество намерений $\bar{F}^* = (F_1^*, F_2^*)$, которое связано с множеством целей $\bar{F}(\psi) = (F_1(\psi), F_2(\psi))$. Такая формулировка задачи допускает то, что цели могут быть как невыполненными так и перевыполненными, и это позволяет лицу, принимающему решение, легко выразить исходные намерения. Относительная степень невыполненности или перевыполненности поставленных намерений контролируется посредством вектора весовых коэффициентов $\bar{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2)$ и может быть представлена как стандартная задача оптимизации следующего вида:

$$\begin{aligned} & \underset{\gamma \in R, \psi \in \Psi}{\text{minimize}} \gamma, \\ & \text{при условии, что} \\ & F_k(\psi) - \alpha_k \gamma \leq F_k^*, \quad k = 1, 2. \end{aligned} \quad (11)$$

Весовой вектор $\bar{\alpha}$ дает лицу, принимающему решение, возможность достаточно точно выразить меру взаимосвязи между двумя целями. На рис. 6 представлена геометрическая интерпретация данного метода. На этом рисунке заштрихованная область схематично изображает множество значений вектор-функции $\bar{F}(\psi)$ (так называемое множество достижимых значений критериев), а часть ее границы, выделенная жирной линией, образует искомое множество неулучшаемых критериальных точек (так называемое множество Парето или паретову границу).

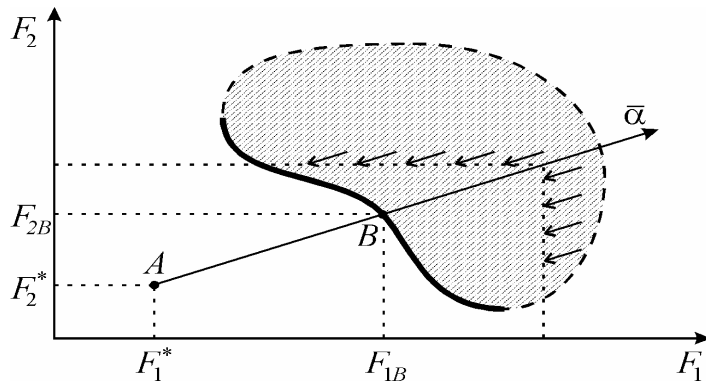


Рис. 6. Геометрическая интерпретация метода достижения цели

Задание компонент намерений (F_1^*, F_2^*) определяет точку намерений A . Весовой вектор $\bar{\alpha}$ задает направление поиска от точки A в сторону множества достижимых значений критериев.

риев. В процессе поиска решения задачи (11) происходит изменение величины γ и движение границы ограничений к точке $B = (F_{1B}, F_{2B})$ множества Парето.

Задачу (11) можно свести к задаче нахождения минимакса

$$\underset{\psi \in \Psi}{\text{minimize}} \max_k \left\{ \frac{F_k(\psi) - F_k^*}{\alpha_k} \right\} \quad (12)$$

и решить с помощью методов нелинейной оптимизации. Причем, если выбрать $F_k^* = \max_{\psi \in \Psi} F_k(\psi) - \varepsilon$, $k = 1, 2$, где ε – малое положительное число, то для установления неулучшаемости стратегии ψ_0 достаточно подобрать такой вектор весов $\bar{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2)$, $\alpha_1 > 0$, $\alpha_2 > 0$ при котором стратегия ψ_0 была бы решением задачи (12). Такой подход позволяет исследовать множество Парето в случае любого количества критериев и любой размерности пространства решений. Используя этот подход, опишем множество неулучшаемых стратегий ремонтов и замен оборудования и соответствующее множество Парето при произвольном количестве ремонтов. На рис. 7 представлено множество Парето, при этом вдоль оси абсцисс отложены математическое ожидание суммарных средних расходов за единицу времени работы оборудования в период от начала эксплуатации до списания, а по оси ординат – среднеквадратическое отклонение суммарных средних расходов. В табл. 2 представлены значения критериев для некоторых точек на паретовой границе (рис. 7) и соответствующие им решения, по которым можно получить представление о множестве неулучшаемых стратегий ремонтов и замен оборудования.

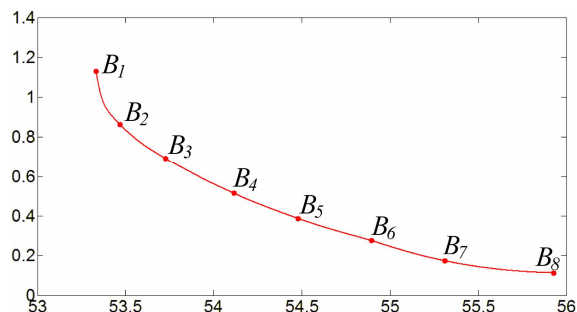


Рис. 7. Кривая точек неулучшаемых значений целевых функций для произвольного количества ремонтов при соответствующих оптимальных стратегиях ремонта и замены оборудования

Таблица 2

Некоторые неулучшаемые стратегии, состоящие из произвольного количества ремонтов и соответствующие им значения целевых функций

Точки, соответствующие неулучшаемым стратегиям	Параметры неулучшаемых стратегий ψ		Значения целевых функций	
	сроки ремонтов	сроки списания	$F_1(\psi) = M[R(s(t, \omega), \psi)]$	$F_2(\psi) = \sigma[R(s(t, \omega), \psi)]$
B_1	4,38; 4,71	15,75	53,334	1,129
B_2	4,58; 5,12	17,09	53,469	0,862
B_3	4,69; 5,52	18,11	53,729	0,693
B_4	4,80; 5,89	19,17	54,116	0,515
B_5	4,98; 6,23	20,08	54,479	0,387
B_6	4,17; 4,60; 5,86	23,14	54,894	0,275
B_7	4,26; 4,74; 6,57	24,56	55,310	0,174
B_8	4,43; 4,97; 7,02	25,02	55,928	0,113

Проследим расположение паретовых границ при различном фиксированном количестве ремонтов оборудования. На рис. 8 изображены паретовы границы для случаев, когда применяются только стратегии, состоящие из одного, двух и трех ремонтов. Маркерами на рис. 8 обозначены те же точки B_1, \dots, B_8 , что и на рис. 7. Таким образом, легко видеть, что кривая, изображенная на рис. 7, состоит из частей кривых 2 и 3, изображенных на рис. 8. Тот факт, что искомая паретова граница может быть представлена как совокупность частей паретовых границ, являющихся решениями более простых задач с фиксированным количеством ремонтов, может быть использован при анализе решений исходной многокритериальной задачи. Вместе с тем, такая структура паретовой границы может потенциально являться источником ее невыпуклости и разрывов. Поэтому исследование свойств множества Парето для рассмотренной задачи представляет отдельный интерес.

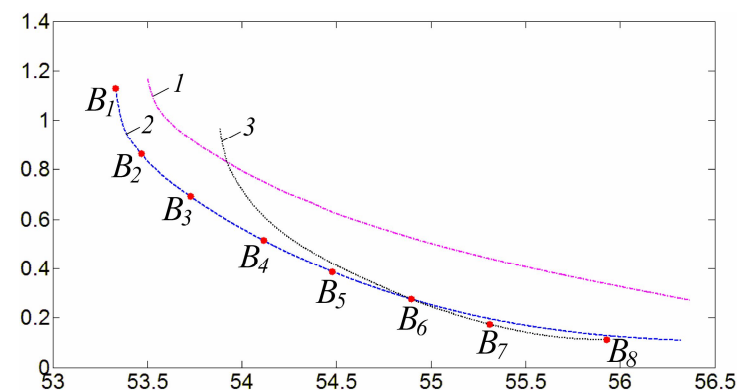


Рис. 8. Кривые точек неулучшаемых значений целевых функций при соответствующих оптимальных стратегиях ремонтов и замен оборудования:
1 – при одном ремонте; 2 – при двух ремонтах;
3 – при трех ремонтах

На практике часто бывает так, что сильное превышение намеченного уровня затрат, даже если это превышение имеет маленькую вероятность, более нежелательно для лица, принимающего решение, чем весьма вероятные, но незначительные отклонения от среднего ожидаемого уровня затрат. Для того, чтобы лучше контролировать именно большие превышения среднего уровня затрат, в рассмотренной выше модели в качестве функции $F_2(\psi)$ следует выбирать центральные моменты высоких порядков. Так, если в качестве $F_2(\psi)$ рассматривать корень девятой степени из центрального момента девятого порядка, то паретова граница для рассматриваемого выше примера будет выглядеть так, как показано на рис. 9.

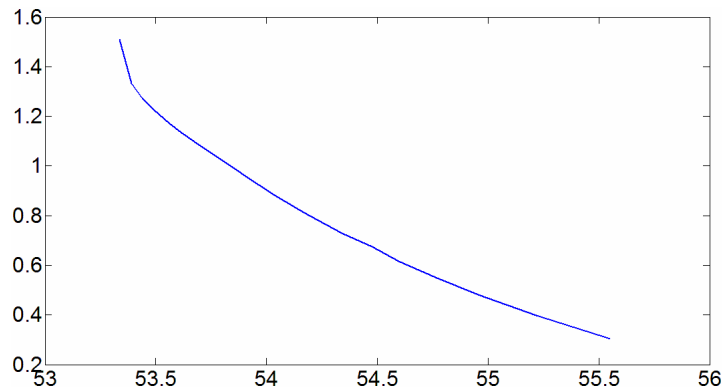


Рис. 9. Кривая точек неулучшаемых значений целевых функций для функции $F_2(\psi)$, равной корню девятой степени из центрального момента девятого порядка, и произвольного количества ремонтов при соответствующих оптимальных стратегиях ремонта и замены оборудования

Выводы. Значительное превышение намеченного уровня затрат, даже если это превышение имеет маленькую вероятность, на практике часто бывает более нежелательным, чем

весьма вероятные, но незначительные их отклонения. Для того, чтобы лучше контролировать большие превышения среднего уровня затрат, целесообразно рассматривать центральные моменты высших порядков. Предложенную в данной статье методику можно использовать не только для уменьшения среднеквадратического отклонения или центральных моментов более высоких порядков, но и для учета других показателей, например, для уменьшения вероятности превышения заданного уровня затрат. Также можно рассматривать задачи с тремя и более целевыми функциями, однако в этом случае придется столкнуться со значительными трудностями при визуализации паретовой границы.

Результаты исследований показали (табл. 2 и рис. 8), что в рассмотренном примере стратегии с большим количеством ремонтов оказались не столь эффективны, но зато более стабильны. При моделировании мы допускали возможность улучшения состояния машины посредством капитальных ремонтов до максимально возможного уровня с единичной вероятностью. На практике, в некоторых случаях ремонты могут улучшать состояние оборудования лишь с определенной вероятностью, существенно меньшей единицы. В этих случаях может оказаться, что планирование большего количества ремонтов, наоборот, будет сопряжено с большей неопределенностью и финансовыми рисками. Однако и в этих случаях предложенная выше математическая модель может быть эффективно использована для нахождения неулучшаемых стратегий ремонтов и замены оборудования.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Воевудский Е.Н. О стохастических моделях взаимодействия транспортных потоков в пунктах перевалки грузов / Е.Н. Воевудский, М.Я. Постан // Кибернетика и системный анализ. – 1993. – № 1. – С. 101-112.

2. *Постан М.Я. Экономико-математические модели смешанных перевозок: Монография / М.Я. Постан. – Одесса: Астропринт, 2006. – 376 с.*
3. *Корниец Т.Е. Методы оценки влияния ограниченной надежности перегрузочных машин на время обработки судна / Т.Е. Корниец // Вестн. Одесского национального морского ун-та: Сб. научн. трудов. – Вып. 22. – Одесса, 2007. – С. 44-53.*
4. *Селиванов А.И. Основы теории старения машин. – М.: Машиностроение, 1971. – 408 с.*
5. *Ширяева Л.В. Методы и модели управления воспроизводством парков оборудования. Вероятностный подход: Монография / Л.В. Ширяева. – Одесса: Астропринт, 2008. – 256 с.*
6. *Шахов А.В. Проектно-ориентированное управление функционированием ремонтпригодных технических систем: Монография / А.В. Шахов, В.И. Чимишир. – Одесса: Феникс, 2006. – 238 с.*
7. *Малаксиано Н.А. Об оптимальных сроках ремонтов сложного портового оборудования / Н.А. Малаксиано // Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Економіка. – 2012. – Вип. 6(3). – С. 186-195.*
8. *Подиновский В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 256 с.*
9. *Gembicki F.W. Vector Optimization for Control with Performance and Parameter Sensitivity Indices. Ph.D. Thesis. Case Western Reserve Univ. – Cleveland, Ohio, 1974.*

Стаття надійшла до редакції 16.10.2012

Рецензент – доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри «Системний аналіз і логістика» Одеського національного морського університету **І.О. Лапкіна**