

О ПЛАНИРОВАНИИ ОПТИМАЛЬНЫХ СРОКОВ РЕМОНТОВ И ЗАМЕН СЛОЖНОГО ПОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ НЕПОЛНОСТЬЮ ОПРЕДЕЛЕННОМ ПРОГНОЗЕ УРОВНЯ ЗАНЯТОСТИ

Введение. Значительную часть расходов портов составляют расходы на оборудование, поэтому большое значение для эффективной работы портов имеет экономически обоснованное планирование его ремонтов и замен. Поскольку главным фактором, влияющим на скорость физического старения оборудования, является интенсивность его использования, невозможно составлять планы ремонтов и замен оборудования без учета уровня его занятости в будущем.

Как правило, структура и интенсивность грузопотока планируется заранее, однако фактическое поступление груза в порт может колебаться относительно запланированных ранее значений. На практике порт имеет весьма ограниченные возможности активно влиять на интенсивность и структуру грузопотока. Основными факторами формирования грузопотока являются общее состояние экономики страны и ее отдельных отраслей, политическая ситуация, изменения в налоговом и таможенном законодательстве и многие другие факторы. И хотя администрация порта не может прямо влиять на грузопоток, она вполне может с определенной точностью прогнозировать тенденции его изменения и принимать управленческие решения в соответствии с этими прогнозами.

Невозможно создать одну математическую модель для корректного описания загрузки всех типов оборудования во всех возможных ситуациях. Так, например, если основная доля загрузки оборудования зависит от заключения нескольких удачных долгосрочных контрактов, то имеет смысл рассматривать лишь несколько альтернативных траекторий изменения коэффициента занятости оборудования, вероятности реализации которых напрямую зависят от заключения или незаключения этих контрактов. Совсем другая ситуация складывается в случае, когда загрузка оборудования зависит от большого количества факторов, которые подвержены случайным изменениям. В этом случае для моделирования изменений коэффициента занятости больше подходит использование соответствующего случайного процесса. Именно этот случай мы рассмотрим в данной статье и проанализируем, как данная специфика изменения уровня занятости оборудования влияет на выбор оптимального плана его ремонтов и замен.

Постановка задачи. В настоящее время удалось достичь значительных результатов в анализе показателей работы предприятий различных отраслей, функционирующих в условиях неопределенности [1-4] и в изучении процессов старения оборудования, в том числе портового, планировании его ремонтов и замен [5-8]. Тем не менее, ряд практически важных вопросов, находящихся на стыке этих направлений, до сих пор остается недостаточно изученными. Целью данной статьи является исследование задачи планирования оптимальных сроков ремонтов и замен сложного портового оборудования при неполностью определенном прогнозе уровня его занятости.

Решение поставленной задачи. В идеале, для нахождения оптимальных сроков ремонтов и замен оборудования в условиях неопределенного грузопотока, было бы хорошо знать конечномерные функции распределения случайного процесса изменения коэффициента занятости, но на практике такая информация практически никогда недоступна. В лучшем случае известна лишь функция прогнозируемого среднего уровня коэффициента занятости в будущем $s_c = s_c(t)$, а также функции $s_e = s_e(t)$ 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 занятости. Кроме этого, если ожидается, что общая специфика изменения загрузки в будущем не будет меняться, может оказаться полезной история изменения коэффициента занятости за прошлые годы, на основании которой можно, например, составить представление о таких характеристиках как уровень колебаний будущей загрузки.

Для примера рассмотрим случай, когда значения коэффициента занятости $s = s(t)$ в будущем могут изменяться случайным образом, принимая значения между функциями $s_e = s_e(t)$ и $s_n = s_n(t)$, графики которых представлены на рис. 1. И ожидается, что в среднем уровень загрузки будет соответствовать значениям функции $s_c = s_c(t)$ (рис. 1).

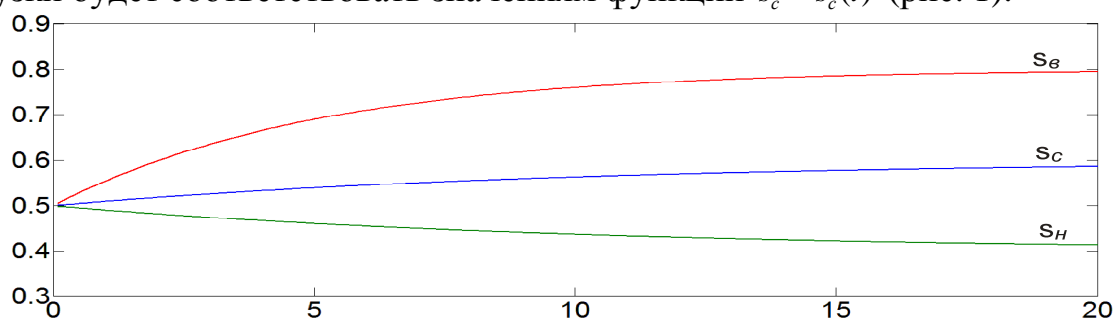


Рис. 1. Графики функций $s_e = s_e(t)$, $s_n = s_n(t)$ и $s_c = s_c(t)$

Для моделирования изменений коэффициента занятости будем его рассматривать как диффузионный случайный процесс $s = s(t, \omega)$, где $\omega \in \Omega$, а (Ω, A, P) – вероятностное пространство. Использование диффузионных случайных процессов удобно тем, что они полностью характеризуются своими функциями сноса и диффузии, которые обладают наглядным физическим смыслом. Функция износа

$$a(x, t) = \lim_{\tau \rightarrow t} \frac{M(s(\tau, \omega) - s(t, \omega) | s(t, \omega) = x)}{\tau - t}$$

выражает скорость изменения значений случайного процесса $s = s(t, \omega)$, а функция диффузии

$$b(x, t) = \lim_{\tau \rightarrow t} \frac{M((s(\tau, \omega) - s(t, \omega))^2 | s(t, \omega) = x)}{\tau - t}$$

выражает скорость изменения условной дисперсии. Поэтому несложно подобрать их так, чтобы обеспечить случайному процессу $s = s(t, \omega)$ надлежащие свойства. При имеющихся функциях сноса и диффузии случайный процесс $s = s(t, \omega)$ может быть выражен с помощью стохастической модели состояния в форме Ито:

$$\begin{cases} ds(t, \omega) = a(s(t, \omega), t)dt + \sqrt{b(s(t, \omega), t)} dW(t, \omega), \\ s(t_0, \omega) = s_0(\omega), \end{cases} \quad (1)$$

где $W(t, \omega)$ – винеровский процесс, выходящий из нуля.

Для моделирования случайного процесса загрузки оборудования рассмотрим функции износа и диффузии следующего вида:

$$a(x, t) = l \cdot (s_c(t) - x) + s'_c(t), \quad (2)$$

$$b(x, t) = q^2 \cdot (s_e(t) - x) \cdot (x - s_n(t)), \quad (3)$$

с параметрами $l, q > 0$. Легко проверить, что при таком выборе функций износа и диффузии случайный процесс изменения коэффициента занятости $s = s(t, \omega)$, получаемый при помощи стохастического дифференциального уравнения (1), ограничен функциями $s_g = s_g(t)$ и $s_n = s_n(t)$, и имеет математическое ожидание $m_s(t) = s_c(t)$. Действительно, это следует из того, что математическое ожидание $m_s(t) \equiv M(s(t, \omega))$ случайного процесса $s = s(t, \omega)$ должно являться решением задачи Коши:

$$\begin{cases} \frac{dm_s(t)}{dt} = l \cdot (s_c(t) - m_s(t)) + s'_c(t), \\ m_s(t_0) = s_c(t_0), \end{cases} \quad (4)$$

которая получается из стохастической модели состояния в форме Ито (1), если на нее подействовать оператором математического ожидания. И поскольку непосредственной проверкой легко убедиться в том, что функция $s_c(t)$ является решением уравнения (4), получаем, что $m_s(t) = s_c(t)$.

Для того, чтобы оценить дисперсию $D_s(t)$ случайного процесса $s = s(t, \omega)$, моделируемого стохастической задачей Коши (1), рассмотрим функцию:

$$y(s(t, \omega), t) = s(t, \omega) - m_s(t).$$

Очевидно, что

$$M(y(s(t, \omega), t)) = 0 \quad \text{и} \quad D_s(t) = M(y^2(s(t, \omega), t)).$$

При этом

$$\begin{aligned} dy(s(t, \omega), t) &= ds(t, \omega) - dm_s(t) = \\ &= (l(s_c(t) - s(t, \omega)) + s'_c(t)) dt + q\sqrt{(s_g(t) - s(t, \omega)) \cdot (s(t, \omega) - s_n(t))} dW(t, \omega) - \\ &\quad - (l(s_c(t) - m_s(t)) + s'_c(t)) dt = \\ &= -ly(s(t, \omega), t) dt + q\sqrt{(s_g(t) - s(t, \omega)) \cdot (s(t, \omega) - s_n(t))} dW(t, \omega). \end{aligned}$$

Используя правило дифференцирования Ито (см., например, [9]), отсюда получим:

$$\begin{aligned} d(y^2(s(t, \omega), t)) &= \\ &= (-2ly^2(s(t, \omega), t) + q^2(s_g(t) - s(t, \omega))(s(t, \omega) - s_n(t))) dt + \\ &\quad + 2q\sqrt{(s_g(t) - s(t, \omega)) \cdot (s(t, \omega) - s_n(t))} y(s(t, \omega), t) dW(t, \omega) = \\ &= (-2ly^2(s(t, \omega), t) + q^2(-s^2(t, \omega) + s(t, \omega)(s_g(t) + s_n(t)) - s_g(t)s_n(t))) dt + \\ &\quad + 2q\sqrt{(s_g(t) - s(t, \omega)) \cdot (s(t, \omega) - s_n(t))} y(s(t, \omega), t) dW(t, \omega). \end{aligned} \quad (5)$$

А поскольку

$$M(s^2(t, \omega)) = D_s(t) + m_s^2(t),$$

применяя к равенству (5) оператор математического ожидания, приходим к задаче Коши для $D_s(t)$:

$$\begin{cases} D'_s(t) = -(2l + q^2)D_s(t) + q^2(s_g(t) - s_c(t))(s_c(t) + s_n(t)), \\ D_s(0) = 0. \end{cases}$$

Решив эту задачу Коши, находим дисперсию:

$$D_s(t) = e^{-(2l+q^2)t} q^2 \int_0^t (s_g(\tau) - s_c(\tau))(s_c(\tau) + s_n(\tau)) e^{(2l+q^2)\tau} d\tau.$$

Параметры в функциях сноса и диффузии, задаваемых формулами (2) и (3), имеют наглядный смысл и представляют дополнительные возможности для учета специфики мо-

делируемого процесса загрузки оборудования. Так, параметр l определяет скорость, с которой траектории случайного процесса $s = s(t, \omega)$ возвращаются к математическому ожиданию $m_s(t)$. Большим значениям параметра l соответствует такая загрузка оборудования, при которой значения коэффициента занятости после отклонений имеют тенденцию быстро возвращаться к своим средним значениям. Параметр q характеризует интенсивность колебаний случайного процесса $s = s(t, \omega)$. Большие значения q соответствуют значительным колебаниям уровня загрузки оборудования.

На рис. 2 представлено несколько траекторий случайного процесса $s = s(t, \omega)$, являющегося решением стохастической задачи Коши (1) с функциями сноса и диффузии, заданными формулами (2) и (3) и параметрами $l = 0,1$ и $q = 0,3$.

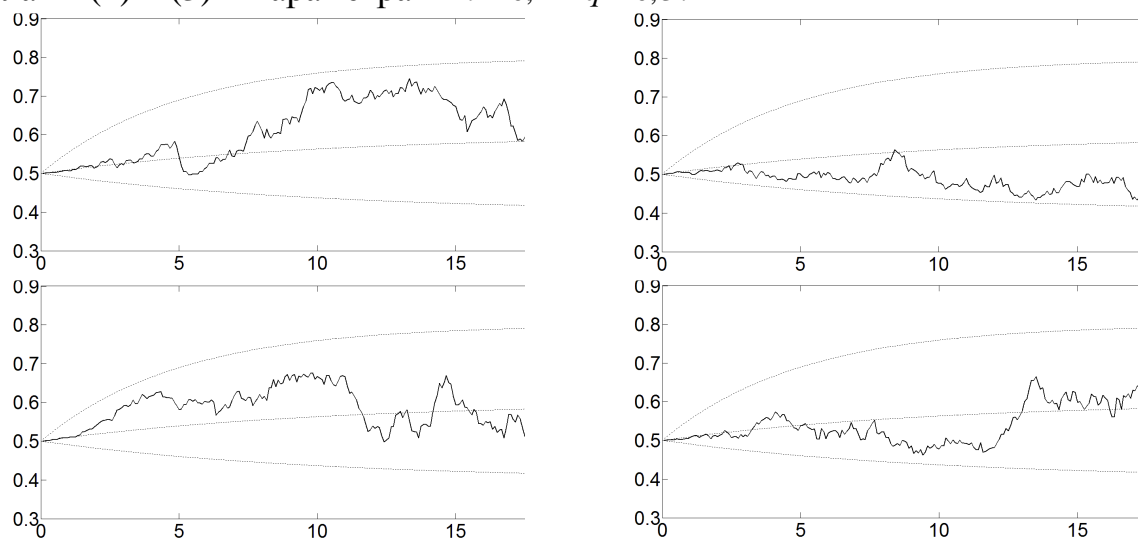


Рис. 2. Некоторые траектории случайного процесса $s = s(t, \omega)$

Свобода выбора функций $s_g = s_g(t)$, $s_u = s_u(t)$ и $s_c = s_c(t)$ создает широкие возможности для учета особенностей процесса изменения загрузки оборудования, например, таких, как возможные сезонные колебания и другие специфические факторы, связанные с данным грузопотоком.

Теперь, имея математическую модель случайных изменений загрузки оборудования, для того, чтобы исследовать влияние этих изменений на эффективность выбранной стратегии ремонтов и замен оборудования, нужна модель динамики старения оборудования, учитывающая изменения уровня его загрузки. В качестве такой модели используем математическую модель, основанную на разделении устранимого и неустраимого износов, предложенную в [10].

Показателем неустраимого износа в момент времени t будем называть число $u_1 = u_1(t)$, ($0 \leq u_1 \leq 1$), характеризующее интенсивность эксплуатационных расходов при полной занятости оборудования, которые невозможно или нецелесообразно уменьшить посредством ремонтов или модернизаций. Показателем устранимого износа будем называть число $u_2 = u_2(t)$, ($0 \leq u_2 \leq 1$), характеризующее интенсивность эксплуатационных расходов на оборудование в момент времени t при его полной занятости, которые могут быть уменьшены посредством ремонтов или модернизаций. Общий физический износ будем считать как сумму $u = u_1 + (1 - u_1) \cdot u_2$. Определяемые таким образом показатели устранимого, неустраимого и общего износа положительны и, возрастая с течением времени, приближаются к своему предельному значению. Для моделирования устранимого и неустраимого износа рассмотрим динамическую модель, описываемую следующей задачей Коши:

$$\begin{cases} u_1' = (1 - u_1)^{w_1} \cdot (u_1 - L_1)^{w_1} \cdot s(t) \cdot (a_1 + b_1 \cdot u_2), \\ u_2' = (1 - u_2)^{w_2} \cdot (u_2 - L_2)^{w_2} \cdot s(t) \cdot (a_2 + b_2 \cdot u_1), \\ u_1(0) = u_{10}, \quad u_2(0) = u_{20}, \end{cases} \quad (6)$$

где w_1 и w_2 – параметры, определяющие интенсивность увеличения соответственно неустраимого и устранимого износов на начальной стадии старения;

v_1 и v_2 – параметры, определяющие интенсивность увеличения неустранимого и устранимого износов на последней стадии старения;

$s(t)$ – коэффициент занятости оборудования в момент времени t ($0 \leq s(t) \leq 1$);

L_1 и L_2 – параметры, определяющие нижние асимптоты кривых неустранимого и устранимого износов ($0 \leq L_1 < 1, 0 \leq L_2 < 1$);

u_{10} и u_{20} – начальные значения показателей неустранимого и устранимого износов ($u_{10} > L_1, u_{20} > L_2$);

a_1 и a_2 – параметры, определяющие общую скорость увеличения неустранимого и устранимого износов на протяжении всего времени моделирования;

b_1 и b_2 – параметры, определяющие взаимное влияние значений и динамики устранимого и неустранимого износов.

Кривые неустранимого и устранимого износов, моделируемые системой (6), имеют сигмоидную форму.

Рассмотрим динамику износа, которая типична для портовых погрузчиков грузоподъемностью до 3т. Эту кривую можно описать с помощью динамической модели (6) со следующими значениями параметров: $v_1 = 1, w_1 = 2, L_1 = 0, a_1 = 1,4, b_1 = 1, u_{10} = 0,1, v_2 = 1, w_2 = 1,02, L_2 = 0, a_2 = 2,8, b_2 = 1, u_{20} = 0.001$. Поскольку сложное портовое оборудование имеет длительные сроки службы, все расходы будем дисконтировать (к моменту начала эксплуатации оборудования). Единицей измерения времени по умолчанию будем считать год. Для наглядности далее все денежные расходы будем указывать в процентах от текущей стоимости нового образца этого оборудования. В данной статье ограничимся рассмотрением только капитальных ремонтов, выполнение которых влечет уменьшение показателя устранимого износа до наименьшего значения. Средние эксплуатационные расходы за единицу времени работы машины в период от начала эксплуатации машины до момента времени t будем искать по формуле:

$$R_y(t) = \frac{R_{y0}}{u(0) \cdot \int_0^t s(\tau) d\tau} \int_0^t u(\tau) \cdot s(\tau) \cdot e^{\delta\tau} d\tau, \quad (7)$$

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

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

R_{y0} – эксплуатационные расходы нового оборудования за единицу времени при полной постоянной 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 машины до момента времени t определяются формулой:

$$R_a(t) = \frac{1}{\int_0^t s(\tau) d\tau} \left(R_0 + \sum_{t_k \leq t} R_{t_k} \cdot e^{\delta t_k} \right), \quad (8)$$

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

R_{t_k} – расходы на капитальный ремонт, запланированный на момент времени t_k .

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

$$R(t) = R_y(t) + R_a(t). \quad (9)$$

Будем считать, что средняя стоимость капитального ремонта составляет 35% от стоимости нового оборудования, годовая ставка процентов при ежегодном наращивании равна 4%, а эксплуатационные расходы нового оборудования за единицу времени работы при

полной занятости составляют 10% от его стоимости и изменяются пропорционально текущим значениям коэффициента износа и коэффициента занятости.

Используя метод имитации отжига [11], получаем, что для рассматриваемого оборудования при условии, что изменение коэффициента его занятости $s = s(t)$ будет совпадать с функцией $s_c = s_c(t)$, целесообразно планировать проведение двух капитальных ремонтов через $t_{рем1} = 4,47$ и $t_{рем2} = 8,64$ лет и списание через $t_{спис} = 12,82$ лет после начала использования. Эту стратегию ремонтов и замен оборудования можно считать оптимальной для данного уровня загрузки, поскольку при ней суммарные средние расходы за единицу времени работы машины в период от начала эксплуатации машины до ее списания принимают наименьшее значение, равное 40,109. На рис. 3 приведены кривые износа оборудования, а на рис. 4 – кривые изменения средних затрат за единицу времени работы машины при данной оптимальной стратегии ремонтов и замен оборудования.

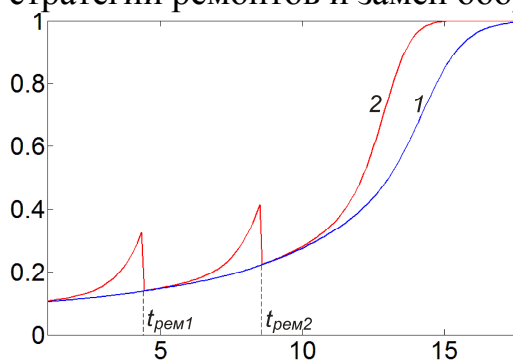


Рис. 3. Кривые износа оборудования при $s(t) = s_c(t)$
(1 – кривая неустранимого износа, 2 – кривая общего износа)

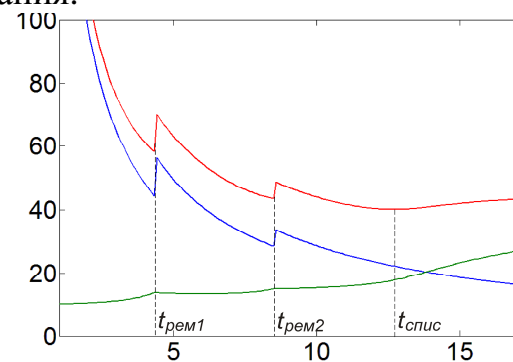


Рис. 4. Средние затраты за единицу времени работы оборудования при $s(t) = s_c(t)$
(1 – средние эксплуатационные затраты; 2 – средние капитальные затраты; 3 – суммарные средние затраты)

Естественно возникает вопрос: какие сроки ремонтов и замен оборудования следует считать оптимальными, и как их искать, если будущие изменения коэффициента занятости оборудования можно прогнозировать лишь с определенной степенью точности? Одним из наиболее естественных подходов к решению поставленной задачи является рассмотрение в качестве оптимальной стратегии ремонтов и замены оборудования такой стратегии Ψ_{opt} , которая бы минимизировала математическое ожидание суммарных средних расходов за единицу времени работы оборудования в период от начала его эксплуатации до списания, то есть минимизировала бы выражение:

$$M(R(s(t, \omega), \Psi)) = \int_{\Omega} R(s(t, \omega), \Psi) P(d\omega),$$

где $R(s, \Psi)$ – суммарные средние расходы за единицу времени работы рассматриваемого оборудования в период от начала его эксплуатации до списания, рассчитываемые по формулам (7)-(9) при стратегии ремонтов и замен оборудования Ψ и функции изменения коэффициента занятости $s = s(t)$. Для того, чтобы вычислить приближенное значение указанного математического ожидания с помощью стохастической задачи Коши (1) сгенерируем случайную выборку траекторий случайного процесса загрузки оборудования $s_1(t), s_2(t), \dots, s_N(t)$, и воспользуемся приближенным равенством:

$$M(R(s(t, \omega), \Psi)) \approx \sum_{k=1}^N \frac{1}{N} \cdot R(s_k(t), \Psi). \quad (10)$$

Используя алгоритм последовательного квадратичного программирования [12], получим, что для рассматриваемого примера оптимальная стратегия Ψ_{opt} состоит из двух ремонтов, проводимых через 4,46 и 8,45 лет, и замены через 12,51 лет после начала эксплуа-

тации оборудования, а соответствующее ей значение $M(R(s(t, \omega), \Psi_{opt}))$ составляет 40,456. При этом оценка среднеквадратичного отклонения суммарных средних расходов за единицу времени работы оборудования в период от начала его эксплуатации до списания $\sigma(R(s(t, \omega), \Psi_{opt}))$ при случайно меняющейся траектории коэффициента занятости и фиксированной стратегии Ψ_{opt} составляет 0,391. И хотя стратегия Ψ_{opt} оказалась похожей на оптимальную стратегию, полученную выше для фиксированной функции коэффициента занятости $s(t) = s_c(t) = m_s(t)$, вид системы (6) не дает оснований утверждать, что это закономерно. Чем больше объем выборки N , тем статистически точнее будет равенство (10). При этом отметим, что даже значительные объемы выборки не приводят к существенному замедлению вычислений компьютерной реализации предложенной математической модели. Так, при объеме выборки $N=100$ нахождение оптимальной стратегии Ψ_{opt} в системе Matlab занимает приблизительно одну минуту. На рис. 5 представлена гистограмма значений суммарных средних расходов за единицу времени работы оборудования в период от начала его эксплуатации до списания $R(s_k(t), \Psi_{opt})$ для 1000 траекторий изменения коэффициента занятости $s_1(t), s_2(t), \dots, s_{1000}(t)$, сгенерированных при помощи стохастической задачи Коши (1) и фиксированной стратегии Ψ_{opt} .

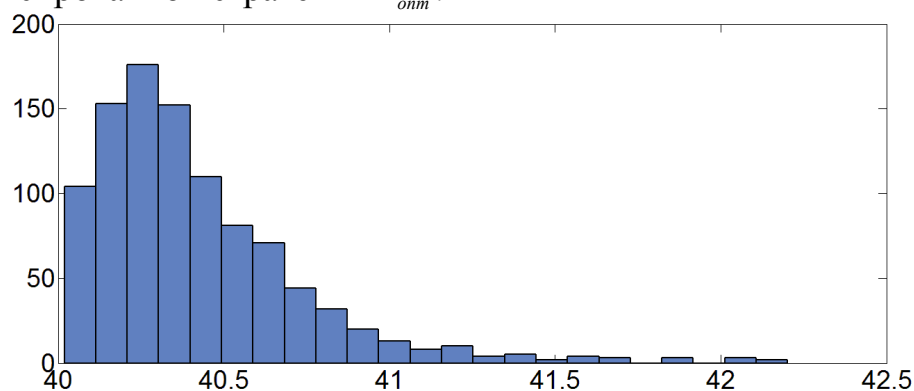


Рис. 5. Гистограмма значений $R(s_k(t), \Psi_{opt})$ при различных траекториях изменения коэффициента занятости и фиксированной стратегии Ψ_{opt}

Выводы. Изображенная на рис. 5 гистограмма дает представление о функции плотности распределения вероятностей суммарных средних расходов за единицу времени работы оборудования в период от начала его эксплуатации до списания при случайно изменяющемся грузопотоке и фиксированной стратегии Ψ_{opt} , минимизирующей математическое ожидание этих расходов. Из приведенной гистограммы видно, что математическое ожидание сдвинуто вправо относительно моды из-за наличия небольшого количества выбросов, почти равномерно распределенных между значениями 41 и 42,3 (правая часть гистограммы). Наличие этих нежелательных выбросов сопряжено с риском дополнительных расходов для порта. В связи с этим в некоторых случаях может быть целесообразным отказаться от использования стратегии Ψ_{opt} в пользу других, менее рискованных стратегий ремонтов и замен оборудования, которые бы минимизировали вероятности таких выбросов за счет незначительного увеличения математического ожидания суммарных средних расходов за единицу времени работы оборудования. Поэтому может представлять практический интерес дальнейшее развитие предложенной модели для исследования многокритериальных оценок стратегий ремонтов и замен оборудования.

Литература

1. Комплексные оценки в системе рейтингового управления предприятием [Текст]: моногр. / [А.П. Белый, Ю.Г. Лысенко, А.А. Мадых, К.Г. Макаров]; Донец. нац. ун-т. – Донецк: Юго-Восток, 2003. – 117 с.
2. Лысенко Ю.Г. Система обслуживания в случае ненадежного прибора переналадки в начале периода занятости [Текст] / Ю.Г. Лысенко, Н.В. Румянцев,

1. Beliy, A.P., Lysenko, You.G., Madyh, A.A., Makarov, K.G. (2003), *Integrated assessments in the rating system of enterprise management*, Donetsk, Uougovostok.
2. Lysenko, You.G., Rumyantsev, N.V., Medvedeva, M.I. (2008), "Service system in the event of an unreliable instrument changeover at the beginning of the busy peri-

М.И. Медведева // Международный научный журнал «Экономическая кибернетика». – Донец. нац. ун-т. – 2008. – № 3–4 (51–52). – С. 55–59.

3. Постан М.Я. Экономико-математические модели смешанных перевозок [Текст]: моногр. / М.Я. Постан. – Одесса: Астропринт, 2006. – 376 с.

4. Корниец Т.Е. Методы оценки влияния ограниченной надежности перегрузочных машин на время обработки судна [Текст] / Т.Е. Корниец // Вестн. Одесского нац. морского ун-та: сб. науч. тр. – 2007. – Вып. 22. – С. 44 – 53.

5. Ширяева Л.В. Методы и модели управления воспроизводством парков оборудования. Вероятностный поход [Текст]: моногр. / Л.В. Ширяева. – Одесса: Астропринт, 2008. – 256 с.

6. Шахов А.В. Проектно-ориентированное управление функционированием ремонтпригодных технических систем [Текст]: моногр. / А.В. Шахов, В.И. Чимшир. – Одесса: Феникс, 2006. – 238 с.

7. Пустова Н.В. Оптимізація стратегії оновлення парку порталних кранів у морських портах України [Текст]: дис. ... канд. екон. наук: 08.03.02 – Економіко-математичне моделювання / Наталія Віталіївна Пустова. – Одеса, 2006. – 159 с.

8. Селиванов А.И. Основы теории старения машин [Текст] / А.И. Селиванов. – М.: Машиностроение, 1971. – 408 с.

9. Оксендаль Б. Стохастические дифференциальные уравнения. Введение в теорию и приложения [Текст] / Б. Оксендаль. – М.: Мир, 2003. – 408 с.

10. Малаксиано Н.А. Об оптимальных сроках ремонтов сложного портового оборудования [Текст] / Н.А. Малаксиано // Вестн. Днепропетровского ун-та. Серия: Экономика. – 2012. – Вып. 6(3). – С. 186 - 195.

11. Ingber L. Adaptive simulated annealing (ASA): Lessons learned. Invited paper to a special issue of the Polish Journal Control and Cybernetics on "Simulated Annealing Applied to Combinatorial Optimization." 1995. [Электронный ресурс] / L. Ingber. – Режим доступа: http://www.ingber.com/asa96_lessons.ps.gz - 25.09.2012 г.

12. Nocedal J. Numerical Optimization, [Текст] / J. Nocedal, S.J. Wright. – New York: Springer Series in Operations Research, Springer Verlag, 1999. – 656 с.

od”, Economic Cybernetics, Vol. 51-52, pp. 55-59.

3. Postan, M. Y. (2006), *Economic and mathematical models of multimodal transport*, Odessa, Astroprint.

4. Korniyets, T.E. (2007), “*Methods for assessing the impact of the limited reliability of the handling machines for the processing of the vessel*”, Bulletin Odessa Nat. Maritime University.

5. Shiryayeva, L.V. (2008), *Methods and models of reproductive management of parks equipment*. Probabilistic campaign, Odessa, Astroprint.

6. Shahov, A.V., Chimshir, V.I. (2006), *Project-oriented management of functioning repairable technical systems*, Odessa, Phenics.

7. Pustova, N.V. (2006) *Optimization strategies renovating the cranes in the seaport Ukraine*, dissertation, Odessa.

8. Selivanov, A.I. (1971), *Fundamentals of the theory of machines*, Moscow, Mechanical Engineering.

9. Oksendal, B. (2003) *Stochastic Differential Equations. Introduction to the theory and application*, Moscow, Mir.

10. Malaksiano, N.A. (2012), *On the optimal timing of repair of a complex of port equipment*, Bulletin Dnipropetrovsk University. Series The Economy, Vol. 6 (3), pp. 186 - 195.

11. Ingber, L. (1995), *Adaptive simulated annealing (ASA): Lessons learned. Invited paper to a special issue of the Polish Journal Control and Cybernetics on "Simulated Annealing Applied to Combinatorial Optimization."*, available at: http://ingber.com/asa96_lessons.ps.gz

12. Nocedal, J. (1999), *Numerical Optimization*, New York, Springer Series in Operations Research, Springer Verlag.