УДК 658.012.122:656.61.01

Н.А. МАЛАКСИАНО

Одесский национальный морской университет

О МОДЕЛИРОВАНИИ ФИЗИЧЕСКОГО ИЗНОСА ПОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕПОСТОЯННОЙ ЗАНЯТОСТИ

В работе рассматриваются математические модели динамики физического износа портового оборудования. Для описания процесса старения портового оборудования в условиях непостоянной занятости предложена динамическая модель, основанная на разделении износов первого и второго рода. Построена стохастическая модель износа оборудования и проанализированы различные подходы к ее исследованию, основанные на применении теории стохастических дифференциальных уравнений и методов имитационного моделирования. Приведены результаты анализа динамики физического износа оборудования для некоторых частых случаев.

Ключевые слова: *физический износ оборудования, случайные процессы, стохастические дифференциальные уравнения.*

Введение

Эксплуатационные характеристики машин со временем ухудшаются. Это происходит как вследствие активного использования (так называемого износа первого рода [1]), так и вследствие разрушительного влияния внешних факторов, действующих вне зависимости от того, работает машина или нет (износа второго рода). Основными проявлениями износа первого рода являются стирание деталей, деформация и усталость материалов. Износ второго рода проявляется в ржавлении, окислении, разрушении под действием атмосферной влажности, перепадов температуры, солнечного света и других факторов. Некоторые проявления физического износа могут быть устранены посредствам плановых ремонтов и технического обслуживания, однако, даже при надлежащем обслуживании, влияние физического износа полностью устранить невозможно. Для разных типов оборудования последствия физического износа могут быть различными. Одним машинам со временем свойственно постепенное увеличение эксплуатационных расходов при почти неизменных показателях надежности. Для других – наоборот, более критичным является увеличение со временем вероятности отказов. В любом случае, ухудшение эксплуатационных показателей техники достигает со временем такого уровня, что ее дальнейшее использование становится нецелесообразным.

Для многих предприятий значительную часть расходов составляют расходы на оборудование. Поэтому взвешенная и обоснованная стратегия обновления и изменения структуры парка машин должна быть неотъемлемой частью стратегии экономического развития таких предприятий. В связи с этим возникает потребность в точных количественных оценках динамики износа оборудования, на основании которых можно было бы создавать обоснованные стратегии управления парками машин. Данный вопрос достаточно сложен, и, несмотря на всю его важность для практики, в научно-производственных кругах не существует единого универсального подхода к моделированию износа. Имеется ряд технических ГОСТов, определяющих способы измерения износа для различных материалов деталей машин. В ГОСТ 27.X XX-XX – «Надежность в технике» вводятся ряд показателей надежности, безотказности, долговечности, ремонтопригодности и сохраняемости для технических объектов, но не дается определения понятия износа сложного оборудования. Многие авторы обоснованно считают (см., например, [2]), что износ сложного оборудования является в большей степени не техническим, а технико-экономическим понятием. Это связано с тем, что для ряда практических задач более содержательным показателем динамики эксплуатационных качеств оборудования является динамика его потенциальной эффективности использования, выраженная в денежном эквиваленте, чем перечисление его показателей надежности в соответствии с ГОСТ 27.002-89 [3]. Предпочтительность экономического подхода к исследованию износа во многих случаях обусловлена тем, что основными критериями в вопросах оптимальной замены или модернизации оборудования зачастую являются не технические, а именно экономические показатели, также выраженные в денежном эквиваленте. Однако при таком подходе износ оборудования приходится определять, не рассматривая его изолированно в статическом положении, а анализируя изменения результатов функционирования производственной системы, в которую оно включено при непостоянных внешних условиях, что может оказаться непростой задачей.

Оценки износа оборудования важны для разных задач: от прогнозирования остаточного ресурса до оценки его стоимости для продажи, и поскольку объем и качество доступной информации могут сильно отличаться, разработано множество моделей определения и прогнозирования износа. Например, в случае, когда никакая другая информация недоступна, некоторые авторы полагают допустимым считать физический износ равным отношению балансовой стоимости к его первоначальной стоимости или отношению его фактической наработки и ожидаемой суммарной наработки от начала его эксплуатации до перехода в предельное состояние. Очевидно, что такой подход в большинстве случаев может оказаться неприемлемым. Некоторые авторы исходят из того, что износ сложного оборудования можно выразить как функцию известных износов его составных деталей и узлов [1]. Реализация такого подхода сопряжена со значительными трудностями, главная из которых состоит в том, что большинство работоспособных машин являются достаточно сложными системами и эксплуатационные качества машины нельзя выразить как линейную или другую функцию простого вида от технических показателей ее частей. Каких-либо общих подходов в выборе такой функции нет, а ошибка в ее выборе может привести к большой погрешности модели.

1. Постановка задачи

В настоящее время удалось достичь значительных результатов в исследовании показателей работы порта (транспортного узла) в условиях неопределенного грузопотока [4], и отдельно – в исследовании процессов старения оборудования, в том числе портового, его ремонтов и замен [5 – 10]. Каждая из этих задач сложна сама по себе и до конца не изучена. Многие авторы отмечают тесную взаимосвязь между ними, однако экономико-математические модели, позволяющие связать эти две задачи в единую систему, до сих пор исследованы недостаточно. Большинство имеющихся моделей основаны на предположении, что грузопотоки и потоки поломок подчиняются закономерностям строго определенного вида, чаще всего это линейная зависимость и экспоненциальное распределение.

Реальный грузопоток в большинстве случаев не является ни постоянным, ни чисто случайным. 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 состояния экономики страны и ее отдельных отраслей, политическая ситуация, налоговое и таможенное законодательство 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.

На наш взгляд, хороших результатов в исследовании динамики физического износа сложного оборудования при непостоянном режиме его работы можно ждать от применения методов теории стохастических дифференциальных уравнений.

2. Результаты

Показателем износа оборудования будем называть число $u = u(t)$, $0 \le u \le 1$, которое характеризует интенсивность эксплуатационных расходов оборудования в момент времени t. Статистические данные показывают значительные колебания коэффициента занятости портового оборудования [11]. Поэтому при моделировании динамики показателя износа необходимо различать вклад износов первого и второго рода. Обозначим ϕ_1 – скорость роста износа первого рода. Вообще говоря, $\phi_1 = \phi_1(t, u, s, \alpha)$ может зависеть от момента времени t, текущего состояния износа оборудования u, коэффициента занятости $s = s(t)$, $s \in [0,1]$ в данный момент времени и от вектора параметров $\alpha = (\alpha_1; \alpha_2; ...; \alpha_k)$, характеризующих конструктивные особенности оборудования. Через $\phi_2 = \phi_2(t, u, \alpha)$ обозначим скорость роста износа второго рода в момент времени t, которая в отличие от ϕ_1 не зависит от коэффициента занятости. Тогда скорость изменения показателя износа оборудования можно записать как сумму влияния износов первого и второго рода

$$u' = \phi_1(t, u, s, \alpha) + \phi_2(t, u, \alpha). \quad (1)$$

Вид функций ϕ_1 и ϕ_2 следует выбирать, исходя из фактически наблюдаемых данных о функционировании оборудования. В качестве примера рассмотрим случай, когда ϕ_1 и ϕ_2 имеют наиболее простую структуру. Предположим, что динамика износа, вызываемого активным использованием данного оборудования, представима в виде

$$\phi_1 = \alpha_1 \cdot s(t) \cdot u + \alpha_2 \cdot s(t), \quad (2)$$

где второе слагаемое не зависит от состояния оборудования и выражает износ, обусловленный только его работой, а первое слагаемое, кроме того, еще зависит от показателя износа $u = u(t)$ и выражает тот факт, что при одной и той же степени занятости новое и старое оборудование может иметь неодинаковые темпы старения. Параметры α_1 и α_2 определяют вклад каждого из этих слагаемых в скорость роста износа первого рода и обусловливают специфику динамики старения для каждого заданного типа оборудования. Для описания динамики износа второго рода можно рассмотреть функцию с аналогичной структурой

$$\phi_2 = \alpha_3 \cdot u + \alpha_4. \quad (3)$$

Таким образом, дифференциальное уравнение (1) примет вид

$$u' = (\alpha_1 \cdot s(t) + \alpha_3) \cdot u + \alpha_2 \cdot s(t) + \alpha_4.$$

Решение этого дифференциального уравнения можно выразить в явном виде:

$$u(t) = e^{\int (\alpha_1 \cdot s(t) + \alpha_3) dt} \left[C + \int (\alpha_2 \cdot s(t) + \alpha_4) \cdot e^{-\int (\alpha_1 \cdot s(t) + \alpha_3) dt} dt \right].$$

На рис. 1 приведены кривые 1, 2, 3 и 4 изменения показателя износа, полученные при помощи данной модели для коэффициента занятости $s(t)$, график которого изображен на рис. 2, векторов параметров $\alpha = (0,8; 0; 0; 0)$, $\alpha = (0; 0,2; 0; 0)$, $\alpha = (0; 0; 0,4; 0)$ и $\alpha = (0; 0; 0; 0,15)$, соответственно и начального условия $u(0) = 0,05$. Если значения обоих параметров α_1 и α_3 малы по сравнению со значениями α_2 или α_4, то кривая показателя износа изменяется почти равномерно (при постоянном коэффициенте занятости), в то время как при увеличении α_1 или α_3 динамика показателя износа ускоряется, проявляя экспоненциальный рост. Если хотя бы один из параметров α_3 или α_4 значительно больше, чем оба α_1 и α_2, то износ оборудования мало зависит от коэффициента занятости, а это означает, что оборудование в большей степени подвержено износу второго рода. Если же хотя бы один из параметров α_1 и α_2 значительно больше, чем оба α_3 или α_4, то оборудование в большей степени подвержено износу первого рода.

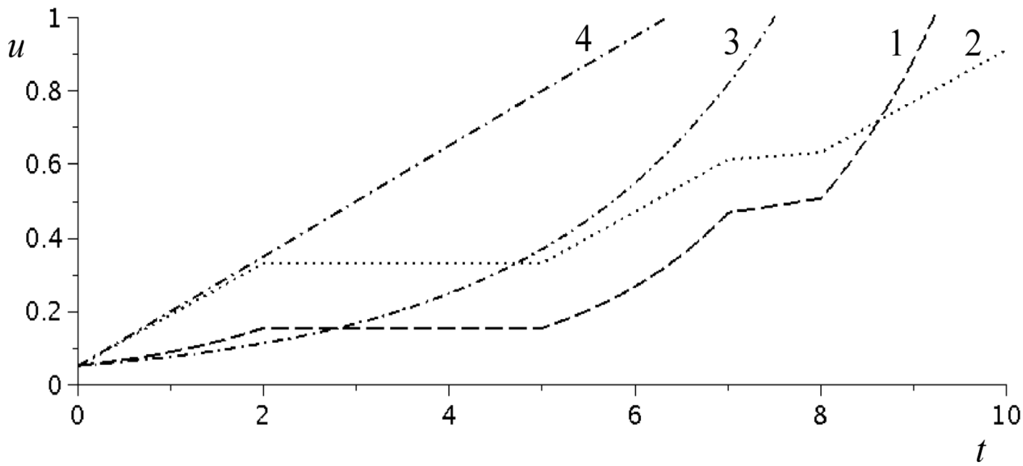

Рис. 1. Кривые изменения показателя износа

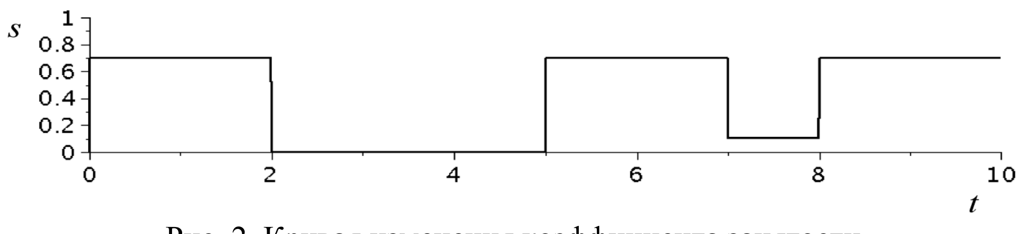

Рис. 2. Кривая изменения коэффициента занятости

Выбирая более сложную структуру функций ϕ_1 и ϕ_2, можно добиться значительной гибкости и точности данной модели. После выбора подходящего вида функций ϕ_1 и ϕ_2 для дальнейшего практического использования описанной модели следует выяснить значения параметров $\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_k$, соответствующих данному оборудованию. Даже если дифференциальное уравнение (1) не удастся решить в явном виде, вектор параметров α можно определить статистическими методами по уже имеющимся наблюдениям траекторий показателя износа и коэффициента занятости для аналогичного оборудования. Более того, при отсутствии данных наблюдений можно оценить значение вектора α, наблюдая лишь за неполной траекторией показателя износа, а затем по этому значению вектора α и по прогнозируемым значениям коэффициента занятости с помощью уравнения (1) прогнозировать значения показателя износа в будущем.

Даже самые удачные модели не могут абсолютно точно соответствовать действительности. Если модель составлена удачно, и ее параметры описывают все основные свойства изучаемой системы, то погрешность модели будет незначительной, и ее можно считать случайной величиной. Тем не менее, при прогнозировании ряда параметров даже незначительная погрешность вследствие накопительного эффекта может приводить к большим ошибкам. Поэтому для того, чтобы контролировать погрешность моделирования динамики износа, в уравнении (1) вместо функций ϕ_1 и ϕ_2 следует рассматривать функции

$$\tilde{\phi}_1 = \phi_1(t,u,s,\alpha) + \xi_1(t,\omega) \quad \text{и} \quad \tilde{\phi}_2 = \phi_2(t,u,\alpha) + \xi_2(t,\omega),$$

где $\xi_1(t,\omega)$ и $\xi_2(t,\omega)$ – случайные процессы, выражающие погрешности оценок динамики износов первого и второго рода. Функции $\xi_1(t,\omega)$ и $\xi_2(t,\omega)$ при фиксированном t называются сечениями и являются случайными величинами, определенными на некотором вероятностном пространстве Ω. Если же зафиксировать $\omega \in \Omega$, то получим функции одной переменной, называемые траекториями, или реализациями случайного процесса. Таким образом, от уравнения (1) перейдем к стохастическому дифференциальному уравнению $u' = \tilde{\phi}_1(t,u,s,\alpha) + \tilde{\phi}_2(t,u,\alpha)$, или

$$u' = \phi_1(t,u,s,\alpha) + \phi_2(t,u,\alpha) + \xi(t,\omega), \tag{4}$$

где $\xi(t,\omega) = \xi_1(t,\omega) + \xi_2(t,\omega)$.

В общем случае случайные процессы ξ_1 и ξ_2 могут зависеть от дополнительных параметров и включаться в модель не как слагаемое, а как множитель, или другим способом. Если предположить, что функции ϕ_1 и ϕ_2 подобраны так, что погрешности являются процессами с некоррелированными нормальными сечениями, то становится естественной замена ξ на белый шум, и далее неизбежен переход от обычного интегрального исчисления к интегральному исчислению Ито. Такой подход является стандартным в квантовой физике и финансовой математике [12]. Однако использование его непосредственно для моделирования динамики старения оборудования привело бы к существованию немонотонных реализаций у случайного процесса, являющегося решением уравнения (4), что нарушало бы корректность модели. Тем не менее, можно предположить, что в каждый момент времени модель может содержать в своих параметрах всю наиболее существенную информацию, необходимую для определения ее дальнейшего развития независимо от предыстории, при этом ослабив требование некоррелированности сечений процесса погрешности, и считать ξ марковским диффузионным случайным процессом. Тогда ξ можно описать при помощи функций сноса $a(x,t)$ и диффузии $b(x,t)$. Функции сноса и диффузии обладают наглядным физическим смыслом. Функция сноса

$$a(x,t) = \lim_{\tau \to t} \frac{M[\xi(\tau,\omega) - \xi(t,\omega) \mid \xi(t,\omega) = x]}{\tau - t}$$

выражает скорость изменения значений случайного процесса ξ, а функция диффузии

$$b(x,t) = \lim_{\tau \to t} \frac{M[(\xi(\tau,\omega) - \xi(t,\omega))^2 \mid \xi(t,\omega) = x]}{\tau - t}$$

выражает скорость изменения условной дисперсии ξ. Поэтому несложно подобрать их так, чтобы обеспечить случайному процессу ξ надлежащие свойства и гарантировать монотонность траекторий показателя износа. Далее рассмотрим два подхода к исследованию уравнения (4). Первый подход ориентирован на поиск аналитических решений, второй – на применение имитационного моделирования и статистических методов.

В рамках первого подхода, решая уравнение Колмогорова-Фокера-Планка

$$\frac{\partial f}{\partial \tau}+\frac{\partial}{\partial y}(a(y,\tau)\cdot f)-\frac{1}{2}\frac{\partial^2}{\partial y^2}(b(y,\tau)\cdot f)=0$$

с соответствующими начальными и граничными условиями, можно найти условные функции плотности вероятностей $f(t,x,\tau,y)=f_\xi(y\,|\,x)$, а значит, и двумерную функцию плотности вероятностей $f_\xi(x,y\,|\,t,\tau)$. Затем исследование уравнения (4) можно проводить, опираясь на интегрируемость случайного процесса ξ в смысле среднеквадратической сходимости. Полных результатов в решении уравнения (4) можно достичь в случае, если функции ϕ_1 и ϕ_2 представимы в виде (2) и (3) соответственно. В этом случае уравнение (4) примет вид

$$u'=(\alpha_1\cdot s(t)+\alpha_3)\cdot u+\alpha_2\cdot s(t)+\alpha_4+\xi(t,\omega). \qquad (5)$$

Нетрудно проверить [13], что решением стохастического дифференциального уравнения (5) с начальным условием $u(t_0,\omega)=u_0$ является случайный процесс

$$u(t,\omega)=e^{\int_{t_0}^{t}(\alpha_1\cdot s(\tau)+\alpha_3)d\tau}\cdot\left[u_0+\int(\alpha_2\cdot s(\tau)+\alpha_4+\xi(t,\omega))\cdot e^{-\int_{t_0}^{\tau}(\alpha_1\cdot s(v)+\alpha_3)dv}d\tau\right].$$

Таким образом, если случайный процесс ξ имеет нулевое математическое ожидание, то математическое ожидание $m_u(t)$ случайного процесса $u(t,\omega)$, выражающее динамику среднего значения показателя износа, находится по формуле

$$m_u(t)=e^{\int_{t_0}^{t}(\alpha_1\cdot s(\tau)+\alpha_3)d\tau}\left[u_0+\int(\alpha_2\cdot s(\tau)+\alpha_4)\cdot e^{-\int_{t_0}^{\tau}(\alpha_1\cdot s(v)+\alpha_3)dv}d\tau\right].$$

Для ковариационной функции случайного процесса $u(t,\omega)$ имеем:

$$K_u(t_1,t_2)=\int_{t_0}^{t_1}\int_{t_0}^{t_2}e^{\int_{\tau_1}^{t_1}(\alpha_1\cdot s(v)+\alpha_3)dv+\int_{\tau_2}^{t_2}(\alpha_1\cdot s(v)+\alpha_3)dv}\cdot K_\xi(\tau_1,\tau_2)\,d\tau_1\,d\tau_2,$$

где

$$K_\xi(t_1,t_2)=\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}\big(x-m_\xi(t_1)\big)\big(y-m_\xi(t_2)\big)f_\xi(x,y\,|\,t_1,t_2)\,dx\,dy\;-$$

ковариационная функция случайного процесса $\xi(t,\omega)$. Отсюда получаем дисперсию ожидаемого показателя износа $D_\xi(t) = \sigma_\xi^2(t) = K_u(t,t)$ в каждый момент времени t.

Для того чтобы реализовать второй подход к исследованию уравнения (4), основываясь на имеющихся функциях сноса $a(x,t)$ и диффузии $b(x,t)$ случайного процесса ξ, перейдем к стохастической модели состояния в форме Ито:

$$\begin{cases} d\xi(t,\omega) = a(\xi(t,\omega),t)dt + \sqrt{b(\xi(t,\omega),t)}\,dw(t,\omega), \\ \xi(t_0,\omega) = \xi_0(\omega), \end{cases} \tag{6}$$

где $w(t,\omega)$ – винеровский процесс, выходящий из 0. Не составляет большого труда сгенерировать любое количество траекторий $\xi_1(t)$, $\xi_2(t)$, …, $\xi_n(t)$ решения уравнения (6) и для этих траекторий, используя уравнение (4), построить соответствующие траектории изменения показателя износа оборудования $u_1(t)$, $u_2(t)$, …, $u_n(t)$. Имея достаточное количество n реализаций процесса износа $u(t,\omega)$, можно с необходимой степенью точности делать статистические выводы относительно эффективности функционирования оборудования. Данный подход предполагает интенсивные компьютерные вычисления. С его помощью можно моделировать достаточно сложные системы, проверять различные стратегии списания и ремонтов в разных условиях. Однако при этом требуется постоянный анализ и проверка качества полученных результатов, основанные на применении статистических методов. На рис. 3 пунктиром изображены некоторые траектории изменения показателя износа оборудования, описываемого стохастическим дифференциальным уравнением (5), а сплошной линией – математическое ожидание $m_u(t)$. Для вычисления этих траекторий использовалось стохастическое дифференциальное уравнение (5) с вектором параметров $\alpha = (0,5; 0,02; 0,03; 0,02)$, начальным условием $u(0,\omega) = 0,05$ и коэффициентом занятости $s(t)$, график изменения которого изображен на рис. 2. При этом использовался случайный процесс

$$\xi(t,\omega) = r \cdot ((\alpha_1 s(t) + \alpha_3)u + \alpha_2 s(t) + \alpha_4) \cdot \eta(t,\omega),$$

где случайный процесс $\eta(t,\omega)$ моделировался с помощью уравнения (6) по заданным функциям сноса $a_\eta(x,t) = -l \cdot x$ и диффузии $b_\eta(x,t) = q^2 \cdot (1-x)^2$ с параметрами $l = 0,5$, $q = 0,8$ и $r = 0,2$. Такой выбор функций сноса и диффузии обеспечивает нулевое математическое ожидание процессов $\eta(t,\omega)$ и $\xi(t,\omega)$, ограниченность процесса $\eta(t,\omega)$ ($|\eta(t,\omega)| < 1$) и монотонность траекторий $u(t,\omega)$. На рис. 4 представлена одна из траекторий процесса $\eta(t,\omega)$.

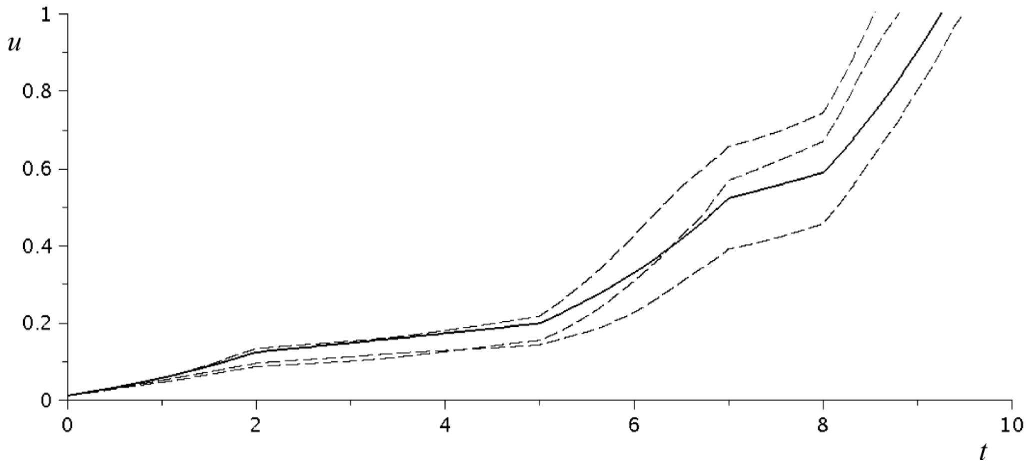

Рис. 3. Некоторые траектории случайного процесса изменения показателя износа оборудования

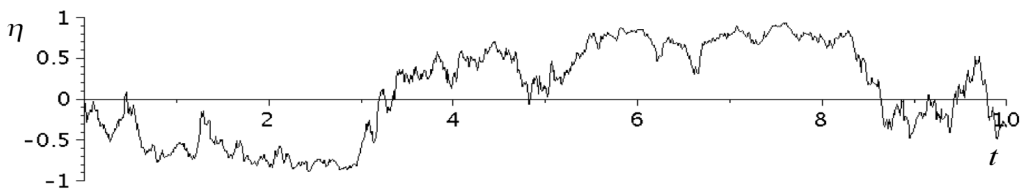

Рис. 4. Одна из траекторий процесса $\eta(t,\omega)$

Кроме того, параметры выбранных функций сноса и диффузии имеют наглядный смысл и представляют дополнительные возможности для учета специфики моделируемой системы. Так, параметр $l > 0$ определяет скорость, с которой траектории случайных процессов $\eta(t,\omega)$ возвращаются в нулевое значение. Большим значениям параметра l соответствуют технические системы, условия функционирования которых после отклонений имеют тенденцию быстро возвращаются к своим средним значениям. Параметр $q \in (0,1)$ характеризуют величину дисперсии процесса $\eta(t,\omega)$. Большие значения q соответствуют частым выбросам условий использования оборудования от своих средних показателей. Коэффициент $r \in [0;1]$ определяет максимальную амплитуду колебаний случайного процесса $\xi(t,\omega)$ около нуля. Технические системы, процесс износа которых мало подвержен случайным воздействиям, характеризуются малыми значениями параметра r, при этом реализации процесса $u(t,\omega)$ мало отличается от $m_u(t)$.

Выводы

Рассмотрена динамическая модель описания физического износа оборудования, основанная на разделении износов первого и второго рода. Такой подход позволяет адекватно описывать процесс старения портового оборудования, функционирующего в условиях непостоянного грузопотока. На основании предложенной динамической модели построена стохастическая модель динамики износа. Эта модель обладает рядом достоинств, среди которых:

– учет существенной неравномерности грузопотока;

– гибкость и возможность достаточно точно описывать специфику системы с помощью небольшого количества числовых параметров, каждый из которых имеет наглядный смысл, что позволяет эффективно применять статистические методы для уточнения значений параметров даже при ограниченном объеме фактических данных о функционировании оборудования;

– возможность исследовать модель в ряде случаев аналитическими методами, и во всех случаях – с помощью имитационного моделирования, что позволят получать разностороннюю информацию и проводить анализ даже очень сложных производственных систем.

Перечисленные достоинства данной модели показывают целесообразность ее использования для описания процесса физического износа портового оборудования на практике. Поэтому имеет смысл развивать предложенную модель для дальнейшего ее использования в качестве основы при построении и изучении оптимальных стратегий ремонтов и замен портового оборудования.

Литература

1. Консон, А.С. Экономика ремонта машин [Текст] / А.С. Консон. – Л.: Машиностроение, 1970. – 216 с.

2. Колегаев, Р.Н. Управление обновлением машинного парка [Текст]/ Р.Н. Колегаев, П.А. Орлов, В.И. Шелепко. – К.: Техніка, 1981. – 176 с.

3. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения [Текст]. – Введен впервые; введ. 01.07.1990. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 37 с.

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

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 ремонтопригодных технических систем [Текст]: моногр. / А.В. Шахов, В.И. Чимшир. – Одеса: Феникс, 2006. – 238 с.

7. Зубко, Н.Ф. Надежность в задачах эксплуатации машин [Текст] / Н.Ф. Зубко. – Одесса: ТЕС, 2007. – 250 с.

8. Холоденко, А.М. Визначення оптимальних термінів експлуатації обладнання [Текст] / А.М. Холоденко // Вісн. технологічного ун-ту поділля. – 2002. –Ч.2., №4. – С. 33 – 38.

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

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

11. Пустовой, В.Н. Портовые краны отрасли: мониторинг технического состояния [Текст] / В.Н. Пустовой // Порты Украины. – 2007. – № 1. – С. 54 – 58.

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

13. Пугачев, В.С. Стохастические дифференциальные системы [Текст] / В.С. Пугачев, И.Н. Синицын. – М.: Наука, 1985. – 560 с.

Поступила в редакцию 4.07.2011

Рецензент: д-р экон. наук, проф., зав. каф. системного анализа и логистики, **И.А. Лапкина**, Одесский национальный морской университет, Одесса.

ПРО МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНОГО ЗНОСУ ПОРТОВОГО ОБЛАДНАННЯ В УМОВАХ НЕПОСТІЙНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ

М.О. Малаксіано

В роботі розглядаються математичні моделі динаміки фізичного зносу портового обладнання. Для опису процесу старіння портового обладнання в умовах непостійної зайнятості запропонована динамічна модель, що заснована на розділенні зносів першого та другого родів. Побудована стохастична модель зносу обладнання і проаналізовані різні підходи до її дослідження, які основані на застосуванні теорії стохастичних диференційних рівнянь і методів імітаційного моделювання. Наведені результати аналізу динаміки фізичного зносу обладнання для деяких окремих випадків.

Ключові слова: фізичний знос обладнання, випадкові процеси, стохастичні диференційні рівняння.

ON THE WEAR AND TEAR PROCESS MODELING FOR A SEA PORT EQUIPMENT ALLOWING FOR PARTIAL EMPLOYMENT

M.O. Malaksiano

The mathematical models of the dynamics of a sea port equipment wear and tear are considered. The dynamic model based on the separation of wear and tear of the first and second types is proposed to describe the wear and tear process allowing for a partial employment of equipment. The stochastic model of wear and tear of equipment is built and different approaches to its investigation are analyzed using the stochastic differential equations theory and the simulation modeling technique. The results of the wear and tear dynamics of equipment are cited for a particular case.

Keywords: wear and tear of equipment, random process, stochastic differential equations.

Малаксиано Николай Александрович – канд. физ.-мат. наук, доцент, докторант кафедры системного анализа и логистики факультета транспортных технологий и систем Одесского национального морского университета, Одесса, e-mail: malax@ukr.net.