

УДК 656.615: 658.589

**О ПОВЫШЕНИИ УСТОЙЧИВОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ СРОКОВ ОБНОВЛЕНИЯ СЛОЖНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

И.А. Лапкина, Н.А. Малаксиано

Аннотация. Исследуется влияние физического износа сложного оборудования на динамику показателей эффективности его использования. Установлена количественная связь между сроком замены оборудования и устойчивостью его суммарных удельных расходов. Предложена методика обоснования сроков обновления оборудования, при которых достигается баланс между минимальностью и устойчивостью суммарных удельных расходов на оборудование.

Ключевые слова: износ оборудования, замена оборудования, устойчивость показателей эффективности.

**ПРО ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ
ПРИ ПЛАНУВАННІ ТЕРМІНІВ ОНОВЛЕННЯ СКЛАДНОГО ОБЛАДНАННЯ**

І.О. Лапкина, М.О. Малаксіано

Анотація. Досліджується вплив фізичного зносу складного обладнання на динаміку показників ефективності його використання. Встановлено кількісний зв'язок між терміном заміни обладнання та стійкістю його сумарних питомих витрат. Запропоновано методику обґрунтування термінів оновлення обладнання, за яких досягається баланс між мінімальністю та стійкістю сумарних питомих витрат на обладнання.

Ключові слова: знос обладнання, заміна обладнання, стійкість показників ефективності.

**ON IMPROVING THE SUSTAINABILITY OF INDICATORS OF EFFECTIVENESS
AT THE PLANNING OF THE UPDATE OF COMPLETING EQUIPMENT UPDATES**

I.A. Lapkina, N.A. Malaksiano

The influence of wear and tear of complex equipment on the dynamics of its key performance indicators is studied.

A quantitative relationship has been established between the time of replacement of equipment and the stability of its total unit costs. A technique of justifying the equipment renewal terms is proposed, so that a balance is attained between the minimum and the stability of the total unit costs for the equipment.

Keywords: wear and tear of equipment, equipment replacement, stability of the key performance indicators.

© Лапкина И.А., Малаксиано Н.А., 2018

Введение. Для большинства предприятий затраты на оборудование составляют значительную часть расходов. Поэтому рациональное планирование сроков замен оборудования имеет большое значение для эффективной работы многих предприятий, и в том числе для морских портов.

При выборе оптимальной стратегии управления заменами сложного портового оборудования необходимо принимать во внимание то, что как правило, такое оборудование имеет длительный срок службы, в течение которого могут происходить существенные колебания уровня загрузки.

Поэтому при планировании сроков замен сложного портового оборудования необходимо учитывать не только средние ожидаемые показатели эффективности его функционирования, но и оценивать уровень устойчивости этих показателей к возможным колебаниям значений внешних факторов. Есть ряд публикаций, посвященных изучению данных вопросов. Так, в работах [1; 2] рассмотрены модели старения оборудования, функционирующего в условиях постоянной загрузки. Модели управления функционированием технических систем, в том числе вероятностные модели управления воспроизводством и управлением надежностью транспортного оборудования, были предложены в [3-5]. Задачи оптимального управления транспортными системами, работающими в условиях неравномерной загрузки, а также задачи выбора оптимальных стратегий ремонтов и замен сложного портового оборудования были рассмотрены в работах [6]-[10]. Однако ряд практически важных вопросов все еще остается исследованным недостаточно и требует дальнейшего изучения.

Изучение вопросов оптимальных сроков замен оборудования часто основаны на использовании сложных аналитических методов теории динамических систем, методов оптимального управления или имитационного моделирования (см., например, [8]-[10]). Эти методы помогают более точно описывать процессы старения оборудования. Подобные исследования играют важную роль в развитии теории, однако, далеко не всегда они могут быть легко реализованы на практике для проведения текущих инженерных расчетов. Универсальных методов планирования сроков замен оборудования, учитывающих всю специфику работы оборудования любого типа, не существует. Для каждой конкретной производственной задачи, как правило, необходимо индивидуально подбирать математическую модель, составлять и исследовать системы дифференциальных уравнений, обосновывать параметры, подбирать численные методы исследования и т.д. Зачастую использование сложных современных моделей требует высокой теоретической подготовки инженеров, реализующих эти методы на практике, наличие специального программного обеспечения и эффективной системы мониторинга за параметрами изучаемой системы. Все эти требования существенно тормозят внедрение передовых исследований на практике. Поэтому, несмотря на то, что

сложные модели позволяют максимально точно описывать предметную область, существует достаточно острая потребность в разработке и адаптации к конкретным производственным условиям относительно простых в использовании методов и моделей, которые, с одной стороны, позволяли бы моделировать все основные особенности и принципы изучаемой предметной области, а, с другой стороны, были бы легко формализуемы в виде производственных инструкций и могли быть реализуемы теми средствами, которые общедоступны на большинстве производств.

Цель статьи. Целью данной статьи является обоснование методики определения сроков замены сложного оборудования, основанной на использовании статистических данных использования аналогичного оборудования за прошлые годы и учитывающей как средние значения показателей эффективности использования оборудования, так и устойчивость этих показателей к возможным воздействиям случайных факторов. При этом предлагаемая методика должна быть достаточно универсальной, легко формализуемой в виде простых конкретных указаний и для ее использования не требовалось бы привлечения сложного математического аппарата и специального программного обеспечения. А также предлагаемая методика должна быть не слишком требовательна к полноте используемых статистических данных и позволяла бы давать удовлетворительные прогнозы даже для случая малой выборки или неполных данных.

Изложение основного материала. Во многих случаях в качестве основного показателя эффективности эксплуатации оборудования естественно рассматривать среднюю удельную себестоимость единицы наработки оборудования, которая может выражать как себестоимость часа работы оборудования (долл. / ч.), так и себестоимость производства единицы продукции с помощью данного оборудования (долл./т, долл./км, и т.п.). Себестоимость единицы наработки оборудования складывается из капитальных и текущих расходов. В свою очередь, капитальные расходы включают в себя расходы на приобретение и монтаж оборудования, а также возможные расходы на капитальные ремонты. Текущие расходы состоят из расходов на текущие ремонты, техническое обслуживание, энергоносители и смазочные материалы. С одной стороны, чем дольше оборудование будет использоваться, тем меньше капитальных издержек будет приходиться на единицу его наработки. С другой стороны, если оборудование будет использоваться слишком долго, из-за физического износа текущие расходы, связанные с оборудованием, могут существенно вырасти и достичь недопустимо больших значений. Таким образом, необходимо выбирать сроки замены оборудования так, чтобы достигался баланс между удельными капитальными и текущими издержками.

Обозначим $R_c(t)$ – функцию кумулятивных капитальных расходов, накопленных за t лет от момента начала работы оборудования, а $R_o(t)$ – функцию кумулятивных текущих расходов, накопленных за t лет от момента его покупки. Тогда общие суммарные расходы оборудования за время t равны

$$R(t) = R_c(t) + R_o(t). \quad (1)$$

Рассмотрим удельные расходы, которые будут приходиться на единицу наработки оборудования, если оборудование будет работать на протяжении t лет. Рассмотрим функцию удельных капитальных расходов $r_c(t)$, функцию удельных текущих расходов $r_o(t)$ и функцию общих удельных расходов $r(t)$, которые определяются по формулам

$$r_c(t) = \frac{R_c(t)}{t}, \quad r_o(t) = \frac{R_o(t)}{t}, \quad r(t) = r_c(t) + r_o(t). \quad (2)$$

На рис. 1 представлена типичная динамика изменения значений удельных расходов оборудования. Аналогичные изображения можно встретить в литературе, посвященной исследованию износа оборудования (см., например, [6]). На всех графиках, приведенных в этой статье, по оси абсцисс представлено время в годах, а по оси ординат – расходы, измеряемые либо в тыс. дол, либо в тыс.дол./год в зависимости от контекста.

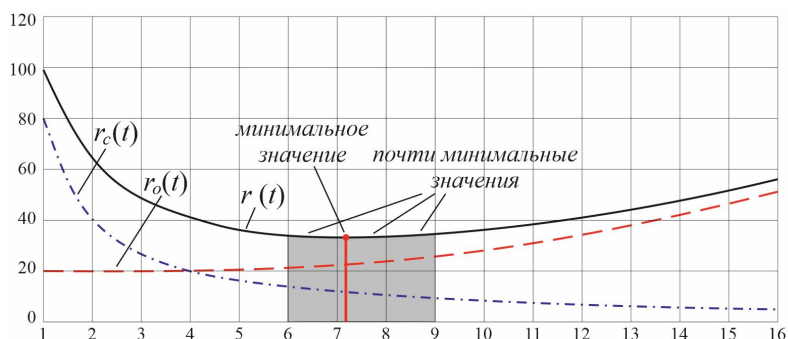


Рис. 1. Кривые изменения удельных расходов без дисконтирования

Из рис. 1 видно, что оборудование целесообразно заменить через 7 лет, когда значение удельных расходов будет минимальным.

Поскольку сложное оборудование, как правило, рассчитано на долгосрочное использование, при анализе финансовых потоков, связанных с эксплуатацией этого оборудования, необходимо использовать дис-

континирование. Предполагая, что функция удельных текущих расходов непрерывно дифференцируема, можно найти настоящее значение текущих расходов за любой промежуток времени с учетом дисконтирования

$$r_o^d(t) = \frac{1}{t} \int_0^t R'_o(t) \cdot e^{-\frac{\delta \tau}{100}} d\tau, \quad (3)$$

где $r_o^d(t)$ – средние текущие удельные расходы за первые t лет эксплуатации оборудования с учетом дисконтирования;

$R'_o(t)$ – производная функции $R_o(t)$, которая показывает интенсивность текущих расходов в каждый момент времени t ;

δ – годовая процентная ставка при непрерывном начислении процентов.

Аналогично можно провести дисконтирование для любой кумулятивной функции расходов и функции средних текущих удельных расходов. На рис. 2 представлена кривая удельных капитальных расходов $r_c^d(t)$, кривая удельных операционных расходов $r_o^d(t)$, а также кривая общих удельных расходов $r^d(t)$ с учетом дисконтирования. Как можно видеть, после дисконтирования скорость роста общих удельных расходов заметно уменьшилась, а точка минимума сместилась вправо почти на 2 года и составила приблизительно 9 лет. Также следует отметить, что после дисконтирования заметно увеличился диапазон значений, при которых достигаются почти оптимальные значения общих удельных расходов (см. рис. 2).

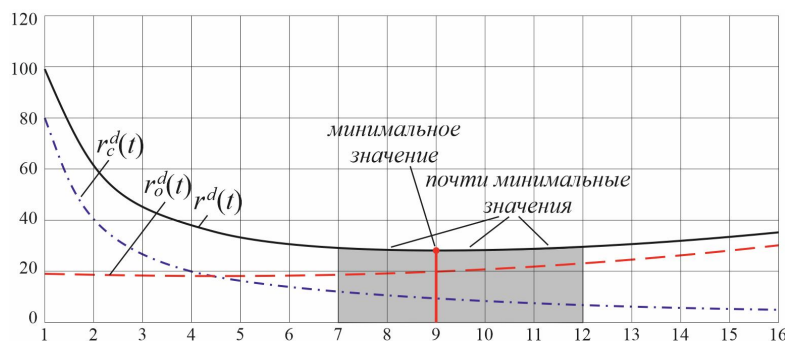


Рис. 2. Кривые изменения удельных расходов с дисконтированием

Для того, чтобы определить наименьший уровень общих удельных расходов и, соответственно, оптимальный срок обновления оборудования, достаточно иметь прогноз изменения $r_c^d(t)$ и $r_o^d(t)$.

На практике прогнозирование будущих значений функции $r_c^d(t)$ не представляет трудности, т.к. чаще всего капитальные затраты на

покупку оборудования вносятся на начальном этапе эксплуатации оборудования, размеры капитальных затрат обычно известны заранее и не подвержены каким-либо случайным колебаниям. С прогнозированием значений $r_o^d(t)$, как правило, ситуация значительно сложнее.

Во-первых, $r_o(t)$ может изменяться скачками. Это связано с тем, что, хотя износ оборудования может накапливаться непрерывно, финансирование текущих ремонтов оборудования обычно выполняется дискретно. Во-вторых, из-за различных случайных факторов точно предсказать будущие значения функций $R_o(t)$ и $r_o^d(t)$, как правило, невозможно. Так, имея две одинаковые машины и используя их в идентичных условиях, для них можно иметь совершенно разные кривые текущих расходов. Поэтому, говоря о планировании будущих значений текущих расходов, корректно говорить не о точных значениях, а об их законах распределений в каждый момент времени t . Имея достаточную базу статистических наблюдений за текущими расходами машин данного типа, на практике не представляет сложности оценить эти законы распределений. На рис. 3 сплошными ломаными линиями представлены типичные кривые изменения значений $R_o(t)$ для нескольких однотипных машин, полученные в результате наблюдений. Имея достаточное количество таких наблюдений, можно оценить средние значения $\bar{R}_o(t)$, степень разброса и другие параметры законов распределения этих значений в каждый момент времени t .

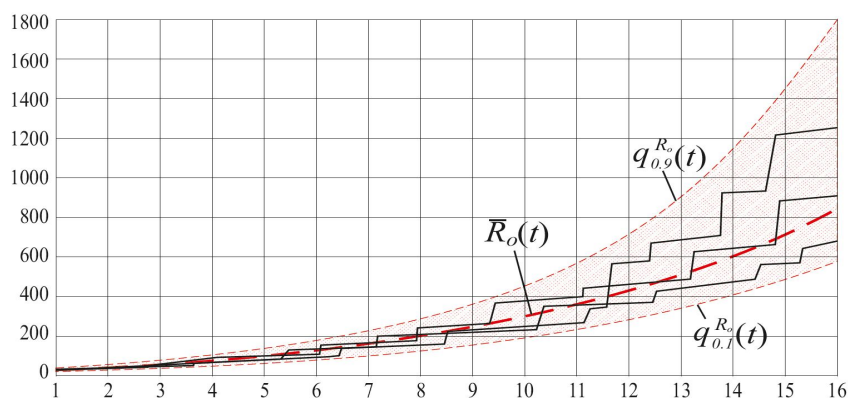


Рис. 3. Примеры изменений $R_o(t)$ с ростом t для разных машин одного и того же типа

На рис. 4 представлены кривые $q_{0,1}^{R_o(t)}(t)$ и $q_{0,9}^{R_o(t)}(t)$, показывающие изменения 10 % и 90 % квантилей распределений значений $R_o(t)$ в различные моменты времени t , а также изображена диаграмма «ящик с усами», иллюстрирующая изменение закона распределения суммарных

текущих расходов $R_o(t)$ с течением времени. С помощью такой диаграммы можно проследить, как со временем увеличивается разброс возможных значений $R_o(t)$. Это говорит о том, что чем дольше планируется использовать оборудование, тем становится сложнее спрогнозировать уровень общих текущих расходов. Также из диаграммы «ящик с усами» можно заметить, что распределение значений $R_o(t)$ имеет сначала симметричную форму, но с ростом t распределение становится все более асимметричным. Это можно объяснить тем, что, как правило, сначала колебания текущих расходов объясняются мелкими случайными поломками и различиями в условиях работы, в результате чего распределение значений $R_o(t)$ при малых t близко к нормальному.

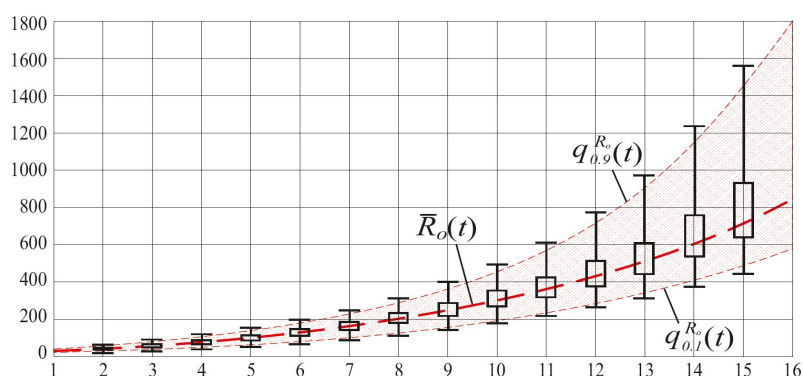


Рис. 4. Диаграмма «ящик с усами», иллюстрирующая распределение значений $R_o(t)$ для разных машин при разных фиксированных значениях t

С течением времени возрастает вероятность нечастых, но сильных негативных выбросов значений $R_o(t)$, в результате чего распределение значений $R_o(t)$ с ростом t обычно имеет все более «толстый хвост». Используя имеющиеся данные анализа тенденций изменений $R_o(t)$, далее можно спрогнозировать тенденции изменений $r_o^d(t)$ и $r^d(t)$, а также уровни их возможных колебаний.

На рис. 5 представлена кривая $\bar{r}_o^d(t) = \frac{1}{t} \bar{R}_o(t)$ вместе с соответствующими линиями квантилей $q_{0,1}^{r_o^d}(t) = \frac{1}{t} q_{0,1}^{R_o^d}(t)$ и $q_{0,9}^{r_o^d}(t) = \frac{1}{t} q_{0,9}^{R_o^d}(t)$, показывающими границы, в пределах которых с вероятностью 80 % будут на-

ходиться значения $r_o^d(t)$. Также изображена кривая $\bar{r}^d(t) = r_c^d(t) + \bar{r}_o^d(t)$ вместе с соответствующими линиями квантилей $q_{0,1}^{r^d}(t) = r_c^d(t) + q_{0,1}^{r_o^d}(t)$ и $q_{0,9}^{r^d}(t) = r_c^d(t) + q_{0,9}^{r_o^d}(t)$.

Линии квантилей $q_{0,1}^{r^d}(t)$ и $q_{0,9}^{r^d}(t)$ показывают границы, в которых с вероятностью 80 % могут находиться будущие значения $r^d(t)$ (рис. 5; 6). Также на рис. 6 пунктиром представлены кривые для квантилей $q_{0,25}^{r^d}(t)$ и $q_{0,75}^{r^d}(t)$.

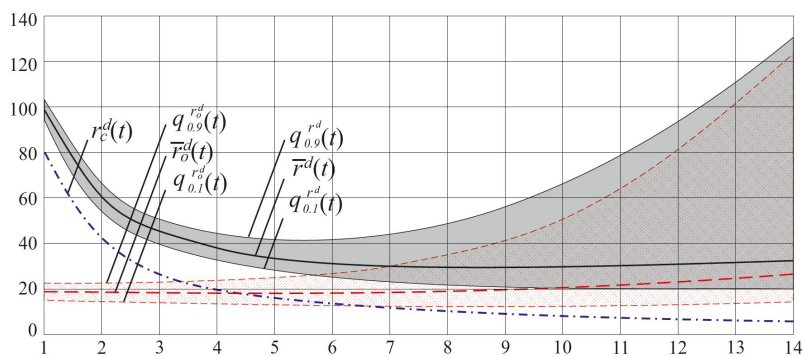


Рис. 5. Линии изменения средних удельных расходов оборудования и их 10 % и 90 % квантили

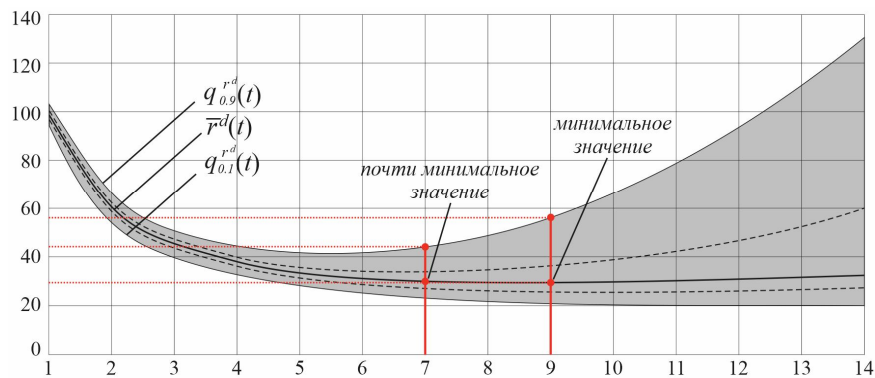


Рис. 6. Изменение общих средних удельных расходов и их квантилей

Из рис. 6 видно, что в промежутке времени от 7 до 12 лет значения $\bar{r}^d(t)$ почти одинаковы. Однако на этом же промежутке времени наблюдается существенный рост функции $q_{0,9}^{r^d}(t)$.

То есть, при практически неизменных средних ожидаемых значениях удельных расходов наблюдается существенное увеличение неопределённости. Например, если планировать замену оборудования не через 9 лет, а через 7 лет, то средние удельные расходы практически не изменятся и составят приблизительно 30 тыс. долл./год., но при этом степень неопределённости заметно сократится.

Так, при планировании обновления оборудования через 9 лет средние удельные расходы не превысят уровня 55 тыс. долл./год. с вероятностью 90 %, в то время как при планировании замены оборудования через 7 лет средние удельные расходы с той же вероятностью не превысят уровня 45 тыс. дол. / год.

Заключение. Чем дольше планируется использовать оборудование, тем, как правило, сильнее возрастает неопределённость показателей эффективности его использования. Даже при том, что средние значения удельных расходов с течением времени могут изменяться незначительно, вместе с тем, форма закона распределения может существенно изменяться. При этом зачастую наблюдается увеличение диапазона разброса возможных значений удельных расходов. При увеличении планируемого времени использования оборудования у распределения значений удельных расходов часто появляется «толстый хвост», свидетельствующий об увеличении вероятности нежелательных выбросов в сторону увеличения расходов.

В данной статье предложена методика оценки уровня будущих расходов, связанных с использованием сложного оборудования, позволяющая обосновывать такие сроки обновления оборудования, при которых достигается баланс между минимальностью и устойчивостью удельных расходов на оборудование.

Использование предлагаемых методов наиболее эффективно при планировании сложного немассового оборудования на промежутке времени, сопоставимом со средним сроком службы этого оборудования. Если парк оборудования состоит из очень большого количества машин, то средние показатели эффективности, рассчитанные для всего парка оборудования, будут мало подвержены воздействию случайных колебаний в силу закона больших чисел. По этим же причинам будет возрастать устойчивость средних показателей эффективности функционирования для цепочки последовательно заменяемых машин, если рассматриваемый горизонт планирования будет значительно превышать средний срок службы машин.

Предложенная в данной работе методика универсальна и может быть применима не только для обоснования срока службы оборудования, но и для других материальных активов, чьи потребительские качества подвержены воздействию случайных факторов и имеют тенденцию ухудшаться с течением времени, например, для различных объектов транспортной инфраструктуры и объектов недвижимости.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Селиванов А.И. Основы теории старения машин [Текст] / А.И. Селиванов. – М.: Машиностроение, 1971. – 408 с.
2. Консон А.С. Экономика ремонта машин [Текст] / А.С. Консон. – Л.: Машиностроение, 1970. – 216 с.
3. Шахов А.В. Проектно-ориентированное управление функционированием ремонтпригодных технических систем [Текст]: Монография / А.В. Шахов, В.И. Чимишир. – Одеса: Феникс, 2006. – 238 с.
4. Ширяева Л.В. Методы и модели управления воспроизводством парков оборудования. Вероятностный поход [Текст]: Монография / Л.В. Ширяева. – Одесса: Астропринт, 2008. – 256 с.
5. Корниец Т.Е. Методы оценки влияния ограниченной надежности перегрузочных машин на время обработки судна [Текст] / Т.Е. Корниец // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць. – 2007. – Вип. 22. – С. 44-53.
6. Лапкина И.А. Оптимизация структуры парка портового оборудования, функционирующего в условиях неравномерной загрузки [Текст] / И.А. Лапкина, М.А. Малаксиано, Н.А. Малаксиано // Актуальні проблеми економіки. – 2016. – № 9. – Вип. 183. – С. 364-371.
7. Лапкина И.А. Моделирование и оптимизация системы доставки скоропортящихся грузов через одесский порт [Текст] / И.А. Лапкина, Н.А. Малаксиано // Актуальні проблеми економіки. – 2016. – № 3. – Вип. 177. – С. 353-365.
8. Малаксиано Н.А. О планировании оптимальных сроков ремонтов и замен сложного портового оборудования при неполностью определенном прогнозе уровня занятости [Текст] / Н.А. Малаксиано // Економічна кібернетика. – 2012. – № 4-6 (76-78). – С. 49-56.
9. Малаксиано Н.А. Использование многокритериальных оценок для уменьшения рисков при планировании ремонтов и замен сложного портового оборудования, функционирующего в условиях неполностью определенного грузопотока [Текст] / Н.А. Малаксиано // Методи та засоби управління розвитком

транспортних систем: Зб. наук. праць. – Одеса: ОНМУ, 2013. – № 1 (20). – С. 7-27.

10. Малаксиано Н.А. *Об оптимальных сроках ремонтов сложного портового оборудования [Текст] / Н.А. Малаксиано // Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Економіка. – 2012. – Вип. 6(3). – С. 186-195.*
11. Оксендаль Б. *Стохастические дифференциальные уравнения. Введение в теорию и приложения [Текст] / Б. Оксендаль. – М.: Мир, 2003. – 408 с.*

Стаття надійшла до редакції 15.01.2018

Рецензенти:

доктор технічних наук, професор, проректор з навчально-організаційної роботи Одеського національного морського університету
А.В. Шахов

кандидат технічних наук, доцент, ректор Інституту морегосподарства і підприємництва **О.В. Яценко**