

Н.А. Малаксиано (Одеський національний морський університет, Україна)

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЛОЖНОГО ПОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В статье проведен анализ устойчивости экономических показателей использования сложного портового оборудования при изменяющихся условиях его эксплуатации и изменениях стратегии его ремонтов и замен. Результаты исследований основаны на использовании динамической модели старения оборудования.

Ключевые слова: стратегия ремонтов и замен оборудования, физический износ оборудования.

Форм. 4. Табл. 2. Рис. 5. Лит. 11.

М.О. Малаксиано (Одеський національний морський університет, Україна)

ПРО СТІЙКІСТЬ ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ВИКОРИСТАННЯ СКЛАДНОГО ПОРТОВОГО ОБЛАДНАННЯ

У статті проведено аналіз стійкості економічних показників використання складного портового обладнання, коли умови його експлуатації та стратегії його ремонтів і замін змінюються. Результати досліджень базуються на застосуванні динамічної моделі старіння обладнання.

Ключові слова: стратегія ремонтів і замін обладнання, фізичний знос обладнання.

N.A. Malaksiano (Odessa National Maritime University, Ukraine)

ON THE STABILITY OF ECONOMIC INDICATORS OF COMPLEX PORT EQUIPMENT USAGE

The article carries out the analysis of stability of economic indicators of complex port equipment usage when its operational conditions and the strategies of its repairs and replacement undergo changes. The results of the research are based on application of the dynamic model of equipment aging.

Keywords: the strategy for equipment repairs and replacement; equipment wearing out.

Постановка проблеми. Значительную часть расходов портов составляют расходы на оборудование. Поэтому экономически обоснованное планирование ремонтов и замен оборудования имеет большое значение для эффективной работы портов. Задача оптимального планирования существенно осложняется тем, что портовое оборудование, как правило, имеет длительные сроки службы, но при этом зачастую тяжело делать точные долгосрочные прогнозы относительно условий, в которых это оборудование будет использоваться.

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время удалось достичь значительных результатов в исследовании показателей работы порта в условиях неопределенности [1; 5], и отдельно – в исследовании процессов старения оборудования, в том числе портового, его ремонтов и замен [2; 3; 6–10]. 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.

Целью исследования является анализ устойчивости экономических показателей использования сложного портового оборудования при изменяющихся условиях его эксплуатации и изменениях стратегий его ремонтов и замен.

Основные результаты исследования. При исследовании стратегий ремонтов и замен оборудования в каждый момент времени необходимо иметь воз-

можность количественно оценивать как текущее состояние оборудования, так и состояние, в которое это оборудование может быть переведено с помощью ремонтов. Поэтому одномерного параметра, характеризующего текущее состояние оборудования, не достаточно. В связи с этим для нахождения оптимальных сроков ремонтов и замен оборудования разными авторами были предложены различные многомерные показатели текущего состояния оборудования. Так, в [7] вводится показатель годности, в [9] – показатель функционального состояния, которые разделяются на активную и пассивную составляющие. Следует отметить, что для исследования оптимальных стратегий ремонтов и замен сложного оборудования целесообразно использовать показатели устранимого и неустраимого физического износа.

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 $u = u_1 + (1 - u_1) \times u_2$. Определяемые таким образом показатели устранимого, неустраимого и общего износа положительны и, возрастающая с течением времени, приближаются к своему предельному значению 1. Заметим, что термины «устраимый» и «неустраимый» износ иногда используются, но в несколько ином смысле, в вопросах страховой оценки и оценки стоимости оборудования при его продаже [4].

Для моделирования устранимого и неустраимого износа рассмотрим динамическую модель, описываемую следующей задачей Коши:

$$\begin{cases} u_1' = (1 - u_1)^{v_1} \times (u_1 - L_1)^{w_1} \times s(t) \times (a_1 + b_1 \times u_2), \\ u_2' = (1 - u_2)^{v_2} \times (u_2 - L_2)^{w_2} \times s(t) \times (a_2 + b_2 \times u_1), \\ u_1(0) = u_{10}, \quad u_2(0) = u_{20}, \end{cases} \quad (1)$$

где w_1 и w_2 – показатели, определяющие интенсивность увеличения соответственно неустраимого и устранимого износов на начальной стадии старения; v_1 и v_2 – показатели, определяющие интенсивность увеличения соответственно неустраимого 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 соответственно неустраимого и устранимого износов ($0 \leq L_1 < 1$, $0 \leq L_2 < 1$); u_{10} и u_{20} – начальное значение показателей соответственно неустраимого и устранимого износов ($u_{10} > L_1$, $u_{20} > L_2$); a_1 и a_2 – параметры, определяющие общую скорость увеличения соответственно неустраимого и устранимого износов на протяжении всего времени моделирования; b_1 и b_2 – параметры, определяющие взаимное влияние значений и динамики устранимого и неустраимого износов.

Кривые неустраняемого и устранимого износов, моделируемые этой системой, имеют сигмоидную форму.

Для примера исследуем динамику износа, которая типична для портовых тягачей. Эту кривую можно описать с помощью динамической модели (1) со следующими значениями параметров: $v_1 = 1$, $w_1 = 1,3$, $L_1 = 0$, $a_1 = 0,83$, $b_1 = 1$, $u_{10} = 0,03$, $v_2 = 1,8$, $w_2 = 1$, $L_2 = 0$, $a_2 = 1,8$, $b_2 = 1$, $u_{20} = 0,001$. С помощью динамической модели (1) можно исследовать износ оборудования, функционирующего в условиях существенно неравномерной загрузки, но для наглядности в данном примере ограничимся рассмотрением случая загрузки с постоянным коэффициентом занятости $s(t) \equiv 0,5$. 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 денежные расходы будем указывать в процентах от текущей стоимости нового образца этого оборудования. В этом примере ограничимся рассмотрением только капитальных ремонтов, выполнение которых влечет уменьшение показателя устранимого износа до минимального значения. Средние эксплуатационные расходы за единицу времени работы машины в период от начала эксплуатации машины до момента времени t можно найти по формуле:

$$P_{\text{э}}(t) = \frac{1}{u(0) \times \int_0^t s(\tau) d\tau} \int_0^t (P_{\text{пер}} \times u(\tau) \times s(\tau) + P_{\text{пост}}) \times e^{\delta \tau} d\tau, \quad (2)$$

где $u(t)$ – показатель общего износа оборудования в момент времени t ; $P_{\text{пост}}$ – постоянные эксплуатационные расходы оборудования за единицу времени; $P_{\text{пер}}$ – 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 наращении).

Средние капитальные расходы за единицу времени работы машины в период от начала эксплуатации машины до момента времени t определяются формулой:

$$P_{\text{а}}(t) = \frac{1}{\int_0^t s(\tau) d\tau} \left(P_0 + \sum_{t_k \leq t} P_{t_k} \times e^{\delta t_k} \right), \quad (3)$$

где $P_0 = 100\%$ – цена нового оборудования; P_{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:

$$P(t) = P_{\text{э}}(t) + P_{\text{а}}(t). \quad (4)$$

Будем считать, что средняя стоимость капитального ремонта составляет 40% от стоимости нового оборудования, годовая ставка процентов при ежегодном наращении равна 4%, постоянные эксплуатационные расходы за единицу времени работы составляют 0,42% от стоимости нового оборудования, а

переменные эксплуатационные расходы нового оборудования за единицу времени работы при полной занятости составляют 6,6% от его стоимости и изменяются пропорционально текущим значениям коэффициента износа и коэффициента занятости.

Используя метод имитации отжига [11], получаем, что для рассматриваемого оборудования при указанных условиях его эксплуатации целесообразно планировать проведение одного капитального ремонта через $t_{рем} = 6,292$ лет и списание через $t_{спис} = 12,708$ лет после начала использования. Эту стратегию ремонтов и замен оборудования можно считать оптимальной, поскольку при ней суммарные средние расходы за единицу времени работы машины в период от начала эксплуатации машины до ее списания принимают минимальное значение, равное 43,417. На рис. 1 приведены кривые износа оборудования, а на рис. 2 – кривые изменения средних затрат за единицу времени работы машины при оптимальной стратегии ремонтов и замен оборудования.

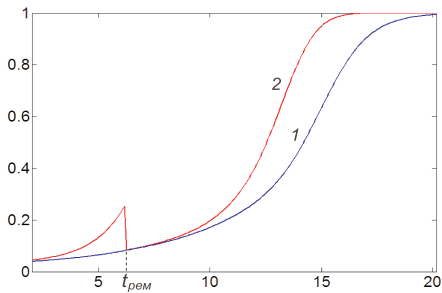


Рис. 1. Кривые износа оборудования (1 – кривая неустраняемого износа, 2 – кривая общего износа), авторская разработка

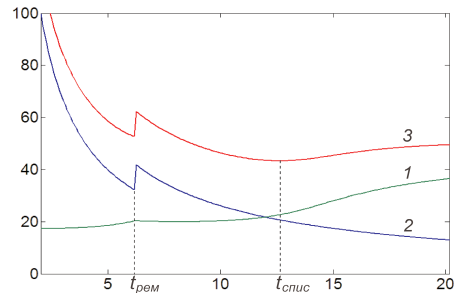


Рис. 2. Средние затраты за единицу времени работы оборудования (1 – средние эксплуатационные затраты; 2 – средние капитальные затраты; 3 – суммарные средние затраты), авторская разработка

Очевидно, что даже при незначительном изменении условий использования оборудования оптимальные сроки ремонтов и замены оборудования изменятся. Вместе с тем, ремонт или замена сложного портового оборудования требуют привлечения значительных финансовых ресурсов, которые необходимо планировать заранее, кроме того, ремонтные работы могут повлечь нарушения технологического процесса и графика работы всего порта. Поэтому в некоторых случаях изменение заранее запланированных сроков ремонтов и замен оборудования может быть нежелательным. Таким образом, важно иметь четкое представление о том, насколько критично изменение условий использования оборудования может отразиться на экономических показателях функционирования оборудования. Для исследования этого вопроса воспользуемся динамической моделью старения оборудования (1) и данными рассмотренного выше примера. На рис. 3а представлены кривые изменения целевой функции (суммарных средних расходов за единицу времени работы машины в период от начала эксплуатации машины до ее списания) при изменении условий использования оборудования и неизменной стратегии ремонтов

и замен. Если же оптимальную стратегию пересчитывать каждый раз, как только меняются условия эксплуатации оборудования, то кривые изменения целевой функции будут выглядеть так, как изображено на рис. 3б. На рис. 3а и 3б по оси абсцисс отложены значения смещений параметров в процентах от их начальных значений, а по оси ординат отложены соответствующие значения целевой функции. Данные вычислений показали, что колебания коэффициента занятости существенно влияют на значение целевой функции и требуют своевременного пересмотра сроков ремонтов и замен оборудования. Кроме того, отдельного исследования заслуживает обоснование выбора значения годовой ставки процентов, поскольку даже незначительные изменения этого параметра существенно влияют на выбор оптимальной стратегии ремонтов и замен оборудования. Более подробно эти зависимости можно проследить по данным в табл. 1 и 2. Изменения постоянных расходов и расходов на ремонт, хоть и имеют значительное влияние на целевую функцию, но, вместе с тем, не настолько критично требуют пересмотра сроков ремонтов и замен оборудования.

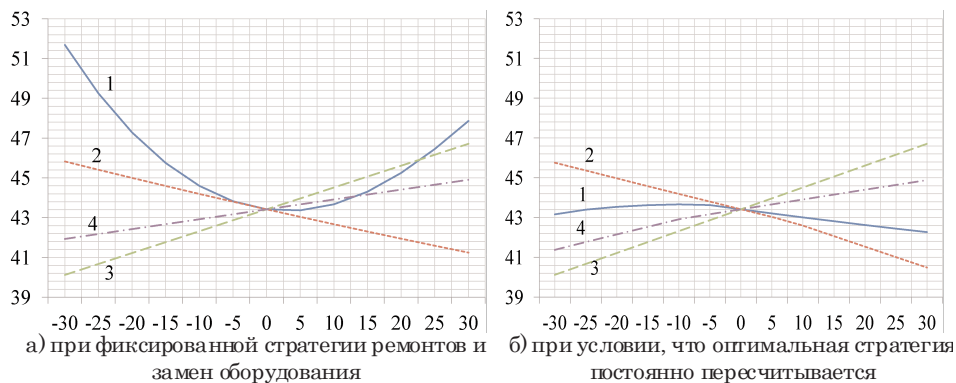


Рис. 3. Кривые значений целевой функции при изменяющихся условиях использования оборудования (1 – изменение целевой функции в зависимости от коэффициента занятости; 2 – изменение целевой функции в зависимости от годовой ставки процентов; 3 – изменение целевой функции в зависимости от постоянных расходов; 4 – изменение целевой функции в зависимости от расходов на ремонт),

авторская разработка

Иногда обстоятельства могут складываться таким образом, что по различным причинам (например, высокий уровень загруженности оборудования в промежутки времени, когда планируется проведение ремонта, или изменение текущих финансовых условий на предприятии), возникает потребность отказа от оптимальной стратегии и переноса сроков ремонтов или замены оборудования. В связи с этим возникает вопрос: насколько критично отступление от оптимальной стратегии ремонтов и списаний оборудования отразится на значении целевой функции? Исследования показали, что оптимальная стратегия может быть скорректирована без существенных потерь в значении целевой функции. Так, перенос даты ремонта не более, чем на квартал и соответствующую-

ший сдвиг оптимальної дати списання не більше, чем на полгода, повлекут ухищення значення цільової функції не більше, чем на 0,1, то єсть общіє потері от такого сдвигу не превьсят 0,65% стоимості нової машини. Представленіє о том, как измененіє стратегії отразиться на значенні цільової функції, можно получить из графика ліній уровн्या цільової функції (рис. 4). На рис. 4 вдоль оси абсцисс отложены возможные даты списаній, вдоль оси ординат – возможные даты ремонтів в годах, а также отмечена точка с координатами $(t_{\text{спис}}, t_{\text{рем}})$, соответствующая оптимальной стратегії ремонта и замены оборудования. Следует отметить, что изменения условий использования оборудования могут повлечь не только сдвиг поверхности значений цільової функції, но и ее искаженіє. Так, для сравненія на рис. 5 представлен график ліній уровн्या цільової функції при условии, что годовая ставка процентов уменьшилась на 2,5%. Аналогичные зависимости можно проследить и для оптимальных стратегій с несколькими ремонтами.

Таблица 1. Изменение цільової функції в зависимости от коэффициента занятости, авторская разработка

Значение коэффициента занятости	Значение цільової функції при фиксированной стратегии	Значение цільової функції при оптимальной стратегии	Оптимальное количество ремонтів оборудования	Оптимальный срок службы, лет
0,350	51,686	43,160	2	25,844
0,375	49,248	43,398	2	22,970
0,400	47,284	43,539	2	20,937
0,425	45,744	43,622	2	19,178
0,450	44,597	43,661	2	17,982
0,475	43,825	43,630	1	13,455
0,5	43,417	43,417	1	12,708
0,525	43,368	43,209	1	12,075
0,550	43,670	43,008	1	11,481
0,575	44,307	42,817	1	10,838
0,600	45,250	42,623	1	10,424
0,625	46,453	42,442	1	9,945
0,650	47,862	42,267	1	9,624

Таблица 2. Изменение цільової функції в зависимости от годовой ставки процентов, авторская разработка

Значение годовой ставки процентов, %	Значение цільової функції при фиксированной стратегии	Значение цільової функції при оптимальной стратегии	Оптимальное количество ремонтів оборудования	Оптимальный срок службы, лет
0	52,537	51,505	1	11,282
0,8	50,449	49,822	1	11,531
1,6	48,503	48,172	1	11,769
2,4	46,689	46,552	1	12,151
3,2	44,997	44,969	1	12,382
4	43,417	43,417	1	12,708
4,8	41,941	41,540	2	16,638
5,6	40,562	39,443	2	17,143
6,4	39,272	37,031	2	20,987
7,2	38,066	34,534	3	21,939
8	36,936	32,327	3	23,120

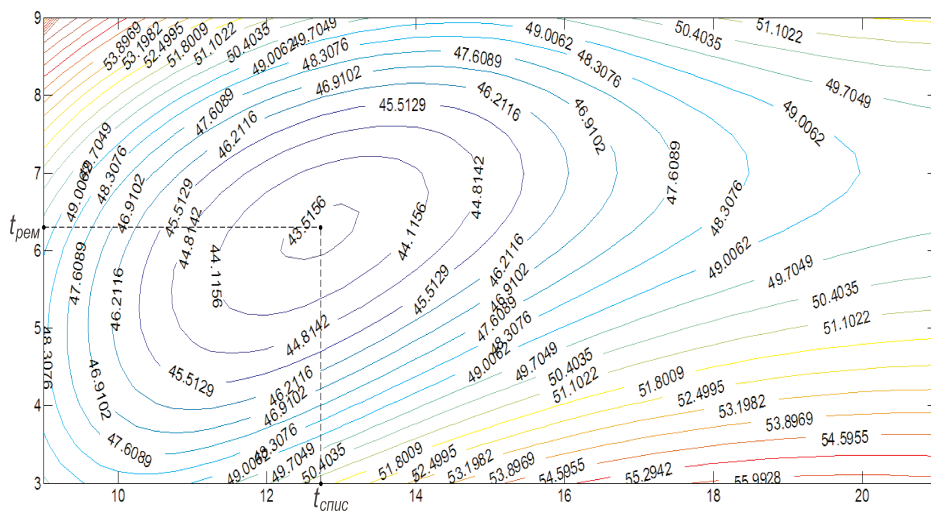


Рис. 4. Линии уровня целевой функции при годовой ставке 4%, авторская разработка

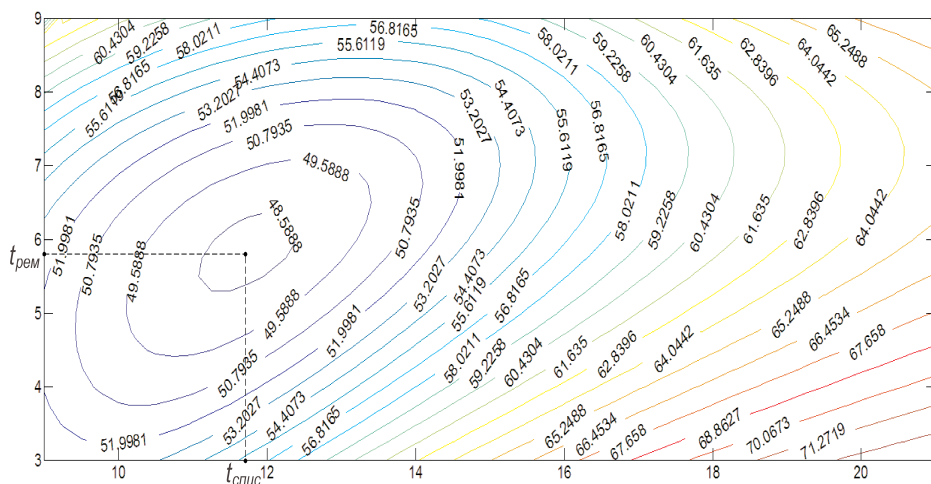


Рис. 5. Линии уровня целевой функции при годовой ставке 1,5%, авторская разработка

Выводы. В данной статье представлен анализ устойчивости экономических показателей использования сложного портового оборудования при изменяющихся условиях его эксплуатации и изменениях стратегии его ремонтов и замен. Полученные результаты основаны на использовании методов численной оптимизации и многократном численном решении систем дифференциальных уравнений. Интенсивные компьютерные вычисления показали эффективность использования предложенной динамической модели старения оборудования (1) при исследовании эффективности стратегий ремонтов и замен портового оборудования. Помимо того, что полученные результаты имеют практический интерес, они также указывают на важность некоторых во-

просов, требующих дальнейших теоретических исследований. Из результатов исследования видно, насколько большое значение при планировании сроков ремонтов и замен оборудования имеет уровень загрузки оборудования. Вместе с тем, долгосрочные прогнозы уровня загрузки портов могут быть неточными. Поэтому большой интерес представляет построение максимально точной вероятностной модели процесса загрузки оборудования и изучение влияния свойств этого случайного процесса на выбор и устойчивость оптимальной стратегии ремонтов и замен оборудования. Отдельного внимания заслуживает рассмотрение годовой ставки процентов. Значение этого параметра существенно влияет на определение оптимальной стратегии ремонтов и замен оборудования, поэтому его выбор требует тщательного обоснования. Исследования также показали, что ухудшение значения целевой функции, вызванное изменениями в оптимальной стратегии ремонтов и замен оборудования, является некритичным. Поэтому имеет смысл вместе с данной целевой функцией изучать и другие показатели эксплуатации машин, которые можно было бы улучшить, при этом лишь незначительно пожертвовав значением целевой функции, то есть перейти к рассмотрению задач многокритериальной оптимизации.

1. *Воеводский Е.Н., Постан М.Я.* О стохастических моделях взаимодействия транспортных потоков в пунктах перевалки грузов // Кибернетика и системный анализ.— 1993.— №1. — С. 101–112.
2. *Зубко Н.Ф.* Надежность в задачах эксплуатации машин. — Одесса: ТЕС, 2007. — 250 с.
3. *Корниец Т.Е.* Методы оценки влияния ограниченной надежности перегрузочных машин на время обработки судна // Вестник Одесского национального морского ун-та: Сб. науч. тр. — Вып. 22. — Одесса, 2007. — С. 44–53.
4. *Михайлец В.Б.* Формула для расчета стоимости с учетом неустраняемого и устраняемого износов // Вопросы оценки.— 2007.— №1. — С. 49–51.
5. *Постан М.Я.* Вероятностные модели простейших транспортно-складских систем и их анализ // Методи та засоби управління розвитком транспортних систем: Зб наук. праць ОНМУ. — Вып. 1. — Одеса, 2001. — С. 53–65.
6. *Пустова Н.В.* Оптимізація стратегії оновлення парку порталних кранів у морських портах України: Дис... канд. екон. наук: 08.03.02 — Економіко-математичне моделювання. — Одеса, 2006. — 159 с.
7. *Селиванов А.И.* Основы теории старения машин. — М.: Машиностроение, 1971. — 408 с.
8. *Холоденко А.М.* Визначення оптимальних термінів експлуатації обладнання // Вісник Технологічного ун-ту Поділля.— 2002. — Ч. 2, №4. — С. 33–38.
9. *Шахов А.В., Чимшир В.И.* Оптимизация технологических процессов ремонта судовых технических средств // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць.— 2005.— Вып. 16. — С. 99–110.
10. *Ширяева Л.В.* Методы и модели управления воспроизводством парков оборудования. Вероятностный подход: Монография. — Одесса: Астропринт, 2008. — 256 с.
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" // www.ingber.com.

Стаття надійшла до редакції 5.07.2012.