
ОТРАСЛЕВЫЕ
ПРОБЛЕМЫ

**ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
НА ПРИМЕРЕ СИСТЕМЫ РАЗВОДНЫХ МОСТОВ**

© 2009 г. А. В. Ащеулов, В. П. Соколов
(Санкт-Петербург)

Впервые дано экономическое обоснование затратам на повышение надежности восстанавливаемой технической системы, отказ которой вызывает только экономические потери. В составе экономического критерия учтены нелинейные ожидаемые потери, вызываемые отказами системы. Приведен пример экономического обоснования целесообразности модернизации разводного моста на р. Неве в Санкт-Петербурге.

При проектировании объектов транспортной инфраструктуры, их реконструкции и ремонте необходимо принимать решения по выбору того или иного варианта конструкции.

Известен ряд моделей для расчета надежности технических систем с использованием аппарата теории вероятностей, в том числе для выполнения прогнозных расчетов условных вероятностей безотказной работы невосстанавливаемых систем. Далее выбор решения выполняется путем сравнения показателя надежности, выбранного в качестве основного, с достаточно высоким нормативом, назначенным экспертным путем на порядок выше, чем дает статистика аварийности. Такой подход представляется приемлемым для технических систем, аварии которых могут вызывать человеческие жертвы. Однако он не оправдан для тех систем, отказ которых вызывает только экономические потери.

Несложно предложить мероприятия, существенно повышающие показатели надежности системы, например, путем введения резервирующих элементов. Экономически целесообразный уровень затрат остается не выясненным. Ключевой проблемой при экономической оптимизации уровня надежности является расчет среднегодовых значений ожидаемых потерь, вызываемых отказами технических систем.

В ряде публикаций (например (Болотин, 1992, с. 19; Иванов, Соколов, 1998)) предлагается определять оптимальное значение совокупности показателей надежности по минимальному значению суммы затрат за время жизненного цикла объекта. При этом предполагается, что сумма затрат плавно меняется с изменением показателей надежности. Ни в одной публикации этот подход численно не реализован.

В действительности в числе оптимизируемых параметров технических объектов есть целочисленные параметры. Показатели надежности и значения критерия вычисляются для отдельных точек, соответствующих комплексным технически совместимым решениям. Через эти точки нельзя провести никаких плавных кривых. В промежутках между точками нет никаких совместимых решений.

В данной статье показано, как учесть ожидаемые потери при выборе технических решений, влияющих на надежность системы разводных мостов.

Активно обсуждается вопрос о капитальных вложениях на ремонт разводных мостов с целью повышения их надежности. Однако до настоящего времени так и не было выполнено экономического обоснования капитальных вложений на повышение надежности мостов — не было ни научно-методической разработки, ни нормативов для расчета среднегодовых значений ожидаемых потерь, вызываемых отказами разводных мостов.

Исследование выполнялось применительно к системе невских мостов Санкт-Петербурга. Новизна разработанной методики заключается в том, что при расчете текущих затрат впервые учтен размер ожидаемых нелинейных ущербов, в данном случае вызываемых отказами восстанавливаемых разводных пролетов мостов.

При разработке методики исходили из следующих положений: строительство и реконструкция мостов не приносят непосредственного денежного дохода и выполняются с целью минимизации совокупных издержек соответствующих транспортных систем. Поэтому в качестве эконо-

Таблица 1. Сведения о судах, проходящих Санкт-Петербург по Волго-Балтийскому водному пути в обоих направлениях (данные из отчета ЦДС ГУ «Волго-Балт» за 2002 г.)

Типы судов	Количество судов	Средний тоннаж/дедвейт судна в группе, т	Средняя сумма тайм-чартера, долл. в сутки
Грузовые нефтеналивные	2892	3000	3000
Грузовые сухогрузные	3667	2700	1300
Пассажирские	51		нет сведений
Технический флот	544		500
ВСЕГО за год	7154		

мического критерия использован минимизируемый критерий чистых дисконтированных затрат — оттоков по системе мостов. Разность значений критерия по вариантам отвечает приращению внутреннего валового продукта. Применение этого критерия рекомендуется Методическими рекомендациями (Коссов, Лившиц, 2000, с. 26).

Показатель чистых дисконтированных затрат, приведенных к началу периода, имеет вид

$$K + \left(\sum_{t=1}^{T_p} C_t \right) / (1 + E)^t \rightarrow \min, \quad (1)$$

где K — капитальные вложения; T_p — расчетный период; C_t — текущие затраты года t расчетного периода (без включения амортизации на полное восстановление); E — норма дисконта.

В данной задаче в состав годовых текущих затрат включены не только обычные эксплуатационные затраты и затраты на текущий ремонт, включая восстановительный ремонт после отказов и аварий, но и годовые ожидаемые потери, вызываемые отказами и авариями мостов.

Годовые ожидаемые потери R определяются в общем случае (Коссов, Лившиц, 2000, с. 77, 86) как произведение денежной оценки ожидаемого ущерба H на вероятность $Q(H)$ его возникновения в течение одного года:

$$R = HQ(H). \quad (2)$$

При расчетах критерия (1) все составляющие текущих затрат C_t приняты в первом приближении постоянными для всех лет расчетного периода и одинаковыми по сопоставляемым вариантам, за исключением ожидаемых потерь R . Принято также, что различиями в остаточной стоимости мостов до модернизации гидросистем и после нее можно пренебречь.

Ожидаемые потери слагаются из годовых потерь, наносящих ущерб судоходству в результате: простоев караванов судов; повреждения судов и грузов; нарушений работы городского транспорта; урона окружающей среде.

По результатам оценочных расчетов, потери судоходства от простоя судов больше, чем все остальные составляющие. В статье подробно исследован только этот вид потерь.

В первом приближении ущерб $H_1(T)$ от простоя судов в течение T суток может быть оценен как сумма тайм-чартерных платежей за эти суда за время простоя (тайм-чартер — договор аренды судна с экипажем).

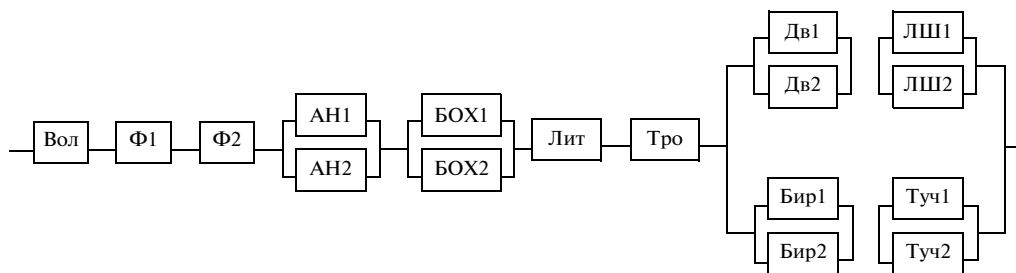
Была выполнена обработка статистики по судам, которые проходят при разводках под невисскими мостами за навигацию (табл. 1), и рассчитана сумма тайм-чартерных платежей по каравану осредненного состава, проходящему в обоих направлениях за одни сутки.

Средняя продолжительность навигации в Санкт-Петербурге — 270 суток в год. Ущерб $H_1(1)$ от простоя такого каравана в течение первых суток без учета пассажирских судов

$$H_1(1) = (2892 \times 3000 + 3667 \times 1300 + 554 \times 500) / 270 = 50800 \text{ долл.} \quad (3)$$

Это минимальная оценка ущерба $H_1(1)$. За вторые сутки ущерб от простоя судов, застрявших в первые сутки, удвоится и прибавится в ординарном размере ущерб от простоя судов, пришедших во вторые сутки, итого потери к концу вторых суток станут в три раза больше, чем за первые сутки. Таким образом, ущерб за T суток возрастает, как сумма членов арифметической прогрессии:

$$H_1(T) = H_1(1) \times 0.5(1 + T)T. \quad (4)$$



Структурная схема надежности системы разводных мостов Санкт-Петербурга. Условные обозначения: Вол – Володарский мост; Ф – Финляндские железнодорожные мосты; АН – мост Александра Невского; БОХ – Большой Охтинский мост; Лит – Литейный мост; Тро – Троицкий мост; Дв – Дворцовый мост; Бир – Биржевой мост; ЛШ – мост Лейтенанта Шмидта; Туч – Тучков мост. Цифрами обозначены крылья/пути мостов.

Тем самым, ущерб от простоя судов возрастает пропорционально квадрату времени простоя T .

Это обстоятельство приводит к нелинейному экономическому критерию и не позволяет рассчитывать ожидаемые потери по средним значениям времени простоя. Математические ожидания ожидаемых потерь приходится вычислять отдельно за первые, вторые и т.д. сутки и лишь после этого их суммировать.

Поскольку ущерб судоходству наступает только при прекращении сквозного движения по Волго-Балтийскому водному пути, то вероятность события $Q_1(T)$ определялась для всей системы мостов от Володарского моста до Финского залива.

На рисунке представлена логическая структурная схема надежности системы невских разводных мостов. Ее элементы представляют собой надежности (точнее – вероятности безотказной работы) отдельных крыльев или подъемных пролетов разводных мостов.

Отказ при разводке однокрылого моста приводит к прекращению проводки судов по фарватеру, над которым он расположен. Однако отказ одного из крыльев двукрылого моста не прерывает движения серийных судов смешанного плавания, спроектированных для Волго-Балтийского водного пути, но может ограничить движение единичных больших судов и плавучих средств (например, плавучих доков), которые могут не пройти в судоходный габарит одного крыла.

Кроме того, прекращения проводки не произойдет, если есть резервный фарватер. Так, Большую Неву дублирует Малая Нева, по которой могут пройти суда всех типов, составляющих транзитный поток Волго-Балтийского водного пути.

Расчет надежности системы мостов в соответствии со схемой, представленной на рисунке, выполнен известным из теории вероятностей способом (Вентцель, 1972, с. 387) с использованием теорем умножения и сложения вероятностей случайных событий отказов отдельных крыльев.

В свою очередь, вероятности отказов крыльев мостов рассчитываются на основе данных об интенсивностях отказов отдельных элементов приводов разводных механизмов крыльев. Эти расчеты в данной статье не рассматриваются. Они выполнены методом деревьев отказов (Ащеулов, Стефанишин, 2006, с. 275–281), который позволил учесть:

- отказы электросистемы;
- наступление скорости ветра, превышающей предел (12 м/с), при котором допускается разводка мостов;
- аварии судов с перекрытием фарватера вследствие навигационных ошибок;
- замерзание воды в котлованах противовесов;
- обрывы противовесов, вызванные усталостью или коррозией металлоконструкций моста.

Включение таких отказов позволило рассчитать тот исходный уровень надежности системы, дальнейшее изменение которого (в результате того или иного технического мероприятия) должно учитываться при расчете экономического критерия.

Для всех событий, приводящих к отказу крыла на $T = 1, 2, \dots$ суток, в соответствии со структурной схемой надежности выполняются отдельные расчеты надежностей – вероятностей того, что судоходная система в целом не откажет соответственно на $T = 1, 2, \dots$ суток.

Результатом расчета надежности отдельного крыла методом деревьев отказов является условная вероятность отказа крыла моста i после 270 развонок (в конце навигации) при условии, что этот отказ не наступил (экспоненциальный закон распределения отказов):

$$Q_i = 1 - e^{-\lambda_i t}, \quad (5)$$

где λ_i — интенсивность отказов механизмов крыла моста i (1/час.); t — время работы механизмов за 270 развонок (час.).

На практике же отказы случаются. Среднее число отказов за год может быть величиной и меньше и больше единицы. Отказавший на мосту элемент крыла немедленно восстанавливается. Тем самым система невыходных мостов относится к восстанавливаемым системам.

Для вычисления годовых ожидаемых потерь от простоев системы мостов необходимо определить среднегодовые значения вероятности отказа крыльев. При создании модели для расчета этих средних значений представляется допустимым принять, что отказы (и немедленные восстановления) крыльев происходят не в случайный момент, а при наступлении средних наработок на отказ. Если число развонок крыла до средней наработки на отказ меньше числа развонок за навигацию, то отказ немедленно устраняется. В тех случаях, когда число развонок крыла до средней наработки на отказ больше числа развонок за навигацию, в межнавигационный период производится техническое обслуживание и мелкий ремонт, выполняющие функцию восстановления. Немонотонную “зубчатую” зависимость вероятности отказа от времени, включающую восстановления, можно представлять как график вероятности отказа с учетом восстановлений и вычислять ее среднее значение. Таким образом, в случаях, если средняя наработка на отказ меньше продолжительности навигации, то среднее значение вероятности отказа крыла:

$$Q = 1 - \int_0^{T_{cp}} e^{-\lambda_i t} dt / T_{cp}, \quad (6)$$

где T_{cp} — среднее значение числа развонок до наработки на отказ. Если же наработка на отказ больше числа развонок за навигацию (270 развонок), то

$$Q = 1 - \int_0^{270} e^{-\lambda_i t} dt / 270.$$

Пример. Приведем расчет целесообразности затрат на технические мероприятия по повышению надежности двукрылого Большого Охтинского моста, осуществленные в 1997–2004 гг. Расчет выполнен в условиях и ценах 2002 г.

В качестве характеристики исходного состояния системы мостов до 1996 г., на основе многолетних наблюдений, приняли, что система мостов дает в среднем 1 отказ в год, при этом проводка судов срывается не более чем на 1 сутки. За год выполняется около 270 рабочих развонок.

Тогда вероятность отказа системы в одну любую разводку на 1 сутки $Q_S = 1/270 = 0.003704$, надежность системы на 1 разводку $P_S = 1 - Q_S = 0.996296$, условная вероятность того, что система мостов за навигацию после 270 развонок не откажет $V_S = (P_S)^{270} = 0.3672$, а среднее значение условной вероятности безотказной работы за этот период $V_S^{cp} = 0.6321$.

На основе предыдущих исследований (Ащеулов, Стефанишин, 2006, с. 275–281) было установлено, что при реконструкции Большого Охтинского моста в 1996 г. неудачное схемное решение для гидравлического привода этого моста снизило безотказность системы невыходных мостов. По расчетным оценкам, ее средняя величина составила $V_S^{cp}(1996) = 0.273$. В межнавигационные периоды 1997–2004 гг. проводились последовательные корректировки конструкции гидравлического привода разводных механизмов, которые повысили среднегодовой уровень безотказности системы невыходных мостов до расчетного значения $V_S^{cp}(2004) = 0.7263$.

Капитальные вложения на корректировку гидросистем по фактическому объему работ, выполненных подрядчиком, составили 2528.1 тыс. руб. (по данным ООО “НТП Гидропривод”).

Суммарные годовые эксплуатационные затраты на систему мостов условно приняты в размере 50 млн. руб.

Таблица 2. Результаты расчета критерия дисконтированных затрат до корректировки гидросистем Большого Охтинского моста (1996 г.)

Величины	Обозначения	Расчетные значения
Продолжительность отказа, сутки	Y	1
Новые капиталовложения на корректировку, млн. руб.	K	0
Средняя вероятность возникновения ущерба $Q_S^{cp}(1996) = 1 - V_S^{cp}(1996)$	Q_S^{cp}	0.727
Ущерб от задержки караванов на Неве на Y суток в ценах 2002 г., тыс. долл.	$H(1)$	50.8
Годовые ожидаемые потери вследствие отказов транспортной системы "Волго-Балт" на Y суток	$R(1)$	36.9
Среднегодовые ожидаемые потери, тыс. долл.	–	36.9
Годовые ожидаемые потери судоходства по среднегодовому курсу 2002 г. 31.3 руб./долл., млн. руб.	R	1.16
Суммарные годовые эксплуатационные затраты на систему мостов, млн. руб.	ΣZ	50.0
Нормативный коэффициент	E	0.04
Критерий (1), млн. руб.	–	1150.1

Таблица 3. Результаты расчета критерия дисконтированных затрат после корректировки гидросистем Большого Охтинского моста (2004 г.)

Величины	Обозначения	Расчетные значения
Продолжительность отказа, сутки	Y	1
Новые капиталовложения на корректировку, млн. руб.	K	2.5281
Средняя вероятность возникновения ущерба $Q_S^{cp}(2004) = 1 - V_S^{cp}(2004)$	Q_S^{cp}	0.2737
Ущерб от задержки караванов на Неве на Y суток в ценах 2002 г., тыс. долл.	$H(1)$	50.8
Годовые ожидаемые потери вследствие отказов транспортной системы "Волго-Балт" на Y суток	$R(1)$	13.9
Среднегодовые ожидаемые потери, тыс. долл.	–	13.9
Годовые ожидаемые потери судоходства (по среднегодовому курсу 2002 г. 31.3 руб./долл.), млн. руб.	R	0.44
Суммарные годовые эксплуатационные затраты на систему мостов, млн. руб.	ΣZ	50
Нормативный коэффициент	E	0.04
Критерий (1), млн. руб.	–	1136.4

В табл. 2 и 3 представлены результаты расчетов критерия чистых дисконтированных затрат, соответственно до и после корректировки гидросистем Большого Охтинского моста.

Значение критерия после корректировки меньше (лучше) на 13.7 млн. руб. Корректировка гидросистем экономически целесообразна. Возможное снижение годовых эксплуатационных затрат в связи с сокращением числа отказов на Большом Охтинском мосту осталось не учтенным, но идет в запас расчета.

Выводы. Разработана и реализована методика экономического обоснования технических решений, влияющих на надежность восстанавливаемых технических систем (на примере системы разводных мостов), с учетом ожидаемых потерь. В методике использованы современные методы определения безотказности.

Впервые выполнены расчеты ущербов от простоя речного транспорта на судоходной реке Неве в Санкт-Петербурге.

Методика может быть использована при обосновании инвестиций, связанных с конструктивными изменениями системы невыхов мостов и при расчетах по страхованию гражданской ответственности перед судовладельцами за непредвиденные отказы этой системы.

Методическая разработка может найти применение при обосновании капиталовложений на повышение надежности широкого круга восстанавливаемых технических систем, отказ которых вызывает только экономические потери, например, надежности конвейерных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ащеулов А.В., Стефанишин Д.В.** (2006): Оценка функциональной надежности объемных гидроприводов механизмов подъемных сооружений методом деревьев отказов // *Известия ТулГУ. Сер. Подъемно-транспортные машины и оборудование*. Вып. 7.
- Болотин В.В.** (1992): Надежность в технике. Нормирование показателей надежности. Гарантии надежности. М.: МНТК "Надежность машин".
- Вентцель Е.С.** (1972): Исследование операций. М.: Советское радио.
- Единые нормы** (1991): Единые нормы амортизационных отчислений на полное восстановление основных фондов народного хозяйства СССР. Утверждена постановлением Совета министров СССР 22 октября 1990 г. № 1072. М.: МГП "Комус".
- Иванов Б.С., Соколов С.А.** (1998): Надежность машин и технических систем: Учебное пособие. СПб.: СПбГТУ.
- Коссов В.В., Лившиц В.Н., Шахназаров А.Г.** (2000): Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. М.: ОАО «НПО Изд-во "Экономика"».

Поступила в редакцию
14.03.2007 г.

Economic Study of Technical Systems' Feasibility – Bascule Bridges on the Neva River

A. V. Ascheulov, V. P. Sokolov

For the first time feasibility study of the increase of reliability of a restorable technical system, a failure of which causes only financial losses, has been given. As a part of the complex criterion, unlinear expectable losses, caused by failures of a system, have been taken into account. As an example, the feasibility study of modernization of the bascule bridge on the Neva river in Saint-Petersburg has been produced.