

ПОИСК ФУНКЦИИ ДЕГРАДАЦИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ АВТОДОРОЖНЫХ МОСТОВ

Бородай Д.И.

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

Проблема

В структуре автодорожных мостов Украины преобладают железобетонные пролетные строения. По отношению к общей протяженности автодорожных мостов железобетонные пролетные строения составляют 91 %. По мере того, как все большая часть железобетонных пролетных строений приближается к своему критическому сроку эксплуатации, все более актуальным становится вопрос о прогнозе их долговечности.

Есть значительное количество работ украинских ученых, посвященных проблеме оценки долговечности эксплуатируемых мостов [1-4]. Разработаны нормативные документы [5], [6], позволяющие прогнозировать остаточный ресурс эксплуатируемых пролетных строений. Что же касается прогноза долговечности проектируемых железобетонных пролетных строений мостов, то такие исследования только начинаются.

В нормативных документах по проектированию, как отечественных, так и зарубежных, содержатся общие директивные указания по назначению долговечности на этапе проектирования сооружения. Практического аппарата прогноза и управления долговечностью с учетом изменяющихся свойств материала сооружения и уровня нагрузки нормативные документы не содержат, тогда как необходимость в теоретическом обосновании и практической разработке методологии оценки ресурса сооружения еще на этапе его проектирования сегодня очевидна.

Проблема оценки долговечности рассматривается в документах Европейского объединенного комитета безопасности сооружений (The Joint Committee on Structural Safety) [7], [8]. Однако практической методологии прогноза долговечности на этапе проектирования названные документы не содержат.

Общий подход к управлению надежностью железобетонных мостов разработан в монографии Л.И.Иосилевского [9]. Здесь расчетная вероятность отказа по параметру напряженно-деформированного состояния x в функции времени t дается зависимостью:

$$P(x,t) = \int F_R(x,t) \rho_s(x,t) dx, \quad (1)$$

где $F_R(x,t)$ – функция распределения прочности материала конструкции;

$\rho_s(x,t)$ – плотность распределения силового фактора S .

Необходимые для практического использования прогноза (1) модели деградации элементов железобетонных мостов в монографии [9] не приводятся.

Изложенное выше демонстрирует проблему и, в некоторой степени, ее состояние. Центральной частью проблемы является модель деградации материала, т.е. функция, описывающая ухудшение свойств материала конструкции с течением времени. Имея такую функцию, можно построить практическую методику прогноза долговечности проектируемых элементов мостов.

Формулировка задачи

Задачей этого исследования есть построение модели деградации как функции времени, интегрально описывающей посредством одного параметра снижение несущей способности пролетного строения.

В общем случае надежность элемента конструкции как вероятность того, что в период времени будет исчерпана несущая способность элемента, т.е. достигнуто предельное состояние, дается интегралом [7]:

$$P_f(t) = \int_{S(X(t)) \leq 0} f[X(t)] dX(t), \quad (2)$$

где $f[X(t)]$ – плотность распределения базовых переменных;

$S(X(t))$ – обобщенный резерв прочности;

$X(t)$ – вектор базовых переменных, зависящих от времени.

Непосредственное вычисление интеграла (2) практически невозможно из-за сложности построения функции плотности распределения базовых переменных. Мы здесь используем численный подход, заключающийся в численном моделировании обобщенного резерва прочности в функции одного параметра – стохастической характеристики безопасности. В основу модели положена гипотеза о том, что интегральным параметром, определяющим достижение граничного состояния, есть характеристика безопасности [10]:

$$S(X(t)) = S(\beta(t)). \quad (3)$$

Принято обычное допущение о нормальном распределении функции $S(\beta(t))$.

Функцию обобщенного резерва прочности представим в виде:

$$S(\beta(t)) = \beta_0 \cdot f(t), \quad (4)$$

где $\beta_0 \cdot f(t)$ – искомая функция деградации;

β_0 – начальное значение характеристики безопасности, определяемое зависимостью

$$\beta_0 = \frac{\bar{\gamma} - 1}{\sqrt{V_Q^2 + \bar{\gamma}^2 V_R^2}}. \quad (5)$$

Здесь $\bar{\gamma}$ – математическое ожидание реального коэффициента запаса:

$$\bar{\gamma} = \mu_R / \mu_Q; \quad (6)$$

$$\mu_R = \frac{R_n}{(I - 1,64V_R)}; \quad \mu_Q = \frac{Q_n}{(I + 1,64V_Q)}, \quad (7)$$

R_n и Q_n – нормативные значения сопротивления и нагрузки соответственно;

V_R – коэффициент вариации сопротивления;

V_Q – коэффициент вариации нагрузки.

Функция деградации

Построим функцию деградации на основе регрессионного анализа статистических данных сроков службы пролетных строений автодорожных мостов. Статистические данные представляют собой сроки достижения пятого дискретного состояния (капитальный ремонт или прекращение эксплуатации). Рассматриваются три выборки:

- № 1 – сроки службы ребристых пролетных строений;
- № 2 – сроки службы плитных пролетных строений, выборка;
- № 3 – сроки службы смешанных конструкций пролетных строений

Статистические характеристики выборок представлены в табл.1.

Таблица 1

Статистический параметр	Выборка № 1	Выборка № 2	Выборка № 3
Количество элементов, N	49	56	105
Среднее время перехода в пятое дискретное состояние μ_t , лет	35	33	34
Максимальное значение долговечности, T_{max} , лет	59	59	59
Минимальное значение долговечности, T_{min} , лет	21	12	12
Дисперсия D_T , лет ²	60,5	60,5	74,5
Стандарт σ_T , лет	7,778	9,323	8,631

На основе регрессионного анализа представленных выборок построены функции деградации в экспоненциальной форме

$$\beta(t) = a \cdot \beta_0 \cdot e^{-b \cdot t} \quad (8)$$

и в виде показательной функции

$$\beta(t) = \beta_0 \cdot t^{-\lambda}. \quad (9)$$

Параметры функций (8) и (9) приведены в табл. 2 и табл. 3 соответственно.

Таблица 2

<i>Тип пролетных строений</i>	β_0	<i>Верхняя и нижняя оценки срока службы, лет</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
Балочные	2,5	$T_{min} = 21 \text{ год}$	2,565	-0,026
		$T_{max} = 59 \text{ лет}$	2,522	-0,009
Плитные	3,9	$T_{min} = 12 \text{ год}$	4,254	-0,089
		$T_{max} = 59 \text{ лет}$	3,965	-0,016
Балочные + плитные	3,2	$T_{min} = 12 \text{ год}$	3,428	-0,069
		$T_{max} = 59 \text{ лет}$	3,242	-0,013

Таблица 3

<i>Тип пролетных строений</i>	β_0	<i>Верхняя и нижняя оценки срока службы, лет</i>	λ
Балочные	2,5	$T_{min} = 21 \text{ год}$	0,168
		$T_{max} = 59 \text{ лет}$	0,125
Плитные	3,9	$T_{min} = 12 \text{ год}$	0,385
		$T_{max} = 59 \text{ лет}$	0,234
Балочные + плитные	3,2	$T_{min} = 12 \text{ год}$	0,305
		$T_{max} = 59 \text{ лет}$	0,186

Полученные функции деградации для балочных, плитных и смешанных пролетных строений ниже иллюстрируются графиками. На рисунках приведены графики функций при различных начальных значениях характеристики безопасности. Приняты обозначения: $\beta_{max}(t), \beta_{min}(t)$ - функция деградации в экспоненциальной форме; $\beta_{max}(t)I, \beta_{min}(t)I$ - функция деградации в показательной форме.

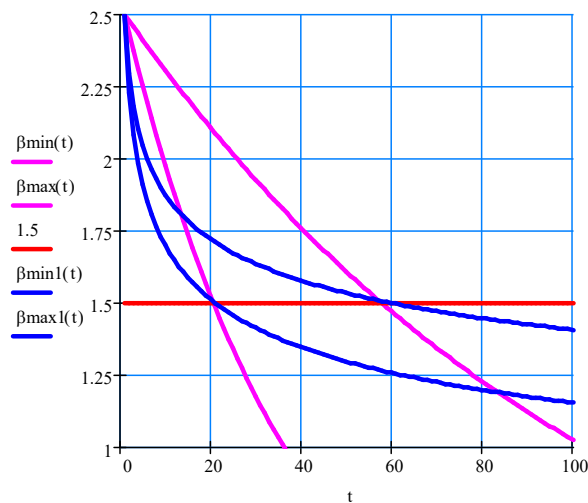


Рисунок 1 – Функции деградации балочных пролетных строений в экспоненциальной и показательной формах при $\beta_0 = 2,5$

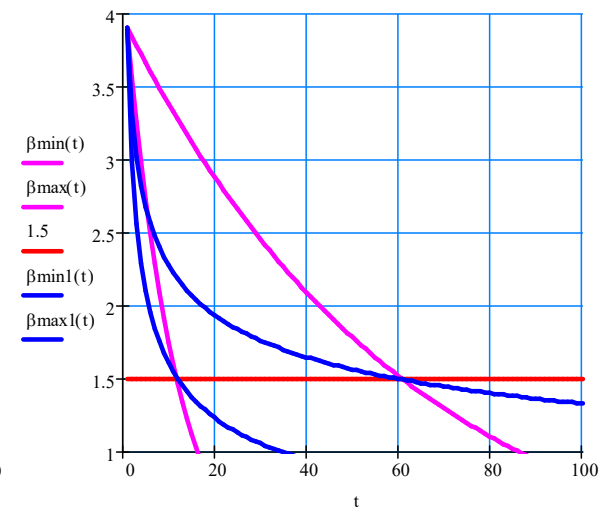


Рисунок 2 – Функции деградации плитных пролетных строений в экспоненциальной и показательной форме при $\beta_0 = 3,9$

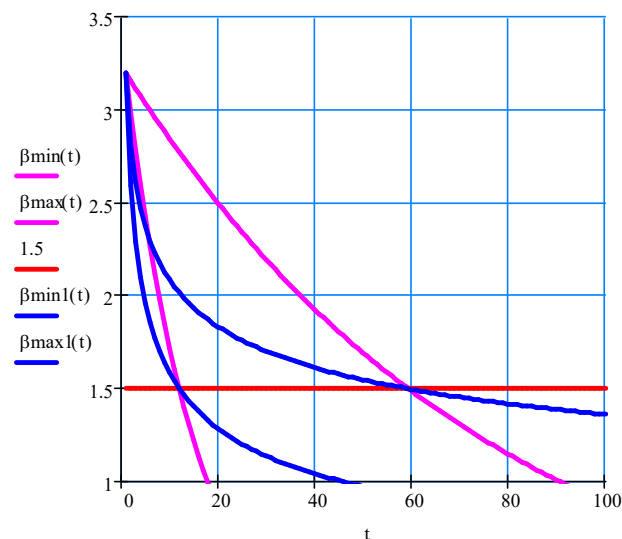


Рисунок 3 – Функции деградации смешанных железобетонных пролетных строений в экспоненциальной и показательной форме при $\beta_0 = 3,2$

Выводы

Анализируя полученные зависимости для функций деградации железобетонных пролетных строений, можно сделать следующие выводы:

- обе формы функции, основанные на данных регрессионного анализа статистических данных эксплуатации мостов, будут давать одинаковые результаты при прогнозе

долговечности. Поведение каждой из функций в зависимости от времени t , разумеется, различно;

- функция деградации пролетных строений в экспоненциальной форме (8) достаточно правдоподобно описывает процесс износа сооружения;
- функция деградации пролетных строений в показательной форме (9) характеризуется интенсивным уменьшением значения характеристики безопасности в первые 10-15 лет эксплуатации с последующим замедлением этой интенсивности. Представляется, что такая форма кривой деградации в меньшей степени соответствует реальному процессу износа.

Основываясь на представленном исследовании, можно принять в качестве интегральной модели деградации железобетонных пролетных строений мостов функцию (8). Функция деградации в форме (8) адекватна имеющимся статистическим данным эксплуатации автодорожных мостов. Однако для построения практического аппарата прогноза долговечности необходимо исследовать и отразить в модели факторы, вызывающие столь значительный разрыв между верхней и нижней оценками долговечности.

Благодарность

Эта работа выполнена под руководством д-ра технических наук, профессора А.И.Лантуха-Лященко. Выражаю искреннюю благодарность моему руководителю.

Литература

1. Лантух-Лященко А.И. Оцінка надійності споруди за моделлю марковського випадкового процесу з дискретними станами. //Зб. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 1999, вип. 57. – С.183-188.
2. Лантух-Лященко А.И. Оцінка технічного стану транспортних споруд, що знаходяться в експлуатації. Вісник Транспортної Академії України, № 3, Київ 1999. – С. 59-63.
3. Лантух-Лященко А.И. Феноменологическая модель деградации элементов сооружений // Труды международной научно-технической конференции «Вычислительная механика деформируемого твердого тела»// – М.: МИИТ, 2006, С. 59-265.
4. Страхова Н.Е. Строки служби та міжремонтні періоди міських мостів. //Зб. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 2006, вип. 73 – С. 307-311.
5. ВБН В.3.1-218-174-2002. Мости та труби. Оцінка технічного стану мостів, що експлуатуються.. – Державна служба автомобільних доріг України. – К.: 2002. – 74 с.
6. В.І. Кир'ян, П.М. Коваль та ін.- Настанови з визначення технічного стану мостів ТАУ. Вид. "Логос", К.: 2002. 117 с.
7. JCSS. Probabilistic model code. The Joint Committee on Structural Safety, – Zurich, 2001. – 138 p.
8. ISO ST 2394. General Principles on Reliability for Structures. – Zurich: ISO, 1998. – 50 p.
9. Иосилевский Л.И. Практические методы управления надежностью железобетонных мостов. – М.: Науч.-изд. центр «Инженер», 2005. – 324 с.
10. Лантух-Лященко А.И. Проблема надійності і довговічності прогонових будов автодорожніх мостів. Зб. Дороги і мости. – К.: ДерждорНДІ, 2006. С. 210-229.