

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И НАДЕЖНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ МЕТОДОВ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Соколов В.А.

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», Санкт-Петербург, Россия (195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29), e-mail: iffice@spbstu.ru

Отмечено, что распознавание технических состояний сложных строительных систем вполне укладывается в понятия и возможности математических методов теории технической диагностики. Указано также, что конечной целью диагностики состояний является повышение надежности и ресурса систем и что техническую диагностику вообще следует рассматривать как один из основных разделов общей теории надежности. Для оценки технического состояния предложен подход, основанный на теоретическом аппарате технической диагностики, использующем вероятностные методы распознавания состояний сложных технических систем. Диагностирование выполняется статистическим методом с применением обобщенной формулы Байеса. При построении решения использованы также методы теории информации. В качестве примера рассмотрены пять состояний железобетонных балок перекрытий. Показано, что полученную для этих балок чисто диагностическую информацию о вероятностях их состояний можно использовать для расчета вероятности их безотказной работы, т.е. надежности. Предлагается в качестве вероятности отказа балки принять полученную по расчетам вероятность отнесения ее к пятому (аварийному) состоянию.

Ключевые слова: техническая диагностика, метод Байеса, диагностическая матрица, теория информации, «дерево диагнозов», надежность.

ESTIMATION OF THE TECHNICAL STATE AND RELIABILITY OF BUILDING CONSTRUCTIONS ON BASIS OF PROBABILISTIC METHODS OF TECHNICAL DIAGNOSTICS

Sokolov V.A.

«Saint-Petersburg State Polytechnic University», Saint-Petersburg, Russia (195251, Saint-Petersburg, Politehnicheskaya street, 29), e-mail: iffice@spbstu.ru

Noted that the recognition of technical conditions of complex building systems could fit into the concepts and possibilities of mathematical methods of the theory of technical diagnostics. It was also mentioned that the ultimate purpose of diagnosis of States is to increase the reliability and resource systems and that technical diagnostics in General should be viewed as one of the main sections of the General theory of reliability. For the technical condition assessment approach based on the theoretical apparatus of technical diagnostics, using probabilistic methods of recognition of the States of complex technical systems. Diagnosis is performed statistical method using the generalized Bayes formula. When constructing the solution, used methods of information theory. As an example, discussed the five States of reinforced concrete beams. It is shown that the obtained for these beams purely diagnostic information about the probabilities of their States can be used for calculating the probability of trouble-free operation, i.e. reliability. Serves as the probability of failure beams take obtained by calculations of the probability of assigning her to the fifth (emergency) state.

Keywords: technical diagnostics, Bayesian, diagnostic matrix, information theory, «tree diagnoses», reliability.

Введение

В работах [5-9] отмечено, что распознавание технических состояний сложных строительных систем вполне укладывается в понятия и возможности математических методов теории технической диагностики. А в монографии [2] совершенно справедливо указано, что конечной целью диагностики состояний является повышение надежности и ресурса систем и что техническую диагностику вообще следует рассматривать как один из основных разделов общей теории надежности.

Для оценки технического состояния, т.е. для определения категорий технического состояния элементов зданий в соответствии с [3; 4], предложен подход, основанный на теоретическом аппарате технической диагностики, использующем вероятностные методы распознавания состояний сложных технических систем. Диагностирование выполняется статистическим методом с применением обобщенной формулы Байеса [2; 5–9]

$$P(S_i / K^*) = \frac{P(S_i)P(K^* / S_i)}{\sum_{s=1}^n P(S_s)P(K^* / S_s)}. \quad (1)$$

После вычисления апостериорных вероятностей состояний $P(S_i/K^*)$ [2; 7] для каждого конструктивного элемента по указанной зависимости осуществляется анализ полученных результатов с использованием аппарата теории информации, в частности, с использованием понятий информационной энтропии [2; 7; 8; 10]. Этот подход использован при построении многоуровневой иерархической модели диагностирования [8; 9]. В настоящей работе именно на этой основе предлагается выполнить и оценку надежности. Такую модель диагностирования для строительных конструкций зданий предлагается применить впервые, что определяет научную новизну работы.

Отмечено [1], что для оценки надежности других технических систем нашел применение и достаточно хорошо развит вероятностно-статистический подход. Однако эти системы характеризуются массовостью изготовления, в связи с чем имеется возможность получить достаточно представительную статистику отказов не только отдельных элементов, но и систем в целом. Для строительных систем такой подход неприемлем, т.к. для них нет полноценной статистики отказов ни для элементов, ни для объекта в целом. Вместе с тем для этих зданий накопился значительный материал по статистике диагнозов (состояний) и по статистике определяющих эти диагнозы признаков, который удалось упорядочить и уложить в рамки уже имеющихся разработанных методик теоретического аппарата технической диагностики и теории информации. Полученные на этой основе результаты диагностирования состояний строительных систем и их элементов позволяют несколько по-иному посмотреть и на проблему надежности, и на ее решение.

Предложенный подход рассматривается далее на примере диагностирования и оценки надежности главных балок железобетонного монолитного междуэтажного перекрытия здания старой городской застройки, выполненного по схеме балочной клетки. Перекрытие представляется как сложная конструктивная подсистема некоторого промежуточного уровня, являющаяся конструктивным элементом системы следующего, более высокого уровня – здания в целом. Перекрытие состоит из главных балок G_k ($k = 1, 2, 3, \dots, g$), второстепенных балок W_k ($k = 1, 2, 3, \dots, w$), плитных участков F_k ($k = 1, 2, 3, \dots, f$) и колонн

L_k ($k = 1, 2, 3, \dots, l$), которые рассматриваются как его элементы и группы элементов. Схема раскладки этих элементов показана на рис. 1. Как видно, в данном примере перекрытие состоит из трех главных балок G_1, G_2 и G_3 ($g = 3$), двадцати двух второстепенных балок W_k ($w = 22$), двадцати четырех плитных участков F_k ($f = 24$) и двух колонн L_k ($l = 2$).

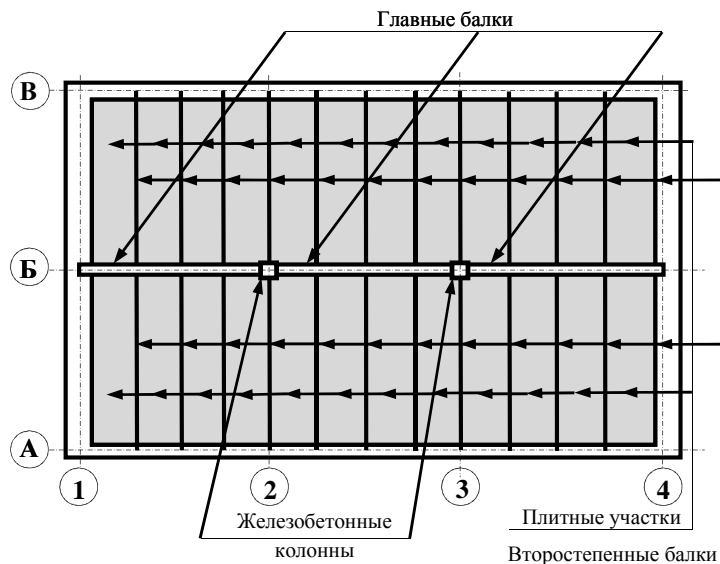


Рис. 1. Схема раскладки элементов перекрытия

Использование статистических методов технической диагностики, в частности метода Байеса, предусматривает сбор, обработку и упорядочивание статистической информации по данным обследований прошлых лет. Весь статистический материал удобно представить в виде так называемых диагностических матриц. Для главных балок рассматриваемого перекрытия диагностическая матрица имеет вид таблицы 1. Как видно, приняты пять состояний диагностирования с названиями в соответствии с [4] и с априорными вероятностями $P(S_i)$, а также девять признаков (простых и трехрядных [5]) с вероятностями $p_g(k_{js}/S_i)$ [6; 8]. Данные для диагностической таблицы получены при обработке результатов ретроспективного анализа состояний *ста* главных балок. Далее предполагается, что при последующих обследованиях аналогичных балок были получены следующие реализации указанных в таблице 1 признаков.

Таблица 1

Диагностическая матрица для главных балок перекрытия

№ № п/п	Диагностические п р и з н а к и	k_{js}	Разр призн.	$p(k_{js})$	Сост.	Сост.	Сост.	Сост.	Сост.
					S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
					$P(S_1)$	$P(S_2)$	$P(S_3)$	$P(S_4)$	$P(S_5)$
					0,18	0,29	0,35	0,13	0,05
1	Поврежд. бетона, сниж. его св-ва по	k_{11}	да	$p(k_{11})$	0,11	0,17	0,29	0,54	0,80

	отн. к арм.	k_{12}	нет	$p(k_{12})$	0,89	0,83	0,71	0,46	0,20
2	Прод. трещины в защ. слое вдоль армат. стержней	k_{21}	да	$p(k_{21})$	0,06	0,14	0,23	0,77	0,60
		k_{22}	нет	$p(k_{22})$	0,94	0,86	0,77	0,23	0,40
3	Нормальные трещины (ширина раскрытия)	k_{31}	< 0,4 мм	$p(k_{31})$	0,76	0,59	0,40	0,15	0,20
		k_{32}	до 1,0 мм	$p(k_{32})$	0,18	0,34	0,43	0,62	0,40
		k_{33}	$\geq 1,0$ мм	$p(k_{33})$	0,06	0,07	0,17	0,23	0,40
4	Наклонные трещ. (наличие)	k_{41}	да	$p(k_{41})$	0,06	0,17	0,34	0,31	0,20
		k_{42}	нет	$p(k_{42})$	0,94	0,83	0,66	0,69	0,80
5	Прочность бетона	k_{51}	проектная	$p(k_{51})$	0,72	0,48	0,49	0,15	0,20
		k_{52}	$\leq 30\%$	$p(k_{52})$	0,22	0,31	0,20	0,39	0,20
		k_{53}	$> 30\%$	$p(k_{53})$	0,06	0,21	0,31	0,46	0,60
6	Коррозия арматуры	k_{61}	< 5%	$p(k_{61})$	0,76	0,59	0,29	0,15	0,20
		k_{62}	5 – 20	$p(k_{62})$	0,18	0,24	0,37	0,39	0,20
		k_{63}	$> 20\%$	$p(k_{63})$	0,06	0,17	0,34	0,46	0,60
7	Прогиб	k_{71}	допускаем.	$p(k_{71})$	0,83	0,48	0,51	0,31	0,20
		k_{72}	$\leq 30\%$	$p(k_{72})$	0,11	0,38	0,23	0,46	0,20
		k_{73}	$> 30\%$	$p(k_{73})$	0,06	0,14	0,26	0,23	0,60
8	Условие прочности по нормальным сечениям	k_{81}	да	$p(k_{81})$	0,94	0,90	0,86	0,69	0,20
		k_{82}	нет	$p(k_{82})$	0,06	0,10	0,14	0,31	0,80
9	Условие прочности по наклонным сечениям	k_{91}	да	$p(k_{91})$	0,94	0,83	0,60	0,61	0,20
		k_{92}	нет	$p(k_{92})$	0,06	0,17	0,40	0,39	0,80

Для *сто* первой балки: первый признак – « k_{11} »; второй признак – « k_{21} »; третий признак – « k_{31} »; четвертый признак – « k_{41} »; пятый признак – « k_{52} »; шестой признак – « k_{61} »; седьмой признак – « k_{71} »; восьмой признак – « k_{81} »; девятый признак – « k_{92} ». В качестве примера для этой балки реализации признаков в таблице 1 выделены цветом.

Для *сто* второй балки: первый признак – « k_{11} »; второй признак – « k_{21} »; третий признак – « k_{31} »; четвертый признак – « k_{41} »; пятый признак – « k_{53} »; шестой признак – « k_{63} »; седьмой признак – « k_{71} »; восьмой признак – « k_{81} »; девятый признак – « k_{91} ».

Для *сто* третьей балки: первый признак – « k_{11} »; второй признак – « k_{21} »; третий признак – « k_{32} »; четвертый признак – « k_{42} »; пятый признак – « k_{53} »; шестой признак – « k_{63} »; седьмой признак – « k_{71} »; восьмой признак – « k_{82} »; девятый признак – « k_{91} ». Очевидно, что

для *сто второй* и *сто третьей* балок выделение строчек цветом в диагностической матрице будет иным.

После проведения серии расчетов по зависимости (1) распределение апостериорных вероятностей состояний $P(S_i/K^*)$ для каждой балки получилось в виде следующих численных значений (таблица 2, столбцы 2, 3, 4, 5, 6).

Таблица 2

Численные значения вероятностных параметров состояний и надежности для главных балок

Элементы	$P(S_1/K^*)$	$P(S_2/K^*)$	$P(S_3/K^*)$	$P(S_4/K^*)$	$P(S_5/K^*)$	$P(S_f)$	$P(S_{nf})$
1	2	3	4	5	6	7	8
Балка G_1	0,008	0,167	0,582	0,221	0,022	0,022	0,978
Балка G_2	0,055	0,378	0,404	0,160	0,003	0,003	0,997
Балка G_3	0,000	0,007	0,080	0,677	0,236	0,236	0,764
Все главн. балки	0,014	0,131	0,300	0,432	0,123	0,123	0,877

Очевидно, что построчная сумма вероятностей в столбцах 2–6 этой таблицы равна единице во всех ее строках.

В последней (нижней) строке таблицы представлено распределение апостериорных вероятностей состояний для объединенной группы элементов «главные балки». Результат получен на основе уровневого построения решения с применением основных понятий методов теории информации. Используются ее основные понятия: информационная энтропия (степень неопределенности состояний системы), максимальная энтропия, остаточная энтропия (степень определенности состояний системы или количество внесенной информации) и вероятности степени определенности. Применен также предложенный автором «передаточный механизм» вероятностной оценки состояний посредством расчетов информационного вклада (доли) состояний каждой балки в состояние структуры следующего уровня – в данном случае объединенной группы элементов «главные балки». В работах [6; 8; 9] построение решения на основе модели иерархической уровневой структуры диагностирования в виде «диагностического дерева» рассмотрено более подробно. В настоящее время такой подход реализован и для здания в целом.

Методику расчета надежности с использованием полученных результатов вероятностного анализа технического состояния рассматриваемых конструктивных элементов перекрытия предлагается рассмотреть именно на примере представленных в таблице 2 вероятностных параметров. В основу построения методики положен принцип

разделения и последующего комбинирования полученных по расчетам вероятностей пяти состояний. Последовательность решения этой задачи в данном случае состоит в следующем.

1. Выполняется разделение, а затем комбинирование пяти априорных вероятностей состояний по принципу 4 + 1 (таблица 1), т.е., например, для балки G_1

$$P(S_{nf}) = P(S_1) + P(S_2) + P(S_3) + P(S_4), \quad \text{а } P(S_f) = P(S_5). \quad (2)$$

2. По такому же принципу разделяются и объединяются получаемые в результате расчетов по формуле (1) пять апостериорных вероятностей, т.е. для балки G_1 можно записать

$$P(S_{nf}/K^*) = P(S_1/K^*) + P(S_2/K^*) + P(S_3/K^*) + P(S_4/K^*), \quad \text{а } P(S_f/K^*) = P(S_5/K^*). \quad (3)$$

3. Принимается решение о том, что апостериорная вероятность пятого аварийного состояния $P(S_5/K^*)$, характеризующегося по определению исчерпанием несущей способности элемента [4], группы элементов и системы в целом, рассматривается как вероятность отказа $P(S_f/K^*)$. Вероятность состояния, которая обозначена $P(S_{nf}/K^*)$ и которая объединяет первые четыре вероятности состояний, в таком случае представляется как вероятность безотказной работы, т.е. надежность. Очевидно, что вероятность безотказной работы

$$P(S_{nf}/K^*) = 1 - P(S_f/K^*). \quad (4)$$

В данном примере численные значения $P(S_f/K^*)$ и $P(S_{nf}/K^*)$ в таблице 2 для всех трех балок приведены в столбцах 7 и 8 соответственно.

Анализируя данные в столбце 8, можно отметить, что группа из трех элементов (трех балок) имеет некоторое резервирование надежности, т.е. не относится однозначно к системам с последовательным соединением элементов. При последовательном соединении элементов, как известно, надежность системы определяется произведением надежностей составляющих элементов

$$P(G_{nf}) = P(G_{1nf}) \cdot P(G_{2nf}) \cdot P(G_{3nf}) = 0,978 \cdot 0,997 \cdot 0,764 = 0,745 < 0,877. \quad (5)$$

Не относится эта группа и к системам с параллельным соединением элементов, надежность которых, как известно, определяется зависимостью, представляющей собой сумму вероятностей составляющих элементов, состояния которых рассматриваются как события совместные и независимые

$$P(G_{nf}) = P(G_{1nf}) + P(G_{2nf}) + P(G_{3nf}) - P(G_{1nf}) \cdot P(G_{2nf}) - P(G_{2nf}) \cdot P(G_{3nf}) - P(G_{3nf}) \cdot P(G_{1nf}) + P(G_{1nf}) \cdot P(G_{2nf}) \cdot P(G_{3nf}) = 0,999 > 0,877. \quad (6)$$

В формулах (5) и (6) величина $P(G_{knf})$ – сумма вероятностей безотказной работы k -й балки ($k = 1, 2, 3, \dots, g$), вычисленная по зависимости (3).

Таким образом, надежность группы элементов «главные балки», отражающая их техническое состояние, выявленное при обследовании, попадает в интервал с крайними граничными значениями вероятностей (0,745 – 0,999), причем практически в середину этого

интервала. Результат представляется достаточно убедительным. Он убедителен еще и потому, что по результатам выполненных вероятностных расчетов для всех элементов низшего (базисного) уровня иерархии (второстепенные балки, плитные участки и колонны) рассматриваемого перекрытия также были получены близкие соотношения. На рис. 2 показана часть (ветвь) «диагностического дерева» только для группы элементов «главные балки». В ячейках диаграммы, как видно, представлены численные значения максимальных вероятностей состояний и вероятностей безотказной работы, т.е. надежности.



Рис. 2. Часть «диагностического дерева» для главных балок перекрытия

Выводы. Методика расчета показателей надежности по данным выполненного вероятностного анализа технического состояния конструктивных элементов здания предложена на примере результатов диагностирования главных балок монолитного железобетонного междуэтажного перекрытия здания старой городской застройки. В этом случае построенное «дерево диагнозов» стало вполне обоснованной графической моделью оценки надежности, т.е. может рассматриваться как «дерево отказов». В основу построения методики расчета надежности положен принцип разделения и последующего комбинирования полученных по расчетам вероятностей состояний.

Последовательность решения этой задачи состоит в том, что разделение выполнено по схеме «4 + 1». Именно на основе этой формулы принято решение считать вероятность отказа равной апостериорной вероятности пятого аварийного состояния, а вероятность безотказной работы (надежность) определять по зависимости (4).

Список литературы

1. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М. : Машиностроение, 1984. – 312 с.
2. Биргер И.А. Техническая диагностика. – М. : Машиностроение, 1978. – 240 с.
3. ГОСТ Р 53778-2010. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М. : Стройиздат, 2010. – 90 с.
4. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. СП 13-102-2003. Свод правил по проектированию и строительству. – М. : Госстрой России. ГУЛ ЦПП, 2003. – 28 с.
5. Соколов В.А. Диагностический вес признаков и диагностическая ценность обследования при распознавании состояний элементов строительных систем // Инженерно-строительный журнал. – 2010. - № 3. – С. 27 – 31.
6. Соколов В.А. Вероятностный метод оценки технического состояния конструкций железобетонного монолитного перекрытия зданий старой городской застройки // Инженерно-строительный журнал. – 2010. - № 4. – С. 49 – 58.
7. Соколов В.А. Оценка технического состояния элементов строительных систем с использованием вероятностных методов распознавания // Дефекты зданий и сооружений : материалы XIV научно-методической конференции, № 14. – СПб. : Изд-во ВИТИ, 2010. – С. 54 – 63.
8. Соколов В.А. Построение решения для оценки технического состояния конструктивных систем зданий и сооружений с использованием вероятностных методов распознавания // Инженерно-строительный журнал. – 2010. - № 6. – С. 48 – 57.
9. Соколов В.А. Многоуровневый вероятностный анализ технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений // Дефекты зданий и сооружений : материалы XV научно-методической конференции, № 15. – СПб. : Изд-во ВИТИ, 2011. – С. 54 – 63.
10. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетики. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1963. – 832 с.

Рецензенты:

Морозов В.И., д.т.н., профессор, зав. кафедрой железобетонных и каменных конструкций ФГБОУ ВПО «СПбГАСУ», г. Санкт-Петербург.

Белов В.В., д.т.н. профессор кафедры «Строительная механика и строительные конструкции» ФГБОУ ВПО «СПбГПУ», г. Санкт-Петербург.