

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

**КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра «Мосты, транспортные тоннели и геодезия»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по выполнению курсовой работы по курсу
«Основы надежности мостов и тоннелей»

по профилю подготовки «Автодорожные мосты и тоннели»
направления 270800.62 «Строительство»

Казань

2015 г.

УДК 624.21 + 519.248
БКК 38я73
И622

Методические указания по выполнению курсовой работы по курсу «Основы надежности мостов и тоннелей» по профилю подготовки «Автодорожные мосты и тоннели» направления 270800.62 «Строительство» / Казанский государственный архитектурно-строительный университет. Сост.: Майстренко И.Ю., Зиннуров Т.А. Казань: КГАСУ, 2015. – 29 с.

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Казанского государственного архитектурно-строительного университета.

В данных методических указаниях рассматривается задача расчета надежности мостового сооружения, при этом освещаются приемы качественного и количественного анализа надежности, а также вопросы разработки мероприятий по повышению надежности автодорожного моста. Предназначены к использованию в учебном процессе для студентов по профилю подготовки «Автодорожные мосты и тоннели» направления 270800.62 «Строительство».

Табл. 8, рис. 5, библиогр. 12 наимен.

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор, заслуженный строитель РТ,
заведующий кафедрой «Мосты, транспортные тоннели и геодезия» КГАСУ
А.А. Пискунов

Кандидат технических наук, профессор, заслуженный работник КГАСУ,
начальник технического отдела ООО НТЦ «Строй-Экспертиза»
И.С. Гирфанов

УДК 624.21 + 519.248
БКК 38я73

© Казанский государственный
архитектурно-строительный
университет, 2015.
© Майстренко И.Ю., Зиннуров Т.А.

СОДЕРЖАНИЕ

	<u>Стр.</u>
Введение	4
1. Конструктивная схема и её описание	4
2. Качественный анализ надежности	6
3. Количественный анализ надежности	12
4. Мероприятия по повышению надежности	23
Литература	28

ВВЕДЕНИЕ

В методических указаниях приведены общие сведения, статистическая информация и описание основных процедур, необходимых для решения задачи оценки надежности мостовых сооружений.

При рассмотрении качественного анализа надежности освещаются приемы выполнения экспертной оценки соответствия принятых проектных решений нормативным требованиям раздела «Общие указания» Свода правил СП.35.13339.2011 «Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84*» [1]. Для выполнения количественного анализа используются принципы системы менеджмента надежности, регламентируемые ГОСТ Р 51901.2-2005 [2], и указания руководства по применению методов анализа надежности ГОСТ Р 51901.5-2005 [3], входящие в группу национальных стандартов по анализу и оценке рисков. Для выделения целесообразности применения, эффективности, достоинств и недостатков методов повышения надежности технических систем рассмотрены основные характеристики методов, которые применяются при их проектировании.

Цель настоящих методических указаний – повысить эффективность работы студентов при решении вопросов оценки надежности мостовых сооружений на стадии проектирования при выполнении курсовой работы по курсу «Основы надежности мостов и тоннелей» по профилю подготовки «Автодорожные мосты и тоннели» направления 270800.62 «Строительство».

1. КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА И ЕЁ ОПИСАНИЕ

Конструктивная система представляет собой взаимосвязанную совокупность вертикальных и горизонтальных несущих конструкций здания, которые совместно обеспечивают его прочность, жесткость и устойчивость.

Конструктивная схема представляет собой вариант конструктивной системы (далее – система) по признакам состава и размещения в пространстве основных несущих конструкций (продольному, поперечному, смешанному, каркасному).

При описании конструктивной системы мостового перехода (сооружения) следует отразить (текстовая часть курсовой работы):

- ♦ разбивка перехода (сооружения) на пролёты;
- ♦ выбор и назначение системы пролётных строений;
- ♦ определение типов фундаментов и конструкции опор;
- ♦ выбор материала пролётных строений и опор;
- ♦ назначение основных размеров по конструктивной схеме.

В качестве примера (рис. 1) рассмотрим конструктивную систему – разрезное пролетное строение автодорожного моста со стальными главными балками двутаврового сечения и ортотропной плитой проезжей части, включенной в работу на общее действие нагрузки. Рассматриваемый пролет моста 42 м, запроектированный под временные нагрузки А14 и Н14 [1, 4], материал несущих элементов – сталь марки 15ХСНД-3 по ГОСТ 6713-91 [11].

Главные балки разбиты по длине на монтажные блоки полной заводской готовности длиной $42/4=10,5$ м и объединены между собой болто-сварным

стыком (верхний пояс на сварке, стенка и нижний пояс на высокопрочных болтах); для сварки использована проволока стальная сварочная св-10НМА по ГОСТ 2246-70 [10]. Пролетное строение имеет систему поперечных связей в местах устройства соединений монтажных блоков и систему нижних продольных связей с длиной панели $10,5/2=5,25$ м из элементов уголкового профиля сечением 100x10 мм по ГОСТ 8509-93 [12]; прикрепление элементов связей выполнено с помощью фасонных листов и высокопрочных болтов. Верхних продольных связей пролетное строение не имеет, их роль в эксплуатационных условиях выполняет ортотропная плита проезжей части. Покрытие проезжей части запроектировано из слоя гидроизоляции толщиной 1 см и двух слоев асфальтобетона, уложенного непосредственно на гидроизоляцию, толщиной 11 см.

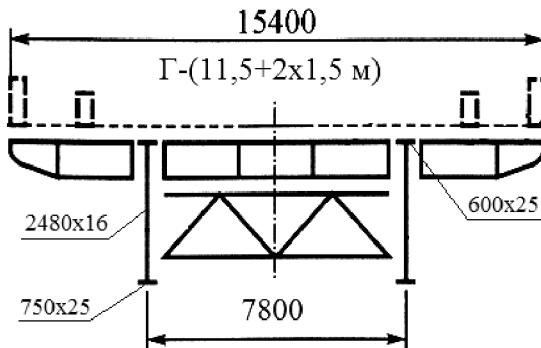


Рис. 1. Схема поперечного сечения пролетного строения моста

2. КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ

Качество – это иерархическая совокупность свойств. Свойства могут быть простыми, аналогично типовому элементу замены – когда дальнейшее рассмотрение на принятом уровне не производится (например: превышение допускаемого отклонения, выход из строя элемента), и сложными (например, надежность, которая определяется безотказностью, восстанавливаемостью, сохраняемостью и долговечностью).

Качественные показатели надежности – это такие показатели, которые не могут быть выражены в виде числа и не содержат информации, позволяющей обосновать предпочтение одного из нескольких конкурирующих вариантов системы при их сравнении. Качественные показатели надежности указывают на то, что рассматриваемая система обладает каким-либо свойством, имеет то или иное устройство, способное выполнить поставленные задачи. Однако качественные показатели дают возможность отличать системы друг от друга, но не позволяют сравнивать их по степени выполнения поставленной задачи, т.е. по надежности.

В рамках курсовой работы для проведения процедуры оценки качественных требований надежности и работоспособности системы, а также характеристик и особенностей системы, режимов её эксплуатации, условий окружающей среды и требований обслуживания предлагается использовать метод качественного анализа, состоящий в анализе функциональной структуры системы [3].

Состав показателей, использованных для выполнения работ должен быть достаточным для возможности оценки (выбора) варианта системы, предложенного в индивидуальном задании. Предполагается в качестве индивидуального задания использовать фрагменты типовых проектных решений автодорожных и пешеходных мостов.

На основании выбранных критериев составляется дерево свойств (пример фрагмента показан в таблице 1), которое представляет собой графическое изображение разветвляющейся структуры, состоящей из сложных свойств и связанных с ними групп свойств.

Таблица 1

Фрагмент дерева свойств

Ярусы дерева свойств			
0	1	2	3
Свойство C1 (п. 5.1 СП.35.13339. 2011)	<p>17. Обеспечение надежности, долговечности и бесперебойности эксплуатации сооружения, а также безопасности и плавности движения транспортных средств, безопасности для пешеходов и охране труда в процессе строительства и эксплуатации</p>	<p>1. Обеспечение безотказности 2. Обеспечение долговечности 3. Обеспечение бесперебойности 4. Обеспечение плавности движения</p> <p>15. Обеспечение безопасности движения</p> <p>16. Обеспечение соблюдения требований охраны труда в процессе строительства</p>	<p>5. Обеспечение безопасности транспортных средств 6. Обеспечение безопасности пешеходов</p> <p>7. Обеспечение соблюдения требований охраны труда в процессе строительства 8. Обеспечение соблюдения требований охраны труда в процессе эксплуатации</p>
	<p>18. Возможность попадания мало-мобильных групп населения на тротуары и пешеходные мосты</p>	<p>9. Наличие пандуса</p>	<p>10. Наличие лифта</p>
	<p>19. Возможность безопасного пропуска паводков и ледохода, выполнение требований судоходства и лесосплава</p>	<p>11. Пропуск паводков на водотоках</p>	<p>12. Пропуск ледохода на водотоках</p>
		<p>13. Выполнение требований судоходства</p>	
		<p>14. Выполнение требований лесосплава</p>	
и т.д.			

По примеру фрагмента дерева свойств, показанного выше, студентам следует в полной мере обобщить и проанализировать все пункты раздела «Общие указания» Свода правил СП.35.13339.2011 «Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84*» и другие разделы СП.35.13339.2011 [1], имеющие прямое отношение к рассматриваемой системе.

В последующем студенты объединяются в группы (5...7 чел.) для оценки своих проектов экспертным методом. Суть этого метода заключается в том, что группа экспертов (её роль выполняют студенты в группе) в количественной форме оценивает объект по критериям, учтенных при составлении дерева свойств.

Рассмотрим один из подходов, базируясь на принципах квалиметрии в архитектурно-строительном проектировании, изложенных в работе [5]:

Шаг 1. Задача первой процедуры состоит в вычислении коэффициентов весомости каждого значимого/рассматриваемого свойства .

До начала опроса (экспертной оценки) подготавливаются бланки для определения значений групповых ненормированных коэффициентов весомости (табл. 2), а затем составляется сводная анкета для определения значений групповых ненормированных коэффициентов весомости. Количество баллов, присуждаемое тому или иному показателю на самом низком иерархическом уровне, может варьироваться в зависимости от желания экспертов (например, от 0 до 100%).

Ведущий эксперт анализирует числа (экспертные оценки), записанные каждым экспертом с точки зрения максимального расхождения между отдельными назначенными экспертными оценками (здесь под оценкой понимается то выраженное числом суждение, которое эксперт высказывает, отвечая на поставленный ему ведущим вопрос по поводу коэффициента весомости или значений каких-то других величин).

Если крайние значения таких оценок отличаются не очень значительно, в пределах 25%, то опрос экспертов по поводу значений групповых ненормированных коэффициентов весомости, входящих в данную группу, ограничивается одним туром. Таким образом, для свойств данной группы процедура экспертного опроса на этом заканчивается.

Если расхождение между крайними экспертными оценками достаточно велико, больше 25% [например, для приведенных выше чисел, относящихся к свойству №11: $(77-55)/77 = 28,6\%$], то ведущий устраивает краткое обсуждение. Для этого он предлагает экспертам, назначившим наиболее отличающиеся от общей массы значения групповых ненормированных коэффициентов весомости (в приведенном выше примере это эксперты №4 и 5, которые дали оценку 55% свойству №11), очень кратко изложить обоснование вынесенного им суждения. Если другие эксперты также самостоятельно пожелаю выразить свою точку зрения, ведущий дает им возможность сделать это (тоже в очень краткой форме). Цель подобного суждения – дать экспертам дополнительную краткую информацию, которая у некоторых из них до выступления других экспертов, возможно, отсутствовала.

Затем, ведущий прекращает обсуждение и назначает повторный, второй тур экспертного опроса, проводимый в ином, по сравнению с первым туром, порядке. Экспертный опрос в целом заканчивается, когда для всех свойств будут определены значения групповых ненормированных коэффициентов весомости.

Таблица 2

Фрагмент сводной анкеты для определения значений групповых ненормированных коэффициентов весомости

№ св-ва по дереву	Значения групповых ненормированных коэффициентов весомости % у экспертов G_i , номера которых i равны:							Вычисление значений групповых коэффициентов весомости			
	1	2	3	4	5	6	7	Средние арифмети- ческие (по всем экспертам), $\bar{G} = \sum G_i / 7$	Сумма всех средних значений групповых ненормированных коэффициентов весомости (с учетом всех свойств в группе), A	\bar{G}/A	Про- верка
1	75	82	88	77	69	66	65	74,5	74,5	1,00	-
2	66	60	50	62	69	72	51	61,4	61,4	1,00	-
3	57	50	66	67	65	62	64	61,6	61,6	1,00	-
4	25	30	28	32	37	44	45	34,4	34,4	1,00	-
5	62	63	65	77	74	75	42	65,4	148,4	0,44	0,44+
6	84	85	88	85	87	77	75	83,0		0,56	+0,56=1
7	50	55	57	54	65	45	44	52,9	101,5	0,52	0,52+
8	51	56	58	53	44	40	45	48,6		0,48	+0,48=1
9	90	89	100	87	85	95	95	91,6	94,6	0,97	0,97+
10	5	4	2	0	0	0	10	3,0		0,03	+0,03=1
11	65	66	59	55	55	69	77	63,7	205,4	0,31	0,31+
12	60	70	71	58	58	55	65	62,4		0,30	+0,30+
13	22	27	38	32	30	35	40	32,0		0,16	+0,16+
14	41	42	55	58	40	45	50	47,3		0,23	+0,23=1
15 (5, 6)	-	-	-	-	-	-	-	74,2	148,4	0,50	-
16 (7, 8)	-	-	-	-	-	-	-	50,8	101,5	0,50	-
17 (1...4, 15, 16)	-	-	-	-	-	-	-	59,4	356,9	0,17	-
18 (9, 10)	-	-	-	-	-	-	-	47,3	94,6	0,50	-

19 (11...14)	-	-	-	-	-	-	-	51,4	205,4	0,25	-
...

Следует отметить, что конечной целью является не групповые коэффициенты весомости применительно к отдельным группам, а коэффициенты весомости, применительно к каждому ярусу дерева.

По полученным выше групповым коэффициентам весомости \bar{G}/A вычисляются коэффициенты весомости каждого свойства по правилу: коэффициент весомости свойства, находящегося на k -м уровне дерева свойств (G_k) равен групповому коэффициенту весомости того же свойства (\hat{G}_k), умноженному на коэффициент весомости соответствующего эквисатисного (эквивалентного по своему влиянию) свойства, находящегося на предыдущем ($k-1$)-м ярусе G_{k-1} .

Для рассматриваемого фрагмента получены следующие коэффициенты весомости G_k : $G_1 = G_2 = G_3 = G_4 = 0,17 \cdot 1,00 = 0,1700$; $G_5 = 0,17 \cdot 0,50 \cdot 0,44 = 0,0374$; $G_6 = 0,17 \cdot 0,50 \cdot 0,56 = 0,0476$; $G_7 = 0,17 \cdot 0,50 \cdot 0,52 = 0,0442$; $G_8 = 0,17 \cdot 0,50 \cdot 0,48 = 0,0408$; $G_9 = 0,50 \cdot 0,93 = 0,4650$; $G_{10} = 0,50 \cdot 0,07 = 0,0350$; $G_{11} = 0,25 \cdot 0,31 = 0,0775$; $G_{12} = 0,25 \cdot 0,30 = 0,0750$; $G_{13} = 0,25 \cdot 0,16 = 0,0400$; $G_{14} = 0,25 \cdot 0,23 = 0,0575$. Для наглядности, результаты оценки коэффициентов весомости свойств 1...14 (номер по дереву свойств, см. табл. 1) представлены схемой ярусов дерева свойств на рис. 2.

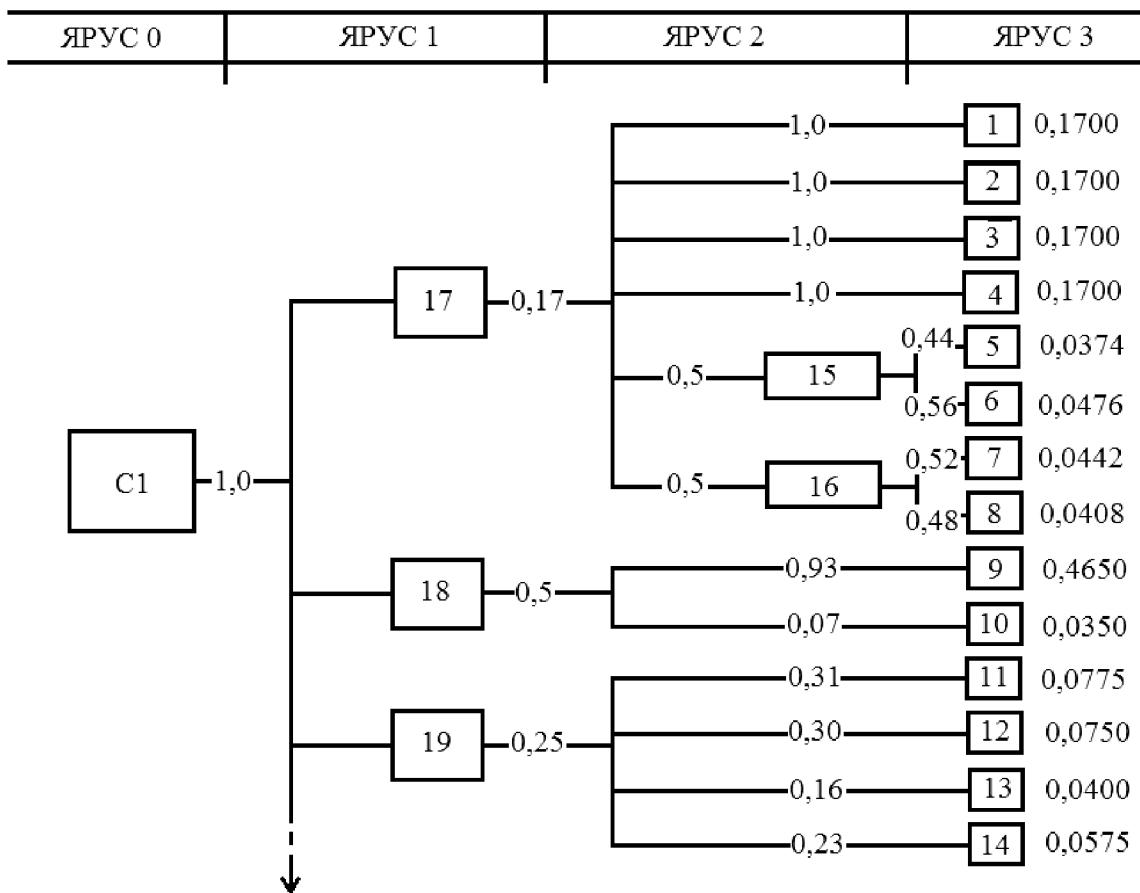


Рис. 2. Пример отображения схемы ярусов дерева свойств

Шаг 2. Задача второй процедуры состоит в получении комплексного показателя качества системы и его последующей классификации по шкале предпочтений, в которой используется принцип попарного сопоставления.

Данная процедура предполагает использование лингвистических переменных (табл. 3) и функции Харрингтона (рис. 3) для лингвистической шкалы [6]. Лингвистическая переменная отличается от числовой переменной тем, что ее значениями являются не числа, а слова или предложения в естественном или формальном языке.

Таблица 3

Значения лингвистических переменных

Балльная оценка	Значение лингвистической переменной
- 6	очень высокая уверенность в отсутствии признака
- 5	почти очень высокая уверенность в отсутствии признака
- 4	полное отсутствие признака
- 3	почти полное отсутствие признака
- 2	отсутствие признака
- 1	почти отсутствие признака
0	среднее проявление (нет информации)
+ 1	чуть больше, чем среднее проявление признака
+ 2	проявление признака
+ 3	почти очень сильное проявление признака
+ 4	очень сильное проявление признака
+ 5	почти предельный уровень проявления признака
+ 6	предельный уровень проявления признака

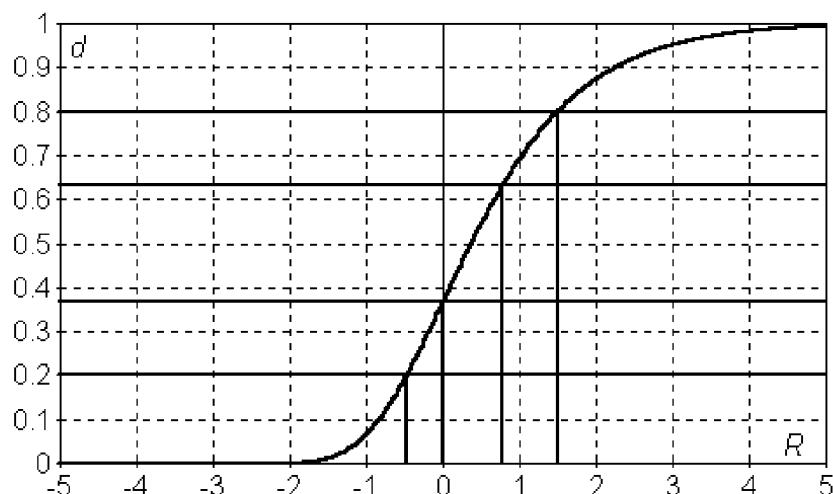


Рис. 3. Функция Харрингтона для лингвистической шкалы $L = [-5; +5]$

Вначале составляется таблица опроса (экспертной оценки), включающая перечень свойств системы на самом низком иерархическом уровне (в нашем случае – это ярус 3), сведения о полученных ранее коэффициентах весомости этих свойств и графу, в которой эксперт, участвующий в опросе, может проставить свою оценку. Далее сведения всех экспертов обобщаются (удобно это выполнить в табличной форме, см. табл. 4).

Таблица 4

Сводная анкета выполнения бальной оценки свойств системы

№ св-ва по дереву	Значения лингвистических переменных у экспертов Q_i , номера которых i равны:							$\bar{Q} = \sum Q_i / 7$	G_k	$\bar{Q} \cdot G_k$
	1	2	3	4	5	6	7			
1	+4	+3	+5	+1	0	-1	+2	+2,00	0,1700	+0,340
2	+3	+5	+1	-1	-1	-1	0	+0,86	0,1700	+0,146
3	-1	-4	-1	-2	-5	0	+1	-1,71	0,1700	-0,291
4	0	0	+4	+4	+2	+2	+1	+1,86	0,1700	+0,316
5	+1	+4	+2	+5	+3	+1	0	+2,29	0,0374	+0,086
6	-1	-4	-1	-6	-7	-3	-3	-3,43	0,0476	-0,163
7	+2	+2	+1	0	0	-3	-5	-0,43	0,0442	-0,019
8	+5	+5	+4	+6	+6	+7	+7	+5,71	0,0408	+0,233
9	+1	+2	+3	+4	+1	+7	+7	+3,57	0,4650	+1,660
10	0	0	+5	+5	+5	+3	+4	+3,14	0,0350	+0,110
11	+2	+3	+3	+7	+7	0	-1	+3,00	0,0775	+0,225
12	+1	+4	+6	+2	+2	+2	0	+2,43	0,0750	+0,182
13	+4	+4	+3	+1	+5	0	+4	+3,00	0,0400	+0,120
14	+6	+5	+5	+5	+7	+7	+2	+5,29	0,0575	+0,304
...
n										

Далее выполняется комплексная оценка качественных свойств системы. В рамках курсовой работы в качестве комплексного показателя предполагается использование соотношения среднего арифметического значения суммы весовых показателей значимых/рассматриваемых свойств системы. Для рассмотренного фрагмента комплексных показатель имеет значение:

$$Q = [\sum(\bar{Q} \cdot G_k)] / n = 3,579 / 14 = 0,256.$$

Таблица 5

Эмпирические и числовые соответствия шкалы предпочтений

Эмпирическая система (лингвистические значения)	Числовая система, d
Очень хорошо	0,80...1,00
Хорошо	0,64...0,80
Удовлетворительно	0,37...0,64
Плохо	0,20...0,37
Очень плохо	0,00...0,20

Значение полученного комплексного показателя Q теперь следует классифицировать. Для классификации полученной оценки комплексного показателя качества, будем использовать функцию принадлежности Харрингтона [6] (рис. 3), которую записывают в виде:

$$d = e^{-e^{-R}}, \quad (1)$$

где: d – значения шкалы предпочтений (табл. 5); R – значения лингвистической шкалы (табл. 3).

Для рассмотренного примера, на основании сопоставления полученного значения комплексного показателя качества Q со значением d по шкале предпочтений (табл. 5): ($Q = 0,256$) $\in [0,20 \dots 0,37]$, классифицируем качество фрагмента проектного решения, в рамках выполненной оценки свойств системы, по лингвистической шкале – с оценкой «плохо».

Вывод: на основании проведенного качественного анализа фрагмента рассмотренного проектного решения по значению комплексного показателя качества оценка свойств системы по лингвистической шкале, проект классифицируется лингвистическим значением «плохо», что показывает необходимость корректировки качественных показателей свойств системы по удовлетворению требований раздела «Общие указания» Свода правил СП.35.13339.2011 [1].

3. КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ

Уровень надежности конструктивной системы выбирается, как правило, на стадии концепции и формирования требований к продукции. Необходимость количественной оценки показателей надежности конструктивной системы возникает как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации. В первом случае, решение задачи сводится к определению проектного ресурса; во втором – к оценке остаточного ресурса.

Любой анализ надежности должен основываться на строго определенных понятиях и определениях. Основным понятием в теории надежности является понятие системы. Понятие «система» является в определенной степени условным. Под системой понимают совокупность взаимосвязанных подсистем (элементов), объединенных функционально или конструктивно в соответствии с определенным алгоритмом взаимодействия при выполнении определенной задачи в процессе применения по назначению. Событие, заключающееся в нарушении работоспособности системы, т.е. в переходе её из работоспособного состояния в неработоспособное состояние, называется отказом.

Количественные показатели надежности – это такие показатели, которые содержат информацию, обеспечивающую оценку степени предпочтения одного варианта системы по отношению к другому при применении по назначению. Количественные показатели выражают надежность в виде числа; при помощи количественных показателей надежность измеряется или оценивается в принятой шкале оценок в абсолютных или относительных единицах.

Рассмотрим некоторые процедуры оценки количественных показателей надежности, базируясь на выбранном примере (рис. 1).

Шаг 1. Задача первой процедуры состоит в определение конфигурации системы, для чего производится идентификация системы с целью определения взаимосвязей между элементами внутри системы исходя из функционального назначения элементов (рис. 4). Для реализации задач этой процедуры используются структурные методы [7].

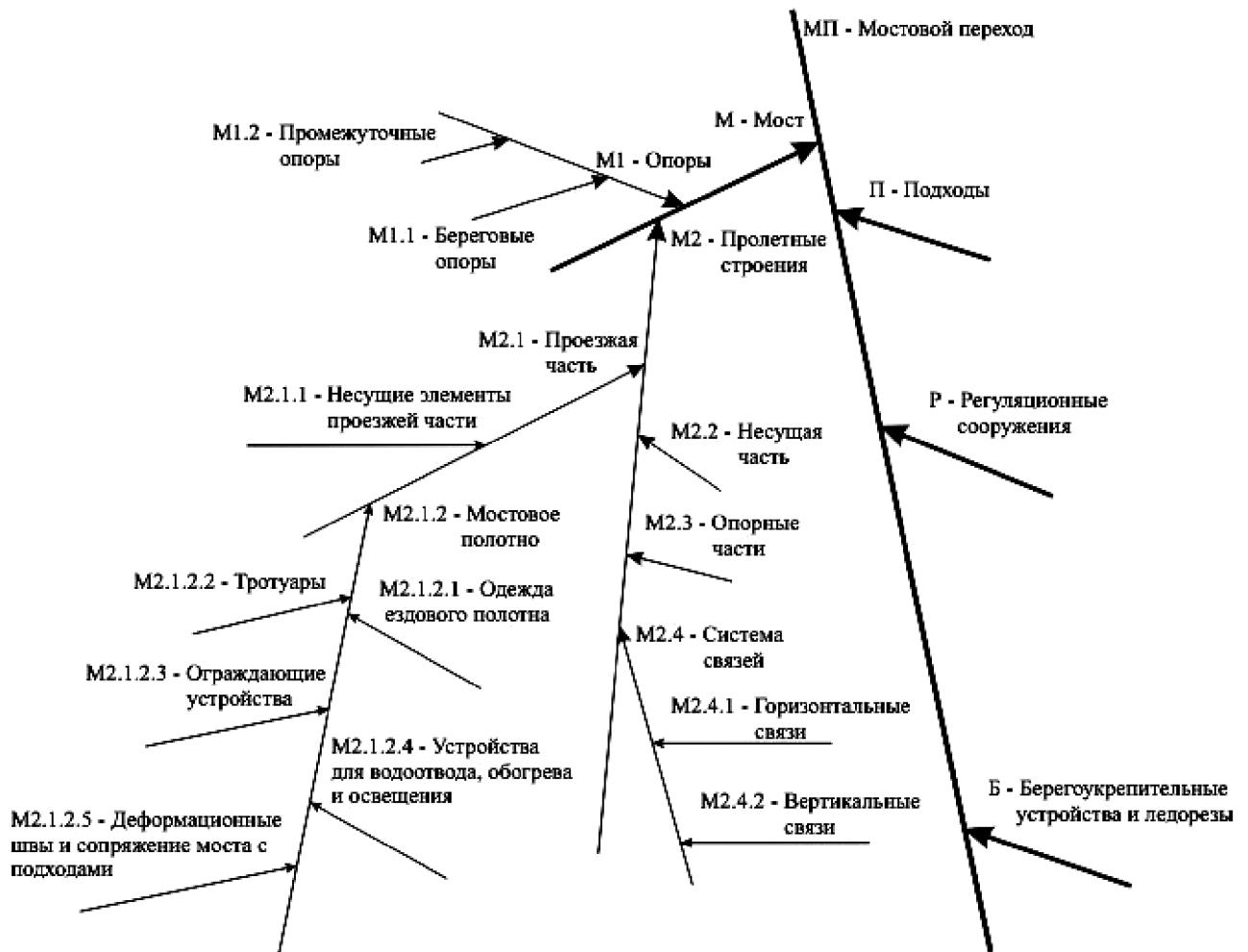


Рис. 4. Типовая структурная схема мостового перехода

Шаг 2. Задача второй процедуры состоит в вычислении вероятности отказов отдельных элементов на основе формул простых моделей структурной схемы надежности (*RBD – Reliability Block Diagram methods*) [7]. Формулы для расчета вероятности безотказной работы системы на основании структурной схемы надежности даны в таблице 6.

В дальнейшем, на основании предварительного анализа, отдельные элементы группируются в статистически независимые блоки для редукции, что способствует упрощению структурной схемы *RBD*. Редуцированные конфигурации отдельных подсистем стальных пролетных строений и функции взаимодействия между расчетными параметрами приведены в таблице 7.

Для оценки ожидаемой вероятности отказов индивидуальных изделий (деталей, узлов, элементов, подсистем и т.п.), а также системы в целом обычно используется статистическая информация, характеризующая показатели надежности аналогичных технических систем (индивидуальных изделий).

В рамках курсовой работы допускается проводить качественное описание частоты возможных отказов для индивидуальных изделий на основе положений ГОСТ 27.310-95 [8], по рабочей шкале оценки ожидаемой вероятности отказов F_i в виде диапазона, с границами $F_{i,\inf}$ и $F_{i,\sup}$ (пример составления такой шкалы приведен в таблице 8).

Таблица 6

Формулы простых моделей структурной схемы надежности

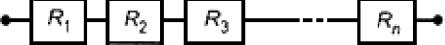
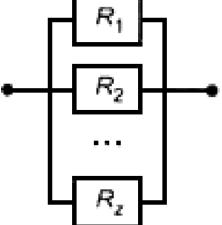
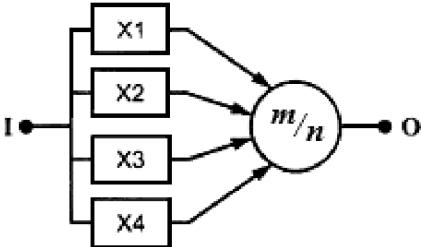
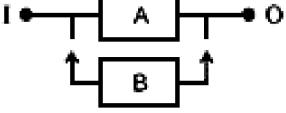
Конфигурации RBD	Формулы расчета вероятности безотказной работы системы R_S
1. Последовательное соединение блоков	
	$R_S = \prod_{i=1}^n R_{Ri},$ <p>где: R_{Ri} – вероятности безотказной работы элементов R_i; n – число последовательно соединенных элементов в системе</p>
2. Параллельное соединение блоков (с нагруженным резервом)	
	$R_S = 1 - \prod_{i=1}^z (1 - R_{Ri}),$ <p>где: z – число параллельно соединенных элементов в системе</p>
3. Система с параллельным соединением n идентичных элементов, для функционирования которой необходима работоспособность не менее m элементов из n	
	$R_S = \sum_{r=0}^{n-m} \binom{n}{r} \cdot R_{xi}^{n-r} \cdot (1 - R_{xi})^r,$ <p>где: R_{xi} – вероятности безотказной работы идентичных элементов x_i; $\binom{n}{r}$ – количество способов выбора r объектов из n</p>
4. Модели с ненагруженным резервом (резервирование замещением)	
	$R_S(t) = R_A(t) + \int_0^t f_A(\tau) \cdot R_{Bd}(\tau) \cdot R_{SW}(\tau) \cdot R_B(t-\tau) d\tau,$ <p>где: $R_A(t)$ – вероятность безотказной работы активного элемента А в течение времени t; $f_A(\tau)$ – функция плотности распределения элемента А, который в начальный момент времени работоспособен и отказывает в момент времени τ; $R_{Bd}(\tau)$ – вероятность безотказной работы элемента В в начальный момент времени, находящегося в ненагруженном резерве; $R_{SW}(\tau)$ – вероятность безотказной работы элемента В в момент перехода в активное состояние при отказе элемента А; $R_B(t-\tau)$ – вероятность безотказной работы элемента В в течение оставшегося времени $(t-\tau)$</p>
Примечание: - блок А является активным элементом; - блок В находится в ожидании (бездействует либо без нагрузки, либо со слабой нагрузкой)	

Таблица 7

Конфигурации и функции взаимодействия в отдельных подсистемах

Код	Подсистема	Конфигурация и функция взаимодействия
1	2	3
A	Болтовое соединение	$F_A = 1 - \sum_{r=0}^{s-z_A} \binom{s}{r} \cdot (1 - F_{1A})^{s-r} \cdot (F_{1A})^r,$ <p>где: F_{1A} – ожидаемая вероятность отказа отдельного болтового соединения; s – общее число болтов в соединении; $r = 0, 1, \dots, (s - z_A)$ – число сочетаний из s по z_A; z_A – компенсирующая составляющая случайных факторов, заложенная в расчете соединения</p>
B	Сварное соединение	$F_B = 1 - \prod_{i=1}^u (1 - F_{B,i}), \quad F_{B,i} = \prod_{i=1}^k \left(1 - \prod_{i=1}^v (1 - F_{1B})\right),$ <p>где: F_{1B} – ожидаемая вероятность отказа отдельного сварного шва; $F_{B,i}$ – ожидаемая вероятность отказа стыка i-го соединения; k – число сварных швов в одном соединении ($k=1$ при односторонних швах, $k=2$ – при двухсторонних); v – число проходов, необходимых для наплавки расчетного катета шва; u – общее число стыкуемых элементов</p>
G	Балка постоянного сечения по длине пролета	$F_G = \left(1 - \prod_{k=1}^n (1 - F_{G,k})\right) - \int_0^t \rho(\tau) \cdot \prod_{i=1}^3 (1 - F_{G,i}) d\tau$ $F_{G,1} \sim F_{G,0 \min}, \quad F_{G,2} = F_{G,1} \cdot \tau \cdot t^{-1},$ $F_{G,3} = F_{G,1} \cdot (1 - \tau \cdot t^{-1}),$ <p>где: $F_{G,k}$ – ожидаемая вероятность отказа k-го блока повышенной заводской готовности в начальный момент времени; n – число блоков повышенной заводской готовности, приходящихся на одну балку; $\rho(\tau)$ – функция плотности распределения внутренних усилий, характеризующая процесс резервирования слабонагруженных частей сечения; $F_{G,i}$ – ожидаемая вероятность отказа слабонагруженных частей сечения: в начальный момент времени, в момент включения в работу в случайный момент времени $\tau \in [0; t]$ и в течение оставшегося времени $(t - \tau)$; t – расчетное (ожидаемое) время эксплуатации балки</p>

1	2	3
C	Комбинированное соединение	$F_C = 1 - (1 - F_A) \cdot (1 - F_B)$, где: F_A и F_B – ожидаемая вероятность отказа болтовой и сварной части соединения
D	Ортотропная плита проезжей части	$F_D = 1 - (1 - F_{pl}) \cdot (1 - F_x \cdot F_y)$, где: F_{pl} , F_x и F_y – ожидаемая вероятность отказа листа настила, с учетом прикреплений элементов, продольных и поперечных ребер соответственно
E	Сварная балка с изменением сечения по длине	$F_E = 1 - (1 - F_D) \cdot (1 - F_B)$ где: F_D – ожидаемая вероятность отказа балки по основному металлу; F_B – ожидаемая вероятность отказа балки по сварным стыкам элементов в зонах изменения сечений

Таблица 8

Пример составления шкалы оценки ожидаемой вероятности отказов

Ожидаемая частота возникновения	Качественное описание частоты для индивидуального изделия	Ожидаемая вероятность отказов, F_i		Область применения (подсистема, элемент)
		$F_{i,inf}$	$F_{i,sup}$	
1	2	3	4	5
Частый отказ	Вероятно частое возникновение	0,01	0,1	✓ ограждающие устройства проезжей части
Вероятный отказ	Будет наблюдаться несколько раз за срок службы изделия	0,005	0,01	✓ деревянный настил проезжей части; ✓ одежда ездового полотна; ✓ тротуары; ✓ устройства для водоотвода; ✓ деформационные швы; ✓ сопряжение моста с подходами; ✓ узлы объединения сталежелезобетонных балок; ✓ отдельные соединения на обычных болтах

1	2	3	4	5
Возможный отказ	Возможно одно наблюдение данного отказа за срок службы	0,001	0,005	<ul style="list-style-type: none"> ✓ продольные и поперечные балки балочной клетки; ✓ элементы ортотропной металлической плиты; ✓ плоская или ребристая железобетонная плита проезжей части; ✓ деревянные прогоны; ✓ элементы решетки горизонтальных и вертикальных связей; ✓ отдельные соединения на высокопрочных болтах
Редкий отказ	Отказ маловероятен, но возможен хотя бы раз за срок службы	0,00005	0,001	<ul style="list-style-type: none"> ✓ металлические прогоны; ✓ опорные части; ✓ отдельные сварные соединения
Практически невероятный отказ	Отказ настолько маловероятен, что вряд ли будет наблюдаться даже один раз за срок службы	0	0,00005	<ul style="list-style-type: none"> ✓ береговые и промежуточные опоры; ✓ главные балки (фермы, арки, рамы)

В рамках курсовой работы допускается использование альтернативной статистической информации, отличной от той, что приводится в таблице 8, так, например, в работе [9] детально освещен опыт Великобритании по созданию новой редакции норм проектирования мостов и приведен диапазон изменения расчетной вероятности отказа по различным элементам сооружения, который колеблется в следующих пределах:

- ✓ стойки – от $3,16 \cdot 10^{-10}$ до $2,51 \cdot 10^{-17}$;
- ✓ растянутые пояса главных балок – от $1,25 \cdot 10^{-15}$ до $7,94 \cdot 10^{-28}$;
- ✓ сжатые пояса главных балок – от $1,58 \cdot 10^{-12}$ до $7,92 \cdot 10^{-20}$;
- ✓ стенки балок – от $5,01 \cdot 10^{-5}$ до $3,16 \cdot 10^{-9}$;
- ✓ настил – от $1,99 \cdot 10^{-3}$ до $2,51 \cdot 10^{-10}$.

Покажем на примерах порядок использования редуцированных конфигураций отдельных подсистем стальных пролетных строений, приведенных в таблице 7.

Пример 1. Требуется оценить вероятность отказа болтового соединения в составе узла прикрепления раскоса продольных связей пролетного строения, выполненного из одиночного равнополочного уголка с помощью обычных болтов, число которых (по расчету методом предельных состояний) установлено равным трём, при известной (заданной расчетом) вероятности отказа каждого из элементов (болтов) $F_{1A} = 0,005 \dots 0,01$, исполнение конструкции – северное «Б».

Решение:

В рассматриваемом случае при расчете болтового соединения автодорожного моста были заложены коэффициенты по позициям 3, 6, 7 табл. 8.15 СП.35.13339.2011 [1]:

- табл. 8.15 [1], позиция 3 – коэффициент условия работы элементов и их соединения в пролетных строениях и опорах автодорожных и городских мостов при расчете на эксплуатационные нагрузки, а также на нагрузки, возникающие при изготовлении, транспортировке и монтаже, равный 1,0;
- табл. 8.15 [1], позиция 6 – коэффициент условия работы растянутого и сжатого элемента из одиночных профилей, прикрепленных одной полкой (или стенкой), равный 0,75 для равнополочного уголка;
- табл. 8.15 [1], позиция 7 – коэффициент условия работы элементов и их сварных соединений в пролетных строениях и опорах северного «Б» исполнения, равный 0,85.

Оценим компенсирующую составляющую, заложенную в расчете соединения, которую представим как произведение использованных коэффициентов условия работы: $\prod_i m_i = 1,0 \cdot 0,75 \cdot 0,85 = 0,6375$.

Тогда минимально необходимое число болтов, то есть число болтов, которое условно могло быть получено, если бы не учитывалось влияние факторов, учтенных коэффициентами условий работы (с округлением до большего целого числа), составит: $z = n \cdot \prod_i m_i = 3 \cdot 0,6375 = 1,9125 \rightarrow 2$.

Вероятность отказа системы для конфигурации А по таблице 7:

$$F_A = 1 - \sum_{r=0}^{s-z} \binom{s}{r} \cdot (1 - F_{1A})^{s-r} \cdot (F_{1A})^r = 1 - \sum_r \left(\frac{s!}{r!(s-r)!} \right) \cdot (1 - F_{1A})^{s-r} \cdot (F_{1A})^r = \\ = 1 - \sum_r \left(\frac{3!}{r!(3-r)!} \right) \cdot (1 - 0,005 \dots 0,01)^{3-r} \cdot (0,005 \dots 0,01)^r = 7,475 \cdot 10^{-5} \dots 2,980 \cdot 10^{-4}, \\ r = 0,1,\dots,(3-z).$$

Вывод: согласно классификации ГОСТ 27.310-95 [8], отказ рассмотренного узла маловероятен и по ожидаемой частоте возникновения оценивается как «редкий отказ» в пределах от $7,475 \cdot 10^{-5}$ до $2,980 \cdot 10^{-4}$.

Пример 2. Требуется оценить вероятность отказа сварных соединений прикрепления горизонтальных поясов и вертикальной стенки стальной главной балки пролетного строения, при известной (заданной расчетом) вероятности отказа отдельного сварного шва $F_{1B} = 0,00005 \dots 0,0001$.

Решение:

По схеме на рис. 1, известны толщины стыкуемых элементов (сварной главной балки двутаврового сечения): верхний и нижний горизонтальные пояса по 25 мм, вертикальная стенка – 16 мм. Исходя из условия равнопрочности сварного соединения с основным металлом элемента конструкции, ориентировочный размер катета сварного шва составит 16 мм (по значению наименьшей из толщин стыкуемых элементов).

Учитывая, что для прикрепления элементов использована автоматическая сварка под флюсом, диаметр сварочной проволоки может составлять 2...5 мм (табл. 8.35 СП.35.13339.2011 [1]), следовательно, для наплавки расчетного катета шва, равного 16 мм, число проходов может составить 16/5...16/2 шт., т.е. $v = 4 \dots 8$ шт.

Ожидаемая вероятность отказа i -го стыка для конфигурации В по таблице 7 при устройстве двухсторонних швов ($k = 2$), составит:

$$F_{B,i,\text{inf}} = \prod_{i=1}^k \left(1 - \prod_{i=1}^v (1 - F_{1B,\text{inf}}) \right) = \prod_{i=1}^2 \left(1 - \prod_{i=1}^{2\dots4} (1 - 5 \cdot 10^{-5}) \right) = 3,999 \cdot 10^{-8} \dots 1,599 \cdot 10^{-7},$$

$$F_{B,i,\text{sup}} = \prod_{i=1}^k \left(1 - \prod_{i=1}^v (1 - F_{1B,\text{sup}}) \right) = \prod_{i=1}^2 \left(1 - \prod_{i=1}^{2\dots4} (1 - 10^{-4}) \right) = 1,600 \cdot 10^{-7} \dots 6,396 \cdot 10^{-7}.$$

Согласно полученным выше данным, диапазон ожидаемой вероятности отказа i -го стыка $F_{B,i}$ составит $3,999 \cdot 10^{-8} \dots 1,599 \cdot 10^{-7}$.

Ожидаемая вероятность отказа сварных соединений прикрепления основных элементов одной главной балки ($u = 2$), оценивается выражениями:

$$F_{B,\text{inf}} = 1 - \prod_{i=1}^u (1 - F_{B,i,\text{inf}}) = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - 3,999 \cdot 10^{-8}) = 7,999 \cdot 10^{-8},$$

$$F_{B,\text{sup}} = 1 - \prod_{i=1}^u (1 - F_{B,i,\text{sup}}) = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - 1,599 \cdot 10^{-7}) = 3,199 \cdot 10^{-7}.$$

Вывод: согласно классификации ГОСТ 27.310-95 [8], отказ рассмотренного узла настолько маловероятен, что вряд ли будет наблюдаться даже один раз за срок службы, и по ожидаемой частоте возникновения оценивается как «практически невероятный отказ» в пределах от $7,999 \cdot 10^{-8}$ до $3,199 \cdot 10^{-7}$.

Пример 3. Требуется оценить вероятность отказа болто-сварного стыка (верхний пояс на сварке, стенка и нижний пояс на высокопрочных болтах) монтажных блоков главной балки пролетного строения. Согласно проектному решению, число высокопрочных болтов для прикрепления нижнего пояса – 12 шт., для прикрепления стенки – 38 шт.

Решение:

Диапазон ожидаемой вероятности отказа сварной части соединения принимаем из примера 2, т.е. $F_B = F_{B,i} = 3,999 \cdot 10^{-8} \dots 1,599 \cdot 10^{-7}$.

Последовательность выполнения оценки соединений на высокопрочных болтах аналогична предпосылкам, принятым в примере 1, с той разницей, что

принимается свои значения диапазона вероятности отказа высокопрочных болтов F_{1A} , которые по данным таблицы 8, составляют 0,001...0,005.

В рассматриваемом случае при расчете болтового соединения автодорожного моста были заложены коэффициенты по позициям 3 и 7 табл. 8.15 СП.35.13339.2011 [1]:

- табл. 8.15 [1], позиция 3 – коэффициент условия работы элементов и их соединения в пролетных строениях и опорах автодорожных и городских мостов при расчете на эксплуатационные нагрузки, а также на нагрузки, возникающие при изготовлении, транспортировке и монтаже, равный 1,0;
- табл. 8.15 [1], позиция 7 – коэффициент условия работы элементов и их сварных соединений в пролетных строениях и опорах северного «Б» исполнения, равный 0,85.

Оценим компенсирующую составляющую, заложенную в расчете соединения, которую представим как произведение использованных коэффициентов условия работы: $\prod_i m_i = 1,0 \cdot 0,85 = 0,85$.

Тогда минимально необходимое число болтов, то есть число болтов, которое условно могло быть получено, если бы не учитывалось влияние факторов, учтенных коэффициентами условий работы (с округлением до большего целого числа), составит:

$$\text{для нижнего пояса } z_1 = n_1 \cdot \prod_i m_i = 12 \cdot 0,85 = 10,2 \rightarrow 11,$$

$$\text{для стенки балки } z_2 = n_2 \cdot \prod_i m_i = 38 \cdot 0,85 = 32,3 \rightarrow 33.$$

Вероятность отказа соединения нижнего пояса (см. конфигурацию А по таблице 7):

$$\begin{aligned} F_{A,z1} &= 1 - \sum_{r_1=0}^{s_1-z_1} \binom{s_1}{r_1} \cdot (1-F_{1A})^{s_1-r_1} \cdot (F_{1A})^{r_1} = \\ &= 1 - \sum_{r_1} \left(\frac{s_1!}{r_1!(s_1-r_1)!} \right) \cdot (1-F_{1A})^{s_1-r_1} \cdot (F_{1A})^{r_1} = \\ &= 1 - \sum_{r_1} \left(\frac{12!}{r_1!(12-r_1)!} \right) \cdot (1-0,001...0,005)^{12-r_1} \cdot (0,001...0,005)^{r_1} = \\ &= 6,556 \cdot 10^{-5} ... 1,596 \cdot 10^{-3}, \text{ при } r_1 = 0,1,...,(12-z_1). \end{aligned}$$

Вероятность отказа соединения стенки:

$$\begin{aligned} F_{A,z2} &= 1 - \sum_{r_2=0}^{s_2-z_2} \binom{s_2}{r_2} \cdot (1-F_{1A})^{s_2-r_2} \cdot (F_{1A})^{r_2} = \\ &= 1 - \sum_{r_2} \left(\frac{s_2!}{r_2!(s_2-r_2)!} \right) \cdot (1-F_{1A})^{s_2-r_2} \cdot (F_{1A})^{r_2} = \\ &= 1 - \sum_{r_2} \left(\frac{38!}{r_2!(38-r_2)!} \right) \cdot (1-0,001...0,005)^{38-r_2} \cdot (0,001...0,005)^{r_2} = \end{aligned}$$

$$= 2,686 \cdot 10^{-12} \dots 3,760 \cdot 10^{-8}, \text{ при } r_2 = 0,1, \dots, (38 - z_2).$$

Работа болтовой части комбинированного соединения характеризуется структурной схемой надежности с последовательным соединением элементов, следовательно, ожидаемую вероятность отказа можно оценить выражением:

$$\begin{aligned} F_{A,\inf} &= 1 - (1 - F_{A,z1,\inf}) \cdot (1 - F_{A,z2,\inf}) = \\ &= 1 - (1 - 6,556 \cdot 10^{-5}) \cdot (1 - 2,686 \cdot 10^{-12}) = 6,556 \cdot 10^{-5}, \\ F_{A,\sup} &= 1 - (1 - F_{A,z1,\sup}) \cdot (1 - F_{A,z2,\sup}) = \\ &= 1 - (1 - 1,596 \cdot 10^{-3}) \cdot (1 - 3,760 \cdot 10^{-8}) = 1,596 \cdot 10^{-3}. \end{aligned}$$

Ожидаемая вероятность отказа всего комбинированного соединения в целом, оценивается по формуле конфигурации С (табл. 7):

$$\begin{aligned} F_{C,\inf} &= 1 - (1 - F_{A,\inf}) \cdot (1 - F_{B,\inf}) = \\ &= 1 - (1 - 6,556 \cdot 10^{-5}) \cdot (1 - 3,999 \cdot 10^{-8}) = 6,560 \cdot 10^{-5}, \\ F_{C,\sup} &= 1 - (1 - F_{A,\sup}) \cdot (1 - F_{B,\sup}) = \\ &= 1 - (1 - 1,596 \cdot 10^{-3}) \cdot (1 - 1,599 \cdot 10^{-7}) = 1,596 \cdot 10^{-3}. \end{aligned}$$

Вывод: согласно классификации ГОСТ 27.310-95 [8], возможно наблюдение данного отказа за срок службы и по ожидаемой частоте возникновения оценивается как «возможный отказ» в пределах от $1,596 \cdot 10^{-3}$ до $6,560 \cdot 10^{-5}$.

Пример 4. Требуется оценить вероятность отказа системы продольных связей в пределах одного монтажного блока. Система продольных связей включает в себя: стойки – $c_1 = 3$ шт., раскосы (при использовании крестовой системы) – $p_1 = 4$ шт., фасонные листы (по числу узлов) – $n_1 = 12$ шт., число болтов в одном узле – 3 шт.

Решение:

Вероятность отказа болтового соединения в составе узла прикрепления элементов продольных связей принимаем из примера 1, F_A в пределах от $7,475 \cdot 10^{-5}$ до $2,980 \cdot 10^{-4}$.

Вероятность отказа одного раскоса F_p системы связей по данным таблицы 8, составляет $0,001 \dots 0,005$, одного фасонного листа F_n порядка $0,00005 \dots 0,001$, а вероятность отказа одной стойки F_c системы связей по данным работы [9] может составить $2,51 \cdot 10^{-17} \dots 3,16 \cdot 10^{-10}$.

Учитывая, что отказ любого из элементов связей, влечет за собой отказ всей системы, работа системы характеризуется структурной схемой надежности с последовательным соединением элементов, следовательно, ожидаемую вероятность отказа можно оценить выражением:

$$F_{sv_1,\inf} = 1 - \left(1 - F_{A,\inf}\right) \cdot \prod_{i=1}^{p_1} \left(1 - F_{p,\inf}\right) \cdot \prod_{i=1}^{n_1} \left(1 - F_{n,\inf}\right) \cdot \prod_{i=1}^{c_1} \left(1 - F_{c,\inf}\right) = \\ = 1 - \left(1 - 1,596 \cdot 10^{-3}\right) \cdot \prod_{i=1}^4 \left(1 - 10^{-3}\right) \cdot \prod_{i=1}^{12} \left(1 - 5 \cdot 10^{-5}\right) \cdot \prod_{i=1}^3 \left(1 - 2,51 \cdot 10^{-17}\right) = 6,180 \cdot 10^{-3}.$$

$$F_{sv_1,\sup} = 1 - \left(1 - F_{A,\sup}\right) \cdot \prod_{i=1}^{p_1} \left(1 - F_{p,\sup}\right) \cdot \prod_{i=1}^{n_1} \left(1 - F_{n,\sup}\right) \cdot \prod_{i=1}^{c_1} \left(1 - F_{c,\sup}\right) = \\ = 1 - \left(1 - 2,980 \cdot 10^{-4}\right) \cdot \prod_{i=1}^4 \left(1 - 5 \cdot 10^{-3}\right) \cdot \prod_{i=1}^{12} \left(1 - 10^{-3}\right) \cdot \prod_{i=1}^3 \left(1 - 3,16 \cdot 10^{-10}\right) = 0,032.$$

Вывод: согласно классификации ГОСТ 27.310-95 [8], вероятно частое возникновение отказа системы продольных связей за срок службы и по ожидаемой частоте возникновения оценивается как «частый отказ» в пределах от $6,180 \cdot 10^{-3}$ до 0,032.

Пример 5. Требуется оценить вероятность отказа системы поперечных связей в пределах одного монтажного блока. Система поперечных связей включает в себя (рис. 1): продольные ветви – $c_2 = 2$ шт., раскосы – $p_2 = 4$ шт., фасонные листы (по числу узлов) – $n_2 = 7$ шт., число болтов в одном узле – 3 шт.

Решение:

Алгоритм решения данной задачи аналогичен тому, что был показан в примере 4, с заменой показателей надежности, принятых для стоек продольных связей, применительно к продольным ветвям поперечных связей.

Примем показатели надежности раскосов, фасонных листов и прикреплений элементов поперечных связей такими же, как и в примере 4, и, с заменой индексов в формулах, оценим ожидаемую вероятность отказа системы:

$$F_{sv_2,\inf} = 1 - \left(1 - F_{A,\inf}\right) \cdot \prod_{i=1}^{p_2} \left(1 - F_{p,\inf}\right) \cdot \prod_{i=1}^{n_2} \left(1 - F_{n,\inf}\right) \cdot \prod_{i=1}^{c_2} \left(1 - F_{c,\inf}\right) = \\ = 1 - \left(1 - 1,596 \cdot 10^{-3}\right) \cdot \prod_{i=1}^4 \left(1 - 10^{-3}\right) \cdot \prod_{i=1}^7 \left(1 - 5 \cdot 10^{-5}\right) \cdot \prod_{i=1}^2 \left(1 - 2,51 \cdot 10^{-17}\right) = 5,932 \cdot 10^{-3}.$$

$$F_{sv_2,\sup} = 1 - \left(1 - F_{A,\sup}\right) \cdot \prod_{i=1}^{p_2} \left(1 - F_{p,\sup}\right) \cdot \prod_{i=1}^{n_2} \left(1 - F_{n,\sup}\right) \cdot \prod_{i=1}^{c_2} \left(1 - F_{c,\sup}\right) = \\ = 1 - \left(1 - 2,980 \cdot 10^{-4}\right) \cdot \prod_{i=1}^4 \left(1 - 5 \cdot 10^{-3}\right) \cdot \prod_{i=1}^7 \left(1 - 10^{-3}\right) \cdot \prod_{i=1}^2 \left(1 - 3,16 \cdot 10^{-10}\right) = 0,027.$$

Вывод: согласно классификации ГОСТ 27.310-95 [8], вероятно частое возникновение отказа системы поперечных связей за срок службы и по ожидаемой частоте возникновения оценивается как «частый отказ» в пределах от $5,932 \cdot 10^{-3}$ до 0,027.

4. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ

Оценить аналитически эффективность того или иного метода повышения надежности возможно только тогда, когда известно, как влияют основные характеристики этого метода на количественные характеристики надежности метода.

Согласно требованиям ГОСТ Р 51901.2-2005 [2], типовые данные характеристик продукции, необходимых для оценки надежности, включают в себя следующие:

- конфигурацию системы;
- данные оценки и верификации показателей надежности;
- результаты испытаний системы в целом;
- отчеты о приемке продукции;
- отчеты об отказах, сбоях, деградациях системы при эксплуатации;
- отчеты технического обслуживания;
- данные материально-технического обеспечения.

Основные процедуры анализа надежности регламентированы ГОСТ Р 51901.5-2005 [3], общий алгоритм показан на рисунке 5.

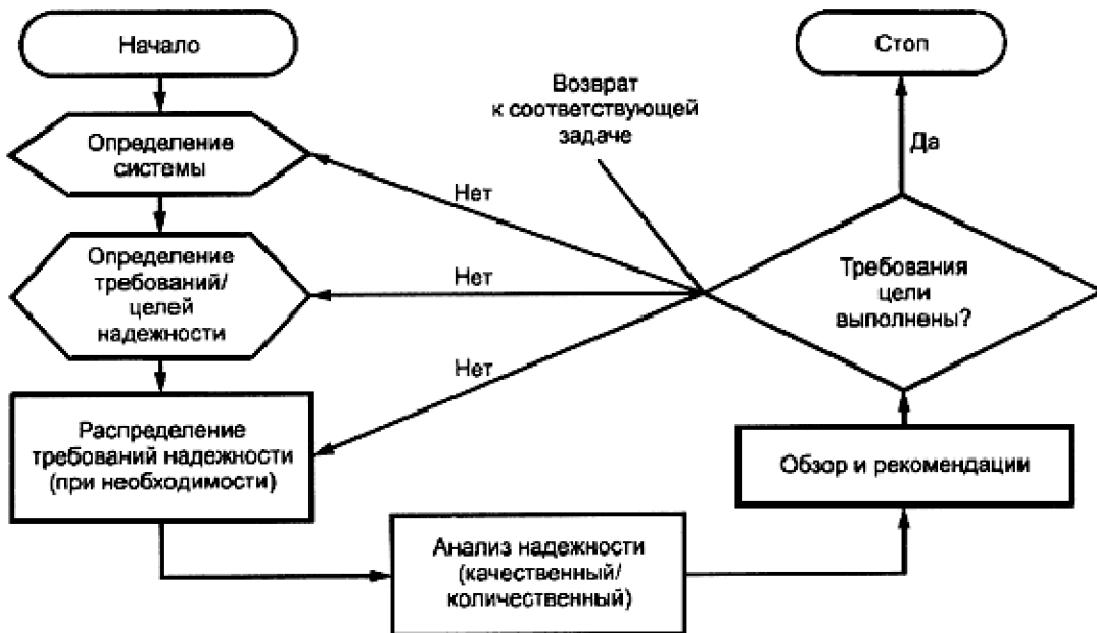


Рис. 5. Общая процедура анализа надежности

При анализе выполнения целей требований надежности для рассматриваемого проекта и возможности их выполнения при использовании альтернативных проектов, следует исследовать возможность решения следующих задач:

- оценка улучшения надежности системы по результатам проектирования (например, резервирование, снижение нагрузок, совершенствование стратегий технического обслуживания системы, контроля продукции и технологических процессов, системы менеджмента качества и материально-технической базы производства);

- исследование проекта системы и определение слабых мест и режимов критичности отказов компонентов;
- исследование проблемных свойств системы и механизмов отказоустойчивости и т.д.;
- разработка альтернативных путей повышения надежности, например, использование резервирования, контроля эффективности, обнаружения неисправностей, методов реконфигурации системы, процедур технического обслуживания, заменяемых компонентов, процедур восстановления;
- выполнение исследований по оценке стоимости и сложности альтернативных проектов;
- оценка влияния возможностей производственного процесса;
- оценка результатов и сравнение их с установленными требованиями.

Общая процедура объединяет некоторые элементы программы надежности, применимые для анализа надежности: спецификации надежности, анализ условий использования, разработка надежности, ремонтопригодности, человеческого фактора, моделирование надежности, анализ проекта и оценка продукции, анализ воздействия причин и анализ риска, анализ решений о заменах.

Наиболее эффективными методами повышения надежности технических систем являются методы, которые применяются при их **проектировании**.

К таким методам относятся:

- резервирование,
- упрощение системы,
- выбор наиболее надежных элементов,
- создание схем с ограниченными последствиями отказов элементов,
- облегчение режимов работы элементов,
- стандартизация и унификация элементов и узлов,
- встроенный контроль,
- автоматизация проверок.

В рамках курсовой работы, следует провести аналитическую оценку результатов качественного и количественного анализа системы, рассмотренной студентом, и разработать общие рекомендации по повышению надежности.

Для выделения целесообразности применения, эффективности, достоинств и недостатков рассмотрим более подробно основные характеристики перечисленных выше методов повышения надежности технических систем.

1) Резервирование как средство повышения надежности

Основное положительное свойство резервирования состоит в том, что оно позволяет из малонадежных элементов проектировать надежные системы. Это свойство резервирования выгодно отличает его от остальных методов повышения надежности.

Резервирование как средство повышения надежности наиболее целесообразно применять для повышения надежности сложных систем, предназначенных для короткого времени непрерывной работы, часто требует

высокой кратности резервирования. Это ограничивает его использование в системах, для которых существуют ограничения веса, габаритов или стоимости.

Повышение надежности технической системы путем её резервирования осуществляется за счет ухудшения таких характеристик, как вес, габариты, стоимость, условия эксплуатации (увеличение частоты проверок, числа запасных элементов, узлов и отдельных приборов и т.п.).

2) Упрощение системы

Одной из главных причин возникновения проблемы снижения надежности является исключительная сложность современных технических систем. Уменьшение сложности системы (упрощение) может существенно повысить ее надежность. Причем этот эффект тем, больше, чем ниже надежность элементов и чем сложнее техническая система.

Однако создание простых схем является одной из наиболее трудных технических задач. Трудность этой задачи состоит в том, что упрощение системы дает ощутимый эффект лишь при значительном уменьшении числа элементов.

Упрощение системы является методом повышения надежности, позволяющим одновременно уменьшить вес. Упрощение системы является весьма эффективным, но достаточно трудно реализуемым методом повышения надежности.

3) Выбор наиболее надежных элементов

При проектировании сложной системы (когда нельзя её упростить) всегда необходимо стремиться выбрать наиболее надежные элементы. Следует, однако, иметь в виду, что чем выше надежность элемента, тем он часто имеет больше вес, габариты и стоимость. Поэтому выбирать тот ли иной тип элемента необходимо на основании анализа технических требований на надежность и по возможности предварительного расчета надежности проектируемой схемы.

4) Облегчение режимов работы элементов

Улучшить условия работы элементов можно, во-первых, уменьшая вредное влияние окружающей среды и внешних воздействий и, во-вторых, облегчая режимы эксплуатации. Облегчить режимы эксплуатации элементов можно снижением нагрузки и уменьшением скорости потока автотранспорта и т.п. Надежность сложной системы, как правило, определяется ограниченным числом типов элементов. Это – либо наиболее многочисленные элементы системы, либо наименее надежные. В связи с этим режимы работы элементов лучше подбирать не для всех элементов, а лишь для тех, которые оказывают существенное влияние на надежность системы.

5) Отбраковка малонадежных элементов

Интенсивность отказов системы на начальном участке времени ее работы обычно значительно выше, чем на участке нормальной работы. Это объясняется тем, что при изготовлении системы в нее могут попасть элементы с внутренними, производственными или другими дефектами. Подобные дефекты часто не удается выявить при заводских методах испытания в течение сравнительно короткого времени работы системы. Отбраковать ненадежные

элементы можно путем тщательной проверки элементов и в результате испытаний при более тяжелых условиях их работы.

6) Создание схем с ограниченными последствиями отказов элементов

Отказы элементов сложной системы не равнозначны. Одни отказы приводят к потере работоспособности, другие лишь ухудшают характеристики системы, третьи нарушают контроль человека за работой системы и т.д.

Проектировать схемы с ограниченными последствиями отказов необходимо таким образом, чтобы отказ элементов не приводил к потере работоспособности или разрушению системы, а приводил, в крайнем случае, лишь к ухудшению характеристик.

7) Стандартизация (применение стандартов) и унификация (приведение к наименьшему числу типоразмеров) элементов и узлов

Унифицированные и стандартизованные схемы узлов всегда наиболее надежны. Это объясняется тем, что такие узлы, как правило, доведены до совершенства на основании богатого опыта эксплуатации. Кроме того, что унифицированные узлы сами по себе наиболее надежны, они значительно облегчают построение систем высокой надежности. Стандартизация и унификация узлов могут существенно уменьшить время, потребное на отыскание и устранение неисправностей. Это означает, что этот метод повышения надежности позволяет не только уменьшить интенсивность отказов системы, но также уменьшить среднее время восстановления, а значит, улучшить показатели надежности системы.

8) Совершенствование технологии производства и его автоматизация

Совершенствование технологии производства и его автоматизация обеспечивают высокую однородность продукции, что повышает надежность продукции и уменьшает разброс (дисперсию) времени возникновения отказов.

9) Статистический контроль качества

Статистический контроль качества, проводимый на производстве непрерывно, позволяет выявить эти причины, повлиять должным образом на технологический процесс и отбраковать дефектную продукцию, что позволяет добиться высокой надежности и однородности продукции.

10) Профилактические мероприятия

Профилактические мероприятия, проводимые при эксплуатации технической системы, направленные на предупреждение отказов, позволяют выявить слабые элементы и узлы, устраниТЬ их дефекты до появления полного отказа и тем самым уменьшить интенсивность отказов всей системы.

В процессе эксплуатации надежность элементов и системы в целом расходуется – при проведении же профилактических мероприятий она может восстанавливаться. Недостатком данного способа по сравнению с резервированием является незначительный выигрыш надежности по интенсивности и вероятности отказов.

11) Сокращение времени непрерывной работы

Надежность, как свойство технической системы, проявляется в эксплуатации. С течением времени надежность системы теряется – чем больше суммарное время работы системы, тем ниже становится её надежность.

Уменьшая суммарное время работы системы, можно тем самым увеличить время её существования в исправном состоянии.

Сокращение времени непрерывной работы технической системы фактически не является методом повышения её надежности, так как повысить надежность, изменяя время работы, не представляется возможным. Этот способ позволяет лишь разумно расходовать надежность.

12) Уменьшение среднего времени восстановления

Время восстановления оказывает существенное влияние на коэффициенты надежности: коэффициент готовности, коэффициент вынужденногоостояния, коэффициент профилактики. Уменьшить среднее время восстановления можно, уменьшив число отказов и сократив время, потребное на ремонт системы. Уменьшить время, потребное на ремонт технической системы, можно реализовать путем рационального её конструирования (встроенный контроль, блочная конструкция и т.п.) а, также на основе использования научных методов организации эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Свод правил СП.35.13339.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84*. – М.: ОАО ЦПП, 2011. – 341 с.
2. ГОСТ Р 51901.2-2005 (МЭК 60300-1:2003). Менеджмент риска. Системы менеджмента надежности.
3. ГОСТ Р 51901.5-2005 (МЭК 61078:2006). Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности.
4. ГОСТ Р 52748-2007. Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения и габариты приближения. – М.: Стандартинформ, 2008. – 9 с.
5. Азгальдов Г.Г. Квалиметрия в архитектурно-строительном проектировании. – М.: Стройиздат, 1989. – 264 с.
6. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. Пер. с англ. – М.: Мир, 1976.
7. ГОСТ Р 51901.14-2007 (МЭК 61078:2006). Менеджмент риска. Структурная схема надежности и булевы методы.
8. ГОСТ 27.310-95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения.
9. Роки К.С., Эванс Х.Р. Проектирование стальных мостов. Пер. с англ. Под ред. А.А. Потапкина. – М.: Транспорт, 1986. – 245 с.
10. ГОСТ 2246-70. Проволока стальная сварочная. Технические условия.
11. ГОСТ 6713-91. Прокат низколегированный конструкционный для мостостроения. Технические условия.
12. ГОСТ 8509-93. Уголки стальные горячекатанные равнополочные. Сортамент.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению курсовой работы по курсу
«Основы надежности мостов и тоннелей»
по профилю подготовки «Автодорожные мосты и тоннели»
направления 270800.62 «Строительство»

Составители: И.Ю. Майстренко, Т.А. Зиннуров

Редактор

Редакционно-издательский отдел

Казанского государственного архитектурно-строительного университета

Подписано в печать

Формат 60x84/16

Тираж 50 экз.

Бумага офсетная №1

Усл.-печ.л.

Заказ №

Печать ризографическая

Учетн.-изд.л.

Печатно-множительный отдел КГАСУ

420043, Казань, Зеленая, 1