



Прибытков Сергей Сергеевич окончил СГУПС в 2002 г., факультет «Мосты и тоннели». В 2006 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Обоснование нормативных требований к содержанию мостового полотна на железобетонных пролетных строениях с ездой на балласте».

Научные интересы — управление содержанием искусственных сооружений на основе анализа их надежности и оценки рисков.

E-mail: pss@stu.ru

УДК 624.21

С.С. ПРИБЫТКОВ

УПРАВЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ ИСКУССТВЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОЛОГИИ УРРАН

В статье рассматриваются вопросы управления эксплуатацией искусственных сооружений железных дорог на основе анализа надежности и оценки рисков. Основное внимание уделено проблеме расчета показателей надежности и подходам к оценке рисков, предложены пути решения этих задач.

Ключевые слова: *искусственные сооружения, железные дороги, мост, надежность, оценка риска.*

Стратегией инновационного научно-технического развития компании ОАО «РЖД» определены целевые показатели эксплуатационной готовности объектов инфраструктуры и показатели снижения расходов на их эксплуатацию [1]. Эти цели в компании намерены достичь в том числе за счет внедрения методологии управления УРРАН — управления ресурсами и рисками на всех этапах жизненного цикла объектов инфраструктуры на основе анализа их надежности — и соответствующего программного обеспечения. В этой статье рассматривается один из возможных подходов к решению задач, связанных с эксплуатацией уже готовой инфраструктуры, с применением методологии УРРАН.

Разработка методологии УРРАН требует решения четырех крупных задач. Первая — расчет показателей надежности и безопасности (интенсивность отказов, средняя наработка на отказ, вероятность безотказной работы, среднее время простоя, коэффициент эксплуатационной готовности и др.). Вторая задача — анализ и оценка рисков. Третья задача — оценка стоимости жизненного цикла объекта инфраструктуры. И, наконец, четвертая — состоит в выборе оптимального решения из множества вариантов. Эти четыре задачи тесно между собой переплетены и в процессе управления эксплуатацией искусственных сооружений должны решаться постоянно, циклически, с перманентным обновлением исходных данных и уточнением целей. Попробуем далее разобраться, каким образом можно решать их по отношению к искусственным сооружениям.

Риск — сочетание вероятности события и его последствий. Поэтому первое, что необходимо сделать — это выполнить идентификацию опасных ситуаций, определить вероятности их возникновения и оценить величину последствий. Далее необходимо сделать вывод о допустимости риска и принять решение о дальнейших действиях по его

оптимизации. Для идентификации опасностей, определения путей развития событий, приводящих к различным исходам, в том числе нежелательным или недопустимым, применяются различные методы. Российским государственным стандартом ГОСТ Р 51901–2002 «Анализ риска технологических систем» рекомендованы несколько основных методов анализа риска:

- анализ дерева событий (*ETA*),
- анализ дерева отказов (*FTA*),
- анализ видов и последствий отказов (*FMEA* и *FMECA*),
- исследование опасности и работоспособности (*HAZOP*),
- анализ влияния человеческого фактора (*HRA*),
- предварительный анализ опасности (*PHA*) и
- анализ структурной схемы надежности (*RBD*).

В дополнение к этим методам стандартом предусмотрено использование и других методов, нацеленных на решение специфических и узких задач, возникающих в рамках анализа рисков:

- выявление источников опасностей:
 - общий анализ отказов;
 - обзор данных эксплуатации, анализ скрытых процессов;
- анализ частоты, моделирование последствий:
 - метод Делфи;
 - метод Монте-Карло;
- ранжирование рисков, определение уровня риска:
 - индексы опасностей;
 - парные сопоставления;
 - классификация групп рисков по категориям;
- оценка последствий, их воздействия на имущество, людей и окружающую среду:
 - модели описания последствий.

Какой способ выбрать для оценки рисков эксплуатации ИССО? Выбор подходящего способа необходимо делать с учетом того, что на железных дорогах эксплуатируется около 85 тыс. сооружений, которые имеют между собой много общего, но в то же время характеризуются особенностями конструкции и условий эксплуатации, и это нельзя игнорировать. Индивидуальный анализ рисков для каждого сооружения трудновыполним, поэтому необходимо отыскать решение, позволяющее в значительной степени автоматизировать этот процесс. Например, можно объединять сооружения и их элементы в группы по совокупности условий эксплуатации и конструктивных характеристик, выполнить анализ надежности и рисков для отдельных компонентов ИССО, составить анализ для сооружения в целом, а затем «встроить» сооружение в систему путевого хозяйства, определив границы с другими объектами инфраструктуры, оказывающими влияние на риски ИССО и, наоборот, подверженных влиянию со стороны ИССО. Подходящими методами анализа надежности и рисков для искусственных сооружений являются, на наш взгляд, *FTA*, *ETA* и *RBD*, как наиболее алгоритмизированные. Анализ дерева отказов (*FTA*) может быть использован в качестве инструмента выявления причинно-следственных связей для различных видов отказов. Конечно, эти связи, большей частью, уже известны — есть инструкции по оценке технического состояния, инструкции по содержанию искусственных сооружений и различные руководства, где приведены соответствующие знания, но они не формализованы и про-

граммное обеспечение не может с ними работать. Анализ дерева событий (*ETA*) можно применить для выявления последствий отказов и связей между потерями и видами отказов. В сочетании друг с другом результаты *FTA* и *ETA* могут дать информацию для определения наиболее эффективных мер по снижению уровня риска. Анализ структурных схем надежности (*RBD*), в свою очередь, позволяет собрать воедино результаты анализа видов отказов элементов системы для того, чтобы оценить систему в целом — структурные схемы позволяют представить как элементы системы с их взаимными связями, так и виды отказов элементов с их взаимными зависимостями. Используя структурные схемы, можно рассчитать показатели надежности системы — и искусственного сооружения в отдельности, и участка пути в целом, включая земляное полотно, ИССО, верхнее строение пути и другие инфраструктурные объекты.

Прежде всего возникает проблема идентификации опасных ситуаций — определения того, какие события в эксплуатации сооружения могут привести к нежелательным последствиям. Учитывая имеющийся значительный опыт эксплуатации искусственных сооружений, можно на предварительном этапе для большинства ИССО указать следующие потенциально опасные ситуации:

- проход поезда,
- пропуск паводка, карчехода, льда.

К указанным ситуациям в определенных случаях могут быть добавлены, например, воздействие сейсмической нагрузки, ветровой нагрузки, пропуск водного транспорта или автомобильного и железнодорожного подвижного состава по пересекаемому сооружением препятствию. Конечными неблагоприятными событиями во всех упомянутых случаях могут быть:

- крушение поезда,
- разрушение или потеря устойчивости элемента сооружения,
- ограничение скорости движения, запрет пропуска отдельных видов нагрузки, полное закрытие движения,
- другие события.

Причины этих событий, как правило, заключаются как в неисправности отдельных элементов сооружения (т.е. отклонения их параметров от проектных значений), так и в превышении нагрузками несущей способности элемента, а также ошибках персонала при проведении оценки технического состояния сооружения или производстве работ по ремонту и текущему содержанию.

Попробуем проиллюстрировать сказанное выше на примере. Допустим, в эксплуатации находится мост с железобетонным пролетным строением с ненапрягаемой арматурой. Мостовое полотно — с ездой на балласте. Рассмотрим различные элементы мостового перехода сначала по отдельности.

Функция мостового полотна — обеспечение устойчивости пути и подвижного состава во время движения поезда по мосту. В качестве конечного события для системы мостовое полотно — поезд выступает крушение поезда. На рис. 1 изображено дерево отказов, на котором показаны некоторые причины конечного события. В круглых знаках показаны неисправности и воздействия внешней среды, являющиеся исходными событиями. В треугольном знаке «Последствия» показано дальнейшее развитие дерева в виде дерева событий для анализа и оценки последствий крушения с помощью *ETA*.

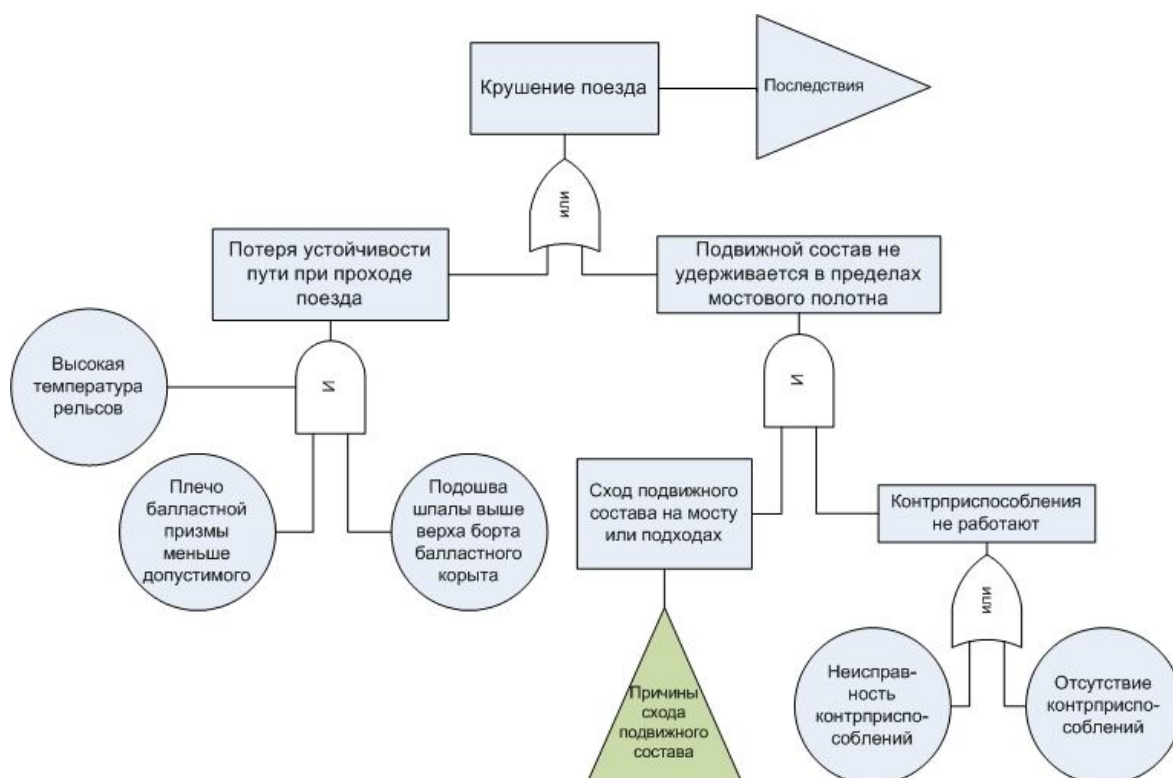


Рис. 1. Дерево отказов мостового полотна

Пролетное строение должно обладать достаточной грузоподъемностью для пропуска подвижного состава. Дерево отказов для плиты балластного корыта пролетного строения изображено на рис. 2. В качестве конечного события в этом дереве также выступает крушение поезда. Непосредственная причина — разрушение плиты — обусловлена сочетанием факторов: грузоподъемность плиты ниже интенсивности нагрузки от проходящего подвижного состава при отсутствии соответствующего ограничения скорости. Снижение грузоподъемности плиты может быть вызвано целым рядом причин — в том числе неисправностями и низкой по сравнению с обрабатываемой нагрузкой интенсивностью расчетной нагрузки (эти факторы обозначены круглыми знаками как исходные события). Кроме этих причин на грузоподъемность плиты могут повлиять ошибки при проектировании и строительстве — на рис. 2 это событие обозначено ромбом как недостаточно разработанное. В свою очередь, причиной отсутствия необходимого ограничения скорости может быть только человеческий фактор (допущена ошибка в расчетах, неверно оценено влияние неисправностей или же вообще неисправности не были обнаружены). И это следует отметить как еще одну особенность искусственных сооружений: единственным средством обеспечения безопасности сооружений в настоящее время являются надзорные мероприятия, а также своевременно и качественно выполняемые работы текущего содержания и ремонта (усиления, реконструкции). То есть безопасность мостов существенно зависит от человеческого фактора. В случае верных действий персонала, последствия снижения грузоподъемности плиты могут быть значительно смягчены за счет ограничения скорости движения поездов (рис. 3).

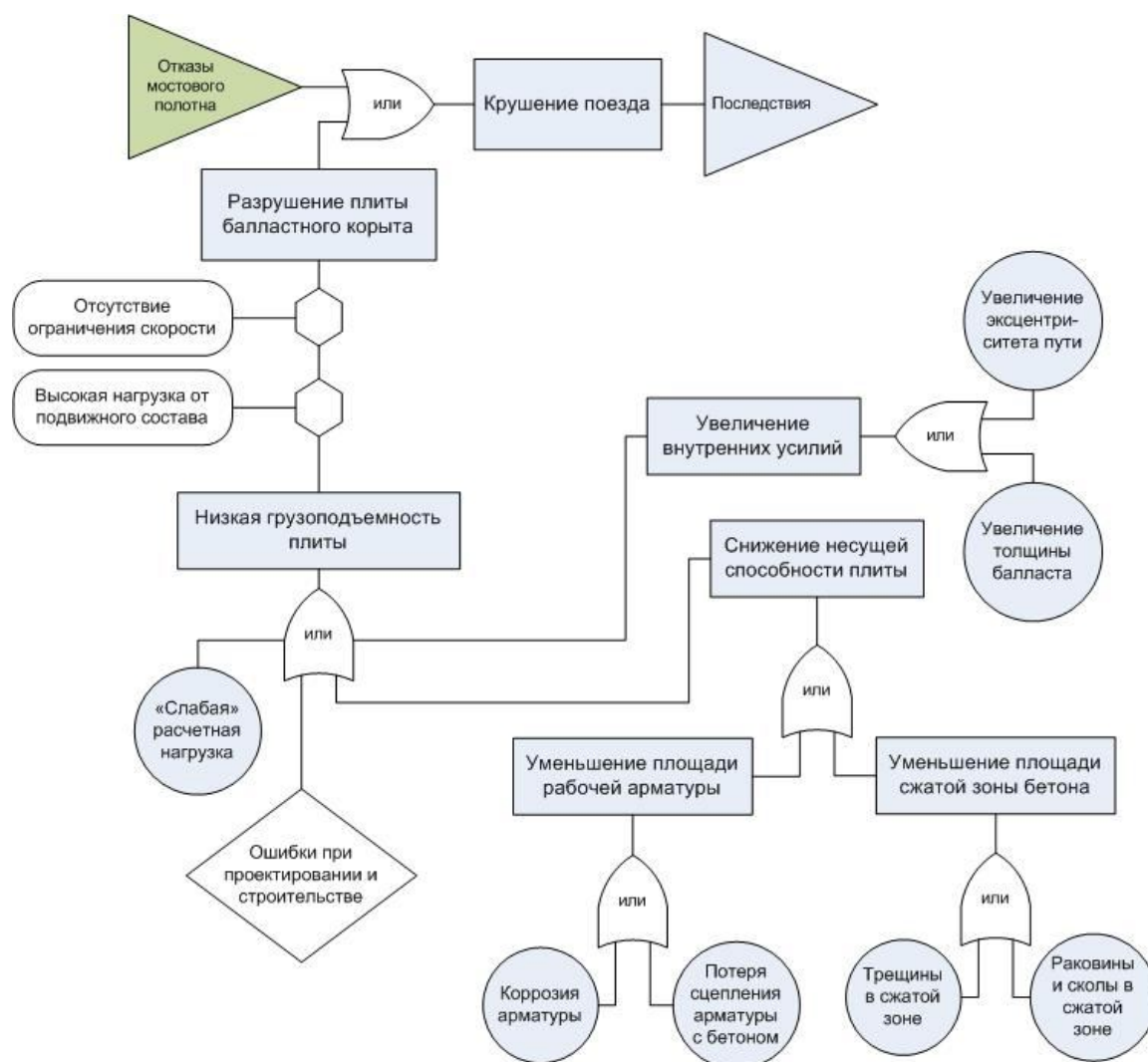


Рис. 2. Дерево отказов плиты балластного корыта пролетного строения

Нарис. 2 также показано, как деревья отказов, построенные для отдельных элементов сооружения, можно объединить в дерево отказов для системы (в нашем случае системы мостовое полотно — пролетное строение). Все события, приводящие к конечному событию со стороны элементов мостового полотна, комбинируются с верхним уровнем дерева отказов для пролетного строения с помощью клапана «ИЛИ». Разработав подобным образом деревья отказов для типовых элементов искусственных сооружений, можно облегчить (и автоматизировать) составление деревьев для каждого из эксплуатируемых сооружений. Встроить полученные деревья отказов сооружений в среду путевого хозяйства можно, определив все необходимые данные для последствий конечных событий, а также для исходных событий (см. рис. 1, знак «Причины схода подвижного состава»). Например, наличие стрелочного пере-



Рис. 3. Альтернативное конечное событие для отказов плиты

вода или переезда на подходе к мосту может оказывать влияние на вероятность события «Сход подвижного состава», а эксплуатация сооружения на особо грузонапряженной линии или линии перевозки опасных грузов сказывается на оценке величины последствий отказов.

Для оценки рисков необходимо не только выявить причины и последствия отказов, но и определить вероятности возникновения исходных событий дерева отказов, т.е. тех элементарных причин, с которых начинается переход системы в состояние отказа. Зная эти вероятности, можно рассчитать показатели надежности для всех видов отказов элементов сооружения. Для каждого вида отказа надо построить отдельные деревья (или структурные схемы), которые затем следует комбинировать друг с другом. При этом необходимо также учитывать наличие статистической зависимости между отдельными событиями или видами отказов, которая проявляется, например, при наличии у них общих причин. После этого, зная показатели надежности для элементов и структуру сооружения (его элементы и связи между ними), можно рассчитать показатели надежности системы в целом и оценить риски.

Каким образом можно определять показатели надежности? Во-первых, вероятностным расчетом. Для этого необходимо знать распределения случайных величин — факторов, влияющих на надежность. Это и нагрузки, и характеристики прочности материалов, и др. — в зависимости от вида рассматриваемого отказа. Но в первую очередь необходима модель, описывающая условия наступления отказа объекта или его элементов. Дерево отказов на элементном уровне в таком случае будет являться не более чем наглядной схемой причин и последствий — для расчетов показателей надежности элемента по данному виду отказов вместо него будет использоваться упомянутая модель, а дерево упростится таким образом, что исходным событием будет отказ элемента. Для отказов, связанных с наступлением предельных состояний первой и второй групп, такие модели частично разработаны, можно получить и необходимые статистические данные для выполнения вероятностных расчетов [3–6]. То есть, например, для отказов, связанных с разрушением конструкции в результате исчерпания прочности или выносливости, показатели надежности можно определить расчетом. Для этого удобно использовать имитационные модели (метод Монте-Карло, рис. 4).

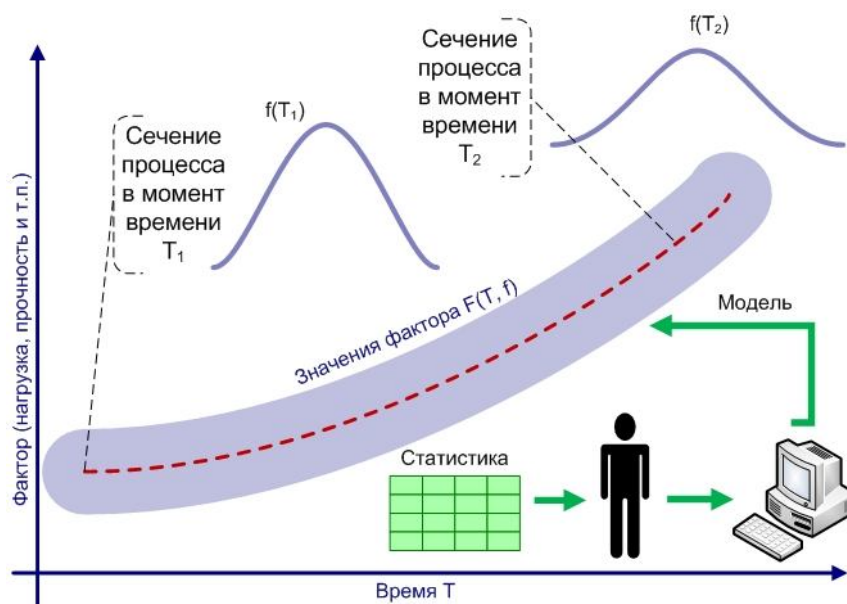


Рис. 4. Имитационное моделирование работы искусственного сооружения

Второй способ расчета показателей надежности заключается в использовании для их вычисления статистики отказов, т.е. данных натурального эксперимента (эксплуатации). Например, интенсивность отказов λ можно определить как отношение количества отказов, произошедших в течение определенного периода, к размеру этого периода: $\lambda = r/T$. Период T может измеряться в единицах времени, количестве циклов использования и т.п. В УРРАН T для путевого хозяйства выражается в единицах тонно-километровой работы (1 млрд т·км). На сегодняшний день часть программного обеспечения УРРАН находится в эксплуатации: с мая 2010 г. железнодорожники ежемесячно рассчитывают показатели безотказности пути (пока только интенсивность отказов и среднюю наработку на отказ $T_n = 1/\lambda$). Накопленная таким образом статистика (количество отказов, длительность периодов между отказами и периодов восстановления работоспособности, другие параметры) должна дать исходные данные для определения всех необходимых показателей надежности.

Каким образом этот способ расчета показателей надежности может быть применен для ИССО? Проблема состоит в том, что искусственные сооружения существенно отличаются разнообразием по времени постройки, нормам проектирования, проектным нагрузкам, конструктивным решениям, применяемым материалам и условиям эксплуатации (подразумеваются и климатические условия, и гидрогеологические условия, и характеристики поездопотока) — это необходимо учитывать при формировании выборок объектов для ведения статистики, что скажется на размере выборок. Кроме того, ИССО рассчитаны на длительный срок службы, а поток отказов элементов искусственных сооружений является нестационарным — т.е. количество отказов (или плотность потока отказов) зависит от времени эксплуатации, что обусловлено процессами износа и изменениями условий эксплуатации (например, возрастанием нагрузок). Также важным является то, что сооружения находятся в различном техническом состоянии и имеют различную историю выполнения ремонтных работ. Все это вместе накладывает определенные ограничения на использование такого способа оценки показателей надежности — процесс накопления необходимой статистики может оказаться неприемлемо долгим. В качестве иллюстрации к влиянию размера выборок на точность оценок на рис. 5 показана зависимость надежности γ оценки вероятности события P (например, вероятности безотказной работы элемента сооружения) от количества испытаний n в предположении нормального распределения оценки.

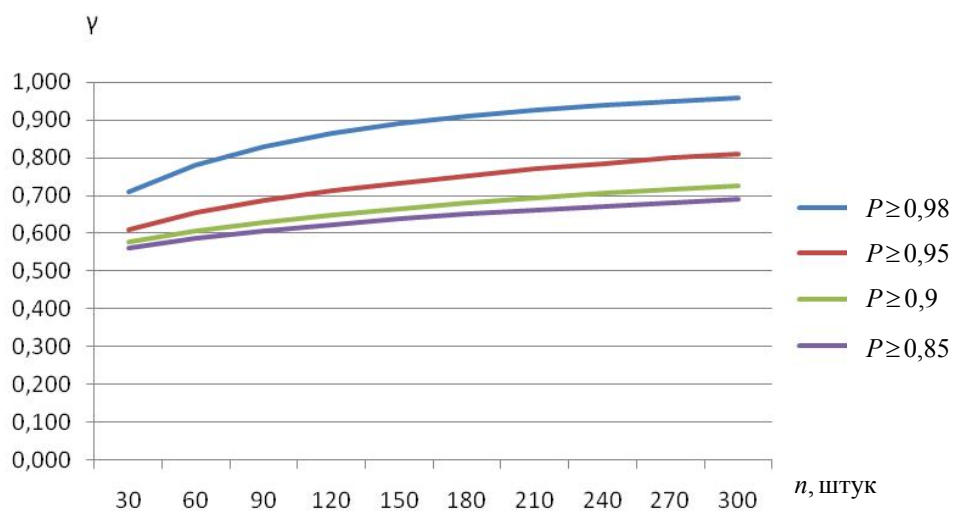


Рис. 5. Зависимость надежности определения вероятности событий от количества испытаний

Другими словами, на рисунке показаны графики изменения вероятности того, что действительное значение P будет не менее его оценочного значения — частоты, определенной по статистическим данным. Как видно, даже для высоконадежных систем с вероятностью отказа менее 0,02 (к таким можно отнести новые искусственные сооружения), приемлемая точность может быть достигнута только при количестве испытаний более трехсот. Это означает, что выборки сооружений и их элементов одинаковой конструкции и эксплуатируемых в сходных условиях должны быть довольно большими и формировать их надо очень тщательно. Однако вести такую статистику отказов для сооружений все же необходимо — с ее помощью можно будет проверять и уточнять модели для аналитического расчета и экспертные оценки надежности.

И, наконец, третий способ — использование мнений экспертов для оценки показателей надежности (рис. 6). Значение вероятности безотказной работы P в таком случае определяется на основе опыта специалистов в предметной области — эксперты буквально «назначают» величину P , принимая во внимание фактическое техническое состояние элемента сооружения (т.е. имеющиеся неисправности). Этот способ применяется в тех случаях, когда для использования первых двух не хватает статистических данных или нет соответствующих математических моделей. В настоящее время этот способ нашел применение в действующей на железных дорогах Инструкции по оценке технического состояния искусственных сооружений [7], разработанной в СГУПС. В ней изложена методика вычисления показателей надежности сооружений в зависимости от наличия тех или иных неисправностей их элементов (рис. 7).

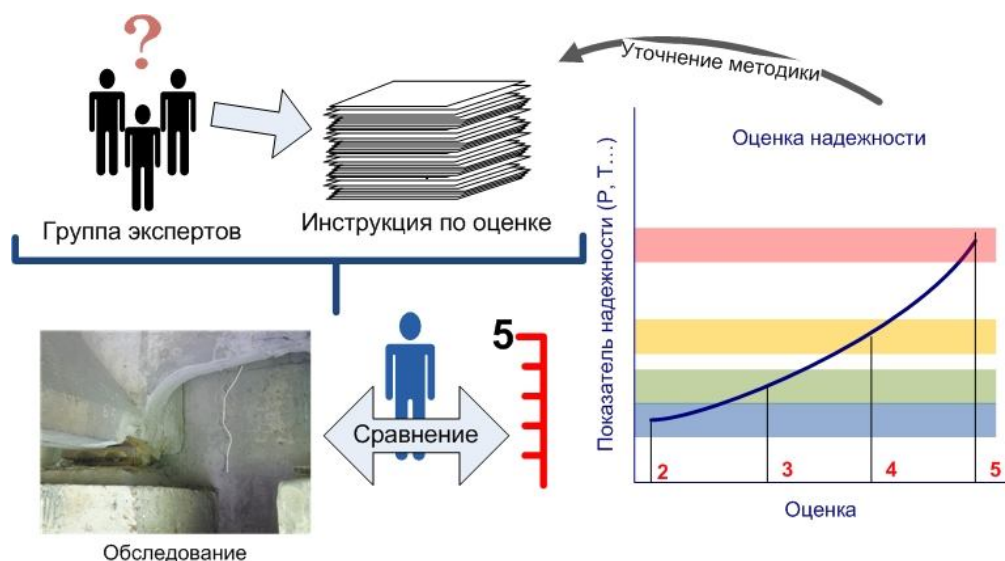


Рис. 6. Экспертный метод оценки показателей надежности

Для большинства типов ИССО и видов их дефектов и повреждений влияние неисправностей на показатели надежности оценено экспертным способом. Исключения составляют неисправности мостового полотна с ездой на балласте, уложенного на разрезных балочных однопутных пролетных строениях из железобетона с ненапрягаемой арматурой — они ранжированы по категориям на основе расчетов показателей надежности [6]. Такое объединение двух различных способов (аналитического и экспертного) стало возможным благодаря предложенному С.А. Бокаревым единому методическому подходу [8]. Следует отметить, что, прежде чем упомянутая методика может быть применена в рамках УРРАН, требуется устранить ряд ее ограничений, таких как:

усреднение оценок показателей надежности сооружений, эксплуатируемых в различных условиях; использование для всех ИССО одной модели сооружения как системы последовательно соединенных элементов с частично зависимыми отказами; безразличия к видам отказов.

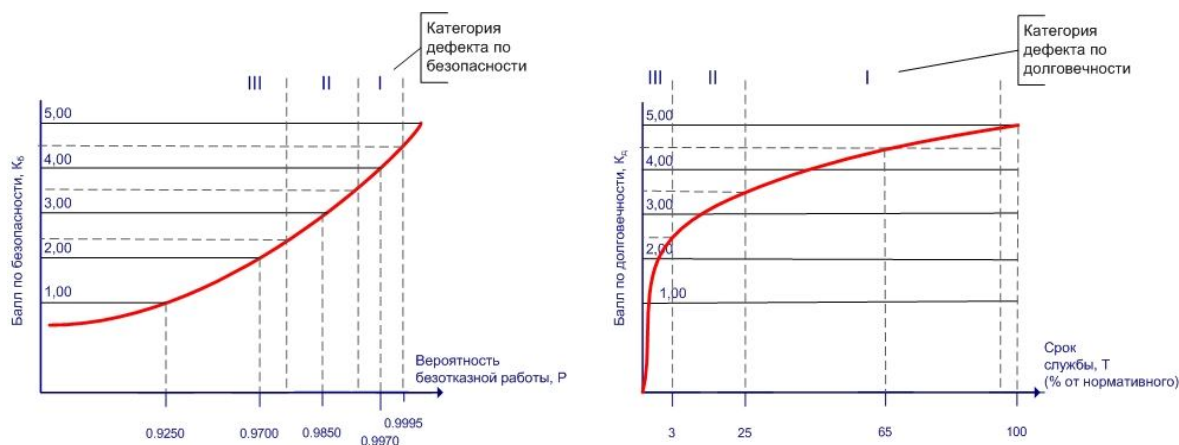


Рис. 7. Зависимость балла сооружения от значений показателей надежности

В упомянутой Инструкции [7] каждая неисправность имеет четыре оценки степени ее влияния на надежность сооружения — категории по безопасности, долговечности, грузоподъемности и ремонтпригодности. Фактически категории по безопасности и грузоподъемности имеют отношение к одному показателю — безотказности. Таким образом, для каждой неисправности есть ее «рейтинг» по безотказности, долговечности и ремонтпригодности.

По формулам и таблицам Инструкции можно рассчитать балл сооружения по указанным показателям надежности и определить соответствующее абсолютное значение показателя надежности — вероятность безотказной работы, остаточный срок службы, стоимость восстановления сооружения до исправного состояния. Например, мост имеет неисправности «Отсутствие контрприспособлений при их необходимости» ($B = 3, D = 1, G = 0, P = 1$) и «Коррозия рабочей арматуры» с уменьшением ее площади на 20 % в плите балластного корыта пролетного строения ($B = 3, D = 3, G = 3, P = 3$). Оценки по показателям надежности в таком случае будут равны:

$$K_o = 2,10; K_d = 2,00; K_r = 2,00; K_p = 2,00.$$

Соответствующие значения показателей надежности:

- вероятность безотказной работы: $P = 0,9715$;
- остаточный срок службы: $T = 3$ % от нормативного, т.е. около 2,5 лет;
- категория по грузоподъемности: $K = IV$;
- стоимость восстановления: $C = 20,0$ тыс. р. в ценах 1991 г.

Следует отметить, что указанные неисправности являются причинами разных видов отказов — отсутствие контрприспособлений приводит к неспособности удерживать подвижной состав на пути в случае схода, а коррозия рабочей арматуры влечет снижение грузоподъемности и разрушение плиты балластного корыта из-за истощения несущей способности. То есть мы имеем дело с двумя элементами сооружения (мостовым полотном и плитой балластного корыта), которые могут отказать независимо друг от друга. Вероятность безотказной работы в случае, когда имеется только одна из этих неисправностей, будет равна $P_1 = P_2 = 0,9725$. Согласно теории надежности,

вероятность безотказной работы системы при наличии у нее двух независимых видов отказов должна быть равна $P_1 \cdot P_2 = 0,9458$, что существенно меньше, чем значение, полученное на основе балла по безопасности (0,9715). Проблему такого рода можно решить, используя для определения показателей надежности вместо обобщенной модели сооружения по Инструкции структурные схемы сооружений.

Более того, прямое связывание категории некоторых неисправностей с абсолютными показателями надежности сооружения или его элемента кажется не совсем верным. Отсутствие контрприспособлений само по себе не провоцирует сход подвижного состава — на вероятность этого события оказывает существенное влияние состояние верхнего строения пути на мосту и подходах, а также состояние подвижного состава. Совокупность категорий неисправности по *Б*, *Д*, *Г* и *Р*, приведенных в Инструкции, можно считать оценкой критичности связанных с ними отказов. Для оценки величины риска можно, например, использовать сумму значений этих категорий.

Оценку надежности сооружений и связанных с отказами рисков можно выполнять по следующему алгоритму:

1. Определить опасные ситуации, которые могут возникнуть на искусственном сооружении и виды отказов его элементов, которые могут к ним привести.

2. Используя методы оценки надежности, установить элементы, их неисправности и события, которые являются причинами опасных ситуаций, и определить взаимосвязи между причинами. Для этого можно использовать, например, *FTA* или *RBD*. Для каждой из опасных ситуаций должен быть проведен индивидуальный анализ, включающий все необходимые элементы и их неисправности и позволяющий определить соответствующие показатели надежности сооружения.

3. Используя, например, *ETA*, установить все существенные варианты развития опасных ситуаций, оценить соответствующие потери и дать оценку риска.

Для оценки надежности сооружения и рисков отказов с учетом его фактического технического состояния каждая обнаруженная неисправность вводится в построенную по этому алгоритму модель как достоверное событие, что позволяет вычислить вероятность отказа и оценить величину соответствующего риска.

В качестве иллюстрации к вышеизложенному рассмотрим анализ надежности и рисков для путепровода с железобетонными пролетными строениями с ездой на балласте. Из всех возможных опасных ситуаций ограничимся двумя — сходом поезда на путепроводе и разрушением плиты балластного корыта. Перечень возможных причин указанных опасных ситуаций также ограничим только некоторыми событиями, в рамках необходимого для иллюстрации подхода.

К сходу поезда на путепроводе может привести нарушение геометрии рельсовой колеи. К разрушению плиты балластного корыта — ее недостаточная грузоподъемность. Это первичные причины — отказы таких элементов, как «мостовое полотно» и «плита балластного корыта». Плита, мостовое полотно должны работать хорошо — в этом случае путепровод будет функционировать, поэтому соответствующая *RBD* будет представлять собой схему системы с последовательным соединением двух элементов. Для упомянутых видов отказов этих элементов можно построить структурные схемы надежности, воспользовавшись для этого данными об их возможных неисправностях, приведенных в Инструкции по оценке. На рис. 8 представлены соответствующие схемы.

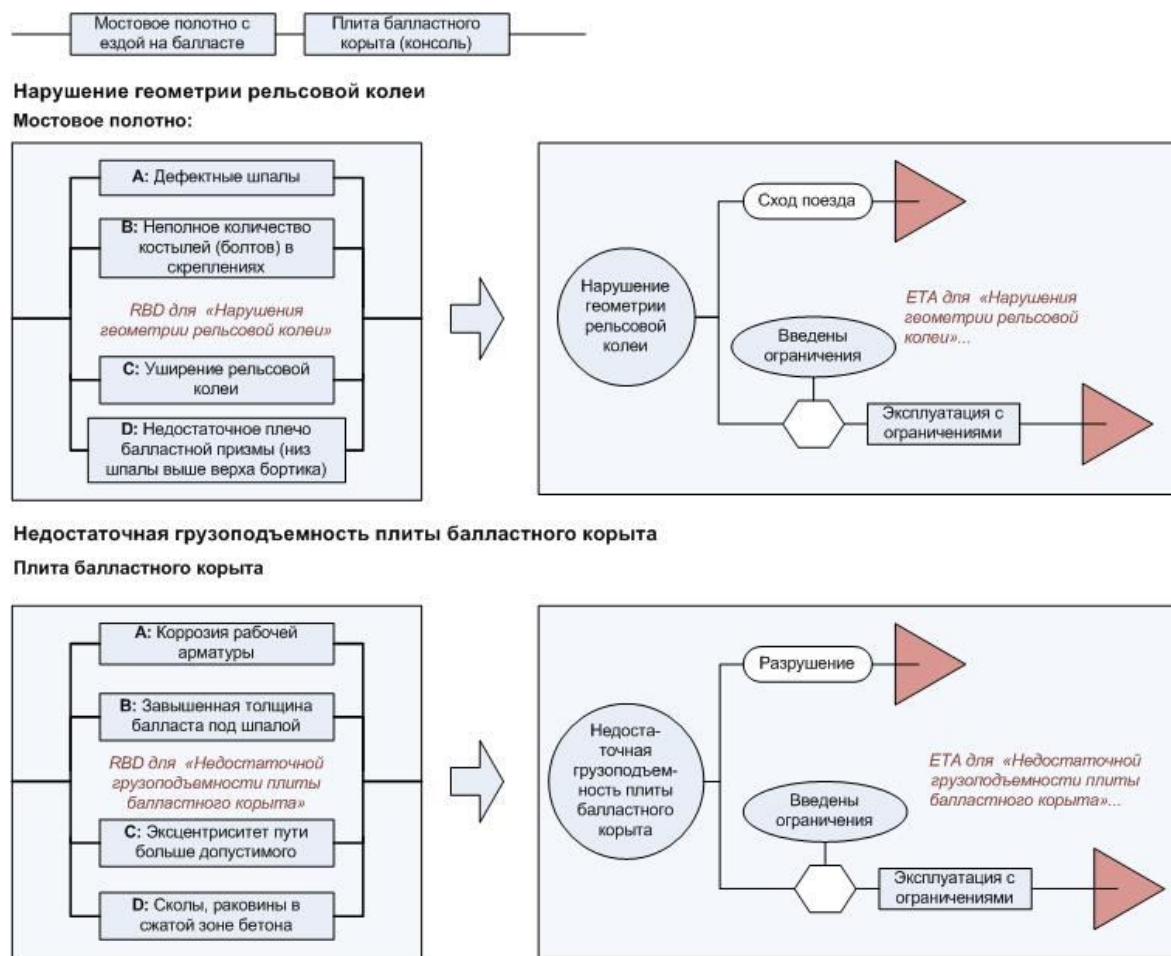


Рис. 8. Схемы для оценки надежности

Каждый из элементов этой системы имеет по одному виду отказа, а структурные схемы видов отказов представляют собой системы параллельно соединенных элементов — неисправностей. Параллельное соединение выбрано потому, что любая из рассматриваемых неисправностей может привести к данному виду отказа независимо от наличия других неисправностей. Для каждого из элементов, представляющих неисправность, можно записать функцию надежности в виде:

$$P_f(k) = \begin{cases} 1, & k = 0 \\ 0,9982, & k = 1 \\ 0,9910, & k = 2 \\ 0,9775, & k = 3 \end{cases}$$

где k — это категория неисправности по безопасности согласно Инструкции, а $P_f(k)$ — это вероятность безотказной работы. Константы вероятностей безотказной работы взяты по данным табл. П.2.1 и П.2.2 этой же Инструкции.

Вероятность каждого из рассматриваемых видов отказов определяется по формуле

$$P_{fm} = 1 - \prod_{i=1}^n P_{f,i}(k_i),$$

поскольку для реализации отказа достаточно хотя бы одной из n неисправностей. Функция надежности элемента сооружения для вида отказа z может быть записана в виде:

$$P_{\exists}(z) = \min(5 \cdot 10^{-5}, P_{fm,z}),$$

где константа минимальной вероятности отказа $5 \cdot 10^{-5}$ приблизительно соответствует проектному уровню надежности элементов искусственных сооружений по действующим нормам [4].

Так как отказы мостового полотна и плиты балластного корыта являются независимыми и совместными событиями, то вероятность безотказной работы рассматриваемой системы (из двух элементов, т.е. $m = 2$) может быть найдена по формуле

$$F(m) = \prod_{i=1}^m (1 - P_{\exists,i}).$$

Используя приведенные выше формулы, полученные на основе структурных схем надежности рассматриваемой системы, можно определить вероятность возникновения отказа каждого отдельного элемента и системы в целом. Это позволяет получить исходные вероятности для деревьев событий, связанных с отказами. Деревья событий используются для оценки рисков, их корневым элементом является опасная ситуация — отказ элемента или системы в целом. Соответствующие рассматриваемой системе деревья изображены на рис. 8. В очень упрощенном виде они состоят всего из двух вариантов развития событий в каждом случае. Первый вариант — своевременная и адекватная оценка неисправностей и установка ограничений движения, второй вариант — катастрофические последствия, связанные со сходом поезда и разрушением пролетного строения. В дереве событий необходимо оценить вероятность каждого исхода — это можно делать на основе статистических данных или экспертных оценок, если необходимой статистики нет. Предположим, что экспертами вероятность наиболее неблагоприятного исхода в случае с недостаточной грузоподъемностью плиты оценивается в 0,15, а в случае с нарушением геометрии рельсовой колеи — в 0,10. Противоположные события с вероятностями соответственно 0,85 и 0,9 будут составлять с ними полные группы событий. Таким образом, вероятность каждого результата можно определить как условную вероятность:

$$R_j = P_{fm} \prod_{i=1}^k P_{e,i},$$

где $P_{e,1}, P_{e,2}, \dots, P_{e,k}$ — вероятности событий, ведущих к результату j , а P_{fm} — вероятность вида отказа, являющегося первичной причиной результата.

Минимально необходимая информация для оценки риска — это вероятность возникновения потерь и оценка их серьезности. При отсутствии детальной информации о величине потерь можно воспользоваться экспертной оценкой серьезности риска — выбрать шкалу и в соответствии с ней назначать величину оценки. Пусть шкала серьезности потерь выглядит следующим образом:

- [1; 5) — незначительные потери;
- [5; 25) — существенные потери;
- [25; 125) — критические потери;
- [125; ∞) — катастрофические потери.

В рассматриваемой системе, допустим, максимальные потери связаны с разрушением плиты балластного корыта — пусть оценка их серьезности будет $L = 200$ (в случае реализации этой ситуации теряются подвижной состав и пролетное строение, движение будет закрыто на длительное время, необходимое для замены пролетного строения и ликвидацию других последствий). Сход поезда обернется потерями в $L = 125$ единиц.

Потери, вызванные ограничениями движения, в обоих случаях оцениваются в 10 единиц (работа не прекращается, но ограничивается скорость и запрещается пропуск особо тяжелых грузов). Количественно величину потерь можно оценить по результатам имитационного моделирования с использованием информации о грузопотоке, пассажирском движении, режиме водотока и других важных процессах.

Для иллюстрации результатов оценки риска и принятия решения о приемлемости либо неприемлемости риска можно воспользоваться матрицей риска. Для ее составления потребуется еще одна шкала — для градации событий по вероятности (или частоте) появления. В качестве основы для нее можно взять данные об ориентировочных значениях нормативной надежности для элементов различной степени ответственности [4]. Таким образом:

- частые: $0,05 \leq P < 1,0$;
- вероятные: $0,01 \leq P < 0,05$;
- редкие: $0,001 \leq P < 0,01$;
- маловероятные: $0,0001 \leq P < 0,001$.

Опираясь на эти же сведения, можно определить зоны матрицы рисков, по которым устанавливается допустимость риска. На рис. 9–11 показаны матрицы рисков, составленные для рассматриваемой системы и видов отказов ее элементов.

Мостовое полотно:		K
A: Дефектные шпалы		1
B: Неполное количество костылей (болтов) в скреплениях		0
C: Уширение рельсовой колеи		0
D: Недостаточное плечо балластной призмы (низ шпалы выше верха бортика)		0
Плита балластного корыта		
A: Коррозия рабочей арматуры		1
B: Завышенная толщина балласта под шпалой		0
C: Эксцентриситет пути больше допустимого		0
D: Сколы, раковины в сжатой зоне бетона		0

Матрица рисков для системы	Незначительные ($L \geq 1$)	Существенные ($L \geq 5$)	Критические ($L \geq 25$)	Катастрофические ($L \geq 125$)
	Частые ($P \geq 0.05$)			
	Вероятные ($P \geq 0.01$)			
	Редкие ($P \geq 0.001$)	X		
	Маловероятные ($P \geq 0.0001$)			X

Матрица рисков для элемента 'Мостовое полотно:' и риска 'Сход/разрушение'	Незначительные ($L \geq 1$)	Существенные ($L \geq 5$)	Критические ($L \geq 25$)	Катастрофические ($L \geq 125$)
	Частые ($P \geq 0.05$)			
	Вероятные ($P \geq 0.01$)			
	Редкие ($P \geq 0.001$)			
	Маловероятные ($P \geq 0.0001$)			X

Матрица рисков для элемента 'Мостовое полотно:' и риска 'Ограничения'	Незначительные ($L \geq 1$)	Существенные ($L \geq 5$)	Критические ($L \geq 25$)	Катастрофические ($L \geq 125$)
	Частые ($P \geq 0.05$)			
	Вероятные ($P \geq 0.01$)			
	Редкие ($P \geq 0.001$)	X		
	Маловероятные ($P \geq 0.0001$)			

Матрица рисков для элемента 'Плита балластного корыта' и риска 'Сход/разрушение'	Незначительные ($L \geq 1$)	Существенные ($L \geq 5$)	Критические ($L \geq 25$)	Катастрофические ($L \geq 125$)
	Частые ($P \geq 0.05$)			
	Вероятные ($P \geq 0.01$)			
	Редкие ($P \geq 0.001$)			
	Маловероятные ($P \geq 0.0001$)			X

Матрица рисков для элемента 'Плита балластного корыта' и риска 'Ограничения'	Незначительные ($L \geq 1$)	Существенные ($L \geq 5$)	Критические ($L \geq 25$)	Катастрофические ($L \geq 125$)
	Частые ($P \geq 0.05$)			
	Вероятные ($P \geq 0.01$)			
	Редкие ($P \geq 0.001$)	X		
	Маловероятные ($P \geq 0.0001$)			

Рис. 9. Оценка рисков для системы с неисправностями первой категории

В матрицах рисков светлым цветом обозначены зоны приемлемого риска, более темным — повышенного риска, а самым темным — недопустимого. Для каждого из выявленных рисков составлена отдельная матрица, в которой знаком «X» отмечена

ячейка, соответствующая текущему уровню риска. Для определения уровня риска были определены координаты ячейки матрицы (R, L) , где R — вероятность возникновения потерь, вычисленная по указанным выше формулам, а L — указанная ранее оценка серьезности потерь.

Мостовое полотно:	К
А: Дефектные шпалы	2
В: Неполное количество костылей (болтов) в скреплениях	1
С: Уширение рельсовой колеи	0
Д: Недостаточное плечо балластной призмы (низ шпалы выше верха бортика)	0
Плита балластного корыта	
А: Коррозия рабочей арматуры	2
В: Завышенная толщина балласта под шпалой	1
С: Эксцентриситет пути больше допустимого	0
Д: Сколы, раковины в сжатой зоне бетона	0

Матрица рисков для системы	Незначительные ($L \geq 1$)	Существенные ($L \geq 5$)	Критические ($L \geq 25$)	Катастрофические ($L \geq 125$)
Частые ($P \geq 0.05$)				
Вероятные ($P \geq 0.01$)		X		
Редкие ($P \geq 0.001$)				X
Маловероятные ($P \geq 0.0001$)				

Матрица рисков для элемента 'Мостовое полотно:' и риска 'Сход/разрушение'	Незначительные ($L \geq 1$)	Существенные ($L \geq 5$)	Критические ($L \geq 25$)	Катастрофические ($L \geq 125$)
Частые ($P \geq 0.05$)				
Вероятные ($P \geq 0.01$)				
Редкие ($P \geq 0.001$)				X
Маловероятные ($P \geq 0.0001$)				

Матрица рисков для элемента 'Плита балластного корыта' и риска 'Сход/разрушение'	Незначительные ($L \geq 1$)	Существенные ($L \geq 5$)	Критические ($L \geq 25$)	Катастрофические ($L \geq 125$)
Частые ($P \geq 0.05$)				
Вероятные ($P \geq 0.01$)				
Редкие ($P \geq 0.001$)				X
Маловероятные ($P \geq 0.0001$)				

Матрица рисков для элемента 'Мостовое полотно:' и риска 'Ограничения'	Незначительные ($L \geq 1$)	Существенные ($L \geq 5$)	Критические ($L \geq 25$)	Катастрофические ($L \geq 125$)
Частые ($P \geq 0.05$)				
Вероятные ($P \geq 0.01$)				
Редкие ($P \geq 0.001$)		X		
Маловероятные ($P \geq 0.0001$)				

Матрица рисков для элемента 'Плита балластного корыта' и риска 'Ограничения'	Незначительные ($L \geq 1$)	Существенные ($L \geq 5$)	Критические ($L \geq 25$)	Катастрофические ($L \geq 125$)
Частые ($P \geq 0.05$)				
Вероятные ($P \geq 0.01$)				
Редкие ($P \geq 0.001$)		X		
Маловероятные ($P \geq 0.0001$)				

Рис. 10. Оценка рисков для системы с неисправностями второй категории

Расчеты для различных состояний системы, показанных на рис. 9–11, приведены в таблице. Кроме матриц рисков для каждого вида отказа в отдельности, можно построить такую матрицу и для всей системы в целом, чтобы проиллюстрировать общий уровень риска. Для каждого из трех состояний матрицы рисков в целом для системы также показаны на рис. 9–11, приведены в таблице. Вероятности потерь каждой группы определены как вероятности реализации по крайней мере одного из двух видов отказов системы:

$$R_L = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - R_i).$$

В рассмотренном примере при наличии по одной неисправности первой категории у каждого из двух элементов системы уровень всех рисков в течение ближайшего года эксплуатации находится в «светлой зоне» (см. рис. 9). То есть риски являются приемлемыми. При появлении неисправностей второй категории уровень рисков выходит на повышенный уровень (рис. 10). И, наконец, в состоянии, когда каждый из элементов системы имеет четыре неисправности — по две третьей категории и две второй, риски становятся неприемлемыми.

Результаты оценки рисков, выполненной подобным образом, могут быть использованы для формирования политики эксплуатации сооружений. Очевидно, нельзя допускать неприемлемого уровня риска и следует принимать меры по перемещению рисков

в «светлую зону», оптимально расходуя ресурсы на соответствующие работы и на последующее поддержание такого состояния сооружений. При решении этой задачи в путевом хозяйстве для рисков экономического характера планируется руководствоваться принципом *ALARP* (*As low as reasonably practicable*) — снижение риска до максимально низкого в практически разумных пределах, находя баланс между затратами на снижение риска и выгодой (или указанными затратами и величиной снижения риска). Управление рисками, связанными с безопасностью, предполагается вести, отдавая приоритет их минимизации над коммерческой выгодой организации. Методы решения подобных задач известны как применительно к финансовым инвестициям [9], так и к техническим решениям [10].

Расчет вероятности отказа

Элемент	Неисправности $K = 1$		Неисправности $K = 2$		Неисправности $K = 3$		P_{fm}	Вероятность схода или разрушения	R_i
	n	$P_f(k)^n$	n	$P_f(k)^n$	n	$P_f(k)^n$		Вероятность ограничений	
Расчет к рис. 9									
МП	1	0,9982 ¹	0	1	0	1	1 – 0,9982 ¹ = 0,0018	0,10	0,00018
								0,90	0,00162
Плита	1	0,9982 ¹	0	1	0	1	1 – 0,9982 ¹ = 0,0018	0,15	0,00027
								0,85	0,00153
Расчет к рис. 10									
МП	1	0,9982 ¹	1	0,9910 ¹	0	1	1 – (0,9982 ¹ ·0,9910 ¹) = 0,0108	0,10	0,00108
								0,90	0,00973
Плита	1	0,9982 ¹	1	0,9910 ¹	0	1	1 – (0,9982 ¹ ·0,9910 ¹) = 0,0108	0,15	0,00162
								0,85	0,00917
Расчет к рис. 11									
МП	0	1	2	0,9910 ²	2	0,9775 ²	1 – (0,9912 ² ·0,9975 ²) = 0,0616	0,10	0,00616
								0,90	0,05550
Плита	0	1	2	0,9910 ²	2	0,9775 ²	1 – (0,9912 ² ·0,9975 ²) = 0,0616	0,15	0,00924
								0,85	0,05240

Задачу определения приемлемого уровня рисков (или «раскрашивания» матриц рисков, как в нашем примере) подразделения компании ОАО «РЖД» должны решать самостоятельно. Выбор способа принятия соответствующих решений, равно как и решений по обработке рисков, остается за сотрудниками подразделений. Впервые проблема принятия решений в условиях риска в близком к современному понимании была рассмотрена в статье Даниила Бернулли в 1738 г., где он предложил функцию, с помощью которой можно оценить, насколько велики могут быть вложения в рискованное предприятие (ставка в игре, страховая премия и т.п.) с учетом величины возможного выигрыша и уже имеющегося капитала. Согласно Бернулли, если w — величина капитала, а $U(w)$ — его полезность, то предельная полезность капитала (т.е. изменение полезности при бесконечно малом приращении капитала) — $dU(w)/dw$ — обратно пропорционально величине капитала. То есть ценность прибыли (или существенность потерь) для субъекта оказывается тем меньше, чем большим капиталом субъект обладает. Таким образом, полезность капитала $U(w) = k \ln w$. Как с помощью функции Бернулли можно найти максимальный уровень приемлемых потерь, покажем на простом примере:

Мостовое полотно:		K
А: Дефектные шпалы		3
В: Неполное количество костылей (болтов) в скреплениях		3
С: Уширение рельсовой колеи		2
D: Недостаточное плечо балластной призмы (низ шпалы выше верха бортика)		2
Плита балластного корыта		
А: Коррозия рабочей арматуры		3
В: Завышенная толщина балласта под шпалой		3
С: Эксцентриситет пути больше допустимого		2
D: Сколы, раковины в сжатой зоне бетона		2

Матрица рисков для системы	Незначительные ($L \geq 1$)	Существенные ($L \geq 5$)	Критические ($L \geq 25$)	Катастрофические ($L \geq 125$)
Частые ($P \geq 0.05$)		X		
Вероятные ($P \geq 0.01$)				X
Редкие ($P \geq 0.001$)				
Маловероятные ($P \geq 0.0001$)				

Матрица рисков для элемента 'Мостовое полотно:' и риска 'Сход/разрушение'	Незначительные ($L \geq 1$)	Существенные ($L \geq 5$)	Критические ($L \geq 25$)	Катастрофические ($L \geq 125$)
Частые ($P \geq 0.05$)				
Вероятные ($P \geq 0.01$)				
Редкие ($P \geq 0.001$)				X
Маловероятные ($P \geq 0.0001$)				

Матрица рисков для элемента 'Плита балластного корыта' и риска 'Сход/разрушение'	Незначительные ($L \geq 1$)	Существенные ($L \geq 5$)	Критические ($L \geq 25$)	Катастрофические ($L \geq 125$)
Частые ($P \geq 0.05$)				
Вероятные ($P \geq 0.01$)				
Редкие ($P \geq 0.001$)				X
Маловероятные ($P \geq 0.0001$)				

Матрица рисков для элемента 'Мостовое полотно:' и риска 'Ограничения'	Незначительные ($L \geq 1$)	Существенные ($L \geq 5$)	Критические ($L \geq 25$)	Катастрофические ($L \geq 125$)
Частые ($P \geq 0.05$)		X		
Вероятные ($P \geq 0.01$)				
Редкие ($P \geq 0.001$)				
Маловероятные ($P \geq 0.0001$)				

Матрица рисков для элемента 'Мостовое полотно:' и риска 'Ограничения'	Незначительные ($L \geq 1$)	Существенные ($L \geq 5$)	Критические ($L \geq 25$)	Катастрофические ($L \geq 125$)
Частые ($P \geq 0.05$)		X		
Вероятные ($P \geq 0.01$)				
Редкие ($P \geq 0.001$)				
Маловероятные ($P \geq 0.0001$)				

Рис. 11. Оценка рисков для системы с неисправностями третьей категории

Пусть на участке железной дороги эксплуатируется мост, вероятность безотказной работы которого в течение года $P = 0,97$ (т.е. вероятность отказа $q = 0,03$). У компании имеется $W = 100$ млн р. капитала, а средняя стоимость контрактов на перевозку грузов в одном поезде составляет $w = 15$ млн р. То есть в случае успешной работы сооружения компания получит указанную сумму. Если во время прохода поезда по участку мост откажет, то компания упустит указанную выгоду, потеряет часть подвижного состава, а также будет вынуждена восстанавливать отказавшее сооружение, выполняя ремонт. Пусть сумма указанных потерь составляет $z = 50$ млн р.

Согласно Бернулли «полезность» возможных потерь U_R (с обратным знаком) не должна превышать «полезность» возможных доходов U_w (как показано на рис. 12). То есть максимально допустимые потери могут быть определены из условия $U_w = U_R$.

В рассматриваемом примере

$$U_w = k [\ln(100 + 15) - \ln(100)],$$

$$U_R = k [\ln(100) - \ln(100 - z)].$$

$$\text{Отсюда } \ln(100 - z) = 2\ln 100 - \ln 115 = 4,465.$$

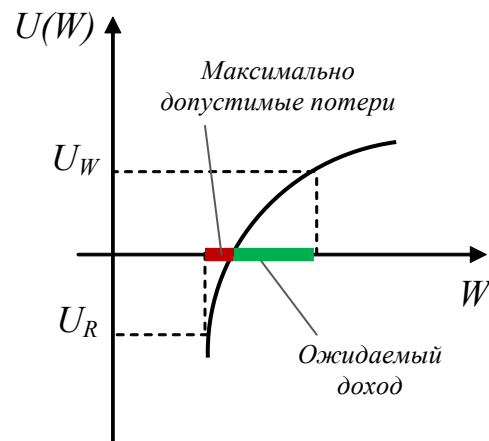


Рис. 12. Функция полезности капитала

В свою очередь, $z = 100 - \exp(4,465) = 13,04$ млн.

То есть граница допустимого риска (если предпочтения компании описываются функцией Бернулли) — это 13,04 млн р., и компания не должна осуществлять деятельность, в результате которой она может потерять сумму больше этой.

Оценка приемлемости и принятие решения — это две отдельные задачи. Получается, что нужно сначала построить конусы предпочтения (на основе оценки приемлемости рисков), т.е. сразу исключить заведомо невыгодные варианты, а затем уже выбирать наиболее эффективное решение из тех, которые находятся внутри конусов предпочтения [10].

Попробуем на примере с уже изложенными выше исходными данными (и изрядной долей упрощений) показать применение функции полезности для принятия решения, связанного с риском.

Предположим, что компания сочла необходимым улучшить надежность сооружения, выполнив ремонт и подняв вероятность безотказной работы с исходных $P_0 = 0,97$ до $P_1 = 0,99$. Какова максимальная целесообразная величина вложений r в улучшение состояния моста?

Оценка риска в случае, если работы не будут произведены, равна:

$$R_1 = Pk \ln(W + w) + (1 - P)k \ln(W - z).$$

Если работы будут выполнены, то

$$R_2 = P_1 k \ln(W + w - r) + (1 - P_1) k \ln(W - z - r).$$

Очевидно, что, решив неравенство $R_1 < R_2$ относительно r , мы получим предельную сумму затрат на ремонт моста. Таким образом:

$$R_1 < R_2 \Rightarrow (100 + 15)0,97 \cdot (100 - 50)^{0,03} > (100 + 15 - r)^{0,99} \cdot (100 - 50 - r)^{0,01}.$$

Отсюда $r < 1,88$ млн р. То есть вкладывать 1,88 млн р. и более в улучшение состояния сооружения при данных условиях нецелесообразно.

Разумеется, реальные ситуации гораздо сложнее, чем в приведенных примерах, и разработка методического и программного обеспечения УРРАН для управления содержанием искусственных сооружений потребует значительных усилий, учитывая сложности, о которых говорилось выше. Однако подходы к решению задач известны — необходимо работать, и в результате ОАО «РЖД» получит инструмент, помогающий достичь целевые показатели эффективности эксплуатации инфраструктуры.

Библиографический список

1. «Белая книга» ОАО РЖД. [Электронный ресурс]. URL: http://doc.rzd.ru/isvp/public/doc?STRUCTURE_ID=387&layer_id=4826&refererLayerId=3339&id=4038&print=1
2. Хенли Э. Дж., Кумamoto X. Надежность технических систем и оценка риска / Пер. с англ. В.С. Сыромятникова, Г.С. Деминой; Под общ. ред. В.С. Сыромятникова. М.: Машиностроение, 1984. 528 с.
3. Иосилевский Л.И. Практические методы управления надежностью железобетонных мостов. М.: Науч.-изд. центр «Инженер», 1999. 295 с.
4. Основы теории проектирования строительных конструкций. Железобетонные конструкции: Учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / В.П. Чирков, В.И. Ключкин и др. М., 1999. 376 с.
5. Разработка рекомендаций по эксплуатации металлических мостов для обеспечения пропуска грузовых поездов повышенного веса с подвижным составом нового типа. Раздел 6 (Составление окончательной редакции методик определения наработки и сравнительной оценки...). Отчет / НИИЖТ, Руководитель работы К.Б. Бобылев. Шифр работы И-29; № ГР 0183.0022155; Инв. № 0284.0007680. Новосибирск, 1983. 160 с.
6. Прибытков С.С. Обоснование нормативных требований к содержанию мостового полотна на железобетонных пролетных строениях с ездой на балласте: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2006. 26 с.

7. Инструкция по оценке состояния и содержания искусственных сооружений на железных дорогах Российской Федерации / Департамент пути и сооружений ОАО «РЖД». М., 2006. 120 с.
8. Бокарев С.А. Управление техническим состоянием искусственных сооружений железных дорог России на основе новых информационных технологий. Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2002. 276 с.
9. Шапкин А.С., Шапкин В.А. Теория риска и моделирование рискованных ситуаций. М.: Дашков и К°, 2005. 880 с.
10. Мушик Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений. М.: Мир, 1990.

S.S. Pribytkov. Maintenance Control of Railway Engineering Structures Based on Reliability and Risk Estimation Methodology.

In the article issues of railway maintenance control of railway engineering structures based on reliability and risk estimation methodology are considered. Focus is on the calculations of reliability indicators and methods of risk estimation. The author proposes the solutions.

Key words: *railway engineering structures, railways, bridge, reliability, risk estimation.*