

Проблема выбора методики анализа рисков, связанных с неисправностями железобетонных пролетных строений мостов

В статье рассмотрены методики анализа рисков, связанных с неисправностями железобетонных пролетных строений, при этом уделено внимание особенностям работы пролетных строений и рассмотрены возможные последствия их отказов.

Ключевые слова: *мост, пролетное строение, риск, вероятность, неисправность, отказ, ущерб.*

В течение срока службы мостовых сооружений и их пролетных строений регулярно приходится принимать решения о мерах по надзору, текущему содержанию, ремонту или реконструкции, о режиме их эксплуатации. Необходимость в этом обусловлена ухудшением показателей надежности конструкций, их старением, появлением у них неисправностей, а также изменением требований к их потребительским качествам (грузоподъемности, габаритам и др.). Независимо от того, кто является владельцем инфраструктуры – коммерческая организация или государство, ее содержание является затратной статьей бюджета, и владелец стремится к тому, чтобы эти затраты были минимальными при сохранении или улучшении безопасности движения и потребительских качеств объектов инфраструктуры.

Процесс принятия решения о режиме эксплуатации, об организации текущего содержания и ремонта может базироваться на оценке рисков. Понятие «риск» можно определить как вероятность наступления неблагоприятного события в сочетании с величиной потерь, которые оно может повлечь за собой. При этом в общем случае неблагоприятными могут считаться любые события, связанные с потерями (например, возникновение неисправности или отказа какого-либо элемента сооружения), т.е. рассматриваются не только события, связанные с нарушением безопасности, авариями и катастрофами. Для поддержки принятия решения нужна технология, позволяющая оценить такие риски, прогнозировать их и определять оптимальный баланс выгод и затрат, связанных с реализацией того или иного решения. Основной частью упомянутой технологии будет являться именно анализ рисков, в связи с этим необходимо уделить внимание методам его осуществления.

Анализ риска включает в себя идентификацию опасностей, определение вероятностей наступления событий, изменяющих свойства системы, и анализ последствий. Оценка риска может быть произведена как по качественным, так и по количественным показателям. Качественные показатели могут быть получены при консолидации сил группы специалистов различных областей, имеющих обширный опыт. Корректность оценки зависит от объема накопленных знаний. Примером качественной оценки может служить следующее суждение: «Удар автотранспорта о нижний пояс пролетного строения путепровода при отсутствии габаритных ворот является частым событием, которое может привести к выходу из строя пролетного строения». Количественная оценка использует вероятностный и статистический подход. Данная методика подразумевает более объективный подход к решению задачи и большую детализацию. Пример количественной оценки: «Вероятность безотказной работы

пролетного строения при уменьшении площади рабочей арматуры ребра на 20 % равна 0,96, стоимость замены пролетного строения в ценах 1991 г. – 20 000 р.»

Зарекомендовавшей себя формой представления уровней риска является матрица риска. По итогам анализа для всех рассматриваемых сценариев в зависимости от объема ущерба и вероятности осуществления сценария можно назначить неприемлемый, допустимый или приемлемый уровень риска.

Рассмотрим технические методы анализа риска как представляющие наибольший интерес для исследований рисков неисправностей пролетных строений мостов.

Среди технических методов анализа рисков выделяют три:

- феноменологический,
- детерминистский,
- вероятностный.

Феноменологический анализ опирается на конкретный опыт, на очевидность событий. Искажения и предположения в этом методе невозможны. Выводы феноменологического анализа весьма точны при полноте данных о системе.

Детерминистский анализ рассматривает всю цепочку событий, приводящих к аварии. Достоинством метода является выявление множества факторов, влияющих на состояние системы. Детерминистический анализ является сложной задачей, решаемой с применением математического моделирования, имитационных моделей и расчетов, что является основным минусом использования этого метода.

Вероятностный метод подразумевает анализ цепочек событий, приводящих к выходу системы из строя, при котором для каждого события задается вероятность его появления, а для каждой цепочки рассчитывается итоговая вероятность реализации. В вероятностном анализе, в силу его использования при различных условиях, выделено три методики:

- статистическая методика, используемая при наличии достаточной для расчета вероятностей базы знаний о системе и ее поведении;
- теоретико-вероятностная методика, используемая для оценки вероятностей редких событий;
- эвристическая методика, находящая свое применение при отсутствии статистических данных и теорий о поведении системы, заключающаяся в определении вероятностей на основе субъективных экспертных мнений.

Пролетные строения мостов являются достаточно изученной технической системой, для которой определен исчерпывающий перечень неисправностей, внешних влияний и изменений условий эксплуатации. Все эти показатели нуждаются в логической структуризации, выявлении взаимосвязей для дальнейшего построения цепочек сценариев выхода пролетных строений из строя. Этим целям наилучшим образом отвечает вероятностный метод, на котором стоит остановиться подробнее в данной статье.

Вероятностный метод применяется в следующих видах анализа:

- анализ всех возможных неисправностей (FTA) и событий (ETA),
- анализ влияния человеческого фактора (HRA, HRQ),
- анализ последствий отказов (FMEA) и опасностей (HAZOP).

Анализ возможных неисправностей и анализ событий являются дедуктивными методами, с помощью которых строятся логические цепочки событий для выявления всего множества причин неисправности технической системы и видов последствий.

Сценарии развития событий представляются в виде блок-схем, называемых деревьями неисправностей и событий, для каждого элемента в цепочке событий просчитывается вероятность.

Анализ влияния человеческого фактора связан с выявлением ошибок человека, влияющих на состояние технической системы. В основу метода заложена исчерпывающая классификация видов ошибок, подлежащая применению. Количественную оценку влияния человеческого фактора выражают в вероятностях принятия правильного решения.

Анализ последствий отказов является качественным методом, основная цель которого – выявление последствий отказа каждого конкретного элемента системы. Неотъемлемой частью анализа FMEA является рассмотрение путей отказа всех компонентов системы, что позволяет хорошо понять ее функционирование. Недостатком данного анализа, помимо сложностей в количественной оценке, является исключение из рассмотрения ремонтных работ и невозможность совместного учета состояния нескольких элементов системы.

Какие же методы необходимо выбрать для анализа рисков неисправностей железобетонных пролетных строений?

Выбор методов должен быть основан на следующих факторах:

– этап жизненного цикла системы и уровень детализации исследования (на ранних этапах жизненного цикла детализация меньше в силу небольшого количества информации);

– цели и задачи анализа риска;

– вид анализируемой системы и характерные ей опасности;

– степень квалификации исследователей;

– доступность информации об исследуемой системе.

Принимаемые методы анализа должны быть научно обоснованными, повторяемыми и проверяемыми.

Попробуем рассмотреть проблему оценки риска железобетонных пролетных строений в свете указанных факторов и требований. Жизненный цикл пролетного строения начинается этапом разработки концепции, проектирования. За ним следует этап реализации проекта – изготовление и строительство. Интересующий нас этап жизненного цикла – это этап эксплуатации конструкции. Как правило, он самый длительный, после него следует этап утилизации или вывода конструкции из эксплуатации.

Следует отметить важные особенности, которые необходимо принимать во внимание при оценке рисков, сопутствующих этапу эксплуатации пролетных строений. Железобетонные пролетные строения являются сложными системами, состоят из различных компонентов. Например, в первом приближении можно выделить главные несущие элементы, плиту балластного корыта, диафрагмы, опорные части. При детализации, к примеру, несущих элементов, таких как ребра пролетного строения, появляются и компоненты сложной системы: продольная арматура, хомуты, защитный слой бетона и т.д. Несомненно, рассмотрение компонентов по отдельности не даст достоверного результата. Характеристики одних компонентов тесно связаны с характеристиками других, например, при изменении площади продольной рабочей арматуры ребра балки следует ожидать изменения напряжений в верхних фибрах балки.

Неисправностям подвержены абсолютно все компоненты пролетного строения. Их можно разделить на две группы, к первой следует отнести неисправности, степень влияния которых на качество конструкции увеличивается с течением времени, ко второй – аварии, происходящие мгновенно. Большую часть первых составляют процессы старения конструкции; чем больше срок эксплуатации пролетного строения, тем больше ожидается неисправностей, связанных со старением. Зачастую последствиями одних неисправностей являются другие. Аварии прежде всего связаны с повреждением компонентов пролетного строения подвижным составом, строительной техникой в процессе текущего содержания и автотранспортом, движущимся по пересекаемой путепроводом автодороге. Аварии не обязательно приводят к изменениям характеристик пролетных строений, при которых дальнейшая эксплуатация невозможна. Часто в результате аварий появляются неисправности, относящиеся к первой группе, описанной выше. Например, в результате аварий происходят сколы, образуются трещины в бетоне, разрушается защитный слой бетона – эти неисправности развиваются во времени, становятся частью деградационных процессов.

Еще одной особенностью неисправностей железобетонных пролетных строений являются различия в интенсивности их влияния на характеристики конкретной конструкции в зависимости от условий эксплуатации. Сеть железных дорог расположена в различных климатических условиях, естественно, старение конструкции происходит быстрее в районах с суровыми условиями. В большей степени это относится к коррозионным процессам бетона и арматуры. Например, в условиях длительных межсезонных периодов и сильных ветров бетон пролетных строений чрезвычайно сильно подвержен морозному разрушению. Также напрямую влияет на развитие неисправностей грузонапряженность линий, на которых расположено сооружение, и установленные скорости движения. Другими словами, нельзя брать сценарий развития неисправности в одном пролетном строении и без изменений применять его к другому, условия эксплуатации и характеристики которого могут быть отличны.

Несмотря на то что нам известно, какие неисправности могут возникать у элементов железобетонных пролетных строений, время возникновения неисправности – величина случайная. Мы можем, например, утверждать, что у железобетонных пролетных строений выщелачивание бетона плиты балластного корыта проявляется в среднем через 10 лет эксплуатации, но может возникнуть и раньше, и позже – в зависимости от качества гидроизоляции и условий эксплуатации. Время развития последствий нарушения гидроизоляции (снижение прочности бетона, коррозия рабочей и конструктивной арматуры, отслоение защитного слоя) – тоже случайная величина (в разных климатических условиях оно будет распределено по-своему). То есть на всех этапах пути от возникновения неисправности к ее последствиям мы имеем дело со случайными величинами. Кроме того, поскольку наша цель – конкретный объект, конкретное пролетное строение, то от обобщающей статистики неисправностей, которую мы применяем к новым конструкциям на старте эксплуатации (или не новым, но на начальном этапе наблюдений, когда данных еще нет или их мало), мы должны переходить к уточненным распределениям времени их возникновения и развития в конкретной конструкции. То есть надо учитывать результаты эксплуатации рассматриваемого объекта (например, Байесовские методы [3]).

В итоге для любого пролетного строения можно выделить следующие факторы, влияющие на его работоспособность: неисправности в результате старения, неисправности в результате аварии, условия эксплуатации, срок эксплуатации. Так, анализируя отказ системы, можно рассмотреть совокупности неисправностей и условий эксплуатации, приводящих к нему. Метод анализа риска должен позволять решать проблему совместного учета указанных факторов.

Рассмотрение неисправностей железобетонных пролетных строений без обзора последствий их развития будет неполным. При рассмотрении последствий неисправностей имеют в виду то, что их развитие привело к отказу конструкции. Фактически, рассматривается выход из строя конструкции пролетного строения. Классифицировать отказы можно по степени ущербов. Все отказы, связанные с крушением, ведут к значительным ущербам, это не вызывает споров, но оставленные без внимания, незначительные на первый взгляд неисправности в своем развитии ведут к не менее серьезным последствиям. Величина последствий зависит от общего состояния конструкции пролетного строения (совокупности присутствующих неисправностей). Например, пропуск нагрузки при уменьшении площади рабочей арматуры может пройти без дополнительных повреждений, может быть осуществлен с ограничением скорости, а может привести к дальнейшему разрушению пролетного строения с вероятной потерей подвижного состава и груза. На сценарий развития событий влияет наличие, например, таких сопутствующих неисправностей, как сверхнормативная толщина балласта, низкая фактическая прочность бетона и др. Для оценки последствий нужно знать, к чему может привести отказ пролетного строения. В связи с этим можно выделить материальные и нематериальные потери. В группе материальных потерь выделяются прямые ущербы и сопутствующие, к первым можно отнести следующие: повреждение объектов инфраструктуры (потеря пролетного строения, повреждение других элементов моста, насыпей, мостового полотна, верхнего строения пути, элементов контактной сети и др.); потеря или повреждение подвижного состава; утрата перевозимого груза; нанесение вреда зданиям и сооружениям, не входящим в транспортную инфраструктуру; компенсация ущерба окружающей среде. К сопутствующим ущербам относится стоимость задержки транспортного потока на срок восстановления мостового перехода или период ограничения скорости. К нематериальным потерям относится ущерб имиджу компании, обслуживающей транспортную инфраструктуру.

В свете вышеизложенного стоит сделать вывод, что метод исследования пролетных строений должен обладать инструментом подробной детализации, для анализа рисков пролетных строений необходимо выявить и связать неисправности, пути их развития и последствия.

Очевидно, что исследование неисправностей пролетных строений имеет цель снижения уровня риска как в части последствий, так и в части реализации опасных сценариев. Для этих целей метод анализа должен позволять ранжировать риски и указывать на развитие неблагоприятного сценария в ранней стадии (например, принятие в эксплуатацию пролетных строений с транспортными и заводскими дефектами).

Получить информацию об исходных характеристиках пролетных строений можно из нормативных источников, проектов пролетных строений и проектов строительного объекта. Данные о допустимых отклонениях характеристик известны

и основаны на расчетах, опыте и статистике. Текущее состояние систем может быть оценено с помощью испытания, обследования и осмотра конструкций.

Система анализа риска возникновения неисправностей железобетонных пролетных строений мостов должна быть достаточно понятна и проста, проведение анализа может осуществить специалист, обладающий знаниями в предметной области, опытом и аналитическим мышлением.

Теперь стоит вернуться к перечню применяемых методик оценки рисков и выбрать подходящие.

По критериям, описанным выше, для анализа опасностей, угрожающих железобетонным пролетным строениям, лучшим является метод анализа дерева неисправностей ФТА. Метод хорошо подходит для выстраивания сценариев неисправностей достаточно изученных систем и анализа их причин. Анализ дерева неисправностей позволяет дать количественную оценку с помощью задания вероятностей неисправностей.

Однако при использовании исключительно такого анализа невозможно оценить последствия отказов. Для полной оценки риска, для анализа последствий подходит метод построения деревьев событий ЕТА. Совместное использование этих методов наиболее полно описывает развитие и последствия неисправностей и отказов.

Немаловажным вопросом является влияние человеческого фактора. Добавлением в тандем ФТА и ЕТА анализа влияния человеческого фактора (HRA, HRQ) позволит рассмотреть большее количество сценариев развития отказов и покажет более полную картину в анализе риска.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 51901–2002. Управление надежностью. Анализ риска технологических систем. М., 2002.
2. Костерев В.В. Надежность технических систем и управление риском: Учеб. пособие. М., 2008. 278 с.
3. Методические рекомендации по оценке рисков на железнодорожной инфраструктуре ОАО «РЖД»: Отчет НИИАС и РАН. М., 2011. 109 с.
4. СТО РЖД 02.037–2011. Управление ресурсами, рисками и надежностью на этапах жизненного цикла (УРРАН). Управление стоимостью жизненного цикла систем, устройств и оборудования хозяйств ОАО «РЖД». М., 2011. 33 с.
5. Хенли Э. Дж., Куамото Х. 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.

S.S. Pribytkov, A.V. Aleksandrov. Choice of an Appropriate Method for Evaluating Risks Connected with Faults Conditions at Reinforced Concrete Bridge Span Structures. Risks analysis methods for faulted reinforced concrete bridge span structures are discussed. Primary attention is given to operating regimes of bridge superstructures as well as to possible consequences of their structural failures.

Keywords: *bridge, superstructure, risk, probability, fault, failure, consequence.*

Прибытков Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Мосты» СГУПС. Область научных интересов: управление содержанием искусственных сооружений на основе анализа их надежности и оценки рисков. E-mail: pss@stu.ru

Александров Андрей Владимирович – аспирант кафедры «Мосты» СГУПС. Область научных интересов: надежность железобетонных пролетных строений. E-mail: aleksandrov_av@inbox.ru