Пути развития автоматизированных систем эксплуатации и содержания автодорожных искусственных сооружений

А.В. Сырков (ОАО «Трансмост»)

Применение методики анализа рисков позволяет выполнить технико-экономическое обоснование систем автоматизации искусственных сооружений, в том числе мониторинга их технического состояния. Показано, что оснащению системами мониторинга инженерных конструкций подлежат не только внеклассные объекты с большими пролетами, высотой и другими уникальными параметрами, но и отдельные рядовые искусственные сооружения с повышенной критичностью рисков. Определены и намечены пути и новые концептуальные направления дальнейшего развития автоматизированных систем в данной области.

Ключевые слова: интеллектуальные транспортные системы, системы мониторинга инженерных конструкций, анализ рисков, критичность риска, стационарные и мобильные системы.

Существует устойчивая мировая тенденция повышения доли автоматизированных процессов в системах эксплуатации и содержания мостов, путепроводов, тоннелей, подпорных стен и т. п. автодорожных искусственных сооружений (ИС). При реализации этой тенденции далеко не всегда сложное и дорогостоящее оборудование и ПО применяется эффективно и экономически оправданно.

Проектирование, строительство и эксплуатация автомобильных дорог, в том числе автодорожных ИС, традиционно считаются одними из самых консервативных видов производственной деятельности в сфере транспорта. Действительно, практически исчерпаны возможности создания новых статических систем, инновации появляются в основном за счет комбинирования известных решений, создания уникальных форм и размеров сооружений, внедрения новых материалов и автоматики. Именно в области автоматики наблюдается наиболее динамичный рост инноваций.

В сфере содержания и эксплуатации ИС автоматизированные системы наиболее востребованы, и отмечается устойчивая мировая тенденция к их распространению в дорожном хозяйстве. Это, например, различные интеллектуальные транспортные системы (ИТС), АСУ дорожным движением (АСУДД), системы мониторинга инженерных систем (СМИС) и многие др.

На современном этапе обеспечен широкий выбор качественных и постоянно совершенствующихся технических средств и ПО, применяемых в этих системах. Однако стоимость их устройства и эксплуатации существенно увеличивает затраты на функционирование транспортной инфраструктуры, далеко не всегда экономически оправдывая автоматизацию процессов эксплуатации и содержания ИС. Главной проблемой здесь является слабость технико-экономических обоснований (ТЭО). Нерешенность этой проблемы не только снижает коэффициент полезного действия (КПД) внедряемых систем, но и тормозит развитие новых сфер внедрения автоматизации.

Рассмотрим состояние обозначенной проблемы на примере системы мониторинга инженерных конструкций (СМИК) ИС, как наиболее близкой автору по роду деятельности. Согласно ГОСТ Р 22.1.12-2005, имеющего статус обязательного документа при проектировании строительства, реконструкции и капитального ремонта инженерных сооружений, СМИК подлежат обязательной установке на определенных категориях объектов капитального строительства, среди которых можно выделить группы, проектные характеристики которых соответствуют ряду ИС:

— высота более чем 100 м;

— пролеты более чем 100 м;

— наличие консоли более чем 20 м;

— заглубление подземной части ниже планировочной отметки земли более чем на 10 м;

— наличие конструкций и конструкционных систем, в отношении которых применяются нестандартные методы расчета с учетом физических или геометрических нелинейных свойств либо разрабатываются специальные методы расчета.

Положения ГОСТ Р 22.1.12-2005 в части СМИК направлены на достижение двух основных групп целей:

— предотвращение и снижение тяжести последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС), связанных с политико-социальными факторами (терроризм, вандализм, халатность);

— предотвращение и снижение тяжести последствий ЧС, связанных с природными и техногенными факторами (воздействие окружающей среды, эксплуатационных и аварийных нагрузок).

Прием в эксплуатацию вышеуказанных объектов без оборудования их СМИС (включая СМИК), не допускается. Мотивация столь быстрого роста статуса значимости инженерных сооружений, в том числе и ряда ИС, по критерию безопасности со стороны государственных структур МЧС вполне понятна и оправдана — это стремление противостоять растущим угрозам природных, техногенных катастроф и деятельности террористических организаций. Учитывая серьезность и опасность этих вызовов для жизни и здоровья людей, об экономическом обосновании здесь речь не идет. В то же время нагрузка на бюджет, дефицит которого и без того постоянно повышается, в результате обязательного оснащения СМИС и СМИК теперь уже десятков ИС, существенно возрастает.

Таким образом, налицо проблема, последствия развития которой пока явно не дают о себе знать, но уже ощутимо выражаются в оттоке части дефицитного финансирования дорожной отрасли на массовое оборудование средствами СМИС и СМИК ИС на автомобильных дорогах. Вообще говоря, само по себе улучшенное оснащение ИС автоматизированными инструментами контроля безопасности — явление положительное, однако не всегда эффективное. Со стороны Федерального дорожного агентства (ФДА) Минтранса РФ уже давно ведется работа по внедрению и методическому обеспечению СМИК ИС, которые в ОДМ 218.4.002-2008 получили наименование систем непрерывного мониторинга мостов (СНММ). Основные цели создания СНММ формулируются для двух основных его разновидностей:

— для контрольного мониторинга — повышение безопасности и эксплуатационной надежности ИС;

— для исследовательского мониторинга — совершенствование проектирования, строительства, эксплуатации и оценки эффективности новых конструктивно-технологических решений ИС.

Анализируя вышеприведенные нормативный (обязательный ГОСТ) и методический (рекомендательный ОДМ) документы, можно заключить, что их цели в значительной степени совпадают (рис. 1).

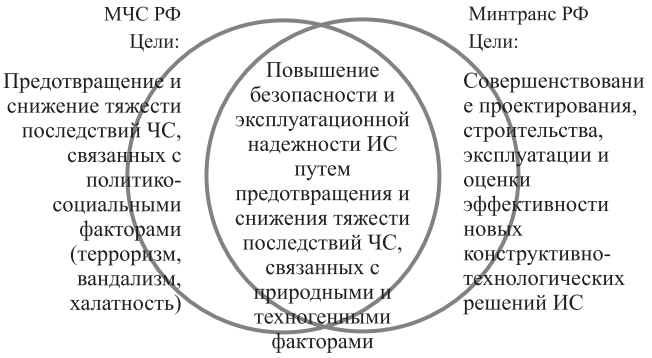

Рис.1. Общность основных целей госструктур при создании автоматизированных систем мониторинга

Далее по тексту в целях единообразия терминологии, будем именовать автоматизированную систему мониторинга ИС, цели создания которой отвечают центральной области рис. 1, как СМИК. Общая формулировка в ГОСТ: «СМИК: подсистема СМИС, осуществляющая в режиме реального времени контроль изменения состояния оснований, строительных конструкций зданий и сооружений; сооружений инженерной защиты, зон схода селей, оползней, лавин в зоне строительства и эксплуатации объекта мониторинга с целью предупреждения ЧС», — не противоречит определению СНММ.

Обозначенная выше проблема не являлась бы таковой или не имела бы остроты при профиците бюджета и избытке финансирования. Однако, исходя из реалий современного положения вещей, выделение средств на дорогостоящие системы мониторинга, как правило, для новых ИС, автоматически ограничивает возможности финансирования мероприятий на внедрение СМИК для старых ИС с высокой степенью физического и морального износа, а также на их содержание, ремонт и реконструкцию. При этом в нормах отсутствуют методики и критерии обоснования требуемой номенклатуры СМИК. То есть обязательное требование наличия СМИК на соответствующих ИС может выродиться, с одной стороны, в формальное исполнение в виде ничтожно малой по объему системы или, наоборот, перегруженной и сверхзатратной. При этом как первый, так и второй из этих крайних вариантов могут оказаться несоответствующими реальным практическим потребностям.

Примеры организации обоснованных по критериям теории надежности СМИК и ранее освещались автором на страницах журнала «Автоматизация в промышленности». Это и система мониторинга моста «Факел» в Салехарде [1] (рис. 2 а), и комплексная

а)

б)

Рис.2. Объекты-представители характерных групп ИС: а) внеклассный вантовый мост «Факел» в г. Салехарде, обеспеченный системой мониторинга конструкций (максимальный пролет 100 м); б) обрушившийся типовой средний мост через реку Тартас в пос. Северный Новосибирской области с максимальным пролетом 21 м (фото Ю.В. Рыбалова).

система мониторинга моста на о. Русский во Владивостоке [2]. Автор участвовал в создании подобных систем также для Большого Обуховского моста через Неву и путепровода в створе пр. Александровской фермы в Санкт-Петербурге. Все это новые, внеклассные, вантовые мосты.

На рис. 2 б показан типовой средний мост через реку Тартас в пос. Северный Новосибирской области, обрушившийся после 26 лет эксплуатации. Статистические данные показывают, что большинство чрезвычайных ситуаций в виде обрушений мостовых конструкций происходят в РФ как раз на подобных объектах, характеристики которых (высота, пролет и т. п.) делают оснащение СМИК необязательным ни при каких условиях.

Вышеприведенные данные отнюдь не означают, что автор ратует за оснащение СМИК всех ИС. Наоборот, целью решения выявленных проблем является снижение затрат из бюджетов всех уровней РФ. Для комплексного их решения предлагается дополнить существующие нормы и методики инновационной на данный период для дорожной отрасли РФ методикой анализа рисков. Вспомним распространенный постулат о том, что инновация — это не всякое новшество или нововведение, а только такое, которое серьезно повышает эффективность действующей системы. В части рассматриваемого комплекса проблем анализ рисков является именно таким инструментом.

Заметим, что анализ рисков уже применялся автором для обоснования системы эксплуатации, содержания и мониторинга уникального внеклассного моста на остров Русский через пролив Босфор Восточный во Владивостоке. В процессе этой работы были определены потенциальные опасности, спрогнозированы возможные последствия, оценены их тяжесть и вероятность возникновения отказов [2]. Аналогичные методики оценки риска широко применяются в мировой практике. Например, в европейских нормах (Eurocode 1 — Actions on structures — Part 1–7) количественно степень риска выражается следующей формулой:

$$R = \sum_{i=1}^{N_H} P(H_i) \sum_{j=1}^{N_P} \sum_{k=1}^{N_S} P(D_j \mid H_i) P(S_k \mid D_j) C(S_k), \qquad (1)$$

где: N_H — число опасностей H_i; N_D — число прямых (локальных) повреждений D_j; N_S — число последующих типов поведения S_k; $P(H_i)$ — вероятность возникновения опасности H_i; $P(D_j \mid H_i)$ — условная вероятность возникновения прямого повреждения D_j из-за опасности H_i; $P(S_k \mid D_j)$ — условная вероятность возникновения поведения конструкции из-за прямого повреждения D_j; $C(S_k)$ — последствия поведения конструкции S_k в денежном выражении.

При всех своих достоинствах, формула (1) сложна для массового применения. Определение вероятностей, являющихся в ней основными аргументами, требует обширного статистического материала, в то время как в реальной практике трудно собрать достаточно большую выборку нежелательных событий и их последствий. Соединение в одной формуле вероятностных и стоимостных показателей еще более усложняют ее и делают R комплексным показателем, в котором сглажено значение тяжести последствий для жизни и здоровья людей (косвенно эти последствия учитываются в $C(S_k)$ в денежном выражении).

Существует более простая методика, основанная на национальном стандарте РФ (ГОСТ Р 51901.1-2002), адаптированная автором к конструкциям ИС и примененная в экспериментальном порядке для нескольких уникальных объектов, в том числе для упомянутого моста на остров Русский. Результаты применения данной методики были освещены на международном семинаре IABSE в Хельсинки [3] и встретили понимание ведущих мировых специалистов в области надежности мостов.

В рассматриваемой методике риск для каждого элемента ИС, отказ которого потенциально опасен, оценивается количественно параметром критичности риска K_{ij}. Оценка безотказности как количественной характеристики надежности или вероятности безотказной работы может быть выполнена применительно к городским и автодорожным ИС на основе исследований для железнодорожных мостов [4], где методом множественного регрессионного анализа получена зависимость:

$$K_б = 391{,}3745 P_c - 866{,}2475 P_{c2} + 479{,}44 P_{c3}. \qquad (2)$$

где $K_б$ — относительный показатель безотказной работы ИС в баллах; P_c, P_{c2}, P_{c3} — вероятности безотказной работы. Теоретически вероятность безотказной работы можно вычислить, однако для этого требуются, как и в случае формулы (1), большие массивы статистических данных. Поэтому на практике данные методы применяются в основном только при разработке норм с использованием массивов данных, полученных на испытательных стендах или в лабораториях. В сфере эксплуатации больших мостовых парков, насчитывающих сотни и тысячи единиц ИС, единственным реально применимым методом остается ранжирование вероятностей возникновения нежелательных событий по индексам, определяемым экспертно, с учетом опыта эксплуатации подобных объектов и появления присущих им дефектов в определенных условиях эксплуатации.

В адаптированной автором и применяемой для ИС методике индекс вероятности отказа V_i отрицательно коррелируется с классом безотказности элемента, принятым по [4]: P_i = 0,9999 (редкий отказ) — V_i = 1; P_i = 0,9990 (возможный отказ) — V_i = 2; P_i = 0,9900 (вероятный отказ) — V_i = 3; P_i = 0,9750 (частый отказ) — V_i = 4. (табл. 1).

Ранжирование элементов ИС в зависимости от тяжести последствий отказа, которое производится экспертно для каждого выделенного элемента (макроэлемента) ИС, приведено в табл. 2.

Таблица 1. Ранжирование вероятности безотказной работы элементов ИС

Показатель	Индекс вероятности отказа элемента МС при возникновении i – ой опасности V_i			
	1	2	3	4
Безотказность элемента МС	$P_i = 0{,}9999$	$P_i = 0{,}9990$	$P_i = 0{,}9900$	$P_i = 0{,}9750$

Таблица 2. Ранжирование элементов ИС в зависимости от тяжести последствий отказа

Показатель	Индекс тяжести последствий отказа j – того элемента S_j			
	1	2	3	4
Опасность эксплуатации	Незначительные последствия	Серьезные последствия	Значительные последствия	Катастрофические последствия

Незначительные последствия, оцениваемые 1 баллом, означают, что отказ элемента может вызвать снижение долговременных эксплуатационных характеристик объекта (например, снижение долговечности). Серьезные последствия (2 балла) — отказ элемента может вызвать затруднение текущей эксплуатации объекта (например, снижение скорости), повреждение транспорта, ранение людей. Значительные последствия (3 балла) — отказ элемента может вызвать ограничение эксплуатационных характеристик объекта (например, кратковременное прекращение движения, частичное закрытие движения, снижение грузоподъемности), утрату отдельных транспортных средств, ранение и гибель нескольких людей). Катастрофические последствия — отказ элемента может вызвать невозможность эксплуатации объекта в течение длительного периода, утрату многих транспортных средств, гибель многих людей. Тяжесть последствий является характеристикой, зависящей от конструктивных особенностей элемента, его дислокации, интенсивности движения по ИС и под ним и подлежит корректировке только при изменении этих параметров.

Критичность риска возникновения отказа элемента K_{ij} рассчитывается как произведение V_i на S_i, составляя значение в диапазоне 1...16 в зависимости от тяжести последствий отказа того или иного элемента МС и вероятности отказа:

$$K_{ij} = V_i S_j, \qquad (3)$$

где: V_i — индекс вероятности отказа элемента МС при возникновении i — той опасности ($4 > i \geqslant 1$); S_j — индекс тяжести последствий отказа j — того элемента ($4 > j \geqslant 1$).

Матрица «вероятность — тяжесть последствий» принимает при этом для отдельного элемента МС вид, приведенный на рис. 3. Область критичности рисков $16 \geqslant K_{ij} \geqslant 8$, выделенная коричневым цветом, является недопустимой для нормальной эксплуатации ИС. Область $6 \geqslant K_{ij} \geqslant 3$ является областью допустимого, пограничного риска. И только область $2 \geqslant K_{ij} \geqslant 1$ можно считать относительно безопасной.

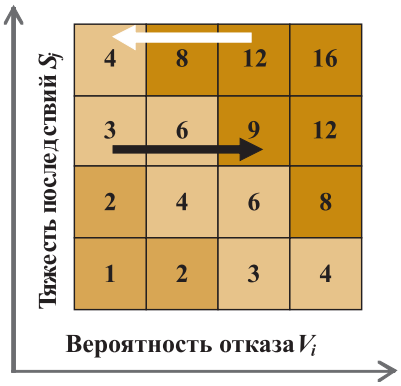

Рис.3. Матрица критичности рисков

Белая стрелка в верхней зоне рис. 3 показывает снижение критичности риска для нового объекта, аналогичного представленному на рис. 2 а типу, при оснащении его автоматизированным мониторингом СМИК. Для данного уникального объекта даже без существенных дефектов потенциальная тяжесть возможных последствий от обрушения равнялась $S_j = 4$. Вероятность наступления отказа при отсутствии контроля оценивалась индексом $V_i = 3$. То есть критичность риска K_{ij} для данного ИС без СМИК равнялась 12. Устройство СМИК, обязательное по ГОСТ для аналогичных ИС, снижает вероятность отказа до уровня, соответствующего индексу $V_i = 1$, что при неизменной потенциальной тяжести последствий дает $K_{ij} = 4$. В данном случае главным инструментом управления рисками является СМИК, которая позволяет своевременно предупредить диспетчерскую службу о ненормативном поведении конструкций, а следовательно, предпринять меры по прекращению доступа на ИС людей, произвести профилактические и чрезвычайные анти-аварийные действия.

Черная стрелка на рис. 3 характеризует ситуацию, сложившуюся к моменту обрушения ИС, изображенного на рис. 2 б. Тяжесть последствий при обрушении данного моста соответствует «значительной» с $S_j = 3$. Когда мост не имел критических дефектов, индекс вероятности соответствовал $V_i = 1$, критичность риска $K_{ij} = 3$ была на допустимом уровне. Однако за год до обрушения на одной из опор было обнаружено начало критической деформации. Вероятность отказа при этом значительно возросла: $V_i = 3$, соответственно повысилась и критичность риска $K_{ij} = 9$, сместившись в недопустимую для нормальной эксплуатации ИС область.

Для управления рисками в первую очередь следовало повысить периодичность контроля опасной зоны. Однако традиционный периодический контроль, даже еженедельный, в данном случае был малоэффективен. В подобных случаях требуется именно непрерывный мониторинг СМИК (СНММ). В последнее десятилетие в РФ произошли уже несколько обрушений. Но их можно было бы избе-

жать при повышении целенаправленности и мобильности блоков СМИК, которые можно было бы переустанавливать с объекта на объект по мере изменения критичности рисков. Это повысило бы КПД СМИК в результате прямой экономии средств на разборку и восстановление аварийных ИС и косвенной экономии от снижения издержек пользователей автодорог.

Следует отметить, что без единой системы обоснования, стоимость «обязательных» СМИК часто неоправданно высока, так как объем оборудования и ПО ничем не лимитируется. Например, автоматическое отслеживание раскрытия деформационных швов и т.п. конструкций часто является дорогостоящим, но далеко не первоочередным мероприятием. Критичность рисков в этих случаях не превышает $V_i = 3$. При комплексной системе анализа рисков, если ее реализовать в виде подпрограммы аналитической информационной системы (АИС), второстепенные мероприятия будут отсеиваться, позволяя высвобождать средства на «точечные», но высокоэффективные мобильные комплексы СМИК для ИС, не попадающих в разряд обязательных, но имеющих высокие текущие критичности рисков.

Выводы

Чтобы повысить эффективность автоматизированных систем мониторинга ИС (СМИК), следует внедрять действенные методики анализа рисков. Для достижения наибольшего эффекта по критериям безопасности, надежности и экономии необходима разработка ПО по анализу рисков в виде приложения к действующим АИС для больших совокупностей ИС, что позволит обоснованно определять приоритетность, уточнить объемы и повысить КПД средств СМИК.

Кроме уникальных и внеклассных объектов, оснащению СМИК подлежат и отдельные элементы других ИС, критичность рисков которых недопустима для нормальной безопасной эксплуатации в силу наличия опасных дефектов, неизвестных и скрытых областей ответственных ключевых деталей несущих конструкций.

Наряду с долговременными стационарными СМИК следует развивать мобильные локальные системы (по возможности с беспроводной связью), способные легко переустанавливаться при снижении критичности риска до допустимых пределов.

Список литературы

1. *Сырков А.В.* Модернизация системы управления техническим состоянием моста «Факел» в г.Салехарде // Автоматизация в промышленности. 2010. №6.
2. *Сырков А.В., Крутиков О.В.* Оптимизация жизненного цикла моста на остров Русский во Владивостоке средствами анализа рисков и мониторинга // Автоматизация в промышленности. – 2012. - №9. С45-50.
3. *Syrkov A.V.* To the question of risk management for failures of cable-stayed and prestressed bridges in Russia // Proceedings of IABSE Workshop on Safety, Failures and Robustness of Large Structures, Helsinki, February 2013.
4. *Бокарев С.А.* Управление техническим состоянием искусственных сооружений железных дорог России на основе новых информационных технологий. Новосибирск: Изд. СГУПСа. 2002.

Сырков Антон Владимирович *– канд. техн. наук, начальник отдела жизненного цикла ОАО «Трансмост».*