

УДК 620.179
ВЕРОЯТНОСТНАЯ КОНЦЕПЦИЯ ОЦЕНКИ РЕСУРСА ТЕХНИЧЕСКИХ
ОБЪЕКТОВ ПО ДАННЫМ МНОГОСЕНСОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В. Л. ВЕНГРИНОВИЧ
«ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»
Минск, Беларусь

Дальнейшее развитие науки и технологий требует создания средств самозащиты и предупреждения разрушений, аварий и катастроф, угрожающих как развитию общества, так и самой цивилизации. Понятие системной безопасности пронизывает все аспекты человеческого существования и человеческой деятельности. Безопасные системы – это в идеале такие системы, функционирование которых не приводит к возникновению аварий и катастроф и, которые продолжают функционировать даже при выходе из строя одного или нескольких элементов. Создание систем мониторинга (СМ) опасных объектов конструкций и сооружений преследует цель снижения рисков функциональных отказов, аварий и катастрофических ситуаций при строительстве и эксплуатации объекта.

Быстро расширяющееся применение систем технического мониторинга для оценки текущего состояния, надежности и ресурса потенциально опасных объектов: высотных и уникальных зданий, магистральных трубопроводов, мостов, объектов химии и нефтехимии, предполагает решение целого ряда технических задач, в том числе, фундаментальных. Одна из них сводится к задаче оценки технического состояния и ресурса по данным многосенсорных измерений, включая измерения текущих параметров различных внешних воздействий. Учитывая значительные материальные затраты на создание разветвленных СТМ, по существу, речь идет о решении задачи повышения достоверности прогноза при минимальном составе сенсорного набора, размещенного оптимальным образом, причем, датчики которого обладают конечными погрешностями в условиях меняющихся температурных и других воздействий. Очевидно, что задача является некорректной обратной (прямая задача предполагает оценку показаний датчиков в результате тех или иных изменений состояния отдельных элементов конструкции).

Будем считать *надежность* показателем качественного состояния конструкции и ее элементов. Количественной мерой надежности может служить вероятность P функционального отказа элемента или конструкции за время T , или иным образом: *надежность* – есть время T_1 , за которое с заданной вероятностью P_1 элемент или конструкция не выйдет из строя. Надежность элемента понижается при наличии в нем повреждений или дефектов. Нештатные воздействия, например, импульсные, могут также снижать показатели надежности.

Надежность может быть определена с некоторой неопределенностью. Байесовская статистика является базисом для количественного представления неопределенности через случайные переменные, которые вводятся с по-

мощью функций плотности вероятности и соответствующих параметров. Повреждения системы, вызванные повреждением составляющих, назовем *прямыми последствиями*. Они не приводят к потере функциональности системы. Комбинация событий, состоящих в повреждении объекта, вызывает *косвенные последствия*, которые могут приводить к потере функциональности системы, в том числе, к ее обрушению. *Косвенные последствия* играют основную роль в оценке рисков системы в целом и их моделированию должна придаваться особая роль. Введем три основных характеристики поведения наблюдаемой системы, а именно: *воздействие*, *уязвимость*, *робастность*.

Повреждения объекта в связи с повреждениями составляющих элементов рассматриваются как *прямые последствия*. *Уязвимость* объекта ассоциируется с оценкой рисков, вызванных именно *прямыми последствиями*.

Множественные или катастрофические единичные воздействия, ведущие к повреждению элементов и вызывающие потерю функциональности, например устойчивости объекта, рассматриваются как *косвенные последствия*, играющие основную роль в оценке рисков, моделировании поведения и в оценке *робастности*. Очевидно, что интегрирование множественных *воздействий* наиболее проблематично.

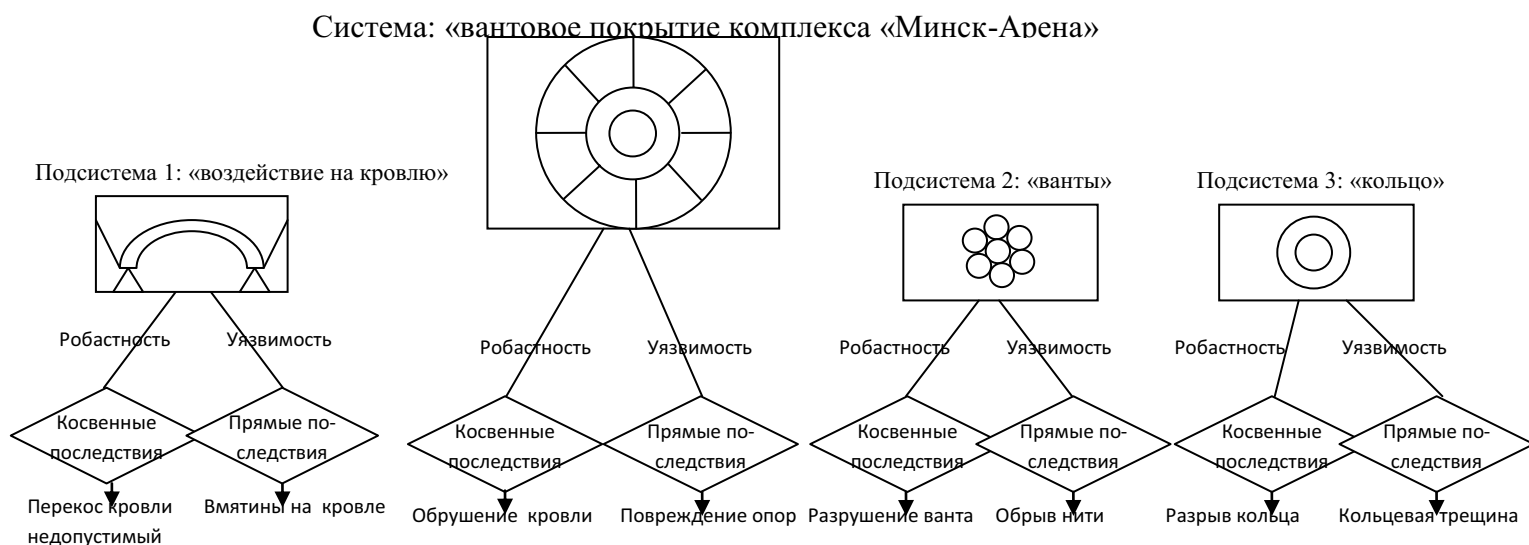


Рис. 1. Характеристика базовой системы «Вантовое покрытие комплекса «Минск-Арена» и инфраструктура подсистем объекта в терминах: *воздействие*, *уязвимость*, *робастность*

На рис.1 показана для примера характеристика базовой системы «Вантовое покрытие комплекса «Минск-Арена» и инфраструктура подсистем объекта в терминах: *воздействие*, *уязвимость*, *робастность*. Вантовое покрытие представляет собой набор вантовых тросов, которые натянуты между стеновыми опорами (наружные крепления) и несущим кольцом (внутренние крепления).

Риск R_e , ассоциированный с одним конкретным *воздействием* e , можно оценить с помощью произведения вероятности возникновения этого *воздействия*, p_e , и последствий c_e , вызванных этим событием:

$$R_e = p_e c_e \quad (1)$$

В предлагаемом подходе риск и его последствия оцениваются в некотором стоимостном эквиваленте, например, монетарной стоимости элементов, числе человеческих потерь, результатах воздействий на окружающую техногенную среду, или стоимости экологических последствий.

Если за время T (например, один год) возможно возникновение нескольких независимых событий $N(T)$, каждое с вероятностью $p_{n(T)}$ и соответствующими последствиями c_n , то суммарный риск соответственно возрастает:

$$R_e = \sum_{n=0}^N p_{n(T)} c_n \quad (2)$$

Если $N[n(T)]$ – ожидаемое число событий определенного типа в течение времени T , то суммарный риск является интегрированным риском:

$$R_e = \sum_{n=0}^{\infty} P_{n(T)} c_n n. \quad (3)$$

Один из самых значительных по последствиям рисков является риск частичного или полного обрушения конструкции, характеризующийся лавинным нарастанием последствий каждого события, связанного со сменой состояний системы. Необходимо отметить, что риски могут быть представлены в различных формах, например, в виде функций распределения последствий, показывающих с какими вероятностями различные стадии последствий могут возникать.

Очевидно, что управление рисками разрушения конструкции предполагает их минимизацию. Минимизация рисков может осуществляться различными способами. Наиболее простой состоит в обеспечении необходимого запаса критических параметров, таких как прочность, сопротивление коррозии, устойчивость и др. за счет увеличения металлоемкости конструкции, сечений железобетонных элементов и т.п. Этот наиболее популярный, но наименее эффективный, по существу экстенсивный путь до сих пор наиболее широко применяется в проектировании сооружений и машин. Машинное проектирование позволило значительно сузить область применения этой концепции, однако научно разработанные критерии, основанные на количественном анализе рисков, до сих пор отсутствуют, по крайней мере, на стадии эксплуатации конструкции и в процессе ее строительства. В то же время системы непрерывного мониторинга, как сложные дорогостоящие информационные системы, не могут создаваться, с одной стороны, без их оптимизации, и, с другой, без обоснованных критериев принятия решений по данным

многосенсорных измерений. В табл. 1 показаны основные научные проблемы, лежащие в основе создания эффективных СМ, и возможные подходы к их решению, принятые в настоящей работе.

Табл. 1. Основные научные проблемы

№	Научные проблемы	Возможные подходы к решению
1	Оптимизация номенклатуры, количества и мест установки датчиков непрерывного наблюдения.	Анализ и минимизация рисков прямых и косвенных последствий при критических <i>воздействиях</i> , снижение <i>уязвимости</i> и повышение <i>робастности</i> конструкции.
2	Метрологическое, инфраструктурное и программное обеспечение функционирования датчиков и средств передачи информации.	Физические принципы построения датчиков, метрология и алгоритмы их функционирования.
3	Оптимизация принятия решений по данным многосенсорной информации.	Анализ многосенсорной информации и минимизация рисков прямых и косвенных последствий при критических <i>воздействиях</i> .
4	Оценка начальных значений измеряемых параметров.	Разработка методов и средств инструментального измерения, контролируемых СМ.

Требует специального пояснения п. 4 табл. 1, касающийся оценки начальных значений измеряемых параметров. Поскольку большинство датчиков (например, датчики деформаций, перемещений или инклинометры) измеряют приращения этих параметров, а не их абсолютные значения, знание начального состояния становится весьма актуальным. Задача определения начальных значений для установки их в измерительную систему относится к категории задач неразрушающего или слабо повреждающего контроля и в настоящем докладе не рассматривается. Научная проблематика задач по п. 1 и п. 3, как видно, тесно взаимосвязана. В основе лежит анализ и минимизация рисков прямых и косвенных *последствий* при *воздействиях*, которые можно считать критическими.

Выражения для расчета состояний повреждения по данным измерения датчиками соответствующих параметров записываются в виде решения обратной задачи минимизации:

$$\hat{n}_v = \arg \min \left\{ \sum_{\mu=1}^{I_m} [r_{\mu}^m - \hat{r}_{\mu}^c]^2 + \lambda_1 \sum_{v=1}^{I_v} \hat{n}_v \ln(\hat{n}_v) : n(x_1) \in U^{f_1} \right\} \quad (4)$$

где r_{μ}^m – измеренные датчиками текущие значения параметров элементов объекта; $\hat{r}_{\mu}^c$ – рассчитанные с помощью выбранной физической модели значения параметров элементов.

Формулы типа (4) дают ключ к вычислению опасных состояний элементов конструкций по данным многосенсорных измерений датчиками СМ, установленными на конструкции. Эти состояния должны быть заданы в пространствах соответственно U^{f_1} , U^{f_2} и U^{f_3} , например, в пространстве величин *надежности* набора элементов конструкции. Для этого *надежность* должна быть математически определена. В настоящей работе предлагается определить *надежность* как интеграл вероятности величины, например, отклонения измеренного параметра при известном диапазоне $\{a, b\}$ допустимых отклонений данного параметра, заданных нормативным документами.

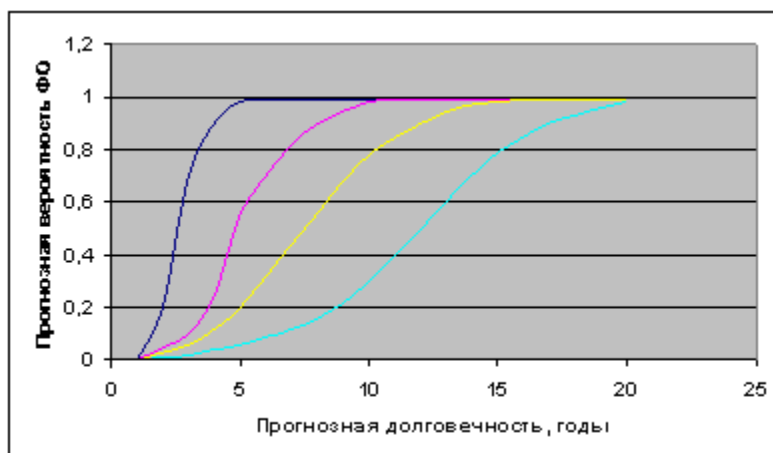


Рис. 2. Кривые, характеризующие прогнозную вероятность в зависимости от количества сенсоров в СМ

Достоверность прогноза состояния зависит от количества датчиков в системе. Ясно, что увеличивать это число бесконечно невозможно. Отсюда – важность задачи оптимизации по формуле (4). На рис 3 показана схема решения задачи оптимизации обнаружения риска по данным многосенсорного наблюдения за объектом.

Показатель надежности с учетом допущенных дефектов K_d является количественной вероятностной характеристикой допустимости отклонений измеренных при диагностировании параметров объекта, в частности, толщины и твердости металла, для которых нормативами установлены предельные значения. К таким параметрам объекта могут быть также отнесены размер зерна, отклонения геодезических и геометрических параметров и другие, выраженные количественно.

Показатель K_d – есть вероятность безотказной работы, P_d объекта по данному параметру. По смыслу она характеризует вероятность того, что по результатам представительной выборки измеренных значений этого параметра можно утверждать, что в объекте в целом значения данного параметра не выйдут за нормативные предельные значения: нижнего a и верхнего b , или одного из них.

Если для величины дефекта устанавливается диапазон $\{a, b\}$, то

$$K_{\partial} = P_{\partial} = \Phi\left(\frac{\bar{x} - a}{\sigma_k}\right) + \Phi\left(\frac{b - \bar{x}}{\sigma_k}\right), \quad (5)$$

где $\Phi(U)$ – интеграл вероятности (определяется по таблицам). Формула 5 дает значения вероятности того, что указанный параметр во всем объекте находится в диапазоне $\{a, b\}$; $\bar{x}$ – математическое ожидание величины данного параметра по результатам оцениваемой выборки; σ_k – стандартное отклонение величины измеряемого параметра.

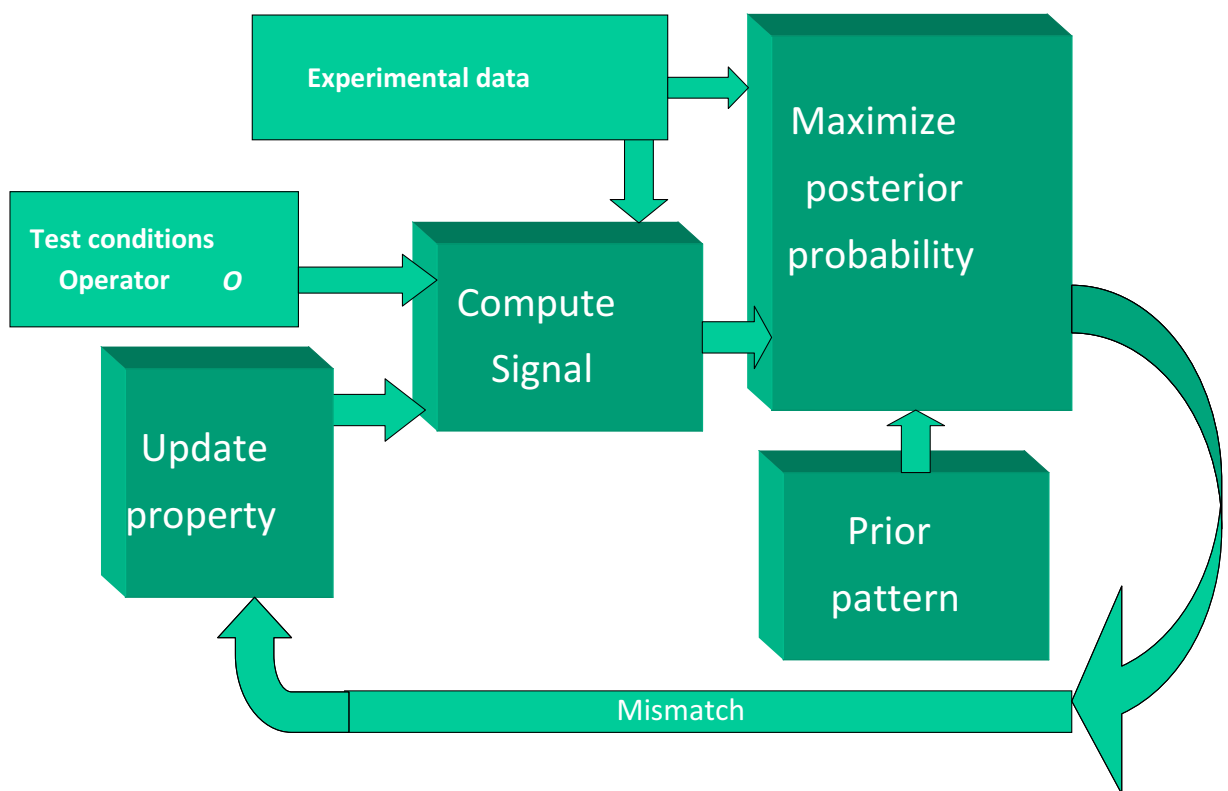


Рис. 3. Схема вычисления риска разрушения по данным многосенсорных измерений

Выводы.

1. В статистической Байесовской постановке исследована проблема оценки рисков опасных состояний конструкций, подвергаемых мониторингу. Ключевыми понятиями в теории являются воздействие, уязвимость и робастность системы

2. Предложена общая теория количественного анализа рисков повреждения, полного и частичного разрушения элементов и конструкций в целом.

3. Рассмотрена проблема минимизации рисков на стадиях проектирования объекта и функционирования системы мониторинга

4. Разработана системы мониторинга для ряда уникальных объектов в Республике Беларусь.