

УДК 685.1

Е.В. Брежнев

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков*

## МЕТОД ДИВЕРСИФИКАЦИИ ОЦЕНОК БЕЗОПАСНОСТИ КРИТИЧЕСКИХ ИНФРАСТРУКТУР В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

*В статье предложен подход к диверсификации оценок безопасности критических инфраструктур (КИ) в условиях неопределенности. КИ характеризуются сложностью поведения, высокой неопределенностью, нелинейностью входных и выходных параметров. Использование одной определенной группы методов риск-анализа не обеспечивает требуемый уровень достоверности оценок безопасности. В качестве оценки безопасности КИ рассматривается критичность состояния, как комбинация вероятности аварии и тяжести ее последствий. Предложены этапы параллельной интеграции методов оценки безопасности.*

**Ключевые слова:** критическая инфраструктура, риск-анализ, неопределенность, диверсность.

### Введение

#### Постановка проблемы и анализ литературы.

Анализ безопасности КИ основан на применении специальных методов и технологий для проведения системного анализа и контроля опасностей на протяжении всего ее жизненного цикла (ЖЦ). Идентификация, классификация, оценка и управление рисками, контроль остаточного риска являются основными этапами риск-анализа КИ. Эффективное решение проблемы управления рисками КИ невозможно без интеграции различных методов оценки безопасности, использующих различную входную информацию, но позволяющих определить идентичный выходной показатель безопасности, например, величину риска, вероятность аварии, т.д.

КИ характеризуется неопределенностью поведения, нелинейностью изменения гетерогенных параметров, наличием большого объема данных, выраженных в различных квалиметрических шкалах. Это приводит к тому, что использование только одной группы методов риск-анализа не обеспечивает требуемый уровень достоверности оценок безопасности КИ.

На сегодняшний день для оценивания безопасности КИ применяются следующие группы методов: аналитические; экспериментальные; методы, основанные на статистическом моделировании; логико-

графические; нечеткие методы; качественные методы; экспертные методы [1 – 3]. Каждая группа методов характеризуется индивидуальными преимуществами и недостатками, может применяться независимо друг от друга. Кроме того, каждая группа методов риск-анализа может оперировать с типом входных данных определенной физической природы.

Применение только одной группы методов, связанной, например, с предпочтениями эксперта, приводит к потере части информации, обработка которой не может быть проведена в силу ограничений используемых методов. На сегодняшний день проблеме разработки подходов к интеграции методов оценки безопасности КИ уделяется недостаточно внимания. Так, например, классическая фазовая модель интеграции количественных и качественных методов была представлена еще в 50-е годы в работе А. Бартона и П. Лазарсфельда [4]. В работе предложено использовать качественные методы исследования для разработки и формулирования гипотез, связанных с поведением сложной системы. Эти гипотезы должны быть проверены по мере накопления статистического материала с помощью количественных методов. В работе не содержится рекомендаций и подходов к интеграции этих методов.

Классическая методологическая триангуляция является расширенной моделью интеграции методов.

Согласно ей, качественные и количественные методы хотя и различны, но методологически сопоставимы. По мнению авторов [5], результаты, достигнутые при помощи одного измерительного инструмента, должны быть дополнены или сверены с результатами измерений, полученных при помощи других инструментов. Данный шаг позволит получить сведения о степени совпадения или расхождения результатов, полученных различными методами. В работе также не рассматриваются аспекты интеграции этих методов, связанные например, с совместимостью методов, с использованием различных шкал оценок. Следует отметить, качественные методы могут рассматриваться не только как инструментарий предварительной оценки, но и как дополнительное средство проверки и уточнения количественных оценок.

В этой связи представляет интерес задача, связанная с интеграцией методов оценки безопасности для повышения обоснованности решений по выбору стратегий снижения рисков КИ.

Таким образом, усложнение структуры и поведения КИ приводит к усложнению проблемы оценивания и обеспечения ее безопасности. Отсутствие технологий интеграции различных методов обуславливает актуальность разработки подходов к интеграции оценок, полученных с использованием различных методов оценки безопасности КИ в условиях неопределенности.

**Цель статьи** – разработка подхода к интеграции оценок безопасности КИ в условиях неопределенности.

## Основной материал

При оценивании безопасности КИ предлагается рассматривать два способа интеграции методов: последовательный и параллельный. При последовательной интеграции для получения одного параметра безопасности применяется множество методов, причем выходные параметры одного метода являются входными параметрами для другого метода. Главным требованием является совместимость методов. Основное достоинство – снижение количества требуемых входных данных.

Параллельная интеграция предусматривает проведение параллельных вычислений одного и того же параметра двумя, тремя группами методов. В рамках данного подхода рассматривается пример параллельной интеграции методов оценивания безопасности КИ. Параллельная интеграция позволяет уточнить оценки безопасности, полученные различными методами.

При анализе безопасности КИ должен применяться принцип интеграции и диверсификации методов риск-анализа. Идея интеграции и диверсификации оценок состоит в использовании разных методов с исходными данными различной (диверсной) квалиметрической природы для получения параметров безопасности КИ. Так, например, величина риска аварии может быть получена как на основе

традиционных вероятностных подходов, так и с использованием нечетких продукционных систем. В этом контексте количественные и качественные методы являются диверсными методами, использующими разнородные входные данные.

Схематично, принцип интеграции и диверсификации методов оценки безопасности на примере матричных (ФМЕСА) методов и байесовских сетей доверия (БСД), представлен на рис. 1. Оба метода используют входные данные различной квалиметрической природы. Выходной параметр – вероятностная оценка безопасности КИ.

Одной из трудностей, возникающих при интеграции методов, является представление результатов оценивания в различных шкалах. Для интеграции полученных результатов необходимо привести их к одной шкале.

При оценивании безопасности КИ с использованием качественных методов применяются следующие виды шкал:

- номинальная шкала (шкала наименований, классификационная шкала), в которой значения определяются с точностью до взаимоднозначных преобразований. Номинальные шкалы обычно используются для классификации дискретных явлений;

- нечеткая (лингвистическая) шкала, в которой значения определяются с точностью до эквивалентных лингвистических преобразований;

- порядковая (ранговая) шкала, в которой численные значения определяются с точностью до монотонных преобразований. Шкалы порядка используются при сравнительной оценке объектов, когда определяется лишь порядок их предпочтения (ранжирование).

Исходными данными для количественных методов являются параметры КИ, измеренные с использованием:

- интервальной шкалы, в которой численные значения определяются с точностью до линейных преобразований. В шкалах интервалов сохраняются отношения разностей численных оценок объектов. Интервальные шкалы могут иметь произвольные начала отсчета и единицы масштаба;

- шкалы разностей, в которой численные значения определяются с точностью до преобразований сдвига. В шкалах разности численных оценок объектов и меняется начало отсчета. Более общим случаем шкалы разностей является периодическая (циклическая) шкала, численные значения которой определяются до преобразований сдвига. При оценке безопасности КИ также используются шкала отношений, в которой численные значения определяются с точностью до преобразований подобия (растяжения). При оценке безопасности КИ также применяется абсолютная шкала, в которой численные значения определяются с точностью до тождественных преобразований. Особенностью абсолютной шкалы является ее отвличенность (безразмерность) и абсолютность нуля и единицы масштаба.

После приведения оценок безопасности, полученных с использованием различных методов к общей шкале проводится агрегация (свертка) результатов. При этом необходимо выбрать правила свертки и весовые коэффициенты, отражающие субъективную степень доверия эксперта к результатам, полученным с использованием определенного подхода.

В рамках данного подхода в качестве показателя безопасности предлагается рассматривать критичность состояния системы. В теории надежности интерпретация этого состояния выражается в понятии предельного состояния. Частными показателями критичности являются вероятность отказа и тяжесть его последствий.

Одной из важных задач, возникающих при интеграции методов оценки безопасности КИ, является анализ входных данных. Исходными данными для оценки безопасности КИ могут быть: априорные данные о безопасности КИ – аналогов, систем, их составных частей, компонентов по опыту их применения в аналогичных условиях; оценки показателей надежности.

Источниками входных данных для расчета безопасности систем КИ могут быть: стандарты и технические условия на системы; справочники по надежности элементов; статистические банки данных о надежности объектов-аналогов, свойствах применяемых в них веществ и материалов, о параметрах операций обслуживания и ремонта, собранные в процессе их разработки, изготовления, испы-

таний и эксплуатации. Аналогично, могут быть использованы статистические данные по ущербам аналогичных объектов.

В методологии анализа безопасности КИ выделяют субъект и объект анализа безопасности.

Субъект анализа – исследователь, проводящий оценивание. Объект анализа – КИ. В зависимости от глубины анализа могут выделяться рассматриваться различные уровни иерархии КИ: системы, подсистемы, компоненты и т.д.

Идентификация объекта анализа безопасности включает получение и анализ информации об объекте, условиях его эксплуатации и других факторах, а именно: назначение, области применения и функции объекта; критерии качества функционирования, отказов и предельных состояний, последствия отказов (достижения объектом предельного состояния) объекта; структура объекта, состав, взаимодействие входящих в него элементов, возможность перестройки структуры и/или алгоритмов функционирования объекта при отказах отдельных его элементов и т.д.

Источниками информации служит конструкторская, технологическая, эксплуатационная документация на объект в целом, его составные части и комплектующие изделия в составе и комплектах, соответствующих данному этапу расчета надежности.

При анализе безопасности КИ необходимо учитывать все исходные данные, независимо от их природы и шкал представления.

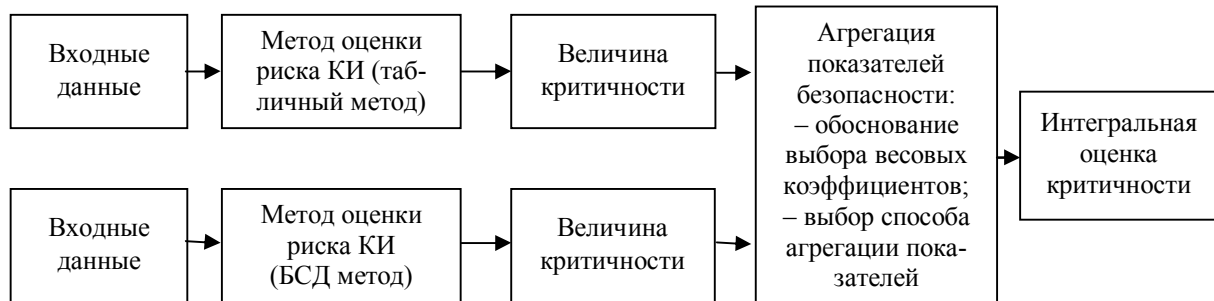


Рис. 1. Диверсификация и интеграция методов оценки безопасности КИ

#### Выбор методов оценивания безопасности КИ.

При оценивании безопасности КИ используются качественные и количественные методы. Количественные методы важны при оценивании рисков, однако их точность, особенно на начальных этапах ЖЦ, может быть недостаточной. В том случае, когда функционирование КИ достаточно полно описано статистическими данными, для получения оценок безопасности достаточно полезным является применение методов и подходов, основанных на теории вероятностей. Достоинством данной группы методов является хорошо изученный математический аппарат.

Однако, основным вопросом является валидность статистики и выполнение требований к ее полноте. Это существенно ограничивает применение этих методов при недостаточном объеме статистики и ограничениях на время получения оценок безопасности. Дан-

ная проблема характерна для начальных этапов ЖЦ КИ, когда ее функционирование характеризуется высоким уровнем неопределенности. Кроме того, часть параметров безопасности, независимо от этапа ЖЦ КИ, не могут быть оценены количественно, с использованием, например, статистических методов. Следует отметить и неточность самих методов, использующих предположения и допущения, например, такие как: аварии вызываются отказами, отказы случайны, проверки идеальны, ошибки являются статистически независимыми и т.д. Неточность моделей анализа безопасности КИ может возникать из-за неверно проведенной декомпозиции общей задачи оценки безопасности, излишней идеализации моделей процессов для КИ, разрыва (не учета) существенных связей между системами, линеаризации, дискретизации, замены фактических характеристик систем гипотетическими

(или эмпирическими), вследствие нарушений допущений и т.д. Это приводит к появлению ошибок в используемых моделях. Так, например, в сложных системах энергетики соотношение между составляющими ошибки составляет: из-за неточности исходных данных: 82 – 84 %, из-за неточности модели: 14 – 15 %, из-за неточности метода: 2 – 3 %.

Ввиду большой доли погрешности исходных данных, возникает погрешность в расчете показателей надежности и безопасности, что приводит к значительной зоне неопределенности при выборе оптимальных параметров КИ. Если параметры безопасности представлены в виде диапазона значений, то целесообразно использовать методы интервального анализа. Достоинством интервального описания данных является то, что в процессе оценивания идет работа со всем интервалом в целом. В качестве математического аппарата применяется интервальная арифметика. Недостатком является то, что при учете нескольких интервально заданных величин получаются большие границы конечного интервала оцениваемых данных. Подсчеты очень грубые, но гарантированные.

Таким образом, при интеграции оценок, полученных с использованием диверсных методов риск-анализа КИ можно выделить:

1. *Этап идентификации объекта анализа безопасности.* Из множества систем выделяют наиболее важные для безопасности КИ. Важность определяется с учетом тяжести последствий возможных аварий. Определение ранга безопасности.

2. *Этап анализа исходных данных.* Определение множества исходных данных, доступных для анализа. Обработка входных параметров. Анализируются все доступные источники данных.

3. *Этап выбора методов анализа безопасности КИ.* Обосновывается выбор методов, которые могут быть использованы для обработки исходных данных и получения искомого параметра безопасности.

4. *Этап оценивания параметра безопасности.* Вычисление параметра с использованием выбранных моделей. Получение множества оценок безопасности КИ.

5. *Этап агрегации.* Агрегация оценок для получения интегральной оценки безопасности КИ.

Данный этап включает: выбор общей шкалы для преобразования оценок; приведение оценок к общей шкале; определение весовых коэффициентов оценок, отражающих степень доверия к используемому методу анализа и источникам входных данных; выбор правила агрегации; получение интегральной оценки.

6. *Анализ результатов и обоснование рекомендаций по повышению безопасности КИ.* На основе полученной оценки проводится выбор средств по снижению риска.

Вероятностные оценки являются наиболее распространенным видом оценок безопасности. Вероятности могут быть получены с использованием интервальных, нечетких и лингвистических методов. Для этих методов вид оценки, ее носитель и пример представления представлен в табл. 1.

Таблица 1

Вид оценки, носитель и пример представления вероятностных оценок показателей безопасности, полученных использованием различных групп методов

Метод	Вид оценки	Носитель оценки	Пример оценки
Интервальные методы	Интервальная оценка	интервал	0,1 – 0,8
Нечеткие методы	Нечеткое треугольное число	Нечеткое множество	Около 0,5
Лингвистические методы	Лингвистическая переменная (ЛП)	Нечеткое множество	Высокая
Вероятностные методы	Точечная оценка	число	0,5

Для получения интегральной оценки необходимо выбрать общую шкалу для преобразования исходных оценок. Так, например, для вероятностей, полученные с помощью разных методов, целесообразно перевести их значения в абсолютную шкалу. Существует множество подходов к приведению оценок параметров безопасности в абсолютную шкалу.

Для интервальных оценок может быть использована средняя величина интервала, значение которой определяется как его среднее арифметическое: полусумма нижней и верхней границы интервала. При использовании нечетких и лингвистических оценок одним из подходов к приведению нечетких оценок параметра безопасности в абсолютную шкалу является дефазификация. Дефазификацией (defuzzification) называется процедура преобразования нечеткого множества в четкое число. В теории нечетких множеств процедура дефазификации аналогична нахо-

ждению характеристик положения (математического ожидания, моды, медианы) случайных величин в теории вероятности. Простейшим способом выполнения процедуры дефазификации является выбор четкого числа, соответствующего максимуму функции принадлежности. Однако пригодность этого способа ограничивается лишь одноэкстремальными функциями принадлежности. К основным методам дефазификации можно отнести методы нахождения: Centroid – центр тяжести; Bisector – медиана; LOM (Largest Of Maximums) – наибольший из максимумов; SOM (Smallest Of Maximums) – наименьший из максимумов; Mom (Mean Of Maximums) – центр максимумов.

Существует множество способов агрегации показателей безопасности, а именно:

– линейная аддитивная свертка (ЛАС). Сущность этого подхода состоит в определении обобщенной оценки безопасности по правилу вида:

$$W = \sum_{i=1}^N w_i \times \alpha_i,$$

где  $w_i$  – значение показателя безопасности ( $i$ -й метода,  $i = \overline{1, N}$ );  $\alpha_i$  – значение  $i$ -го весового коэффициента, определяющего степень доверия эксперта к данному методу,  $i = \overline{1, N}$ ,  $\sum_{i=1}^N \alpha_i = 1$ ;

– мультипликативная свертка (МПС). При ее использовании интегральная оценка безопасности определяется по правилу вида:

$$W = \prod_{i=1}^N (w_i)^{\alpha_i}.$$

Общие интегральные оценки безопасности могут быть получены с использованием метода идеальной точки, а также с использованием подходов кластеризации. При агрегации оценок могут возникнуть трудности, связанные с выбором значений весовых коэффициентов  $\alpha_i$ . Значение этого коэффициента представляет степень доверия эксперта к оценке, полученной с использованием соответствующего метода. Чем выше значение, тем больше степень уверенности эксперта в достоверности оценки. Для методов, приведенных на рисунке 1, выходным показателем безопасности является критичность системы. Представляет интерес процедура агрегации нечетких оценок критичности, представленных в виде ЛП. В рамках похода семантика ЛП выражается нечетким треугольным числом. Процедура агрегации нечетких оценок критичности включает этапы:

– уточнения корректности представления семантики ЛП. В матричном методе и БСД для выражения семантики термов ЛП критичность состояния используется нечеткое треугольное число;

– выбора правила свертки показателей критичности системы. Выбор весовых коэффициентов, отражающих субъективную степень доверия субъекта анализа к методу и источникам входных данных. Использование нечеткой математики позволяет определить результирующее нечеткое число;

– применения правил лингвистической аппроксимации для выражения полученного результата в исходных лингвистических термах.

## МЕТОД ДИВЕРСИФІКАЦІЇ ОЦІНОК БЕЗПЕКИ КРИТИЧНИХ ІНФРАСТРУКТУР В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

С.В. Брежнев

В статті запропонований підхід до диверсифікації оцінок безпеки критичних інфраструктур (КІ) в умовах невизначеності. КІ характеризуються складністю поведінки, високою невизначеністю, нелінійністю вхідних та вихідних параметрів. Використання однієї групи методів ризик аналізу не забезпечує потрібний рівень достовірності оцінок безпеки КІ. В якості оцінки безпеки КІ пропонується критичність стану, як комбінація імовірності аварії та важкості її наслідків. Запропоновано етапи послідовної інтеграції методів оцінки безпеки КІ.

**Ключові слова:** критична інфраструктура, ризик-аналіз, невизначеність, диверсність

## THE DIVERSIFICATION METHOD OF ESTIMATES OF CRITICAL INFRASTRUCTURE'S SAFETY ASSESSMENT UNDER UNCERTAINTY

E.V. Brezhnev

The approach to diversification of estimates of critical infrastructure safety assessment under uncertainties is suggested in the paper. CIs are characterized by complex behavior, high uncertainties, nonlinear input and output parameters. The application of one, particular group of risk analysis methods does not provide an adequate level of safety estimates validity. The system state criticality is considered as CI safety estimate, taken from combination of accident probability and its severity. The stages of sequential integration of risk analysis methods are proposed in the paper.

**Keywords:** critical infrastructure, risk-analysis, uncertainties, diversity.

## Выводы

Таким образом, сложность проблемы оценивания и обеспечения безопасности КИ в условиях неопределенности, наличие большого объема данных, представленных в различных шкалах и недостатки отдельных групп методов приводит к необходимости их интеграции в рамках гибридных методов, позволяющих повысить достоверность оценки безопасности. На сегодняшний день одним из перспективных направлений оценки безопасности КИ является применение технологии мягких вычислений, объединяющей нечеткую логику, искусственные нейронные сети, вероятностные рассуждения и эволюционные алгоритмы. В рамках этой технологии возможна интеграция методов для создания гибридных методов оценивания безопасности КИ в условиях неопределенности. Показана особенность интеграции матричных методов и БСД, выходным параметром которых является лингвистическая оценка критичности состояния КИ.

## Список литературы

1. *Безопасность критических инфраструктур: математические и инженерные методы анализа и обеспечения / под ред. В.С. Харченко.* – Министерство образования и науки Украины, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, 2011. – 641 с.
2. Дружинин Г.В. *Надежность автоматизированных систем. Изд. 3-е. перераб. / Г.В. Дружинин.* – М.: Энергия, 1997. – 536 с.
3. *Надежность технических системы: Справочник / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др.; под ред. И.А. Ушакова.* – М. Радио и связь, 1985. – 608 с.
4. Barton A.H., Lazarsfeld P.F. *Einige Funktionen von qualitativer Analyse in der Sozialforschung.* in: C Hopf und E. Weingarten (Hg.): *Qualitative Sozialforschung.* Stuttgart: Klett Cotta. 1984. – P. 41-89.
5. Campbell D.T., Fiske D.W. *Convergent and Discriminant Validation by the Multitrait-Multimethod Matrix / D.T. Campbell, D.W. Fiske // Psychological Bulletin* 56. – 1959. – № 2. – P. 81-105.

Поступила в редколлегию 18.07.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.С. Харченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.