

МЕТОДИЧЕСКИЕ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ЗНАЧИМОСТИ РИСКА КОМПОНЕНТОВ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ. Ч. I

Анотація. У роботі розглянуті методичні і обчислювальні аспекти значущості техногенного ризику. Приведено комплекс алгоритмів обчислення показників різних типів значущості. Комплекс алгоритмів призначений для використання в автоматизованих системах аналізу техногенного ризику.

Ключові слова: значущість елементів системи, чинники ризику, структурна значущість, Бірнбаум, Фуссел-Весели.

Аннотация. В работе рассмотрены методические и вычислительные аспекты значимости техногенного риска. Приведен комплекс алгоритмов вычисления показателей различных типов значимости. Комплекс алгоритмов предназначен для использования в автоматизированных системах анализа техногенного риска.

Ключевые слова: значимость элементов системы, факторы риска, структурная значимость, Бирнбаум, Фуссел-Весели.

Abstract. Methodical and computing aspects of technogenic hazard significance are considered. Algorithmic complex for the rate computation of different significance types is described. It is targeted for the usage in technogenic hazard automated systems.

Keywords: system elements significance, hazard factors, structural significance, Birnbaum, Fussell-Vesely.

1. Введение

Стратегия предупреждения опасных событий основана на выявлении наиболее значимых (с точки зрения вероятности возникновения взрывов, аварий, пожаров) элементов потенциально опасных объектов (ПОО) и мониторинга их состояний.

Показатели значимости являются основными критериями оценки техногенной опасности при:

- анализе проектов потенциально опасных систем сложной структуры;
- выработке стратегии оптимального резервирования систем;
- анализе риска реальных ПОО и выявлении слабого звена в их структуре;
- установлении режимов и очередности технических осмотров элементов ПОО;
- планировании и организации мероприятий предупреждения отказов элементов ПОО.

В существующей литературе, затрагивающей проблемы техногенного риска сложных систем, имеется несколько понятий, связанных с термином «значимость». Содержание этих понятий зависит от того, что является объектом и субъектом влияния риска, а также от типа исходных данных, на основании которых вычисляются показатели значимости [1–3]. Это может приводить к неоднозначному толкованию и, как следствие, к неадекватному использованию показателей значимости (ПЗ) в процедурах анализа техногенного риска.

Целью работы является:

– выполнить систематизированное описание комплекса понятий значимости структурных компонент ПОО и причинных факторов в возникновении отказов сложных систем, которое включает, в том числе, классификацию типов значимости, перечень условий вычисления ПЗ, графическую интерпретацию ПЗ риска;

– описать комплекс алгоритмов вычисления ПЗ элементов в системе сложной структуры.

2. Основные понятия и показатели значимости

Сложная система (в дальнейшем система) – это объект сложной структуры, на котором возможны опасные события (взрывы, пожары, аварии). В системе выделяются структурные элементы и группы элементов. Отказы элементов, называемые базисными событиями, при определенных сочетаниях могут приводить к системному отказу, который сопровождается тяжелыми последствиями.

Термин «сечение» определяет комбинацию наименьшего числа базисных событий, достаточных для возникновения системного отказа.

Групповой отказ дизъюнктивной группы – отказ хотя бы одного из элементов группы.

Примечание. Для компактности изложения будут применяться сокращения. Например, полное наименование «значимости риска элемента системы в возникновении системного отказа» в сокращенном виде будет иметь вид: «значимость элемента в системе».



Рис. 1. Перечень типов понятия значимость

Понятие значимости включает в себя две составляющие:

- «субъект» – событие, которое влияет на возникновение других событий;
- «объект» – событие, на которое влияет субъект.

Одно и то же событие может быть как субъектом, так и объектом. Например, «групповой отказ» является объектом для «отказа элемента» и субъектом для «отказа системы». Каждой паре «субъект – объект» устанавливается определенный тип понятия значимости. На рис. 1 приведены основные типы значимости, используемые в вероятностном анализе безопасности (ВАБ).

Определение. Значимость (по Бирнбауму) элемента E_k в системе «С» есть величина [2]:

$$B^k = \frac{dP_c^k(a_k)}{dP(a_k)}, \quad (2.1)$$

где $P(a_k)$ – вероятность возникновения

базисного события на элементе E_k ;

$P_c^k(a_k)$ – вероятность отказа системы, зависящая от $P(a_k)$;

$a_k \in \{a_i, i = \overline{1, n}\}$ n – количество элементов системы.

Показано [2], что

$$B^k = P_c^k(1) - P_c^k(0), \quad (2.2)$$

где $P_c^k(1)$, $P_c^k(0)$ – вероятность отказа системы при условиях $P(a_k) = 1$, $P(a_k) = 0$ соответственно.

В терминах «частота отказа системы» показатель B^k характеризует величину увеличения частоты отказа системы при переходе элемента E_k из состояния абсолютной надежности в состояние абсолютного отказа. Низкий показатель значимости элемента E_k

(по Бирнбауму) в системе свидетельствует о высоком уровне функционального резервирования этой системы.

Определение. Значимость (по Фусселу-Веселы) элемента E_K в системе «С» есть величина [4]:

$$FV^K = [P_C^K(N) - P_C^K(0)] / P_C^K(N), \quad (2.3)$$

где $P_C^K(N)$ – вероятность отказа системы при номинальном значении вероятности отказа элемента E_K .

Показатель FV^K характеризует относительное увеличение частоты отказа системы при переходе элемента E_K из состояния абсолютной надежности в «номинальное» состояние (состояние, соответствующее регламентируемым нормам).

Кроме показателей B^K , FV^K , в ВАБ используются показатели «Коэффициенты» и «Интервалы» изменения риска [5]:

- коэффициент увеличения риска (Risk Increase Ratio), (RIR);
- коэффициент уменьшения риска (Risk Reduction Ratio), (RRR);
- интервал увеличения риска (Risk Increase Interval), (RII);
- интервал уменьшения риска (Risk Reduction Interval), (RRI).

Данные показатели имеют следующие формализованные представления:

$$RIR = P_C(1) / P_C(N), \quad (2.4)$$

$$RRR = P_C(N) / P_C(0), \quad (2.5)$$

$$RII = P_C(1) - P_C(N), \quad (2.6)$$

$$RRI = P_C(N) - P_C(0). \quad (2.7)$$

На рис. 2 представлена графическая интерпретация показателей значимости и их соотношения.

$$B = RII + RRI. \quad (2.8)$$

Из подобия треугольников АЕН и ADS, с учетом $AS = 1$, $EH = RRI$, $AH = N$, $DS = B$, следует:

$$RRI = B \times N. \quad (2.9)$$

Из подобия треугольников АЕН и EDQ, с учетом (2.8), $AH = N$, $EQ = LC = 1 - N$, $DQ = RII$, следует:

$$RII = B(1 - N). \quad (2.10)$$

Используя выражения (2.3), (2.7), (2.9), получим

$$FV = (B \times N) / P_C(N), \quad (2.11)$$

$$B = \frac{FV \times P_C(N)}{N}. \quad (2.12)$$

Выражения (2.11) и (2.12) формализуют связь между показателями B и FV.

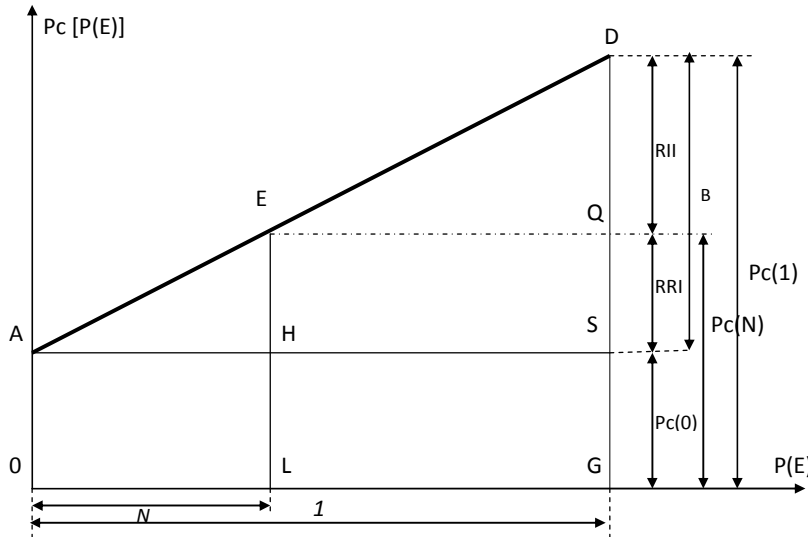


Рис. 2. Графическая интерпретация показателей значимости риска

Примечание. На рис. 2 в обозначениях показателей значимостей K -го элемента с целью визуального упрощения не проставлен индекс « K », который следует подразумевать. Как следствие, то же самое сделано в выражениях (2.4) – (2.7).
 $P(E)$ – вероятность отказа элемента E ;
 $P_C[P(E)]$ – вероятность отказа системы, соответствующая значению вероятности отказа элемента E ;
 N – номинальная вероятность отказа элемента E .

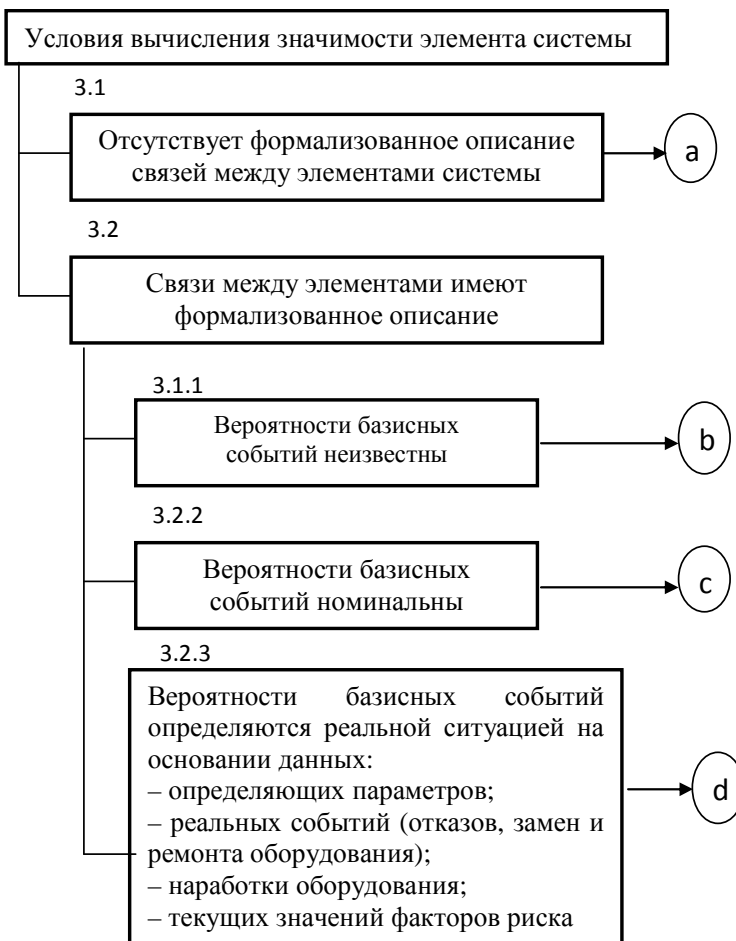


Рис. 3. Условия вычисления значимости риска

3. Вычисление значимости элементов системы в возникновении отказа системы

Процесс вычисления значимости определяется конкретными условиями, которые имеют место в анализируемой системе. Перечень этих условий приведен на рис. 3.

- a – вычисление статистической значимости;
- b – вычисление структурной значимости;
- c – вычисление номинальной значимости;
- d – вычисление ситуационной значимости.

Далее рассмотрен процесс вычисления значимости для каждого приведенного случая.

3.1. Вычисление оценок значимости элемента в системе при условии отсутствия формализованного описания связей между элементами системы

В этих условиях используются

статистические данные по отказам системы и ее элементов, а вычисление оценок значимости выполняется согласно выражению

$$B_c^K = n_1^K / N_c - n_o^K / N_c, \quad (3.1)$$

где B_c^K – статистическая значимость элемента E_K (по Бирнбауму);

N_c – число всех отказов системы;

n_1^K – число отказов системы при условии отказа элемента E_K ;

n_0^K – число отказов системы при условии безотказности элемента E_K .

3.2. Вычисление значимости элемента в системе при условиях, когда формализованы логические связи между элементами

В ВАБ модели дерева отказов (ДО) и дерева событий (ДС) являются базовым средством моделирования возникновения и развития техногенной опасности. Применение моделей ДО и ДС позволяет получить формализованное описание аварии в виде дизъюнктивно-нормальной формы (ДНФ), переменными которой являются базисные события [5–7].

$$C = G(\{a_i\} (i = \overline{1, n})) = \bigcup_{r \in R} S_r, \quad (3.2)$$

где C – опасное событие, вызванное отказом системы;

G – логическая функция в виде ДНФ опасного события;

$\{a_i\} (i = \overline{1, n})$ – базисные события на элементах системы E_i ;

S_r – сечения в ДНФ;

R – множество индексов сечений в ДНФ.

ДНФ дает возможность представить вероятность опасного события « C » как аналитическую функцию, у которой аргументами являются вероятности базисных событий.

$$P_c = Q[P(a_1), P(a_2), \dots, P(a_n)], \quad (3.3)$$

где $P(a_i)$ – вероятности отказов элементов $E_i (i = \overline{1, n})$;

$$P_c = Q(\{P(a_i)\} (i = \overline{1, n})) = \sum_{r \in R} P(S_r) = \sum_{r \in R} \prod_{i_r \in I_r} P(a_{i_r}), \quad (3.4)$$

где $P(a_{i_r})$ – вероятности базисных событий на элементах E_i из сечений S_r ;

$P(S_r)$ – вероятности сечений S_r ;

I_r – множество индексов базисных событий из сечения S_r .

Описание Процедуры оценки значимости элемента в системе (“Significance Assessment Procedure”) (SAP)

Процедура SAP содержит следующие шаги.

А. Определение оценок вероятностей базисных событий $P(a_i) (i = \overline{1, n})$ на элементах системы.

В. Вычисление значений вероятностной функции P_c (3.4) в случаях, когда:

* элемент E_K находится в состоянии отказа ($P(a_K) = 1$);

* элемент E_K абсолютно безопасен ($P(a_K) = 0$);

* вероятность отказа элемента E_K имеет номинальное значение ($P(a_K) = N$).

Обозначим эти значения функции P_c соответственно $P_c^K(1)$; $P_c^K(0)$; $P_c^K(N)$.

$$P_c^K(1) = Q[P(a_1), \dots, P(a_K) = 1, \dots, P(a_n)]. \quad (3.5)$$

$$P_c^K(0) = Q[P(a_1), \dots, P(a_k) = 0, \dots, P(a_n)]. \quad (3.6)$$

$$P_c^K(N) = Q[P(a_1), \dots, P(a_k) = N, \dots, P(a_n)]. \quad (3.7)$$

С. Вычисление значимостей элемента E_K в системе по Бирнбауму и по Фусселу-Веселы подстановкой значений $P_c^K(1)$, $P_c^K(0)$, $P_c^K(N)$ в выражение (2.2) и (2.3).

Примечание. Формула (3.4) дает удовлетворительный результат в случае, когда

$$\forall_{i \in \overline{1, n}} P(a_i) \leq 10^{-3}, \text{ т.е. когда } \exists_{i \in \overline{1, n}} P(a_i) > 10^{-3} \text{ [8].}$$

В противном случае необходимо использовать точные методы, в частности, метод ортогонализации, который позволяет представить ДНФ $G(\{a_i\})$ в виде совокупности ортогональных (несовместимых) конъюнкций отказов элементов

$$G(\{a_i\}) = \bigcup_{i \in L} \tilde{K}_i,$$

где \tilde{K}_i – ортогональные конъюнкции базисных событий.

В результате вероятность отказа системы может быть вычислена точно:

$$P_c = Q(\{P(a_i)\}) = \sum_{i \in L} P(\tilde{K}_i),$$

где L – количество ортогональных конъюнкций [3].

При реализации шага «А» процедуры SAP возможны следующие случаи:

- значения $P(a_i)$ ($i = \overline{1, n}$) априори неизвестны;
- $P(a_i)$ ($i = \overline{1, n}$) имеют номинальные значения (N_i);
- $P(a_i)$ определяются на основании описания конкретной ситуации, сложившейся на объекте.

Значимости риска, вычисленные в этих условиях, назовем, соответственно, «структурной», «номинальной» и «ситуационной» значимостями.

3.2.1. Вычисление структурной значимости элемента E_K

Определение. Структурная значимость элемента в системе есть значимость, определяемая исключительно на основании формализованного описания структуры системы (логико-вероятностной модели взаимосвязей элементов системы).

Шаг «А» процедуры «SAP» заключается в присвоении вероятностям отказов всех элементов системы значений, равных 0,5.

Шаг «В» процедуры “SAP” реализуется при условии

$$\forall_{i \in (\overline{1, n}) \setminus K} P^i(a_i) = 0,5. \quad (3.8)$$

Примечание. На шаге «В» процедуры “SAP” предварительно выполняется ортогонализация ДНФ отказа системы, и только после этого производятся расчеты.

3.2.2. Вычисление номинальной значимости элемента E_K в системе

На шаге «А» процедуры “SAP” значения $P(a_i)$ ($i = \overline{1, n} \setminus K$) устанавливаются равными своим соответствующим номинальным значениям (N_i), которые получены из стандартов и других документов, нормирующих безопасность.

Шаг «В» процедуры “SAP” реализуется следующим образом:

– значения $P_c^K(1)$ и $P_c^K(0)$ ((3.5), (3.6)) вычисляются при условии

$$\forall_{i \in \{\overline{(1,n)} \setminus K\}} P^i(a_i) = N_i;$$

– значения $P_c^K(N)$ (3.7) вычисляются при условии

$$\forall_{i \in \overline{(1,n)}} P^i(a_i) = N_i. \quad (3.9)$$

3.2.3. Вычисление значимости элемента на основании описания конкретной ситуации, сложившейся на объекте

Описание ситуации представляет собой совокупность сведений о состоянии каждого элемента системы, включенного в выражение (3.2). Оно формируется по результатам мониторинга состояния объекта и включает в себя для каждого элемента:

- описание реальных событий, происшедших на элементе системы и влияющих на вероятность отказа системы;
- значения определяющих параметров, характеризующих состояние элемента;
- значения наработок (времени эксплуатации) отдельных элементов системы;
- текущие значения причинных факторов риска, влияющих на возникновение базисных событий.

Значимость элемента, вычисленного на основе подобных данных, будем называть ситуационной значимостью риска элемента. Рассмотрим реализацию шага «А» процедуры “SAP” для каждого указанного случая.

3.2.3.1. Определение вероятности отказа каждого элемента E_i на основании конкретных событий, происшедших на этом элементе

К моменту фиксации состояния элемента возможны следующие события:

- а) отказ элемента;
- б) ремонтно-профилактические работы (РПР) на элементе не завершены (неработоспособное состояние);
- в) РПР завершены или выполнена замена элемента на новый.

В случаях а и б вероятность базисного события устанавливается равной единице ($P(a_i) = 1$).

В случае в) вероятность отказа устанавливается равной номинальному значению ($P(a_i) = N_i$).

3.2.3.2. Определение вероятности отказа элемента на основании определяющего параметра

Определяющий параметр элемента системы – физический или функциональный параметр, значение которого определяет работоспособность или неработоспособность элемента.

В случаях, когда для анализируемого элемента предусмотрен контроль состояния по определяющему параметру, выход определяющего параметра за допустимые пределы интерпретируется как реализация отказа элемента, и вероятность базисного события устанавливается равной единице ($P(a_i) = 1$).

В случае, если определяющий параметр не вышел за допустимые пределы, возможна оценка вероятности отказа элемента системы на основе предварительно созданной вероятностно-физической модели, параметры которой могут быть определены на основе анализа физических процессов деградации [9, 10].

3.2.3.3. Оценка вероятности отказа элемента на основании наработки элемента системы

Для многих типов элементов сведения о наработке являются наиболее информативными данными, на основании которых оценивается риск отказа. При этом используются методы теории надежности. По данной проблематике имеются достаточно обстоятельные публикации, в частности, [9–11].

В кратчайшем виде оценка вероятности отказа элемента на заданном временном интервале $[\tau_0, \tau_0 + \Delta\tau]$ сводится к реализации следующих этапов.

Этап 1. Построение модели отказа элемента E_i . Данный этап включает в себя выбор теоретической функции распределения отказов; постановку элементов исследуемого типа на испытание; вычисление оценок параметров распределения по результатам испытаний.

Обозначим модель отказа:

$$Z^i(t, \mu, \nu),$$

где Z^i – вид функции наработки до отказа элемента E_i ;

μ, ν – оценки параметров распределения масштаба и формы;

t – наработка до отказа.

Выражение

$$F^i(t) = Z^i(t, \mu, \nu) \quad (3.10)$$

позволяет вычислить вероятность отказа элемента E_i до момента, обусловленного наработкой t .

Данный этап выполняется в период подготовки базы данных автоматизированной системы оценки и анализа безопасности.

Этап 2. Определение наработки элемента E_i , соответствующей левой и правой границам заданного прогнозного интервала $[\tau_0, \tau_0 + \Delta\tau]$.

Моменту τ_0 соответствует реальная наработка t_0 , которая определяется:

– по результатам мониторинга за фактической эксплуатацией анализируемого элемента;

– либо с использованием выражения

$$t_0 = \tau_0 \times K_3, \quad (3.11)$$

где K_3 – коэффициент усредненной загрузки элемента E_i .

Моменту $\tau_0 + \Delta\tau$ соответствует наработка $t_0 + \Delta t$, где Δt – прогнозируемая наработка за период $\Delta\tau$. Δt устанавливается на основании экспертных оценок либо с использованием коэффициента усредненной загрузки элемента E_i .

$$\Delta t = \Delta\tau \times K_3. \quad (3.12)$$

Этап 3. Вычисление оценки вероятности отказа элемента E_i в заданном прогножном интервале $[\tau_0, \tau_0 + \Delta\tau]$.

Оценка вероятности отказа выполняется с помощью выражения [12]:

$$P(a_i) = [F^i(t_0 + \Delta t) - F^i(t_0)] / [1 - F^i(t_0)], \quad (3.13)$$

где $t_0, \Delta t$ – наработки, определенные на Этапе 2;

$F^i(t)$ – аналитическое представление модели отказов, определенное в виде выражения 3.10 на Этапе 1.

3.2.3.4. Оценка вероятности отказа элемента системы на основании текущих значений причинных факторов риска

Фактор риска – причина, влияющая на вероятность возникновения базисных событий или на размеры потенциального ущерба в результате реализации опасных событий (пожаров, взрывов, аварий).

Для решения проблемы вычисления оценок вероятностей возникновения базисных событий, возникающих под влиянием совокупности независимых факторов риска, разработан «Метод экспертных оценочных шкал» (МЭОШ), детально изложенный в [13, 14]. Здесь приведем его кратчайшее описание.

В МЭОШ выделены два элемента: формирование базы знаний (БЗ), позволяющей формализовать описание ситуаций, возможных на объекте, и вычисление оценок вероятностей базисных событий. БЗ включает в себя описания факторов и их влияний. Каждый фактор представлен множеством его упорядоченных возможных значений. Влияние фактора представлено функцией влияния (ФВ). ФВ фактора X_j на базисное событие a_i есть соответствие между возможными значениями фактора и условными вероятностями возникновения базисного события при условии, что все остальные факторы принимают значения своих норм. Таким образом, для каждой пары («Фактор X_j », «Базисное событие a_i ») в базе знаний формируется L_j кортежей следующего вида:

$$(i, j, x_{j,l_j}, f_j^i(x_{j,l_j}^l)), \quad (3.14)$$

где i – индекс базисного события a_i ($i = \overline{1, n}$);

j – индекс фактора X_j ($j = \overline{1, M}$);

x_j^l – одно из возможных значений фактора X_j ($l_j = \overline{1, L_j}$);

$f_j^i(x_j^l)$ – значение функции влияния фактора X_j на вероятность возникновения события a_i при условии

$$(X_j = x_j^l) \cap (\forall_{q \neq j} X_q = x_q^N), \quad (3.15)$$

где x_q^N – значение нормы фактора X_q .

Подобная база знаний позволяет вычислять оценки вероятности базисного события a_i , возникшего при совокупном влиянии независимых факторов $\{X_j\}$ ($j = \overline{1, M}$) в ситуации, когда

$$X_1 = x_1^c; X_2 = x_2^c; \dots; X_M = x_M^c. \quad (3.16)$$

Оценка вероятности базисного события a_i вычисляется с помощью выражения

$$P(a_i) = 1 - \prod_{j=1}^M [1 - f_j^i(x_j^c)]. \quad (3.17)$$

Данное выражение позволяет оценивать вероятности возникновения отказов элементов системы на основании значений факторов риска, которые они принимают в момент мониторинга контролируемой ситуации.

Таким образом, шаг «А» процедуры “SAP” при вычислении ситуационной значимости сводится к последовательному применению действий, изложенных в п.п. 3.2.3.1–3.2.3.4.

Шаг «В» процедуры “SAP” выполняется при условии

$$\forall_{i \in \{(1,n) \setminus K\}} P^i(a^i) = P_S(a_i),$$

где $P_S(a_i)$ – оценки вероятностей возникновения a_i , вычисленные из условий контролируемой ситуации (п.п. 3.2.3.1–3.2.3.4).

Примечание. Шаг «С» процедуры “SAP” остается инвариантным во всех описанных случаях 3.2.1–3.2.3.

4. Заключение

В работе рассмотрены методические и вычислительные аспекты ключевого инструмента анализа риска значимости.

Приведен упорядоченный и классифицированный комплекс понятий значимости и показателей значимости. Приведена геометрическая иллюстрация показателей значимости и их связей.

Представлен комплекс алгоритмов вычисления показателей различных типов значимостей элементов системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барлоу Р. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность / Р. Барлоу, Ф. Прошан. – М.: Наука, 1984. – 328 с.
2. Birnbaum Z.W. On the importance of different components in a multi-component system. *Multivariate Analyses – 2* / Birnbaum Z.W. – N.Y.: Academic Press, 1969. – P. 581 – 592.
3. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / Рябинин И.А. – СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета, 2007. – 278 с.
4. Fussel J.B. How to Hand-Calculate system reliability characteristics / J.B. Fussel // *IEEE Transactions on Reliability*. – 1973. – N 3. – R-24.
5. Можаяев А.С. Автоматизированное структурно-логическое моделирование систем / А.С. Можаяев. – СПб.: ВМА им. Н.Г. Кузнецова, 2006. – 577 с.
6. Вероятностный анализ безопасности атомных станций (ВАБ) [В.В. Бегун, О.В. Горбунов, И.Н. Каденко и др.]. – К.: НТУУ «КПИ», 2000. – 568 с.
7. Серебровский А.Н. Алгоритм формирования и минимизации логического представления дерева отказов / А.Н. Серебровский, Л.П. Ситниченко, В.Г. Пилипенко // *Математичні машини і системи*. – 2009. – № 1. – С. 165 – 172.
8. Risk Spectrum PSA Professional 1.10 Theory Manual/RELCON AB, 1998. – 57 p. – Режим доступа: <http://www.riskspectrum.com>.
9. Стрельников В.П. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем // В.П. Стрельников, А.В. Федухин. – К.: Логос, 2002. – 486 с.
10. ГОСТ 27.005-97. Надежность в технике. Основные положения. Модели отказов. – Введ. 05.12.97, № 732. – Киев: Госком Украины по стандартизации, 1997. – 45 с.
11. Серебровский А.Н. Об использовании вероятностно-физических моделей для оценки вероятностей элементарных событий, порождающих техногенную опасность / А.Н. Серебровский, В.П. Стрельников // *Математичні машини і системи*. – 2007. – № 1. – С. 137 – 143.
12. Серебровский А.Н. Методы оценки вероятностей отказов в процессах прогнозирования техногенных чрезвычайных происшествий / А.Н. Серебровский // *Математичні машини і системи*. – 2007. – № 2. – С. 111 – 116.
13. Серебровский А.Н. Об одном методе вероятностного анализа безопасности потенциально опасных объектов / А.Н. Серебровский // *Математичні машини і системи*. – 2002. – № 1. – С. 41– 48.
14. Serebrovsky A.N. Models and Algorithms of Probabilistic safety assessment of potentially hazardous objects/ A.N. Serebrovsky // *Материалы “6-th International Conference on Information System Technology and Application”*, (Kharkiv, may 23–25, 2007). – Kharkiv, 2007. – P. 127 – 134.

Стаття надійшла до редакції 01.11.2011