

УДК 631.3

А.Н. СЕРЕБРОВСКИЙ

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

Анотація. Наведено комплекс алгоритмів обчислення показників значущості групи елементів системи, причинних чинників ризику. Комплекс призначений для використання в автоматизованих системах аналізу техногенного ризику.

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

Аннотация. Приведен комплекс алгоритмов вычисления показателей значимости группы элементов системы, причинных факторов риска. Комплекс предназначен для использования в автоматизированных системах анализа техногенного риска.

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

Abstract. Algorithmic complex for the rate computation of system group components significance and causal hazard factors are described. It is targeted for the usage in automated systems for the technological hazard analysis.

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

1. Введение

В первой части работы [1] рассматривались алгоритмы вычисления значимости риска отдельных элементов системы. Однако не менее актуальной является проблема оценки значимости отдельных компонент оборудования потенциально опасных объектов (ПОО). Под компонентом понимается группа элементов системы, объединенных по определенному признаку. Например, элементы, комплектующие один узел оборудования; элементы одного функционального типа; элементы, события на которых отображаются в формализованном представлении как сечения.

Актуальность данной проблемы можно продемонстрировать при планировании режимов и сроков проведения ремонта отдельных узлов и агрегатов ПОО с учетом их технического состояния и влияния на техногенный риск.

«Вывод оборудования в плановый ремонт есть упреждение отказа оборудования, и, как следствие, упреждение отказа системы. Степень упреждения должна зависеть от значимости оборудования. Чем значительней оборудование влияет на безопасность эксплуатации, тем с большим запасом времени должен назначаться плановый ремонт этого оборудования. Если же оборудование имеет пренебрежимо низкое влияние, то ремонт может проводиться по факту отказа» [2].

Понятие значимости традиционно связывается с понятиями элементов систем и с событиями на элементах, одновременно с этим не менее серьезный интерес представляет значимость причинных факторов риска.

Целью работы является описать комплекс алгоритмов вычисления значимостей: групп элементов в системе; отдельных элементов в группе; причинных факторов риска, влияющих на отказ элемента и на отказ системы.

Определение основных понятий и показателей значимости описано в п. 2 [1].

В данной работе предполагается, что перед вычислением показателей значимости предварительно была проведена формализация связей между элементами системы. Для этого применяются модели дерева отказов и дерева событий. В результате формализованное описание отказа системы (в частности, аварии) можно получить в виде дизъюнктивно-нормальной формы (ДНФ), переменными которой являются отказы элементов системы (базисные события) [3–6].

$$C = G(\{a_i\} (i = \overline{1, n})) = \bigcup_{r \in R} S_r, \quad (1.1)$$

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.

$$P_C = Q[P(a_1), P(a_2), \dots, P(a_n)], \quad (1.2)$$

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

$$P_C = Q(\{P(a_i)\} (i = \overline{1, n})) = \sum_{r \in R} P(S_r) = \sum_{r \in R} \prod_{i \in I_r} P(a_i), \quad (1.3)$$

где $P(a_i)$ – вероятности базисных событий элементов E_i ;

$P(S_r)$ – вероятности сечений S_r ;

I_r – множество индексов базисных событий из сечения S_r .

2. Вычисление значимости риска элемента в возникновении отказа группы элементов (группа выступает как объект влияния)

2.1. Группа представляет собой конъюнкцию событий из множества $\{a_i\} i = \overline{1, n}$

Пример. Вычислить значимости по Бирнбауму (B^A) и Фусселу-Веселы (FV^A) [1] элемента « A », входящего в состав сечения $S = A \cap B \cap D$.

$$\begin{aligned} B_S^A &= P_S^A(1) - P_S^A(0) = [1 \times P(B) \times P(D)] - [0 \times P(B) \times P(D)] \\ &= P(B) \times P(D). \end{aligned}$$

В общем виде значимость элемента a_{K_S} в сечении $S = \bigcap_{q \in Q_S} a_q$ вычисляется со-

гласно выражениям:

$$B_S^{K_S} = \prod_{q \in \{Q_S \setminus K_S\}} P(a_q), \quad (2.1)$$

$$FV_S^A = [P_S^A(N) - P_S^A(0)] / P_S^A(N), \quad (2.2)$$

так как

$$P_S^A(0) = 0, \text{ то } FV_S^A = 1. \quad (2.3)$$

Примечание. Из (2.3) следует, что для оценки значимости риска элемента в возникновении сечений не имеет смысла применять показатель FV .

2.2. Группа представляет собой дизъюнкцию независимых событий из множества $\{a_i\} \ i = \overline{1, n}$

Пример. Вычислить значимость элемента «А» дизъюнкции $G = A \cup B \cup D$.

$$FV_G^A = [P_G^A(N) - P_G^A(0)] / P_G^A(N). \quad (2.4)$$

$$FV_G^A = \{[N^A + P(B) + P(D)] - [0 + P(B) + P(D)]\} / P_G^A(N). \quad (2.5)$$

$$FV_G^A = N^A / [N^A + P(B) + P(D)], \quad (2.6)$$

где N^A – номинальная вероятность отказа элемента А.

В общем случае значимость события a_K по FV в дизъюнктивной группе $G = \{a_q\} \ q \in Q_G$ вычисляется согласно выражению

$$FV_G^K = N^K / [N^K + \sum_{q \in \{Q_G \setminus K\}} P(a_q)], \quad (2.7)$$

где N^K – номинальная вероятность a_K .

$$B_G^A = P_G^A(1) - P_G^A(0) = [1 + P(B) + P(D)] - [P(B) + P(D)] = 1. \quad (2.8)$$

Примечание. Из (2.8) следует, что для оценки значимости элемента в составе дизъюнкции не имеет смысла применять показатель «В».

3. Вычисление значимости группы элементов в системе (группа выступает как субъект влияния)

3.1. Группа представляет одно из сечений S_K формализованного описания отказа системы «С»

Согласно (1.1), сечение S_K может рассматриваться как один из независимых членов дизъюнктивной совокупности $C = \bigcup S_r \ (r = \overline{1, R})$. Поэтому для вычисления значимости S_K по FV можно применить выражение (2.7)

$$FV_C^{S_K} = N^{S_K} / \left[N^{S_K} + \sum_{q \in Q_R} P(S_q) \right], \quad (3.1)$$

где $Q_R = \{\overline{1, R} \setminus K\}$;

R – количество сечений в ДНФ.

$$N^{S_K} = \prod_{i_k \in \Omega_K} P^N(a_{i_k}),$$

где N^{S_K} – номинальная вероятность сечения S_K ;

Ω_K – множество индексов базисных событий из сечения S_K ;

$P^N(a_{i_k})$ – номинальные вероятности событий a_{i_k} ;

$$P(S_q) = \prod_{i_q \in \Omega_q} P(a_{i_q});$$

Ω_q – множество индексов сечения S_q ;

$P(a_{i_q})$ – вероятности событий a_{i_q} из сечения S_q .

Значимость по $B_C^{S_k}$ вычислять не имеет смысла (см. Примечание к разд. 2.2).

3.2. Группа, представляющая собой дизъюнкцию независимых событий в системе «С»

Допустим, что во множестве базисных событий $\{a_i\}$ ($i = \overline{1, n}$) выделена группа $G_1 = \bigcup_{j \in J} a_j$,

дополнением к которой является $G_2 = \{a_i\} \setminus G_1$. Известны номинальные вероятности событий из G_1 , которые обозначим N^j . Требуется определить значимость по FV группы G_1 в системе $C = G_1 \cup G_2$.

$$FV_C^{G_1} = [PG_C^{G_1}(N) - P_C^{G_1}(0)] / P_C^{G_1}(N). \quad (3.2)$$

$$P_C^{G_1}(N) = P_{P(a_j)=N^j}(G_1 \cup G_2) = P_{P(a_j)=N^j}(G_1) + P_{P(a_j)=N^j}(G_2). \quad (3.3)$$

$$P_C^{G_1}(0) = P_{P(a_j)=0}(G_1 \cup G_2) = P_{P(a_j)=0}(G_1) + P_{P(a_j)=0}(G_2). \quad (3.4)$$

Так как события из группы G_1 независимы и составляют дизъюнкцию, то [5]

$$P_{P(a_j)=N^j}(G_1) = 1 - \prod_{j \in J} (1 - N^j), \quad (3.5)$$

где N^j – номинальная вероятность a_j ($j \in J$).

Так как события из группы G_2 независимы от событий группы G_1 , то вероятность $P(G_2)$ инвариантна вероятностям событий из группы G_1 , в частности

$$P_{P(a_j)=N^j}(G_2) = P_{P(a_j)=0}(G_2). \quad (3.6)$$

Очевидно, что $P_{P(a_j)=0}(G_1) = 0$. (3.7)

Подставив (3.3), (3.4), (3.5), в (3.2) и учитывая (3.6) и (3.7), получим

$$FV_C^{G_1} = [1 - \prod_{j \in J} (1 - N^j)] / [1 - \prod_{j \in J} (1 - N^j) + P_{P(a_j)=N^j}(G_2)]. \quad (3.8)$$

Данное выражение дает возможность вычислять групповую значимость группы G_1 в двух случаях:

– когда для событий группы G_2 заданы их номинальные вероятности $P(a_l) = N^l$ $l \in L = \overline{1, n} \setminus J$;

– когда для событий группы G_2 заданы их ситуационные вероятности $P(a_l) = P_s^l$, где P_s^l – ситуационное значение вероятности события a_l $l \in L$.

В первом случае значимость группы характеризуется как номинальная, во втором случае – как ситуационная.

4. Значимость причинных факторов риска

В п. 3.2.3.4 работы [1] приведены описание причинных факторов риска и краткое содержание метода для оценки вероятностей базисных событий, основанные на данных о факторах риска. В данном разделе рассмотрим вычисление значимостей факторов риска в возникновении отдельных базисных событий и в возникновении отказа системы.

4.1. Определение значимости фактора в возникновении отдельного базисного события

Выделяются следующие случаи определения значимости фактора:

- экспертное оценивание значимостей;
- оценка на основании статистики базисных событий;
- оценка на основании функций влияния факторов риска.

4.1.1. Экспертная значимость фактора устанавливается на основании экспертных оценок об относительной важности фактора риска для вероятности возникновения конкретного базисного события. При этом возможно как прямое установление оценок значимости, так и с применением метода анализа иерархий (составление матрицы парных сравнений, вычисление собственных значений матрицы парных сравнений [7]).

4.1.2. Статистическая значимость фактора риска вычисляется при наличии статистики возникновения базисного события для различных значений фактора с помощью выражения

$$Z_s^a(X) = F^a(x^{KP}) - F^a(X^N), \quad (4.1)$$

где $Z_s^a(X)$ – статистическая значимость фактора "X";

$F^a(x^{KP})$, $F^a(X^N)$ – частота возникновения события "a" при условии, когда фактор "X" принимает критическое и нормальное значения соответственно.

4.1.3. Значимость фактора риска, вычисленная на основе функций влияния фактора на базисное событие (п. 3.2.3.4 [1])

Обозначим значимость фактора X_j в возникновении базисного события a_i через Z_j^i . Подобная значимость, согласно определению функции влияния, вычисляется с помощью выражения

$$Z_f^a(X) = f_X^a(x^{KP}) - f_X^a(x^N), \quad (4.2)$$

где $f_X^a(x^{KP})$, $f_X^a(x^N)$ – значения функции влияния фактора X на возникновение события "a", при условии, когда фактор X принимает критическое и нормальное значения соответственно.

Примечание. В случае допущения, что x^{KP} и x^N соответствуют правой и левой границам интервала возможных значений фактора X , т.е., когда $f_X^a(x^{KP}) = 1$, $f_X^a(x^N) = 0$, выражение (4.2) представляет собой значимость фактора X в возникновении события "a" по Бирнбауму. Таким образом, значимость фактора по Бирнбауму является частным случаем значимости фактора, выраженной через функции влияния.

4.2. Определение значимости заданного фактора X_k в возникновении отказа системы

Значимость фактора в отказе системы вычисляется при условиях:

– создана модель отказа системы в дизъюнктивно-нормальной форме, переменными которой являются базисные события a_i ($i = \overline{1, n}$), а также функция вычисления вероятности отказа системы ((1.1), (1.3));

– создана база знаний, содержащая описание факторов риска X_j ($j = \overline{1, M}$) и функций влияния факторов на базисные события

$$f_j^i(x_j^l) \quad (l = \overline{1, L_j}),$$

где x_j^l – одно из возможных значений фактора X_j ,

L_j – количество возможных значений фактора X_j ;

– описана ситуация, в условиях которой находится объект, в том числе, определены ситуационные значения факторов риска (x_1^C, \dots, x_M^C) .

Процедура определения значимости фактора в отказе системы состоит из следующих шагов.

I. Вычисление значений вероятностей каждого базисного события a_i ($i = \overline{1, n}$) при двух условиях, когда фактор X_K принимает критическое и нормальное значения.

$$P^{KP}(a_i) = 1 - \prod_{j \in \{(1, M) \setminus K\}} [1 - f_j^i(x_j^C)] \times [1 - f_K^i(x_K^{KP})]. \quad (4.3)$$

$$P^N(a_i) = 1 - \prod_{j \in \{(1, M) \setminus K\}} [1 - f_j^i(x_j^C)] \times [1 - f_K^i(x_K^N)], \quad (4.4)$$

где $f_K^i(x_K^{KP})$, $f_K^i(x_K^N)$ – значения функции влияния фактора X_K на событие a_i при критическом и нормальном значениях соответственно;

$f_j^i(x_j^C)$ – значение функции влияния фактора X_j на событие a_i , когда $X_j = x_j^C$;

x_j^C – ситуационное значение фактора X_j .

II. Вычисление значений вероятностей отказов системы при критическом и нормальном значениях фактора X_K . Для этого используется вероятностная функция $Q[\{P(a_i) \mid i = \overline{1, n}\}]$ (1.3), в которую в качестве аргументов подставляются $P^{KP}(a_i)$ и $P^N(a_i)$, вычисленные на шаге I.

$$P_C^{KP} = Q[\{P^{KP}(a_i) \mid a_i = \overline{1, n}\}]. \quad (4.5)$$

$$P_C^N = Q[\{P^N(a_i) \mid a_i = \overline{1, n}\}]. \quad (4.6)$$

III. Вычисление значимости фактора риска в возникновении отказа системы

$$Z_C(X_K) = P_C^{KP} - P_C^N. \quad (4.7)$$

5. Заключение

Приведен комплекс алгоритмов вычисления групповой значимости риска совокупности элементов потенциально опасных объектов; значимости отдельных элементов в группе; значимости причинных факторов риска в отказе системы и отдельных элементов.

Теоретическое значение работы заключается в следующих положениях:

– предложены показатели значимости влияния причинных факторов риска на возникновение отказов отдельных элементов системы и системы в целом;

– показано, что значимость фактора риска по Бирнбауму является частным случаем функций влияния, используемых в Методе экспертных оценочных шкал (п. 3.2.3.4 [1]).

Практическое значение данной работы и работы [1].

Приведенный упорядоченный и классифицированный комплекс показателей значимости (в том числе новых понятий) может быть использован как методическая поддержка анализа при решении проблем обеспечения техногенной безопасности.

Предлагаемый комплекс алгоритмов вычисления показателей различных типов значимости может быть использован разработчиками:

- ситуационных центров по чрезвычайным ситуациям;
- автоматизированных систем оценки и анализа техногенного риска потенциально опасных объектов;
- гибридных экспертных систем анализа и предотвращения техногенного риска.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Серебровский А.Н. Методические и вычислительные аспекты значимости риска компонентов в сложных системах. Ч. I / А.Н. Серебровский // Математичні машини і системи. – 2012 – № 2. – С. 145 – 154.
2. Комаров Ю.А. Методология проведения ремонта по техническому состоянию оборудования АЭС / Ю.А. Комаров // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2010. – Вип. 13. – С. 48 – 59.
3. ГОСТ Р 51901.13-2005. Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей (IEC 6 1025:1990, Fault Tree Analysis). – Введ. 31.05.2005. – М.: Стандартиформ, 2005. – 16 с. (Национальный стандарт Российской Федерации).
4. Вероятностный анализ безопасности атомных станций (ВАБ) [В.В. Бегун, О.В. Горбунов, И.Н. Каденко и др.]. – К.: НТУУ «КПИ», 2000. – 568 с.
5. 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.
6. Культура безопасности на ядерных объектах Украины / [В.В. Бегун, С.В. Бегун, В.В. Литвинов и др.]. – К.: НТУУ «КПИ», 2009. – 386 с.
7. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Саати Т.Л. – М.: Радио и связь, 1989. – 316 с.

Стаття надійшла до редакції 21.11.2011