

---

---

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОСТИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ И ПРОЦЕССОВ

---

---

УДК 519.711.72

А. Н. ПАВЛОВ, С. А. ОСИПЕНКО

## ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В рамках концепции генома структуры представлен анализ характеристик безопасности сложных технических объектов. В качестве характеристик выбраны значимость и вклад событий, приводящих к авариям объектов.

*Ключевые слова:* монотонные и немонотонные системы, геном структуры, показатели безопасности, П-сеть, Н-сеть.

В настоящее время значительный потенциальный риск представляют сложные технические объекты, при функционировании которых возможны аварийные и нештатные ситуации, приводящие к катастрофам. К числу таких объектов, в первую очередь, относятся промышленные и научно-исследовательские установки ядерной энергетики и химической промышленности, установки и комплексы вооружения Министерства обороны РФ. Аварийные и нештатные ситуации, как правило, труднопредсказуемы и возникают внезапно. Масштабы связанных с ними негативных последствий также труднопредсказуемы, могут лавинообразно увеличиваться с течением времени и, кроме того, повлечь за собой различные негативные последствия для других объектов. Информация об аварийных ситуациях, как правило, имеет противоречивый и неопределенный характер и поступает в систему управления объектом с временными задержками. Принятие решений в таких ситуациях связано с риском и осуществляется в условиях жесткого лимита времени и различных ограничений по выбору и реализации управляющих воздействий.

Основная проблема при оценке безопасности сложных технических объектов связана с получением объективной информации о безотказности их элементов, статистические данные о параметрах которых недостаточны для проведения соответствующей стандартной обработки и анализа. Указанная проблема вызвана следующими причинами [1]: для отдельных объектов такие данные зачастую либо вообще отсутствуют, либо труднодоступны; построение вероятностной модели объекта требует большого объема наблюдений, которые, как правило, оказываются неполными, неточными и противоречивыми; процесс построения большой выборки наблюдений длителен по времени, в течение которого объект и окружающая его среда изменяются, что приводит к некорректности получаемых вероятностных и статистических закономерностей.

Для исследования надежности, живучести и безопасности сложных технических объектов в условиях возникновения нерасчетных нештатных ситуаций, аварий и катастроф (которые в дальнейшем будем называть критическими ситуациями) можно построить [2—11] сценарии их развития и соответствующие им функции алгебры логики (ФАЛ). При исследовании

указанных ситуаций вводятся выраженные в полиномиальном виде функции надежности или функции отказов на основе ортогонализации ФАЛ и замещения логических аргументов вероятностями их истинности, а логических операций — соответствующими арифметическими. Однако оценить вероятность наступления негативных событий в этом случае также затруднительно. Поэтому при исследовании критических ситуаций целесообразно определить весомость каждого конкретного негативного события, для чего следует проанализировать и сравнить различные характеристики событий, приводящих к таким ситуациям. По результатам анализа можно выделить события, на которые стоит обратить первостепенное внимание, и определить, с отказами каких элементов объекта они связаны.

В общем случае для структурно-сложных объектов (систем) в работах [6—11] введено понятие генома структуры, представляющего собой вектор  $\chi = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)$ , компонентами которого являются коэффициенты функции отказа структуры, представленной полиномом  $T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ , состоящим из однородных элементов  $T(Q) = \chi_0 + \chi_1 Q + \chi_2 Q^2 + \dots + \chi_n Q^n$ . Используя геном структуры, можно вычислить интегральные оценки отказа объекта, связанного с его структурным построением. При вероятностном описании отказов элементов системы для однородной монотонной или немонотонной структуры (характеризующихся одинаковой вероятностью отказа элементов) интегральный показатель отказа вычисляется по формуле [3, 8]

$$F(\chi) = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n) \left( 1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{n+1} \right)^T, \quad (1)$$

а для неоднородной структуры (характеризующейся различными вероятностями отказа элементов системы) — по формуле

$$F'(\chi) = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n) \left( 1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n} \right)^T. \quad (2)$$

При описании отказов элементов системы с позиции теории возможностей интегральный показатель возможности отказа для монотонной однородной структуры вычисляется по формуле

$$F_B(\chi) = 1 - \mu_*, \quad (3)$$

где  $\mu_*$  — решение уравнения  $(\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n) (1, \mu_*, \mu_*^2, \dots, \mu_*^n)^T = 1 - \mu_*$ ; для немонотонной однородной структуры этот показатель определяется как

$$F'_B(\chi) = \mu_{**}, \quad (4)$$

где  $\mu_{**}$  — решение уравнения  $(\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n) (1, \mu_{**}, \mu_{**}^2, \dots, \mu_{**}^n)^T = \mu_{**}$ .

Предлагаемый подход можно использовать для вычисления различных характеристик события, приводящего к критическим ситуациям (например, весомость события, его значимость, вклад в критическую ситуацию, т.е. степень влияния на нее). В настоящей статье рассмотрим введенные в работах [4, 5] такие характеристики события, как его значимость, положительный и отрицательный вклады в критическую ситуацию.

Для вычисления степени значимости  $i$ -го события относительно причин возникновения аварии следует воспользоваться полиномом [2—5]

$$\xi_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) = T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \Big|_{Q_i=1} - T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \Big|_{Q_i=0},$$

где  $T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \Big|_{Q_i=1}$  — функция отказа объекта при выходе из строя  $i$ -го элемента,

$T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \Big|_{Q_i=0}$  — функция отказа объекта при безотказной работе  $i$ -го элемента.

Полиномы для вычисления положительных и отрицательных вкладов событий в критическую ситуацию имеют следующий вид [2—5]:

$$B_i^+(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) = T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \Big|_{Q_i=1} - T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n),$$

$$B_i^-(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) = -(T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) - T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \Big|_{Q_i=0}).$$

Необходимо отметить, что для вычисления указанных характеристик не требуется знать вероятности наступления входящих в сценарий событий. В работах [2—5] значимость и вклады  $i$ -го события рассчитываются по следующим формулам:

$$g_i = \xi_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \Big|_{Q_i=0,5, i=1, \dots, n}, \quad \beta_i^+ = B_i^+(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \Big|_{Q_i=0,5, i=1, \dots, n},$$

$$\beta_i^- = B_i^-(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \Big|_{Q_i=0,5, i=1, \dots, n},$$

где запись  $Q_i = 0,5, i = 1, \dots, n$ , означает, что в соответствующий полином вместо всех  $Q_i$  необходимо подставить 0,5.

Каждому из рассматриваемых полиномов  $\xi_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ ,  $B_i^+(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ ,  $B_i^-(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$  ставится в соответствие геном  $\chi_\xi^i$ ,  $\chi_+^i$ ,  $\chi_-^i$ , используя который можно вычислить значимость и вклады событий по формуле (2):

$$g_i = \chi_\xi^i \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n}\right)^T, \quad \beta_i^+ = \chi_+^i \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n}\right)^T, \quad \beta_i^- = \chi_-^i \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n}\right)^T.$$

Следовательно, с помощью геномов  $\chi_\xi^i$ ,  $\chi_+^i$ ,  $\chi_-^i$ , можно вычислять эти характеристики с использованием как вероятностных оценок однородных структур (см. формулу (1)), так и оценок возможности отказа монотонных и немонотонных структур (см. формулы (3), (4)).

Кроме того, важно отметить, что полиномы  $\xi_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ ,  $B_i^+(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ ,  $B_i^-(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ , вне зависимости от того, характеризует функция отказа  $T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$  монотонную или немонотонную систему, имеют одно из нижеперечисленных свойств:

— монотонно возрастают, сохраняют „0“ и „1“: т.е.  $\xi_i(0) = 0$ ,  $\xi_i(1) = 1$ ;  $\beta_i^+(0) = 0$ ,  $\beta_i^+(1) = 1$ ;  $\beta_i^-(0) = 0$ ,  $\beta_i^-(1) = 1$ ;

— монотонно убывают, не сохраняют „0“ и „1“: т.е.  $\xi_i(0) = 1$ ,  $\xi_i(1) = 0$ ;  $\beta_i^+(0) = 1$ ,  $\beta_i^+(1) = 0$ ;  $\beta_i^-(0) = 1$ ,  $\beta_i^-(1) = 0$ ;

— немонотонны, сохраняют либо „0“, либо „1“: т.е.  $\xi_i(0) = 1$ ,  $\xi_i(1) = 1$ ;  $\xi_i(0) = 0$ ,  $\xi_i(1) = 0$ ;  $\beta_i^+(0) = 1$ ,  $\beta_i^+(1) = 1$ ;  $\beta_i^+(0) = 0$ ,  $\beta_i^+(1) = 0$ ;  $\beta_i^-(0) = 1$ ,  $\beta_i^-(1) = 1$ ;  $\beta_i^-(0) = 0$ ,  $\beta_i^-(1) = 0$ .

Проведем исследование того, как влияет на степень значимости события и величину его вкладов в критическую ситуацию замена элементов монотонной структуры на инверсные (негативные) элементы. Данная операция переводит монотонные полиномы  $\xi_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ ,  $B_i^+(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ ,  $B_i^-(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ , сохраняющие „0“ и „1“, в полиномы, обладающие одним из вышеперечисленных свойств. Исследования будем проводить на простейших последовательно-параллельных структурах (П-сетях) и простейшей сложной структуре (простейшая Н-сеть — „мостиковая структура“).

Если в структуру (П-сеть, Н-сеть) ввести элементы, описываемые немонотонными ФАЛ (например,  $\bar{x}_i$  — инверсный элемент), то в целом такая структура будет представлена

немонотонной ФАЛ первого типа [2]. Исследуем простейшие неразложимые П-сети при наличии и отсутствии инверсных элементов; структуры таких сетей приведены на рис. 1.

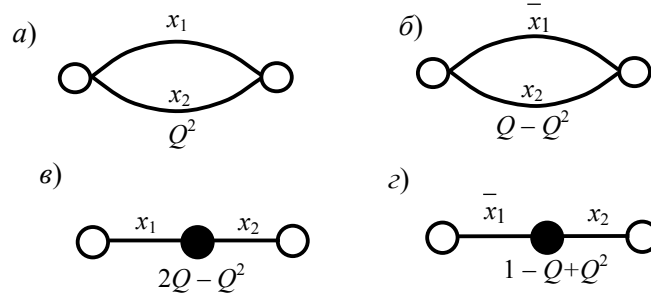


Рис. 1

Геномы представленных на рис. 1, а—г структур имеют соответственно следующий вид:  $\chi_a = (0, 0, 1)$ ,  $\chi_{б} = (0, 1, -1)$ ,  $\chi_{в} = (0, 2, -1)$ ,  $\chi_{г} = (1, -1, 1)$ .

Вычислим вероятностные интегральные показатели отказа приведенных однородных и неоднородных структур по формулам (1), (2):

$$F(\chi_a) = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n) \left( 1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{n+1} \right)^T = 0,333, \quad F(\chi_{б}) = 0,167, \quad F(\chi_{в}) = 0,667, \\ F(\chi_{г}) = 0,833;$$

$$F'(\chi_a) = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n) \left( 1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n} \right)^T = 0,25, \quad F'(\chi_{б}) = 0,25, \quad F'(\chi_{в}) = 0,75, \quad F'(\chi_{г}) = 0,75.$$

Интегральные показатели возможности отказа однородных монотонных и немонотонных структур (см. рис. 1), вычисленные по формулам (3), (4), имеют соответственно следующие значения:

$$F_B(\chi_a) = 0,382, \quad F_B(\chi_{б}) = 0,236, \quad F_B(\chi_{в}) = 0,618, \quad F_B(\chi_{г}) = 0,764, \\ F'_B(\chi_a) = 0,382, \quad F'_B(\chi_{б}) = 0,382, \quad F'_B(\chi_{в}) = 0,618, \quad F'_B(\chi_{г}) = 0,618.$$

Рассмотрим несколько вариантов введения инверсных элементов в мостиковую структуру (рис. 2).

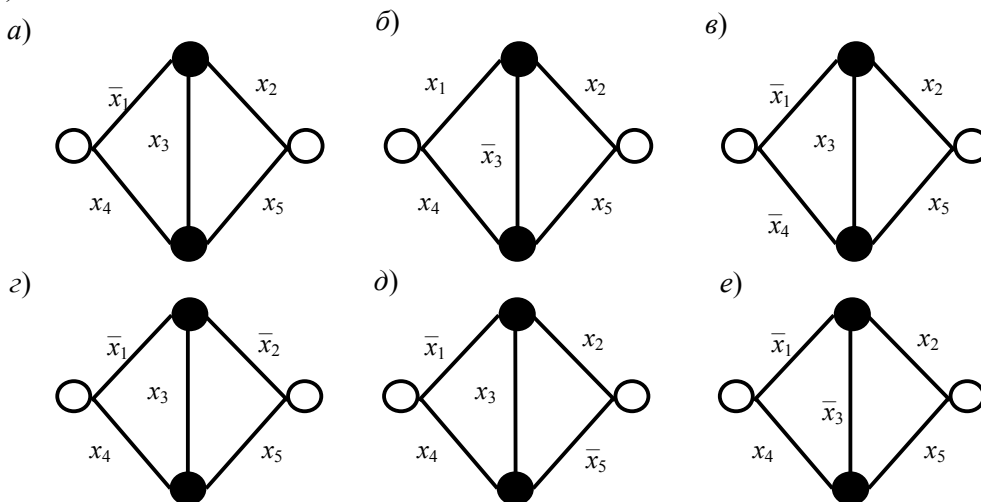


Рис. 2

Для однородных структур (см. рис. 2, а—е) функции отказа и соответствующие им геномы имеют следующий вид:  $T_a(Q) = Q + Q^2 - 4Q^3 + 5Q^4 - 2Q^5$ ,  $\chi_a = (0, 1, 1, -4, 5, -2)$ ;  $T_{б}(Q) = 4Q^2 - 6Q^3 + 5Q^4 - 2Q^5$ ,  $\chi_{б} = (0, 0, 4, -6, 5, -2)$ ;  $T_{в}(Q) = 1 - 2Q + Q^2 + 4Q^3 - 5Q^4 + 2Q^5$ ,

$$\chi_b = (1, -2, 1, 4, -5, 2); \quad T_c(Q) = 2Q - 3Q^2 + 4Q^3 - 5Q^4 + 2Q^5, \quad \chi_c = (0, 2, -3, 4, -5, 2);$$

$$T_d(Q) = 3Q - 7Q^2 + 8Q^3 - 5Q^4 + 2Q^5, \quad \chi_d = (0, 3, -7, 8, -5, 2); \quad T_e(Q) = 2Q - 4Q^2 + 6Q^3 - 5Q^4 + 2Q^5,$$

$$\chi_e = (0, 2, -4, 6, -5, 2).$$

Несмотря на то, что мостиковая структура имеет инверсные элементы, функции отказа для вариантов, приведенных на рис. 2, *a, б, д, e*, являются монотонными, сохраняющими „0“ и „1“ ( $T_a(0) = T_b(0) = T_d(0) = T_e(0) = 0$ ,  $T_a(1) = T_b(1) = T_d(1) = T_e(1) = 1$ ). Для вариантов, приведенных на рис. 2, *в, з*, функции отказа немонотонные:  $T_v(0) = 1$ ,  $T_v(1) = 1$ ,  $T_z(0) = 0$ ,  $T_z(1) = 0$ .

Результаты вычисления вероятностных оценок и оценок возможности отказа различных структур сведены в таблицу.

Вариант (рис. 2)	Вероятностная оценка структуры		Оценка возможности отказа структуры	
	однородной	неоднородной	однородной	неоднородной
<i>a, б, д, e</i>	0,5	0,5	0,5	0,5
<i>в</i>	0,667	0,5	0,586	0,5
<i>з</i>	0,333	0,5	0,414	0,5

В заключение отметим следующее. Используемые в работах [2—5] вероятностные оценки значимости событий и их вкладов в критическую ситуацию нечувствительны к введению в структуру инверсных элементов, описываемых немонотонными ФАЛ. В основе предложенных в настоящей статье оценок лежит концепция генома структуры, что позволяет учитывать влияние инверсных элементов, а также оценить диапазон изменения степени значимости негативных событий и их вкладов в критическую ситуацию. Поэтому при исследовании надежности, живучести и безопасности сложных технических объектов использование предложенных оценок может оказаться полезным для получения дополнительной (по сравнению с существующими подходами) информации о состоянии объекта и наиболее опасных его элементов (узлов, компонентов), а также для выработки рекомендаций по повышению надежности и безопасности.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 08–08–00346, 08–08–00403, 09–08–00259, 10–08–90027), Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект № О–2.3/03).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пытьев Ю. П.* Возможность как альтернатива вероятности. Математические и эмпирические основы, применение. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 464 с.
2. *Горопашная А. В.* Методы анализа безопасности сложных технических систем: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб, 2009.
3. *Рябинин И. А., Черкесов Г. Н.* Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. М.: Радио и связь, 1981.
4. *Рябинин И. А.* Надежность и безопасность сложных систем. СПб: Политехника, 2000. 248 с.
5. *Можжаев А. С.* Общий логико-вероятностный метод анализа надежности сложных систем. Л.: ВМА, 1988. 67 с.
6. *Павлов А. Н.* Нечетко-возможностный подход к анализу и оцениванию безопасности сложных организационно-технических систем // Материалы XI Междунар. конф. „Региональная информатика-2008 (РИ—2008)“. СПб: СПИИРАН, 2008. С. 48—49.
7. *Павлов А. Н., Соколов Б. В.* Многокритериальная кластеризация структурных состояний катастрофоустойчивых информационных систем // Материалы XV Междунар. конф. „Проблемы управления безопасностью сложных систем“. М.: ИПУ РАН, 2008. С. 150—153.

8. Павлов А. Н. Исследование генома двухполюсной сетевой структуры // Тр. IX Междунар. науч. школы „Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах“. СПб: ГУАП, 2009. С. 429—434.
9. Павлов А. Н., Соколов Б. В. Структурная динамика катастрофоустойчивой информационной системы // Там же. С. 85—93.
10. Павлов А. Н., Соколов Б. В., Сорокин М. В. Анализ структурной динамики комплексной системы защиты информации // Информация и безопасность. 2009. Т. 12, № 3. С. 389—396.
11. Павлов А. Н., Соколов Б. В., Осипенко С. А. Обобщенный алгоритм формирования классов структурных состояний информационных систем // Информационные технологии и вычислительные системы. 2009. № 4. С. 3—8.

**Сведения об авторах**

- Александр Николаевич Павлов** — канд. техн. наук, доцент; СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании;  
E-mail: pavlov62@list.ru
- Сергей Александрович Осипенко** — адъюнкт; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедры автоматизированных систем управления космическими аппаратами, Санкт-Петербург; E-mail: fon\_vakano@mail.ru

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
09.07.10 г.