

Бурый А.С. Оценка состояния отказоустойчивых структур систем со сложной динамикой [Электронный ресурс] // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования: Научный интернет-журнал. 2014. – № 2(18). Режим доступа [http://iea.gostinfo.ru/files/2014\\_02/2014\\_02\\_05.pdf](http://iea.gostinfo.ru/files/2014_02/2014_02_05.pdf)

УДК 004.052.3

## ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ СТРУКТУР СИСТЕМ СО СЛОЖНОЙ ДИНАМИКОЙ

**Бурый А.С.** доктор технических наук, Российский научно-технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия (ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»)

*В статье рассматривается подход к анализу сложных технических систем со сложной динамикой в условиях деградации их структур при сохранении заданного уровня вероятностно-временных характеристик.*

**Ключевые слова:** структура технической системы; реконфигурация; отказоустойчивость; структурные преобразования.

UDC 004.052.3

## ASSESSMENT OF STRUCTURES FAULT-TOLERANT SYSTEMS WITH COMPLEX DYNAMICS

**Buryu A.S.**, doctor of technical sciences, FSUE «STANDARTINFORM»

*The article discusses the approach to the analysis of complex technical systems with complex dynamics in a degradation of their structures, while maintaining a specified level of probability-time characteristics.*

**Keywords:** structure of the technical system; reconfiguration; fault tolerance; structural changes.

Сложность технических систем определяется огромным числом входящих в их состав подсистем и элементов, разнообразием связей и коммуникаций, как обеспечивающих функционирование их самих, так и взаимодействие с окружающим миром в ходе их целевого применения. Современные методики моделирования и расчета надежности позволяют получить заметные результаты только при сочетании традиционных логико-вероятностных методов и методов оптимизации, основанных на идеях адаптации, самоорга-

низации, многоагентном представлении организационно-технических систем [1].

Одним из важнейших стратегических направлений развития современных организационно-технических систем (ОТС) является обеспечение устойчивости к различного рода структурным нарушениям, возникающим в результате отказов оборудования, аварий и катастроф. В этом случае возникает необходимость в реконфигурации системы [2, 3].

Под *реконфигурацией* сложного объекта понимается процесс изменения его структуры (структур) в целях сохранения и последующего восстановления (повышения) уровня работоспособности объекта либо в целях обеспечения минимального снижения уровня эффективности системы при деградации ее функций [4]. Основными функциями управления реконфигурацией сложных объектов являются: целевая направленность, планирование (стратегическое, долгосрочное, оперативное и т.п.), регулирование (оперативное управление), контроль и учет, мониторинг и координация.

Способность выполнять заданные функции сложными организационными-техническими системами в условиях возможных структурных нарушений характеризуется понятием устойчивости. Различают отказоустойчивость и катастрофоустойчивость. В понятии *отказоустойчивость* акцент делается на восстановление работоспособности после единичных, случайных, не связанных между собой отказов компонентов. [5] Технология обработки таких отказов предполагает, как правило, что в работу вводятся резервные компоненты каждой подсистемы либо оставшиеся компоненты многократно дублированной подсистемы перераспределяют между собой работу независимо от того, что происходит в это время в других подсистемах. [5] В понятии *катастрофоустойчивость* главное – сохранение данных и продолжение работы системы в условиях массовых и, возможно, лавинообразных отказов связанных между собой подсистем и элементов. Технология обработки отказов в этом случае зависит от конкретного варианта последовательности развития

событий (так называемый сценарий катастрофы) с целью обеспечения максимально возможной сохранности защищаемых данных [5].

Разрешение той или иной неопределенности в ОТС, вызванной действием отказа, обеспечивается за счет «умения» интерпретатора системы распознать возникшую ситуацию. Применяемые для этой цели алгоритмы должны обеспечивать оперативный анализ ситуации в условиях нарушений связей и отказов элементов. Представленный для этой цели подход позволяет классифицировать структуры, возникающие в результате реконфигурации системы, заменяя вышедшие из строя структурные единицы некоторыми псевдоэлементами, сохраняя работоспособное состояние системы.

Рассмотрим простейший случай структурных нарушений ОТС ( $\Sigma$ ) и построение оператора, обладающего неподвижной точкой, являющегося множеством структурных изменений, которые заранее неизвестны.

Под структурой будем понимать упорядоченную совокупность элементов  $\sigma_i^{(j)} \in \Sigma_j \in \Sigma$ , соединенных между собой определенным образом. Здесь  $\Sigma_j, j \in \overline{1, n}$  – подсистемы  $\Sigma$ , каждая из которых имеет  $\sigma_i^{(j)} k \in \overline{1, l} (l \in N)$  элементов.

Связь элемента  $\sigma_i^{(j)}$  с элементом  $\sigma_k^{(j+1)}$  будем обозначать через  $p_{(i,k)}^{(j,j+1)}$ , подсистемы  $\Sigma_j$  с подсистемой  $\Sigma_{j+1}$  – через  $P^{(j,j+1)}$ .

Для произвольной системы  $\Sigma$ , состоящей из блоков  $\Sigma_1, \dots, \Sigma_n$  опишем все множество теоретически возможных связей с учетом их мгновенной деградации. Структурной *деградацией* информационных систем называется увеличение числа полностью отказавших модулей системы без изменения ее функциональных возможностей [6]. Это означает необходимость рассмотрения всех связей  $(\overline{1, n})$  элементов, все связи  $(\overline{1, n} \setminus \{j\})$  – элементов  $j \in \overline{1, n}$ , все связи  $(\overline{1, n} \setminus (\{i\}, \{j\}))$  при  $i \neq j$ .

Таким образом, множество всех связей элементов можно представить в виде:

$$\mathbf{P} = \left( P_n^\chi, \chi \in \overline{[1, n]} \right) \oplus \left( P_{n-1}^\chi, \chi \in \overline{[1, n \setminus \{j\}]} \right) \oplus \dots,$$

где  $\overline{[1, n]}$  – множество всех перестановок чисел  $\overline{1, n}$ ;  $\chi \in \overline{[1, n]}$  – элемент этой перестановки, содержащий  $n$  чисел;  $\overline{[1, n \setminus \{j\}]}$  – множество всех перестановок ряда чисел  $\overline{1, n}$  без числа  $j$  и т.д. Непосредственно из определения следует, что  $(P_{\langle n \rangle}^\chi, P_{\langle m \rangle}^\varphi) > 0$  и  $\rho(*, *) = 0$  только при полном совпадении векторов  $P_{\langle n \rangle}^\chi, P_{\langle m \rangle}^\varphi$ . На множестве  $\mathbf{P}$  введем функцию  $\rho(P_{\langle n \rangle}^\chi, P_{\langle m \rangle}^\varphi) = \inf \text{card}(i^* : \forall l \in \overline{1, i^*}, P_{\langle n \rangle l}^\chi \neq P_{\langle m \rangle l}^\varphi)$ , которая равна мощности множества всех несовпадающих компонент векторов  $P_{\langle n \rangle}^\chi, P_{\langle m \rangle}^\varphi$ . Множество  $\mathbf{P}$  содержит все теоретически возможные связи элементов  $(\Sigma^{(i)})_{i \in \overline{1, n}}$  и из него могут быть выделены подмножества с определенными признаками связей. Если обозначить через  $\pi$  некоторое множество признаков, тогда  $\mathbf{P}(\pi), \overline{\mathbf{P}}(\pi)$  – множество связей соответственно обладающих и не обладающих указанным признаком:  $\mathbf{P}(\pi) \cup \overline{\mathbf{P}}(\pi) = \mathbf{P}$ .

Отметим важное свойство  $\mathbf{P}$ . Пусть  $P_{\langle i \rangle}^{(*)} \in \mathbf{P}$  – некоторая структура, оптимальная в смысле функционала  $J(P, \Sigma)$ , т.е.

$$J(P_{\langle i \rangle}^{(*)}, \Sigma) = \inf_{P \in \mathbf{P}} J(P, \Sigma),$$

тогда для  $\forall C > 0$  запишем:

$$\left( \exists P_{\langle i \rangle}^{*(\dots)} \in \mathbf{P} \right) : J(P_{\langle i \rangle}^{*(\dots)}, \Sigma) = J\left( \tilde{P}_{\langle i \rangle}^{(*)}, \Sigma \right) + C.$$

Иными словами, множество  $\mathbf{P}$  содержит все структуры с любой допустимой деградацией качества системы  $\Sigma$ .

Рассмотрим множество  $\pi$  такое, что  $\mathbf{P}(\pi) \cap \overline{\mathbf{P}}(\pi) = \emptyset$ ;  $\mathbf{P}(\pi) \cup \overline{\mathbf{P}}(\pi) = \mathbf{P}$ , оператор  $Q : \mathbf{P} \times \pi \rightarrow \mathbf{P}(\pi)$ , порождающий уравнение  $\mathbf{P}(\pi) = Q(\pi, \mathbf{P})$ , являющийся оператором сжатия с неподвижной точкой. Итерационную последовательность построим по правилу:

$$\mathbf{P}^{[l]}(\pi) = Q \left( \overbrace{\pi, Q(\pi, \dots, \dots)}^{[l-1]}, Q(\pi, \mathbf{P}) \right),$$

представляющее собой последовательное преобразование данных.

Вычисление показателей надежности с учетом структурных преобразований проведем на основе метода псевдоэлементов (МПЭ), когда сложная структура последовательно заменяется единственным псевдоэлементом [7]. Эквивалентное преобразование здесь – есть операция, обеспечивающая либо уменьшение числа элементов, либо изменение топологии при неизменных характеристиках надежности системы в целом с одновременным изменением функции надежности.

Рассмотрим основные эквивалентные преобразования МПЭ:

1. *Последовательная композиция* двух элементов  $x_{ij}$  и  $x_{kl}$ :

$$x_{ij} \wedge x_{kl} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \tilde{x}_{ij} \Rightarrow x_{ij}, \text{ если } i < k; \\ \tilde{x}_{kl} \Rightarrow x_{kl}, \text{ если } i > k \end{array} \right\}.$$

Вероятность безотказной работы  $R_{ПЭ}(t) = R_1(t)R_2(t)$ , где  $R_i(t) = e^{-\lambda_i t}$ , тогда готовность псевдоэлемента (ПЭ) есть

$$K_{Г_{ПЭ}}(t) = K_{Г_1}(t)K_{Г_2}(t).$$

2. *Последовательная декомпозиция* двух элементов – операция, обратная последовательной композиции. Она является вспомогательной и используется в алгоритмах раскрытия топологической сложности системы. При этом появляется возможность по известным характеристикам надежности последовательной системы двух элементов и одного из них определять параметры другого элемента:

$$x_{ПЭ} = x_{ij} \wedge x_{kl} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \tilde{x}_{ij} \Rightarrow x_{ij}, \text{ если известен } x_{kl}; \\ \tilde{x}_{kl} \Rightarrow x_{kl}, \text{ если известен } x_{ij} \end{array} \right\}.$$

т.е.  $\lambda_2 = \lambda_{ПЭ} - \lambda_1$ , или  $K_{Г_2} = K_{Г_{ПЭ}} / K_{Г_1}$ .

3. *Параллельная композиция* двух элементов  $x_{ij}$  и  $x_{kl}$ :

$$x_{ij} \vee x_{kl} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \tilde{x}_{ij} \Rightarrow x_{ij}, \text{ если } j < l; \\ \tilde{x}_{kl} \Rightarrow x_{kl}, \text{ если } j > l \end{array} \right\}.$$

В пределе поток отказов параллельной системы стремится к пуассоновскому, т.е. к ординарному потоку.

4. *Параллельная декомпозиция* – операция, обратная композиции, когда из параметров надежности параллельной системы и одного из элементов, например, первого, определяют характеристики второго элемента:

$$K_{G_2} = (K_{G_{12}} - K_{G_{11}}) / (1 - K_{G_1}).$$

Проведем поэтапное преобразование структуры исходной системы в условиях деградационных изменений с применением типовых эквивалентных преобразований. Предварительно заметим, что точка в схеме называется узлом, если разрезание в этой точке соединения приводит к потере связности структуры, т.е. надежность схема распадается на два фрагмента.

Представим трехэтапную систему распределенной переработки данных в виде схемы (рис. 1), где элементы 11-14 – рабочие места обработки и анализа данных на первом этапе; 21, 22 – на втором и, соответственно, 31-33 – на третьем этапе. Будем независимо рассматривать две части (1 и 2) схемы, разделенные пунктирной линией.

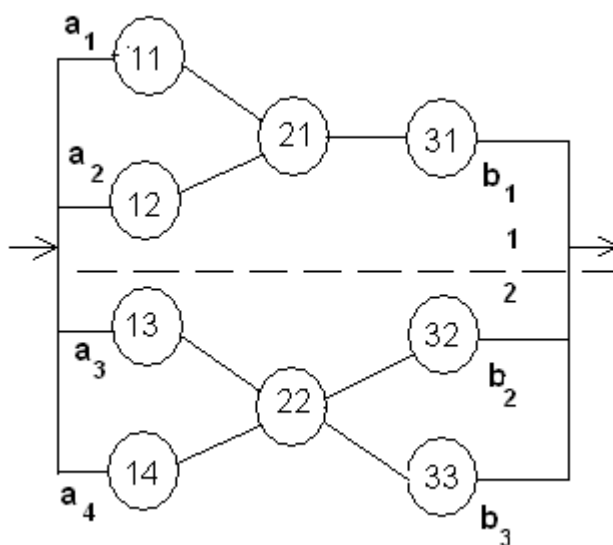


Рис. 1. Исходная схема для декомпозиции структуры распределенной системы

Алгоритм эквивалентного преобразования исходной структуры сводится к следующему.

1. Выделим подсистемы (в данном случае их две), сопряженные с исходной структурой по входам – выходам.

2. Определим эквивалентные характеристики надежности выделенных подсхем, для чего используются последовательные и параллельные композиции (рис. 2). Для сечений  $a_1 - b_1$  и  $a_2 - b_1$  выделим общие элементы и заменим два последних псевдоэлементом  $ПЭ_1$ . Применив параллельную композицию, заменим элементы 11 и 12 через  $ПЭ_2$ , а затем и весь фрагмент  $ПЭ_1 - ПЭ_2$  на  $ПЭ_3$ .

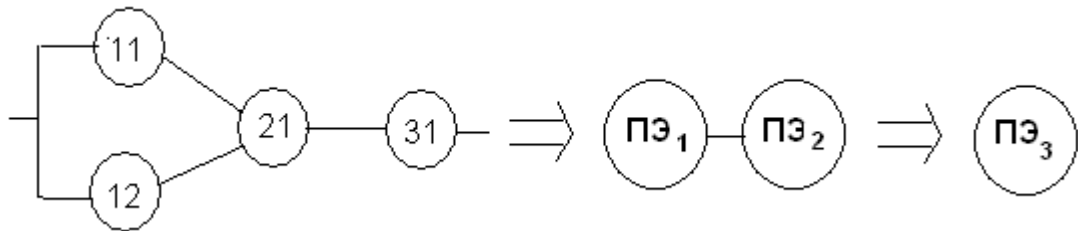


Рис. 2. Приведение участков структуры к эквивалентному ПЭ

3. Аналогично поступаем со вторым фрагментом структуры, заменяя соответствующими 13 и 14, 32 и 33, затем и весь фрагмент 2.

4. Окончательно путем параллельной композиции псевдоэлементов первого и второго фрагментов структуры получаем оценку характеристик надежности общей схемы.

Данная последовательная замена позволяет формировать исходные структуры в эквивалентные упрощенные с параметрами, определяемыми для экспоненциальных функций распределения времени наработки на отказ и времени восстановления. Учет технического состояния, например, в космических системах, характеризующихся большой динамикой в условиях автономного функционирования, позволяет получать приемлемые результаты в точности решения традиционных навигационных задач [8].

### Список использованных источников

1. Бурый А.С., Квасницкий В.Н. Многоагентное представление коммуникативных процессов в социальных сетях // Транспортное дело России, 2013. – № 6. – С. 150-152.

2. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. – М.: Наука, 2006. – 410 с.

3. Ломакин М.И., Миронов А.Н., Шестопалова О.Л. Многомодельная обработка измерительной информации в интеллектуальных системах прогнозирования надежности космических средств // Измерительная техника, 2014. – № 1. – С. 8-13.

4. Павлов А.Н. Методологические основы решения проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов // Изв. Вузов. Серия «Приборостроение». – 2012. – № 11. – С. 7-13.

5. Зеленцов В.А., Ковалев А.П., Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Методология создания и применения интеллектуальных информационных технологий наземно-космического мониторинга сложных объектов // Труды СПИИРАН. – 2013. – Вып. 5(28). – С. 7-81.

6. Тарасов А.А. Стратегии функциональной перестройки отказоустойчивых информационных систем при различных видах деградации // Безопасность информационных технологий. – 2012. – № 2. – С. 22-31.

7. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных производственных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 480 с.

8. Бурый А.С., Михайлов С.Н., Мячин А.В. Учет технических отказов при оценке эффективности орбитального сегмента СРНС «ГЛОНАСС» // Космические исследования. – 1998. – № 2. – С. 168-175.

© А.С. Бурый, 2014