

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖИВУЧЕСТИ  
КРИТИЧЕСКИХ ИНФРАСТРУКТУРБ.В. Соколов, Д.А. Иванов,  
А.Н. Павлов, А.А. Слинько (Санкт-Петербург)**Введение**

Исследования критической инфраструктуры становятся приоритетными во многих странах мира. Такие исследования, как правило, включают задачи выявления ключевых объектов инфраструктуры, воздействие на которые может оказать наиболее негативный эффект на отрасль экономики, ключевой ресурс или всю инфраструктуру, оценивания последствий подобного воздействия и разработке механизмов снижения таких рисков. При исследовании критических инфраструктур следует различать следующие основные типы структур: структуру целей, функции и задач, решаемых системой; организационную структуру; техническую структуру; топологическую структуру; структуру программно-математического и информационного обеспечения; структуру технологии управления сложным объектом. Одной из основных особенностей современных критических инфраструктур является то, что на практике мы сталкиваемся постоянно с их структурной динамикой (см. рисунок 1). В этих условиях для повышения (сохранения) уровня работоспособности и возможностей сложных систем, либо обеспечения наилучших условий деградации указанных объектов, необходимо осуществлять управление их многоструктурными макросостояниями.

Важная роль при решении проблемы управления структурной динамикой инфраструктуры отводится исследованию задачи оценивания (наблюдения) структурных состояний и структурной живучести системы при любых заранее непредсказуемых комбинациях вышедших из строя вследствие естественной ненадежности или разрушающих воздействий внешней среды ключевых элементов структуры.

Процессы деградации или восстановления структуры системы связаны, как правило, с отказами или восстановлением наиболее важных (ключевых) объектов  $\hat{Q} = \{Q_{j1}, Q_{j2}, \dots, Q_{jN}\}$ . При выходе из строя ключевых объектов инфраструктура может находиться в одном из своих промежуточных состояний, приведенных на рисунке 2 для случая, когда число ключевых объектов равно  $N = 5$ .

Причем, 1-му уровню деградации (восстановления) соответствуют структурные состояния, связанные с отказом (восстановлением) одного ключевого объекта, 2-му уровню – структурные состояния, вызванные отказом (восстановлением) произвольных двух ключевых объектов, и т.д.

Ранее проведенные исследования [1-5] показали, что структурные состояния  $S_\alpha$  (начальное, финальное, промежуточные) характеризуются своими геномами  $\vec{\chi}_\alpha$ . Значения показателей структурного отказа для рассматриваемых состояний монотонных или немонотонных систем с учетом однородных или неоднородных по надежности элементов, а также когда имеются возможностные отказы элементов можно вычислять по следующим формулам:

$$F_{odnor}(\vec{\chi}_\alpha) = \vec{\chi}_\alpha \cdot (1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{n+1})^T, \quad F_{neodnor}(\vec{\chi}_\alpha) = \vec{\chi}_\alpha \cdot (1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n})^T, \quad (1)$$

$$F_{vozm}(\vec{\chi}_\alpha) = \sup_{\mu \in [0,1]} \min \{ \vec{\chi}_\alpha \cdot (1, \mu, \mu^2, \dots, \mu^n)^T, g(\mu) \}.$$

Варианты многоструктурных состояний	j-й уровень СТО				
	$S_0^{(j)}$	$S_1^{(j)}$	$S_2^{(j)}$	...	$S_k^{(j)}$
Типы структур					
Топологическая структура				...	
Технологическая структура				...	
Техническая структура				...	
Структура программно-математического обеспечения				...	
Структура информационного обеспечения				...	
Организационная структура				...	

Рис.1. Возможные варианты структурной динамики сложного технического объекта

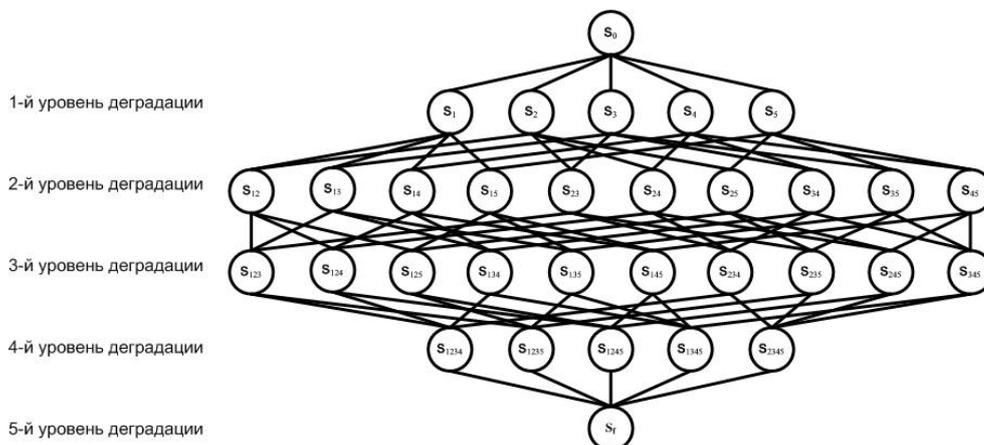


Рис.2. Уровни деградации инфраструктуры

### Построение сценариев структурной деградации критической инфраструктуры

Операцию перехода из одного структурного состояния  $S$ , характеризующегося геномом  $\vec{\chi}$ , в другое  $S_\alpha$ , описываемого геномом  $\vec{\chi}_\alpha$ , путем удаления (восстановления) одного ключевого элемента  $Q_j \in \hat{Q}$  обозначим следующим образом  $\vec{\chi} \xleftarrow{Q_j} \vec{\chi}_\alpha$ .

Множество всех структурных состояний, непосредственно связанных с состоянием  $\vec{\chi}$ , обозначим  $X(\vec{\chi})$ .

Тогда один из возможных сценариев (траекторий) структурной деградации (восстановления) системы из начального состояния  $S_0$  в требуемое состояние  $S_f$  можно описать следующей цепочкой переходов

$$\vec{\chi}_{\alpha_0} \xleftarrow{Q_{j_1}} \vec{\chi}_{\alpha_1} \xleftarrow{Q_{j_2}} \vec{\chi}_{\alpha_2} \xleftarrow{Q_{j_3}} \dots \xleftarrow{Q_{j_{N-1}}} \vec{\chi}_{\alpha_{N-1}} \xleftarrow{Q_{j_N}} \vec{\chi}_{\alpha_N},$$

где  $\vec{\chi}_{\alpha_0} = \vec{\chi}_0$ ,  $\vec{\chi}_{\alpha_N} = \vec{\chi}_f$ , множество  $\{Q_{j_1}, Q_{j_2}, \dots, Q_{j_N}\} = \hat{Q}$ , т.е. множество отказавших (восстанавливаемых) ключевых объектов системы в цепочке перехода является перестановкой элементов множества  $\hat{Q}$ .

Структурные изменения, происходящие в промежуточных состоянии  $\vec{\chi}_\alpha$  на рассматриваемой траектории, будем оценивать показателем структурного отказа  $F_{otkaz}(\vec{\chi}_\alpha) \in \{F_{odnor}(\vec{\chi}_\alpha), F_{neodnor}(\vec{\chi}_\alpha), F_{vozm}(\vec{\chi}_\alpha)\}$ . Тогда согласно [6] задачу построения оптимистической траектории структурной деградации системы можно представить в виде следующей оптимизационной задачи (2), а пессимистической траектории – задачи (3).

$$\sum_{j=0}^N F_{otkaz}(\vec{\chi}_{\alpha_j}) \rightarrow \min_{\substack{\vec{\chi}_{\alpha_j} \in X(\vec{\chi}_{\alpha_{j-1}}) \\ \vec{\chi}_{\alpha_0} = \vec{\chi}_0, \vec{\chi}_{\alpha_N} = \vec{\chi}_f, \\ \{Q_{j_1}, Q_{j_2}, \dots, Q_{j_N}\} = \hat{Q}}} \quad (2)$$

$$\sum_{j=0}^N F_{otkaz}(\vec{\chi}_{\alpha_j}) \rightarrow \max_{\substack{\vec{\chi}_{\alpha_j} \in X(\vec{\chi}_{\alpha_{j-1}}) \\ \vec{\chi}_{\alpha_0} = \vec{\chi}_0, \vec{\chi}_{\alpha_N} = \vec{\chi}_f, \\ \{Q_{j_1}, Q_{j_2}, \dots, Q_{j_N}\} = \hat{Q}}} \quad (3)$$

В работе [6] обоснован комбинированный метод случайного направленного поиска эволюционного типа с отсечением неперспективных вариантов решения поставленных задач и разработан алгоритм, реализующий приведенный метод. Сущность предложенного метода состоит в проведении повторяющихся испытаний, каждое из которых определяет переход от одной траектории структурной деградации системы к другой, лучшей, что и образует процедуру последовательного улучшения решения. На каждом  $k$  испытании строится случайная последовательность  $\mu_\zeta^{(k)} = [\vec{\chi}_{\alpha_0}, \vec{\chi}_{\alpha_1}^{(k)}, \vec{\chi}_{\alpha_2}^{(k)}, \dots, \vec{\chi}_{\alpha_{N-1}}^{(k)}, \vec{\chi}_{\alpha_N}]$  (где  $\vec{\chi}_{\alpha_0} = \vec{\chi}_0$ ,  $\vec{\chi}_{\alpha_N} = \vec{\chi}_f$ ), соответствующая некоторой траектории структурной деградации. Для построенной траектории вычисляется суммарный структурный отказ  $F_{otkaz}(\mu_\zeta^{(k)}) = \sum_{j=1}^{N-1} F_{otkaz}(\vec{\chi}_{\alpha_j}^{(k)})$ . Причем случайный переход в промежуточное структурное состояние, характеризуемое геномом  $\vec{\chi}_{\alpha_j}^{(k)}$ , осуществляется с использованием равномерного закона распределения. В результате применения комбинированного метода, включающего метод случайного направленного поиска и отсечение неперспективных траекторий по методу «ветвей и границ», осуществляется нахождение оптимального или квазиоптимального решения

поставленной задачи (2).

Таким образом, комбинированный метод и соответствующий ему алгоритм, представленный в работе [6], позволяет осуществлять поиск как оптимистической и пессимистической траекторий, так и различных промежуточных траекторий, выбираемых случайным образом.

### Имитационное моделирование структурной живучести

На рисунке 3 представлена некоторая траектория структурной деградации критической инфраструктуры  $\mu_{\zeta}^{(k)}$ . Площадь  $S^k$  равная  $\min_{j=0,1,\dots,N} \{F_{отказ}(\bar{\chi}_{\alpha_j}^{(k)})\} \cdot N$  характеризует суммарную структурную надежность системы в случае сохранения им значения возможного минимального структурного отказа при развитии рассматриваемого сценария. Вычисленная площадь  $S_0^k = \sum_{j=0}^{N-1} \frac{F_{отказ}(\bar{\chi}_{\alpha_j}^{(k)}) + F_{отказ}(\bar{\chi}_{\alpha_{j+1}}^{(k)})}{2}$  показывает суммарную структурную надежность системы при изменении им значений структурного отказа в процессе деградации в рамках сценария  $\mu_{\zeta}^{(k)}$ . Тогда отношение указанных площадей  $J^k = \frac{S_0^k}{S^k}$  будет численно отражать структурную живучесть системы в процессе его структурной деградации по сценарию  $\mu_{\zeta}^{(k)}$ .

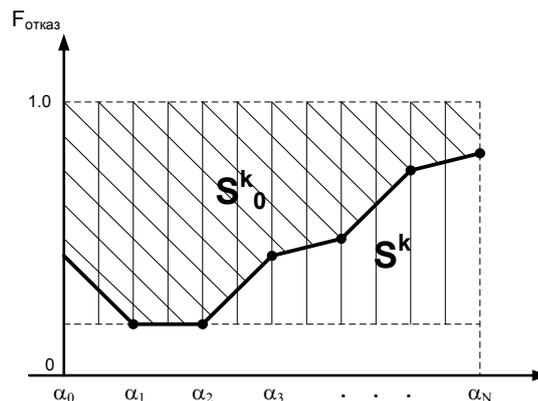


Рис.3. Графическая интерпретация структурной живучести системы

Следует отметить, что максимальное значение  $J^{\max} = \max_k \{J^k\}$  будет соответствовать оптимистическому сценарию, а минимальное значение  $J^{\min} = \min_k \{J^k\}$  - пессимистическому. Проведем  $M$  имитационных экспериментов. На каждом  $k$  испытании строится случайная последовательность  $\mu_{\zeta}^{(k)} = [\bar{\chi}_{\alpha_0}, \bar{\chi}_{\alpha_1}^{(k)}, \bar{\chi}_{\alpha_2}^{(k)}, \dots, \bar{\chi}_{\alpha_{N-1}}^{(k)}, \bar{\chi}_{\alpha_N}]$  (где  $\bar{\chi}_{\alpha_0} = \bar{\chi}_0, \bar{\chi}_{\alpha_N} = \bar{\chi}_f$ ), соответствующая траектории структурной деградации инфраструктуры. Для построенной траектории вычисляется значение структурной живучести  $J^k = \frac{S_0^k}{S^k}$ . Далее находим среднее значение структурной живучести всех испытаний  $J^0 = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M J^k$ .

Тогда можно утверждать, что значения показателя структурной живучести  $J_{SG}$

лежат в интервале  $[J^{\min}, J^{\max}]$  и наиболее ожидаемое значение равно  $J^0$ . При этом прогнозные значения показателя  $J_{SG}$  можно задавать нечетким треугольным числом  $(a, \alpha, \beta)$ , где  $a = J^0$ ,  $\alpha = J^0 - J^{\min}$ ,  $\beta = J^{\max} - J^0$ .

Кроме того вычисление значений структурного отказа  $F_{otkaz}(\bar{\chi}_\alpha) \in \{F_{odnor}(\bar{\chi}_\alpha), F_{neodnor}(\bar{\chi}_\alpha), F_{vozm}(\bar{\chi}_\alpha)\}$  может осуществляться из предположения, что структура инфраструктуры состоит только из однородных по надежности объектов, только из неоднородных по надежности объектов, и наконец имеются возможностные отказы объектов. Для каждого из этих трех случаев, произведя расчет значений показателя  $J_{SG}$ , получим соответственно три нечетких треугольных результата:  $(a^i, \alpha^i, \beta^i), (a^n, \alpha^n, \beta^n), (a^b, \alpha^b, \beta^b)$ . Тогда в качестве прогнозного значения показателя структурной живучести критической инфраструктуры  $J_{SG}$  будем полагать среднюю величину полученных результатов  $J_{SG} = \frac{(a^i, \alpha^i, \beta^i) + (a^n, \alpha^n, \beta^n) + (a^b, \alpha^b, \beta^b)}{3}$ .

### Выводы

Таким образом, задача статистического оценивания структурной живучести критической инфраструктуры свелась к имитационному исследованию траекторий структурной деградации системы, вызванных отказами ключевых объектов. Обоснован подход к вычислению значений показателя структурной живучести инфраструктуры в виде нечетких треугольных чисел.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации: СПбГПУ (мероприятие 6.1.1), ИТМО (субсидия 074-U01), Программы НТС Союзного государства «Мониторинг СГ» (проект 1.4.1-1), грантов РФФИ №№15-07-08391, 15-08-08459, 14-21-00135, 14-11-00748, РФФИ №№12-07-00302, 13-07-00279, 13-08-00702, 13-08-01250, 13-07-12120, 13-06-0087, Программы фундаментальных исследований ОНИТ РАН (проект №2.11), проекта ESTLATRUS 2.1/ELRI -184/2011/14, проекта ESTLATRUS/1.2./ELRI-121/2011/13 «Baltic ICT Platform».

### Литература

1. Павлов А.Н. Логико-вероятностный и нечетко-возможностный подходы к исследованию монотонных и немонотонных структур // XI научно-техническая конференция «Кибернетика и высокие технологии XXI века», 12-14 мая 2010 г. Тез. докладов – Воронеж, 2010, С. 483-492.
2. Павлов А.Н., Зеленцов В.А., Кулаков А.Ю. Структурная реконфигурации сложных объектов // Симпозиум «Надежность и качество», 21-31 мая 2012 г. Пенза: Труды в 2 т./ под ред. Н.К. Юркова. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2012. – 1 т., С.146-148
3. Павлов А.Н., Кулаков А.Ю., Павлов Д.А. Многокритериальный анализ критичности отказов функциональных элементов общесудовых систем и канализации электроэнергии судна // Первая научно-практическая конференция «Современные технологии автоматизации процессов борьбы за живучесть» (АПБЖ-2012), 6 декабря 2012 г., Санкт-Петербург: Материалы конференции/ ИАП БЖКС, ОАО «Концерн «НПО «Аврора». – СПб, 2012, С. 72-73
4. Осипенко С.А., Павлов А.Н. Исследование безопасности сложных технических

- объектов // Известия Вузов. Приборостроение.- 2010, том №53, №11, с.27-32.
5. Зеленцов В.А., Павлов А.Н. Многокритериальный анализ влияния отдельных элементов на работоспособность сложной системы // Информационно-управляющие системы.- 2010, №6 (49), С.7-12.
  6. Павлов А.Н. Алгоритм управления реконfigurацией структуры сложного технического объекта // Управление развитием крупномасштабных систем: Материалы Пятой конференции (3-5 октября 2011г., Москва, Россия). Том I. – М.: Учреждение Российской академии наук Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН, 2011, С. 374-377.