

АНАЛИТИКО-ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ НАДЕЖНОСТИ И ЖИВУЧЕСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

А. Н. Павлов, М. В. Сорокин, С. А. Осипенко (Санкт-Петербург),
Д. А. Иванов (Хемниц, Германия)

Введение

Анализ основных тенденций развития современных сложных технических объектов (СТО) показывает, что данные объекты имеют целый ряд особенностей, среди которых следует выделить: многоаспектность и неопределенность их поведения, иерархию, структурное подобие и избыточность основных элементов и подсистем СТО, связей между ними, многовариантность реализации функций управления на каждом из уровней СТО, территориальную распределенность их компонент.

Одной из основных особенностей современных СТО является то, что их параметры и структуры на различных этапах жизненного цикла изменяются под действием объективных и субъективных причин. Другими словами, на практике мы сталкиваемся постоянно со структурной динамикой СТО. В этих условиях для повышения (сохранения) уровня работоспособности и возможностей СТО либо обеспечения наилучших условий деградации указанных объектов необходимо осуществлять управление их структурами (в том числе управление реконфигурацией структур СТО).

Под структурой системы понимается характеристика устойчивых связей и способов взаимодействия элементов системы, определяющая её целостность, строение, основы её организации. Применительно к СТО будем, в первую очередь, различать следующие основные типы структур: структуру целей, функций и задач, решаемых СТО; организационную структуру; техническую структуру; топологическую структуру; структуру программно-математического и информационного обеспечения; структуру технологии управления СТО.

Структурная динамика СТО – это процесс перехода структуры (структур) СТО из одного заданного состояния в другое заданное состояние под действием различного рода причин (внутренних, внешних, объективных, субъективных и т. п.).

На рис. 1 представлена графическая иллюстрация понятий, связанных со структурной динамикой СТО [1].

Варианты многоструктурных состояний	<i>J</i> -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 СТО

Важная роль при решении проблемы управления структурной динамикой СТО отводится исследованию задачи оценивания (наблюдения) структурных состояний и структурной динамики СТО в различных условиях обстановки. Особо следует выделить проблемы, связанные с выбором их структурной организации – синтезом функциональных, алгоритмических, организационных, топологических, технических и других видов структур, характеризующих идеологии построения и принципы функционирования СТО и предотвращающих создание структурно-ненадежных объектов. Результаты структурного анализа имеют исключительную важность и для алгоритмического решения задач реконфигурации СТО при любых заранее непредсказуемых комбинациях вышедших из строя (вследствие естественной ненадежности или разрушающих воздействий внешней среды) элементов структуры.

Аналитическая модель структурной надежности

Как правило [2, 3, 4], задача структурного анализа сводится к построению соответствующих структурных функций: функций надежности СТО, функций безопасности, функций живучести, функций работоспособности, минимальных сечений отказов, – путем ортогонализации функций алгебры логики (ФАЛ), замещения логических аргументов в ФАЛ вероятностями их истинности и логических операций арифметическими. Теоретической основой указанного подхода является математический аппарат логико-вероятностных исчислений [3], применение которого позволяет количественно оценить как надежность СТО в целом в зависимости от вероятности надежной работы входящих в нее элементов, так и ранжировать вклад отдельных элементов в надежность системы. Используем для этого понятие полином надежности [2, 3, 4, 5] $R(P_1, P_2, \dots, P_n)$ и соответствующую формулу:

$$R(P_1, P_2, \dots, P_n) = \sum_{l=1}^k (-1)^{l-1} \sum_{i=1}^{C_k^l} \prod_{q \in W_i(\Pi, l)} P_q, \quad (1)$$

где \mathbf{v} – количество кратчайших путей; C_v^l – число сочетаний из \mathbf{v} по \mathbf{l} ; $W_i(\Pi, l)$ – подмножество номеров элементов СТО из $\{1, 2, \dots, n\}$, получающихся при i -м варианте объединения элементов различных \mathbf{l} путей из множества всех путей Π ; P_q – вероятность надежной работы q -го элемента. Можно показать, что в условиях однородной структуры $P_1 = P_2 = \dots = P_n = P$ полином надежности преобразуется в полином $R(P)$ от одной переменной.

Для исследования надежности структурного состояния СТО введем в рассмотрение интегральные показатели надежности однородной и неоднородной монотонной структуры с использованием вероятностного и нечетко-возможностного подходов [3, 5, 6]

$$F_{\text{однор}} = \int_0^1 R(P) dP, \quad F_{\text{неоднор}} = \int_0^1 \int_0^1 \dots \int_0^1 R(P_1, P_2, \dots, P_n) dP_1 dP_2 \dots dP_n,$$

$$F_{\text{возм}} = \int_{[0,1]} R(\mu) \circ G = \sup_{\alpha \in [0,1]} \min\{\alpha, G(H_\alpha)\},$$

где $H_\alpha = \{\mu \in [0,1] : R(\mu) \geq \alpha\}$, $G(H_\alpha) = \max_{R(\mu) \geq \alpha} \{1 - \mu\}$.

Для вычисления интегральных показателей надежности монотонных структур можно воспользоваться введенным понятием [6] генома структуры $\vec{\chi} = (\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)$:

$$F_{\text{однор}}(\vec{\chi}) = (\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n) \cdot \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{n+1}\right)^T ; \quad (2)$$

$$F_{\text{неоднор}}(\vec{\chi}) = (\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n) \cdot \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n}\right)^T ; \quad (3)$$

$$F_{\text{возм}}(\vec{\chi}) = \mu_*, \text{ где } (\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n) \cdot (\mu_*, \mu_*^2, \dots, \mu_*^n)^T = 1 - \mu_* \quad (4)$$

Имитационное моделирование структурной живучести СТО

Для исследования структурной живучести СТО в условиях действия различного рода причин воспользуемся аппаратом имитационного моделирования. Основными этапами реализации имитационного моделирования (рис. 2) являются: определение вероятностных законов распределения тех исходных данных, которые по своей физической природе имеют или могут иметь случайные отклонения; генерация случайных чисел с заданными законами распределений; статистическая обработка результатов моделирования.

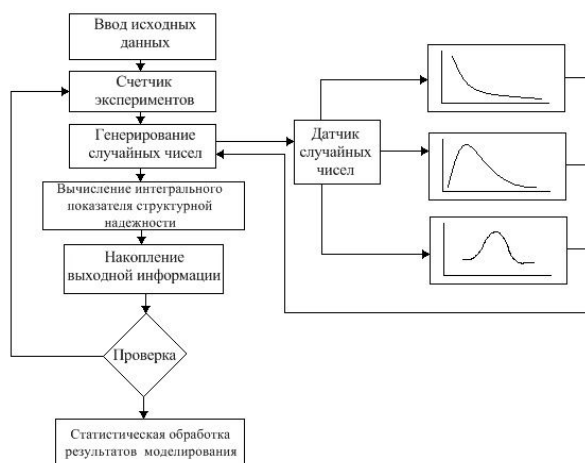


Рис. 2. Этапы имитационного моделирования

В процессе исследований будем имитировать воздействия на различные элементы (вершины и дуги) структуры СТО: либо на вершины при условии безотказной работы связей, либо на связи при условии безотказной работы вершин, либо на вершины и дуги. В результате воздействия происходит деградация структуры СТО. Для оценивания структурной надежности образовавшейся в результате воздействия структуры используем введенные показатели (2)–(4). Статистическая обработка результатов вычислений осуществляем по схеме, принятой в теории случайных процессов. Применительно к рассматриваемой задаче был разработан программный комплекс, позволяющий проводить имитационное моделирование воздействий на элементы структуры СТО и оценку структурной живучести системы. В разработанном прототипе программного комплекса реализованы следующие режимы работы.

Первый режим работы программного комплекса – ввод исходной структуры СТО как в ручном, так и автоматическом режимах. Внешний вид интерфейса пользователя ввода исходных данных представлен на рис. 3.

Второй режим работы программного комплекса – визуальный контроль за изменениями графической модели в результате воздействия по элементам структуры (рис. 4).

Третий режим работы – расчёт полного и сокращённого полиномов надёжности структуры, структурной живучести, а также построение графических зависимостей (рис. 5).

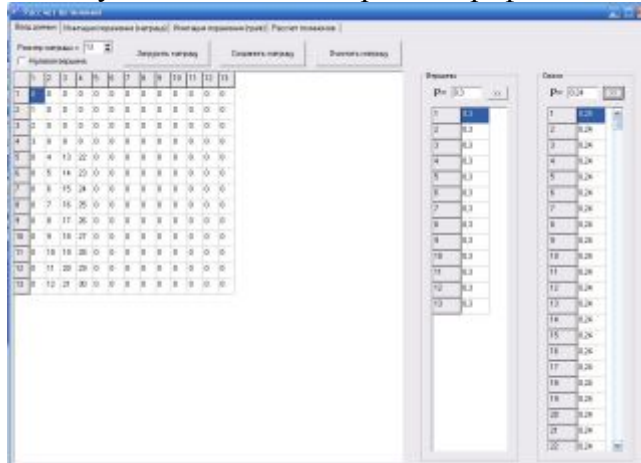


Рис. 3. Интерфейс пользователя ввода исходной структуры СТО

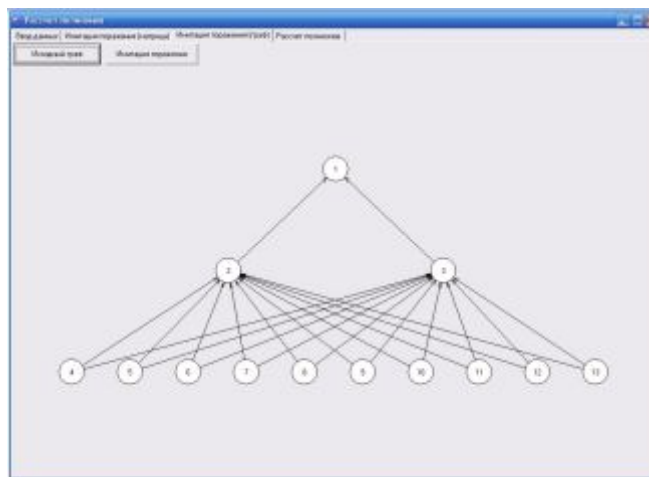


Рис. 4. Интерфейс пользователя визуального контроля деградации структуры СТО

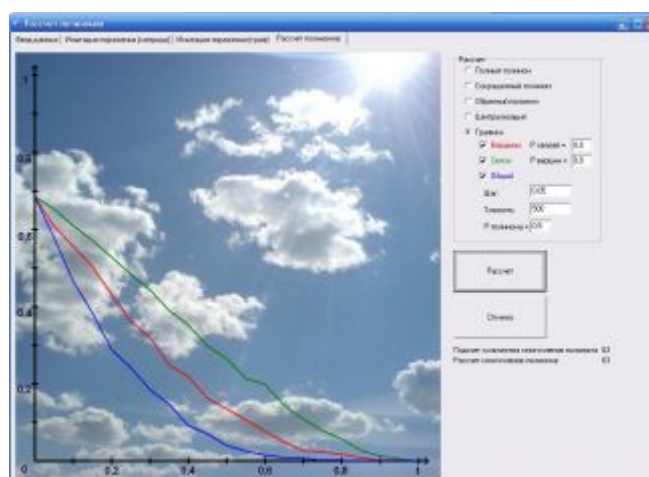


Рис. 5. Интерфейс пользователя результатов имитационного моделирования

Выводы

Разработан модельный комплекс для исследования структурной надежности и живучести СТО в процессе воздействия на элементы структуры различных поражающих факторов. Комплекс включает в себя аналитические модели, позволяющие получать оценки структурной надежности СТО, и имитационные модели, предназначенные для исследования деградации структуры СТО при поражении ее элементов.

Взаимодействие указанных моделей осуществляется на уровне исходных данных, передаваемых из аналитической модели в имитационную.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке РФФИ (гранты 07-07-00169, 08-08-00403, 09-07-00066а, 08-08-00346а), РГНФ (грант 09-01-12105в), Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект №О-2.3/03)

Литература

1. **Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.** Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
2. **Рябинин И. А., Черкесов Г. Н.** Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. М.: Радио и связь, 1981.
3. **Рябинин И. А.** Надежность и безопасность сложных систем//СПб.: Политехника, 2000. 248 с.
4. **Соложенцев Е. Д.** Сценарное логико-вероятностное управление риском в бизнесе и технике. СПб.: Бизнес-пресса, 2004. 432 с.
5. **Павлов А. Н.** Нечетко-возможностный подход к анализу и оцениванию безопасности сложных организационно-технических систем//XI Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика-2008 (РИ-2008)», РФ, г. Санкт-Петербург, 22–24 октября 2008 г.: Материалы конференции. С. 48–49.
6. **Павлов А. Н.** Исследование генома двухполюсной сетевой структуры//Труды IX Международной научной школы МА БР-2009 «Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах», Санкт-Петербург, 7–11 июля 2009 г. СПб.: ГУАП, 2009. С. 429–434.