

ПРОБЛЕМИ ФУНДАМЕНТАЛЬНИХ І ПРИКЛАДНИХ НАУК

PROBLEMS OF BASIC AND APPLIED SCIENCES

УДК 004.942

Г.О. Оборский, д-р техн. наук, проф.,
О.С. Савельева, канд. техн. наук, доц.,
Н.А. Котенко, магистр,
Одесс. нац. политехн. ун-т

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД В МОДЕЛИРОВАНИИ МАРКОВСКИХ ПРОЦЕССОВ

Г.О. Оборський, О.С. Савельєва, Н.А. Котенко. **Синергетичний підхід в моделюванні марківських процесів.** Розглядаються питання створення інформаційної системи підтримки прийняття рішень в САПР і АСУ, заснованої на синергетичному об'єднанні можливостей різних видів марківських моделей складних динамічних систем з резервуванням: емпіричної, напівмарківської та морфологічної.

Г.А. Оборский, О.С. Савельева, Н.А. Котенко. **Синергетический подход в моделировании марковских процессов.** Рассматриваются вопросы создания информационной системы поддержки принятия решений в САПР и АСУ, основанной на синергетическом объединении возможностей различных видов марковских моделей сложных динамических систем с резервированием: эмпирической, полумарковской и морфологической.

G.A. Oborsky, O.S. Savelyeva, N.A. Kotenko. **Synergetic approach in modeling of Markov processes.** The work is devoted to the creation of decision-making support in CAD and CAM information system, based on the synergetic association of different Markov models of complex dynamic systems with reservation possibilities: empirical, semi-Markov and morphological.

Основное понятие синергетики — структура сложной динамической системы — определяется как состояние, возникающее в результате многовариантного и неоднозначного поведения многоэлементных структур или многофакторных сред, которые не деградируют к стандартному для замкнутых систем усреднению термодинамического типа, а развиваются вследствие открытости, притока энергии извне, нелинейности внутренних процессов, появления особых режимов с обострением и наличия более одного устойчивого состояния.

Одним из действенных методов повышения надежности динамической системы является структурное резервирование — введение дополнительных резервных элементов структуры, которые при абсолютной надежности элементов исходной системы не являются функционально необходимыми [1].

Моделирование жизненного цикла (ЖЦ) такой сложной динамической системы удобнее всего осуществлять с помощью методов марковского анализа, использующих диаграмму состояний и переходов для моделирования надежности поведения системы во времени. Главным преимуществом применения таких методов является то, что они позволяют легко моделировать многочисленные стратегии технического обслуживания. Кроме того, в марковской модели можно отразить порядок, в котором происходят многократные отказы. К сожалению, другие методы анализа надежности не всегда позволяют учесть сложные стратегии технического обслуживания [2].

При использовании марковской модели как модели поведения таких систем [3] исследователи сталкиваются со многими проблемами, решение которых может быть найдено на пути взаимодействия марковских моделей различных видов, т.к. в соответствии с принципами синергетики, когда нелинейные динамические системы объединяются, новое образование не равно сумме частей, а образует систему другой организации или систему иного уровня.

Главная проблема при создании модели заключается в том, что количество ее состояний и возможных переходов быстро возрастает с ростом количества элементов. Кроме того, существующие виды марковских моделей не позволяют сочетать стохастическую основу такого подхода с вполне детерминированными событиями, происходящими при реальной эксплуатации конкретных технических объектов.

Структурный анализ сложных динамических систем со структурным резервированием с помощью марковских моделей основывается на том предположении, что система в целом может существовать в различных состояниях, каждое из которых определяется специфической комбинацией работоспособного и неработоспособного состояний ее элементов [4, 5].

В случайный момент времени при отказе или восстановлении работоспособности хотя бы одного элемента вся система может перейти в следующее состояние. Важнейшим компонентом такого анализа является *прогноз поврежденной структуры*, представляющий собой “расписание” будущих отказов отдельных элементов резервируемых систем. Прогнозирующая модель должна при этом содержать две основные подмодели: подмодель *прогноза поврежденной структуры* проектируемых (управляемых) объектов системы на протяжении ЖЦ и подмодель их *численной оценки критериев надежности* [6, 7].

Существует много видов марковских моделей, часть которых наиболее подходит для прогнозирования и оценки как параметрической, так и структурной надежности систем.

В частности, именно для этих целей создавалась *эмпирико-статистическая (ЭС) модель*, работа которой построена на непосредственной оценке повреждений, произошедших в системе при ее стендовых и полигонных испытаниях [8], но, к сожалению, с ее помощью нельзя оценить текущее состояние объекта в целом, тем более, идентифицировать его отказ.

Полумарковские (ПМ) модели созданы для моделирования дискретных систем в непрерывном времени [9, 10], однако для их обучения необходима информация, полученная при практических испытаниях объекта моделирования, что не всегда удобно, особенно, на этапе проектирования объекта.

И, наконец, *морфологические (МО) марковские модели* применимы в идентификации состояний сложных систем, но малопригодны для моделирования ЖЦ реальных объектов [7].

Таким образом, марковские модели являются универсальным средством для изучения и прогнозирования многих динамических процессов. Однако реальное их применение зачастую ограничивается отсутствием информации о поведенческих тенденциях в развитии соответствующих динамических систем, а также действенных и, главное, быстродействующих методов идентификации отказов и интегральной оценки надежности предлагаемых технических решений, необходимых как при проектировании, так и при управлении сложными динамическими системами.

Предлагается информационная система поддержки принятия решений в САПР и АСУ на этапах проектирования и управления сложными динамическими системами с резервированием, основанная на синергетическом объединении возможностей различного вида марковских моделей.

Рассмотрим структуру сложной системы, состоящей из n отдельных взаимозависимых элементов. Если система приняла состояние z , то она проводит в нем некоторое случайное время, а затем вследствие отказа или восстановления какого-либо элемента переходит в новое состояние. Таким образом, в этом случае все реализации фазового процесса $\{Z(t)\}$ являются *кусочно-постоянными*. Считая связи абсолютно надежными, а элементы такими, которые могут находиться только в двух состояниях: исправном и неисправном (работоспособном и неработоспособном), принимаем, что система является поглощающей, т.е. отказавшие узлы не восстанавливаются и дальнейшие переходы из них невозможны [4].

Главной особенностью прогнозирования эксплуатации таких систем с резервированием является то, что на всех итерациях ЖЦ, кроме последней, суммарное повреждение отдельных элемен-

тов не приводит к отказу всей системы, а значит, возникает проблема назначения некоторой совокупности повреждений на каждой такой итерации. Естественно предположить, что в реальной жизни накопление повреждений носит стохастический характер: из-за особенностей изготовления не бывает двух совершенно одинаковых объектов; из-за особенности эксплуатации не бывает одинаковых условий их работы и одинаковых случайностей, подстерегающих объекты.

Например, пусть представлена некоторая система, состоящая из $n = 7$ элементов, которые в исходном состоянии (момент i) исправны. Система обладает свойством «марковости», которое означает отсутствие последствия. На графе перехода в следующее возможное новое состояние системы j_k , где $k \geq 1$, показано возможное множество S_7 вариантов изменения ее состояний (рис. 1).

Мощность этого множества, даже для относительно простых объектов, чрезвычайно велика и быстро растет при увеличении n . Так, в нашем примере только на первой итерации может быть получено 127 состояний системы, т.е.:

$$S_7 = C_7^1 + C_7^2 + C_7^3 + C_7^4 + C_7^5 + C_7^6 + C_7^7 = 127, \tag{1}$$

где C_n^q — число сочетаний из n элементов по q элементов.

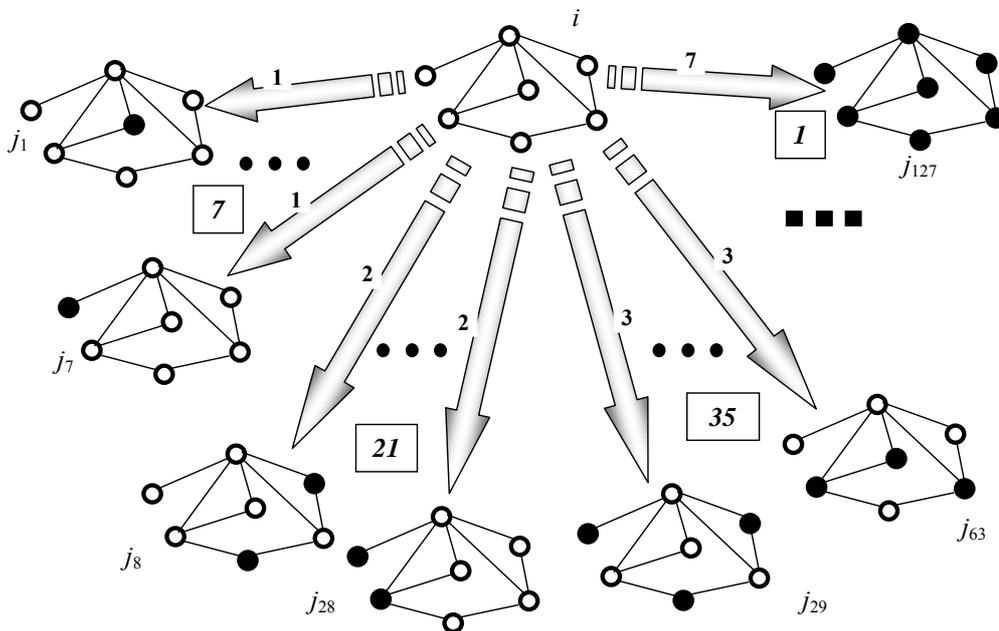


Рис. 1. Пример графа переходов для системы из 7 элементов

Если система имеет избыточную структуру, то часть этих состояний $S_{n\text{отк}}$ приведет к отказу системы в целом, а часть $S_{n\text{испр}}$ — нет. Очевидно, что

$$S_n = S_{n\text{отк}} + S_{n\text{испр}}. \tag{2}$$

На рассматриваемом этапе ЖЦ система в любой момент времени из состояния S_i может перейти в состояние S_j , при этом может произойти отказ любого сочетания из семи элементов по 1, 2, ..., 6 — переходы $ij_1 \dots ij_{126}$ и, наконец, могут отказать все элементы — переход ij_{127} . Каждый из переходов от S_i к $S_{j_1} \dots S_{j_{127}}$ соответственно характеризуется вероятностями $p_1 \dots p_{127}$, значения которых определяются тремя группами факторов:

- внутренними свойствами системы: конструкцией элементов и связей, технологически-ми переходами и пр.;
- условиями внешней среды: механическими нагрузками, температурным воздействием и пр.;
- непредвиденными случайными воздействиями, источники которых находятся как внутри, так и вне системы.

Здесь возникают *первая и вторая задачи*: определить вероятности $p_1 \dots p_{127}$ и статистические характеристики времени τ_{ij} наступления перехода для реальной системы, работающей в реальных условиях эксплуатации. Эти задачи решаются в результате комплексного применения ЭС и ПМ моделей на основании статических, динамических или полигонных испытаний исследуемых систем или их прототипов.

Если после очередной итерации система работоспособна, моделирование может быть продолжено от выбранной вершины — эволюционного корня (рис. 2). Выбор может быть обоснован совокупным воздействием факторов и необязательно отвечать наиболее вероятному переходу.

В рамках решения *третьей задачи* на каждой итерации моделирования ЖЦ выбирается один путь среди S_n возможных состояний, определяемый количеством элементов и их характером. Фактически именно здесь решается вопрос о выборе «корня» дальнейшей эволюции системы, т.к. она может быть продолжена от любого состояния из подмножества S_n испр, а мощность этого подмножества, особенно на начальных стадиях ЖЦ резервированных систем, мало отличается от мощности множества S_n .

Эта задача решается в результате комплексного применения ПМ и МО моделей. Аналогичные рассуждения можно применять ко всем другим переходам ЖЦ системы: $j \rightarrow (j+1)$; $(j+1) \rightarrow (j+2)$ и т.д., сохраняющим работоспособность системы в целом. *Четвертая задача* заключается в идентификации отказа на последовательных переходах эволюции системы и решается в результате комплексного применения ЭС и МО моделей.

В рамках решения *пятой задачи* осуществляется интегральная оценка надежности системы. Для этого используется МО модель (см. таблицу), основанная на вычислении энтропийного критерия надежности

$$K = - \sum_{i=n_1+1}^{n_2-1} [p_i \log_2 p_i + (1-p_i) \log_2 (1-p_i)], \quad (3)$$

где p_i — вероятность отказа системы после повреждения n ее элементов.

Применяемые марковские модели

№	Содержание задачи	Применяемые модели		
		ЭС	ПМ	МО
1	Определение вероятностей переходов, p_i	+	+	—
2	Определение времени переходов, τ_{ij}	+	+	—
3	Выбор корня для последующего перехода	—	+	+
4	Идентификация отказа [7]	+	—	+
5	Интегральная оценка надежности	—	—	+

Использование энтропии для оценки и сравнения сложных технических систем, поведение которых имеет признаки стохастичности, приобретает все большее распространение [11].

В данном случае она дает возможность при диагностике оценить техническое состояние системы одним значением критерия K , играющим во многих случаях главную роль, например, при необходимости быстрого подбора варианта конструкции в САПР или варианта структурной перестройки системы в управлении.

Таким образом, для решения проблемы информационной поддержки прогнозирования структурной надежности при проектировании и управлении сложными динамическими системами

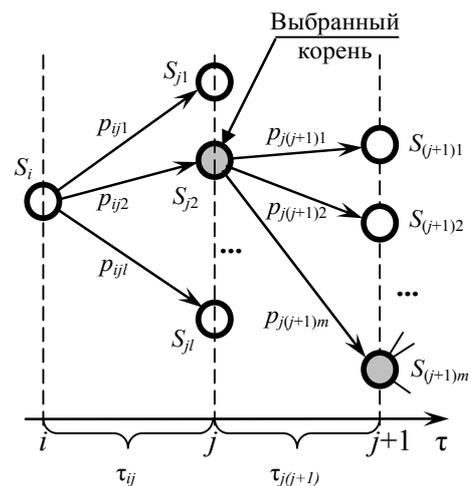


Рис. 2. Схема возможных движений системы по итерациям жизненного цикла

ми с резервированием, а также выполнения текущей и интегральной оценок их структурной отказоустойчивости предложено комплексное применение марковских моделей различных типов.

Литература

1. Острейковский, В.А. Теория надежности / В.А. Острейковский. — М.: Высш. шк., 2003. — 408 с.
2. Князева, Е. Н. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем / Е.Н. Князева, С.П. Курдюмов. — М.: Наука, 1994. — 236 с.
3. Кельберт, М.Я. Вероятность и статистика в примерах и задачах. Т. 2: Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов и их приложения / М.Я. Кельберт, Ю.М. Сухов. — М.: МЦНМО, 2009. — 295 с.
4. Байхельт, Ф. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход / Ф. Байхельт, П. Франклин. — М.: Радио и связь, 1988. — 392 с.
5. Application of Markov techniques : The Intern. Standard IEC 61165 (1995-01). — 45 p.
6. Становский, А.Л. Моделирование надежности компьютерных сетей / А.Л. Становский, О.Е. Плачинда, И.Л. Стадник // Зб. наук. пр. Одес. ін-ту Сухопутних військ. — 2006. — № 12. — С. 115 — 117.
7. Моделирование отказоустойчивости в САПР сложных технических систем / А.Л. Становский, В.М. Тонконогий, О.С. Савельева, О.Е. Плачинда // Сучасні технології в машинобудуванні: До ювілею Ф.Я. Якубова: Зб. наук. статей. — Харків: НТУ “ХПІ”, 2007. — С. 445 — 450.
8. Балан, С.А. Статистические методы прогнозирования жизненного цикла сложных восстанавливаемых технических систем / С.А. Балан, А.Л. Становский, Халиль Ягхи // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса: ОГПУ, 2000. — Вып. 3 (12). — С. 95 — 98.
9. Дышин, О.А. Полумарковские модели управления рисками в магистральных газонефтепроводных системах / О.А. Дышин, И.А. Азизов // Электрон. моделирование. — 2010. — Т. 32, № 2. — С. 15 — 30.
10. Рыков, В.В. Регенерирующие процессы с несколькими типами точек регенерации / В.В. Рыков, М.А. Ястребенецкий // Большие системы. Массовое обслуживание. Надежность. — М.: Наука, 1970. — С. 203 — 208.
11. Хазен, А.М. Введение меры информации в аксиоматическую базу механики / А.М. Хазен. — М.: РАУБ, 1998. — 324 с.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Гогунский В.Д.

Поступила в редакцию 23 декабря 2010 г.