

**Г.А. ОБОРСКИЙ**, д-р техн. наук, **О.С. САВЕЛЬЕВА**, канд. техн. наук,  
**Н.А. КОТЕНКО**, Одесса, Украина

## **ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СТРУКТУРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАРКОВСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Робота присвячена створенню інформаційної системи підтримки прийняття рішень в САПР і АСУ, заснованої на синергетичному об'єднанні можливостей різних видів марковських моделей складних динамічних систем з резервуванням: емпіричної, напівмарковської та морфологічної. Емпірико-статистична модель оцінює ушкодження, що відбулися в об'єкті при його стендових і полігонних випробуваннях, напівмарковська модель створюється для моделювання дискретних об'єктів у неперервному часі і, нарешті, морфологічні марковські моделі застосовуються для ідентифікації станів складних систем.

Работа посвящена созданию 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. Эмпирико-статистическая модель оценивает повреждения, произошедшие в объекте при его стендовых и полигонных испытаниях, полумарковская модель создается для моделирования дискретных объектов в непрерывном времени и, наконец, морфологические марковские модели применяются для идентификации состояний сложных систем.

*G.A. OBORSKIJ, O.S. SAVEL'EVA, N.A. KOTENKO*  
*INFORMATION SUPPORT OF THE AUTOMATED STRUCTURAL DESIGNING*  
*MARKOVIAN PROCESSES*

The work is devoted to the creation support of decision-making in CAD and CAM information system, based on the synergetic association of different markov models of difficult dynamic systems with reservation possibilities: empirical, semimarkov and morphological. The empirico-statistical model estimates the damages which have occurred in object at its bench and polygon tests, semimarkov the model is created for modeling of discrete objects in continuous time and, at last, morphological markov models are applied to identification of conditions of difficult systems.

Основное понятие синергетики – определение структуры как состояния, возникающего в результате многовариантного и неоднозначного поведения таких 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.

При рассмотрении марковского процесса как модели «поведения» таких структур исследователи сталкиваются с многими проблемами, решение которых может быть найдено на пути взаимодействия марковских моделей различных видов, так как, в соответствии с принципами синергетики, когда нелинейные динамические системы объединяются, новое образование не равно сумме частей, а образует систему другой организации или системе иного уровня.

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

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

Моделирование жизненного цикла (ЖЦ) таких объектов удобнее всего осуществлять с помощью методов марковского анализа, использующих диаграмму состояний и переходов и моделирующих аспекты 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].

Марковская система рассматривается как набор элементов, каждый из которых может существовать только в одном из двух состояний: неработоспособном или работоспособном. Структурный анализ марковских систем 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 [3, 4]. В случайный момент отказа или восстановления хотя бы одного элемента вся система может перейти из одного состояния в следующее по времени. Важнейшим компонентом такого анализа является *прогноз повреждений структуры*, представляющий собой «расписание» будущих отказов отдельных элементов резервируемых систем. Прогнозирующая модель должна, при этом, содержать две основные под-

модели: подмодель *прогноза повреждений структуры* проектируемых (управляемых) объектов на протяжении их жизненных циклов (ЖЦ) и подмодель *численной оценки критериев надежности* этих объектов [5, 6].

Существует много видов марковских моделей, часть которых наиболее подходит для прогнозирования и оценки надежности.

В частности, именно для этих целей создавалась *эмпирико-статистическая (ЭС) модель*, работа которой построена на непосредственной оценке повреждений, произошедших в объекте при его стендовых и полигонных испытаниях [7]. Обладая большим «практическим опытом» прогнозирования поэлементных повреждений, такая модель, к сожалению, не может оценить текущее состояние объекта в целом, тем более, идентифицировать его отказ.

*Полумарковские (ПМ) модели* созданы для моделирования дискретных объектов в непрерывном времени [8, 9], 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 [6].

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

Целью настоящей работы является создание информационной системы поддержки принятия решений в САПР и АСУ, основанной на синергетическом объединении возможностей различного вида марковских моделей сложных динамических систем с резервированием, в основном, в области техники.

Рассмотрим структуру сложного объекта в виде  $n$  отдельных взаимозависимых элементов. Если система приняла состояние  $z$ , то она проводит в нем некоторое время, вообще говоря, случайное, а затем вследствие отказа или восстановления какого-либо элемента «скачкообразно» переходит в новое состояние. Таким образом, в этом случае все реализации фазового процесса  $\{Z(t)\}$  являются *кусочно-постоянными*.

Будем считать также связи абсолютно надежными, а элементы такими, которые могут находиться только в двух состояниях: исправном и неисправном. Примем также, что система поглощающая, т.е. отказавшие узлы не восстанавливаются и дальнейшие переходы из них невозможны [3].

Главной особенностью прогнозирования эксплуатации таких систем с резервированием является то, что на всех итерациях ЖЦ, кроме последнего, суммарное повреждение не приводит к отказу, а значит, перед моделью возникает проблема «назначения» некоторой совокупности поврежденных на каждой такой итерации. Естественно предположить, что в реальной жизни накопление повреждений носит стохастический характер: не бывает двух совершенно одинаковых объектов (особенности изготовления), одинаковых условий их работы (особенности эксплуатации) и одинаковых случайностей, подстерегающих объекты.

Рассмотрим простой пример. Пусть в качестве объекта представлена некоторая система, структура которой состоит из  $n = 7$  элементов. Исходное состояние системы – момент  $i$  – характеризуется их исправностью (рис. 1).

Совокупность переходов на графе возможных состояний объекта в процессе его эксплуатации представляет собой множество вариантов изменения состояний системы на одной итерации ЖЦ (рис. 1).

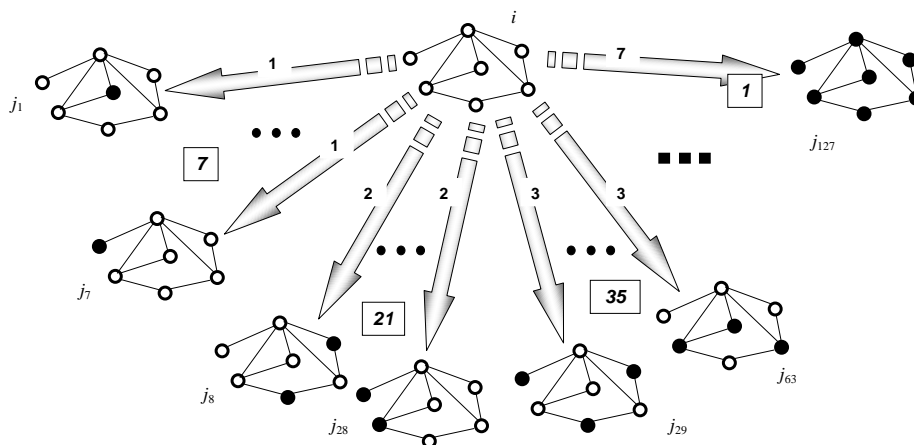


Рисунок 1 – Схема 127 возможных переходов семиузловой системы из состояния  $i$  в новое состояние  $j$  на одной итерации ЖЦ

Мощность этого множества, даже для относительно простых объектов, чрезвычайно велика. Так, в нашем примере только на первой итерации переход к моменту  $j$  может быть реализован 127 способами:

$$S_7 = C_7^1 + C_7^2 + C_7^3 + C_7^4 + C_7^5 + C_7^6 + C_7^7 = 127. \quad (1)$$

Общее количество вариантов быстро растет при увеличении  $n$ . Так как система имеет избыточную структуру, часть  $S_n$  отк этих переходов приводит к отказу системы в целом, а часть  $S_n$  испр – нет. Очевидно, что

$$S_{n \text{ отк}} + S_{n \text{ испр}} = S_n. \quad (2)$$

На рассматриваемом в нашем примере этапе ЖЦ системы в любой момент времени состояние  $i$  может перейти в состояние  $j$ , при этом может произойти отказ любого сочетания из семи элементов по 1, 2, ..., 6 (переходы  $ij_1 - ij_{126}$ ) и, наконец, могут отказаться все элементы (переход  $ij_{127}$ ). Каждый из переходов от  $i$  к  $j_1 \dots j_{127}$ , соответственно, характеризуется вероятностями  $p_1 \dots p_{127}$ , значения которых определяются тремя группами факторов:

- внутренними свойствами системы (конструкцией элементов и связей, технологическими переходами и пр.);
- условиями внешней среды (механические нагрузки, температурное воздействие 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 наступления переходов  $\tau_{ji}$  для реальной системы, работающей в реальных условиях эксплуатации. Эти задачи решаются в результате комплексного применения ЭС и ПМ моделей.

В случае выхода системы из очередной итерации в работоспособном состоянии моделирование может быть продолжено от выбранного «корня» (рис. 2). Выбор может быть обоснован рядом причин и необязательно отвечать наиболее вероятному переходу.

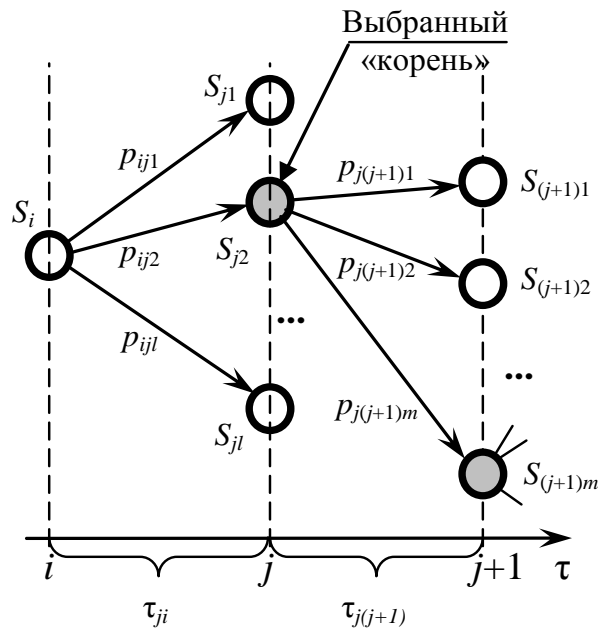


Рисунок 2 – Схема возможных движений системы по итерациям жизненного цикла

Поэтому, в рамках решения *третьей задачи* на каждой итерации моделирования ЖЦ необходимо выбрать один путь среди  $S_n$  испр возможных, причем эта величина определяется количеством элементов и характером последних. Фактически, именно здесь решается вопрос о выборе «корня» дальнейшей эволюции, 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 решаются 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 позициях эволюции системы. Эти задачи решаются в результате комплексного применения ЭС и МО моделей.

И, наконец, интегральная оценка надежности объекта осуществляется в рамках решения *пятой задачи*. Для этого используется МО модель (см. табл.), 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.

Использование энтропии для оценки и сравнения сложных технических систем, «поведение» которых имеет признаки стохастичности, приобретает все большее распространение [10].

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

Таблица – Использование марковских моделей различных типов для решения задач информационной поддержки структурного проектирования и управления

№	Содержание задачи	Применяемые модели		
		ЭС	ПМ	МО
1	Определение вероятностей переходов	+	+	–
2	Определение времени переходов	+	+	–
3	Выбор «корня» последующего перехода	–	+	+
4	Идентификация отказа	+	–	+
5	Интегральная оценка надежности	–	–	+

Таким образом, в работе решена проблема информационной поддержки прогнозирования структурной надежности сложных резервированных технических систем путем комплексного применения марковских моделей различных типов. Такая система поддержки принятия решений способна эффективно функционировать как в рамках САПР, так и при структурном управлении.

**Список использованных источников:** 1. *Острейковский В.А.* Теория надежности. – М.: Высшая школа, 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. *Байхельт Ф.* Надежность и техническое обслуживание. Математический подход / *Ф. Байхельт, П. Франклин.* – М.: Радио и связь, 1988. – 392. 4. Application of Markov techniques. – The International Standard IEC 61165 (1995-01). – 45 p. 5. *Становский А.Л.* Моделирование надежности компьютерных сетей / *А.Л. Становский, О.Е. Плачинда, И.Л. Стадник* // Зб. наук. праць Одесько інституту сухопутних військ. – 2006. – № 12. – С. 115 – 117. 6. *Становский А.Л.* Моделирование отказоустойчивости в САПР сложных технических систем / *А.Л. Становский, В.М. Тонконогий, О.С. Савельева, О.Е. Плачинда* // Резание и инструмент в технологических системах. – 2007. – Вып. 73. – С. 290 – 295. 7. *Балан С.А.* Статистические методы прогнозирования жизненного цикла сложных восстанавливаемых технических систем / *С.А. Балан, А.Л. Становский, Халиль Ягхи* // Труды Одесского политехнического университета. – Одесса. – 2000. – Вып. 3. – С. 95 – 98. 8. *Дышин О.А.* Полумарковские модели управления рисками в магистральных газонефтепроводных системах / *О.А. Дышин, И.А. Азизов* // Электронное моделирование. – 2010. – Т. 32. – № 2. – С. 15 – 30. 9. *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. 10. *Хазен А.М.* Введение меры информации в аксиоматическую базу механики. М.: РАУБ, 1998. – 324 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Ostrejkovskij V.A.* Teorija nadezhnosti. – M.: Vysshaja shkola, 2003. – 408 s. 2. *Knjazeva E. N.* Zakony jevoljucii i samoorganizacii slozhnyh sistem / *E.N. Knjazeva, S.P.Kurdjumov.* – M.: Nauka, 1994. – 236 s. 3. *Bajhel't F.* Nadezhnost' i tehničeskoe obslužhivanie. Matematičeskij podhod / *F. Bajhel't, P. Franklin.* – M.: Radio i svjaz', 1988. – 392. 4. Application of Markov techniques. – The International Standard IEC 61165 (1995-01). – 45 p. 5. *Stanovskij A.L.* Modelirovanie nadezhnosti komp'juternyh setej / *A.L. Stanovskij, O.E. Plachinda, I.L. Stadnik* // Zb. nauk. prac' Odes'ko institutu suhoputnih vijs'k. – 2006. – № 12. – S. 115 – 117. 6. *Stanovskij A.L.* Modelirovanie otkazoustojchivosti v SAPR slozhnyh tehničeskijh sistem / *A.L. Stanovskij, V.M. Tonkonogij, O.S. Savel'eva, O.E. Plachinda* // Rezanie i instrument v tehnologičeskijh sistemah. – 2007. – Vyp. 73. – S. 290 – 295. 7. *Balan S.A.* Statističeskije metody prognozirovanija zhiznennogo cikla slozhnyh vosstanavlivaemyh tehničeskijh sistem / *S.A. Balan, A.L. Stanovskij, Halil' Jaghi* // Trudy Odessko-go politehničeskogo universiteta. – Odessa. – 2000. – Vyp. 3. – S. 95 – 98. 8. *Dyshin O.A.* Polumarkovskie modeli upravlenija riskami v magistral'nyh gazoneftetrubo-provodnyh sistemah / *O.A. Dyshin, I.A. Azizov* // Jelektronnoe modelirovanie. – 2010. – T. 32. – № 2. – S. 15 – 30. 9. *Rykov V.V.* Regenerirujuwie processy s neskol'kimi ti-pami tocek regeneracii / *V.V. Rykov, M.A. Jastrebeneckij* // Bol'shie sistemy. Masso-voe obslužhivanie. Nadezhnost'. – M.: Nauka, 1970. – S. 203 – 208. 10. *Hazen A.M.* Vve-denie mery informacii v aksiomatičeskiju bazu mehaniki. M.: RAUB, 1998. – 324 s.