УДК 519.876.5:519.873:004.94

Е.И. Сукач

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ВЕРОЯТНОСТНО-АЛГЕБРАИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЁЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Излагается подход к исследованию надёжности сложных систем и средства его автоматизации, основанные на методе вероятностно-алгебраического моделирования, позволяющего определить вероятностные характеристики надёжности сложных систем по характеристикам надёжности составляющих их компонентов. Моделируются изменения, происходящие с каждым из компонентов. Учитываются связи между компонентами, определяющие изменения характеристик системы в целом.

Введение

Существует множество систем, которые относятся к категории сложных. Эта сложность определяется большим числом элементов составляющих систему, сложностью функциональных и логических связей между ними, многорежимностью систем, возможностью восстанавливаемых и невосстанавливаемых отказов у одних и тех же элементов в зависимости от характера самого отказа, последействием, выражающимся в необходимости отключения ряда исправных элементов при ремонте отказавших.

С позиций анализа надежности сложных систем можно выделить статические и динамические модели. В статических моделях предполагается, что состояния системы определяются наборами работоспособных и неработоспособных элементов в выбранные моменты времени. В динамических моделях происходящие события и отказы рассматриваются как процессы, развивающиеся во времени. Как статическое, так и динамическое моделирование базируются на известных математических методах.

Для статического исследования надёжности сложных систем используется классический логико-вероятностный метод [1] и варианты его развития и усовершенствования [2, 3]. Сущность этого метода состоит в описании структуры системы средствами математической логики и определении количественной оценки надёжности системы с использованием теории вероятностей. Классические статические модели позволяют рассчитывать лишь мгновенные показатели надежности, определяемые в момент времени t. К динамическим моделям можно отнести моделирование систем марковскими процессами [4], статистическое имитационное моделирование [5].

В обоих случаях, при исследовании надёжности реальных систем возникает проблема размерности (рост пространства состояний модели, усложнение связей между состояниями), которая делает невозможным ручное описание модели, определение параметров моделирования и выполнение расчетов. Проблема может быть решена только с помощью автоматизации, причем, программное обеспечение анализа надежности должно обеспечивать приемлемый для практики уровень точности описания процессов, характеризующих систему.

Современные компьютеры с соответствующим программным обеспечением являются универсальным средством, позволяющим путём моделирования исследовать надёжность сложных систем. Примерами программных средств анализа надежности и безопасности являются: АРБИТР (ПК АСМ СЗМА) [6] – программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности систем; АСОНИКА-К – программное обеспечение расчета надежности на основе методов статистического моделирования и аналитических формул для последовательно-параллельных систем [7]; Relex Reliability Studio [8] – программная среда, включающая различные методы анализа надёжности и реализующие разнообразные формы задания моделей (графы, деревья отказов, событий, блок-схемы надежности).

Перечисленные программные средства анализа надежности характеризуются высоким теоретическим уровнем, оригинальностью решений при решении установленного класса задач, обладают развитым интерфейсом и обеспечивают статистическую обработку результатов моделирования. Однако они предназначены для исследования класса структруно-сложных систем, которые представляются в виде графов, включающих большое число однотипных компонентов, которые, как правило, характеризуются двумя состояниями (работа и отказ). При этом описание связей между компонентами ограничено использованием двух логических операций (конъюнкция и дизъюнкция).

Следует отметить, что только малая часть систем имеет явно выраженную структуру в виде графической схемы. Часто исследуемые системы требуют умозрительного структурирования, позволяющего выявить связи между компонентами системы. Кроме этого существует класс сложных систем, структура которых проста, а взаимодействие между компонентами организуется по сложным законам. В виду указанной особенности такие системы можно отнести к классу функционально-сложных систем. Ко всему, следует отметить, что при определении характеристик надёжности сложных систем, следует учитывать промежуточные изменения, происходящие с каждым из элементов, учитывать их взаимное влияние и влияние на систему в целом. Зачастую, такая система, рассматриваемая в целом, обладает новыми качествами, несвойственными её отдельным элементам.

Цель работы – изложение метода вероятностно-алгебраическое моделирования [9], автоматизирующего этапы построения и эксплуатации статических моделей, отражающих одномоментное взаимодействие компонентов исследуемых систем и динамических моделей, описывающих процессы эволюции отдельных компонентов и всей системы во времени.

1. Исходные положения метода вероятностно-алгебраического моделирования

Объектом вероятностно-алгебраического моделирования являются сложные системы, структурно включающие множество компонентов $K = \{K_i\}, i = \overline{1, m}$. Компоненты систем описываются множеством состояний $S = \{S_j\}, j = \overline{1, n}$. Каждое из состояний S_j характеризуется совокупностью значений параметров исследуемой системы. Вероятности нахождения компонентов системы в каждом из состояний задаются векторами вероятностей:

$$P^i = (p_1^i, p_2^i, ..., p_n^i), \sum_{j=1}^{n} p_j^i = 1 . \qquad (1)$$

Предполагается, что компоненты системы независимы и между ними могут быть установлены функциональные связи с учётом целей исследования. Формализация связей между компонентами системы позволяет установить операции, задающие композиции компонентов.

Будем говорить, что компонент K_3 является композицией компонентов K_1 и K_2, если задано отображение F, однозначно определяющее состояние S_k компонента K_3 по состояниям S_i и S_j исходных компонентов K_1 и K_2, где $k = F(i, j)$. При этом отображение F однозначно определяет вероятности состояний результирующего устройства по вероятностям состояний исходных устройств:

$$P_k^3 = \sum_{k=F(i,j)} P_i^1 \cdot P_j^2 . \qquad (2)$$

Операция *, определённая на множестве векторов $P = \{P^i\}$, порождает алгебру А*, т. е. для любых P^1 и P^2 выполняется:

$$P^3 = P^1 * P^2 \qquad (3)$$

и для операции * справедливы свойства дистрибутивности:

$P^1 * (\alpha \cdot P^2 + \beta \cdot P^3) = \alpha \cdot P^1 * P^2 + \beta \cdot P^1 * P^3$,

$(\alpha \cdot P^2 + \beta \cdot P^3) * P^1 = \alpha \cdot P^2 * P^1 + \beta \cdot P^3 * P^1$,

где α и β – вещественные числа, $P^1, P^2, P^3 \in R^n$.

Алгебра задаётся структурными коэффициентами a_{ij}^k, удовлетворяющими условию:

$$\forall i, j, k \quad a_{ij}^k \geq 0 \text{ и } \sum_{k=1}^{n} a_{ij}^k = 1 . \qquad (4)$$

При этом элементы результирующего вектора P^3 вычисляются по формуле

$$p_k^s = \sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{n} a_{ij}^k p_i^1 p_j^2 \text{, где } i, j, k = \overline{1, n} . \qquad (5)$$

Алгебру, структурные коэффициенты которой удовлетворяют условию (4), будем называть стохастической [10], поскольку элементами её представления являются стохастические матрицы $M = \|m_{jk}\|$, элементы которых имеют вид:

$$m_{jk} = \sum_{i=1}^{n} a_{ij}^k p_i ,$$

где a_{ijk}– структурные коэффициенты алгебры, $p_i, i = \overline{1, n}$ – элементы вектора вероятностей *P*. Вид стохастических матриц определяется операцией, порождающей алгебру. Общим свойством стохастических алгебр является их связь с цепями Маркова, позволяющая сделать выводы об изменении состояний исследуемых систем с учётом введенных операций и свойств этих операций.

Частным случаем стохастических алгебр является алгебра A*, порождённая детерминированной операцией *. Такая операция задаётся функцией $F(i, j)$, а структурные коэффициенты определяются следующим образом:

$$\begin{cases} a_{ij}^k = 1, & \text{если} \quad k = F(i, j) \\ a_{ij}^k = 0, & \text{если} \quad k \neq F(i, j). \end{cases} \qquad (6)$$

Операции, порождающие стохастические алгебры, могут задаваться с использованием детерминированных и вероятностных функций. Примерами детерминированных функций $F(i, j)$ могут быть: $F(i, j) = \max(i, j)$ (для операции $\wedge$); $F(i, j) = \min(i, j)$ (для операции $\vee$); $F(i, j) = \min(i + j - 1, n)$ (для операции $\oplus$); $F(i, j) = |i - j|$ (для операции Θ) и др.

Перечисленные операции имеют естественную интерпретацию при решении задач надёжности сложных систем. Например, операция $\wedge$ (конъюнкция) описывает связь между последовательно соединёнными компонентами, а операция $\vee$ (дизъюнкция) – связь между параллельно соединёнными компонентами. При рассмотрении систем с двумя состояниями (1 и 0) они используются методом логико-вероятностного моделирования [1].

Функция $F(i, j) = \max(i, j)$ задаёт операцию $\wedge$ и позволяет определить структурные коэффициенты алгебры $A\wedge$. Отказ системы, представленной композицией компонентов $K_1 \wedge K_2$, определяется отказом одного из них и её состояние определяется состоянием наименее надёжного компонента.

Функция $F(i, j) = \min(i, j)$ задаёт операцию $\vee$ и позволяет определить структурные коэффициенты алгебры $A\vee$. В этом случае отказ системы, представленной композицией компонентов $K_1 \vee K_2$, происходит в результате отказа двух компонентов и её состояние определяется состоянием наиболее надёжного компонента.

Функция $F(i, j) = \min(i + j - 1, n)$ задаёт операцию $\oplus$ и определяет структурные коэффициенты алгебры $A\oplus$. При этом состояние системы определяется путём суммирования состояний исходных компонентов. В задачах исследования надёжности сложных систем эта операция может быть использована для оценки некоторого уровня накопления повреждений взаимодействующих компонентов.

Функция $F(i, j) = |i - j|$ задаёт операцию Θ и определяет структурные коэффициенты алгебры $A\Theta$. Состояние системы определяется разностью состояний исходных компонентов. При решении задач надёжности она позволяет учесть разницу между состояниями работоспособности компонентов исследуемой системы.

При решении практических задач часто встречаются ситуации, когда уместно использование операции, описывающей композицию *n* компонентов и порождающей *n*-арную алгебру. Например, в случае необходимости учёта вероятностных характеристик трех компонентов системы формируются структурные коэффициенты алгебры a^k_{ijm}, а элементы результирующего вектора вероятностей вычисляются по формуле

$$p^4_k = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{m=1}^{n} a^k_{ijm} p^1_i p^2_j p^3_m \ \forall i,j,m,k\,. \tag{7}$$

Для описания ситуаций, когда детерминированным состояниям компонентов соответствует некоторое распределение вероятностей результирующих состояний, используются операции, которые задаются с использованием вероятностных функций. Примером алгебры, порождённой недетерминированной операцией, является алгебра $A\otimes$, структурные элементы которой могут быть сформированы, например, следующим образом:

$$a^k_{ij} = 0.5(a1^k_{ij} + a2^k_{ij})\,,\ \forall i,j,k\,, \tag{8}$$

где $a1^k_{ij}$ и $a2^k_{ij}$ структурные элементы соответственно алгебр $A\wedge$ и $A\vee$.

Процесс формирования вектора вероятностей состояний системы по векторам вероятностей состояний составляющих систему компонентов с учётом введённых операций назовём вероятностно-алгебраическим моделированием.

Метод вероятностно-алгебраического моделирования (ВАЛМ) позволяет решать следующие задачи:

– получать вероятностные характеристики надёжности моделируемой системы по вероятностным характеристикам надёжности составляющих её компонентов;

– определять надёжность одного из компонентов системы по известным вероятностным характеристикам надёжности остальных компонентов и системы в целом;

– определять степень влияния надёжности отдельных компонентов и их групп на вероятностные характеристики всей системы.

2. Автоматизация этапов вероятностно-алгебраического моделирования

Для автоматизации построения и эксплуатации вероятностно-алгебраических моделей разработана программная система моделирования, реализующая автоматическое построение моделей и расчёты показателей надёжности исследуемых систем.

Система ВАЛМ включает: подсистему формирования графа модели; библиотеку процедур, реализующих функции, определяющих отношения между компонентами; подсистему статического моделирования; подсистему управления процессом моделирования; информационную базу данных; подсистему визуализации результатов моделирования; подсистему анализа результатов моделирования и принятия решений; библиотеку типовых вероятностно-алгебраических моделей.

Начальный этап ВАЛМ, который заключается в формализации исследуемой сложной системы с целью последующего моделирования, в своей содержательной, творческой части, не может быть автоматизирован. Здесь автоматизации подлежат только лишь его сервисные части, позволяющие построить граф модели и реализовать занесение входных параметров моделирования. С этой целью используются возможности подсистемы формирования графа модели.

В соответствии с выделенным множеством элементарных компонентов системы $K=\{Ki\}$ и функциональных отношений между ними $F=\{Fj\}$ в диалоговом режиме формируется графическая схема $G(F,K)$ исследуемой системы. Графическая схема представляет собой дерево, вершинами которого являются функции $\{Fj\}$, определяющие связи между компонентами системы, а рёбрами – множество компонентов $\{Ki\}$ системы и промежуточные результаты моделирования. Функции выбираются из библиотеки функций, включающей типовые функции надёжности, параметризованные заготовки вероятностных и n-арных функций.

Для каждого компонента задается количество состояний и начальные вектора вероятностей, характеризующие эти состояния, которые автоматически заносятся в информационную базу данных.

Для случая динамического моделирования реализована возможность выбора модели, определяющей способ изменения значений векторов вероятностей $P^{it} = (p_1^{it}, p_2^{it}, ..., p_n^{it}), \sum_{j=1}^{n} p_j^i = 1, t = \overline{1,T}$, свидетельствующих о надёжности компонентов. Одним из способов является моделирование с использованием различного вида цепей Маркова с дискретным временем и дискретными состояниями отдельных компонентов, позволяющих описать случайный процесс накопления повреждений. Возможен выбор моделей, реализующих накопление повреждений без восстановления, а также рассмотрение различных стратегий восстановления вероятностных характеристик компонентов в зависимости от степени их деградации (профилактический ремонт, полная замена, изменение режима функционирования и др.). Альтернативным способом задания динамического изменения векторов вероятностей является использование параметрических функций, зависящих от времени и заданных в символьном виде. Они позволяют проследить динамические изменения векторов компонентов в символьном виде и далее организовать вероятностно-алгебраическое моделирование характеристик системы в символьном виде.

Завершается этап формализации модели заданием критерия успешности функционирования системы с учётом поставленных целей исследования, который определяет допустимые границы изменения контролируемых параметров системы, определяющих состояния надёжности системы.

Все последующие, в том числе наиболее громоздкие этапы вероятностно-алгебраического моделирования и расчётов автоматизируются. Автоматизация стала возможна после разработки алгоритмических методов моделирования, обеспечивающий высокий уровень формализации не только способов представления исходных, промежуточных и конечных данных, но и собственно построения вероятностно-алгебраических моделей.

Этап построения алгебраической модели, реализуется подсистемой статического моделирования, позволяющей сформировать алгебраическую модель системы в символьном виде. На этом этапе на основе графической схемы исследуемой системы $G(F,K)$ определяется последовательность алгебраических преобразований, учитывающая структуру вложенности введённых операций. В символьном виде алгебраическая модель записывается следующим образом:

$$Z = F_1(F_2(Y_1, Y_2, Y_3(Y_3, Y_5), ..., F_z(Y_{m-1}, Y_m)), \qquad (9)$$

где $F = \{F_j\}, j = \overline{1,z}$ – множество функций, определяющих отношения между элементарными устройствами модели $\{Y_i, i = \overline{1,m}\}$. Аргументами функций, описывающих взаимодействие компонентов являются состояния компонентов, вероятностные значения которых задаются векторами вероятностей $\{P^i, i = \overline{1,m}\}$. Построенная в символьном виде алгебраическая модель системы, определяющая связи между элементарными устройствами модели, однозначно определяет вектор вероятностей состояний исследуемой системы в целом.

На следующем этапе реализуется расчётная вероятностная модель системы. При этом автоматически осуществляется преобразование алгебраической модели, в вероятностную форму:

$$P^{st} = P(\{P^{it}, Z\}, i = \overline{1,m}, t = \overline{1,T}), \qquad (10)$$

где $P^{it} = (p_1^{it}, p_2^{it}, ..., p_n^{it})$ – векторы вероятностей состояний компонентов системы, $P^{st} = (p_1^{st}, p_2^{st}, ..., p_n^{st})$ – вектор вероятностей состояний надёжности системы, $Z = F_1(F_2(Y_1, Y_2, Y_3(Y_3, Y_5), ..., F_z(Y_{m-1}, Y_m))$ – алгебраическая модель исследуемой системы.

Подсистема статического моделирования реализует одномоментное вероятностно-алгебраическое моделирование путём последовательной свёртки векторов вероятностей устройств модели по формуле (5) с учётом уровня вложенности функций и коэффициентов вероятностно-алгебраического моделирования (4).

Динамическое вероятностно-алгебраическое моделирование реализуется подсистемой управления процессом моделирования итерационно путём проведения компьютерных вычислений на каждом шаге моделирования с учётом вероятностного изменения состояний надёжности компонентов. В процессе динамического моделирования автоматизируются аналитические расчёты, однозначно определяющие вероятности состояний системы по вероятностям исходных устройств и просматриваются управляющие правила, описывающие динамику модели. Управляющие правила отслеживают моменты и последовательность возникновения критического уровня повреждений компонентов, приводящие к различным последствиям на системном уровне. Они определяют:

– изменение состава и последовательности операций между устройствами модели в зависимости от текущего состояния моделируемой системы;

– изменение состояний одних устройств модели зависимости от состояний других;

– однотипные и тождественные устройства модели.

Таким образом, если SZ_t – вектор вероятностей состояний исследуемой системы в момент времени t, а SZ_1, SZ_2,…, …,SZ_{t-1} – вектора вероятностей состояния моделируемой системы в моменты времени 1,…,t-1. Тогда $SZ_t=R(SZ_1, SZ_2, \ldots, SZ_{t-1})$, где R – совокупность управляющих правил описывающих динамику модели системы.

Результаты моделирования динамически отображаются подсистемой визуализации, которая формирует временные диаграммы изменения надежности, как отдельных компонентов, так и всей системы.

На заключительном этапе моделирования организуется выполнение расчётов вероятностных характеристик системы с использованием подсистемы анализа результатов моделирования и принятия решений, которая включает набор процедур, реализующих традиционные методы принятия решений в многокритериальных задачах и позволяющих провести статистическую обработку результатов моделирования и выбрать решение в условиях неопределённости. При этом с использованием вероятностной расчётной модели вычисляются показатели, необходимые для решения различных задач системного анализа надёжности исследуемых систем. Полученные данные анализируются в соответствии с заданным критерием работоспособности системы и позволяют сравнить варианты структуры системы, оценить динамические свойства надёжности компонентов проектируемых систем, обеспечивающих заданный уровень надёжности.

Библиотеку типовых вероятностно-алгебраических моделей составляют параметризованные варианты моделей сложных систем различных предметных областей, которые могут быть использованы как «заготовки» при создании моделей реальных систем и требуют задания исходной информации о параметрах компонентов и структуре исследуемой системы.

Автоматизация вероятностно-алгебраического метода, базирующегося на теории алгебр, позволяет расширить круг решаемых задач и избежать полного перебора всевозможных состояний системы в процессе анализа надёжности функционирования сложной системы.

3. Пример определения вероятностных характеристик надёжности транспортной сети

По ряду признаков, таких как большая размерность, стохастический характер происходящих в системе процессов, влияние неконтролируемых факторов, выводящих систему из устойчивого состояния, многокритериалъностъ оценок протекающих процессов, транспортные сети (ТС) можно отнести к классу сложных систем. Надёжность их функционирования обеспечивается максимальной пропускной способностью и необходимым уровнем качества обслуживания транспортного потока. Под пропускной способностью сети (*PR*) понимают максимально возможное количество единиц транспорта, которое она способна пропустить за выбранную единицу времени. Критерий качества обслуживания транспортного потока (*W*) определяется временем и стоимостью перемещения транспортных единиц и задаётся следующим образом:

$$W^* = \delta_1 \cdot T^* + \delta_2 \cdot Q^*, \sum_{i=1}^{2} \delta_i = 1, \quad (11)$$

где $0 \le \delta_i \le 1$ являются весовыми коэффициентами важности соответственно времени (δ_1) и стоимости (δ_2) движения по сети, T – время перемещения транспорта по сети, Q – затраты на перемещения транспорта. Верхний индекс у переменных означает их нормирование соответствующими максимальными величинами. Нормировка составляющих позволяет оценить качество функционирования сети в виде скалярной величины изменяющейся на интервале [0,1].

Указанные характеристики сети изменяются случайным образом и зависят от износа участков ТС. По мере увеличения уровня износа дорог пропускная способность сети уменьшается, а материальные и временные затраты транспортных средств, движущихся по сети, увеличиваются. Ставится задача определения динамических вероятностных характеристик пропускной способности сети и качества функционирования сети с использованием метода вероятностно-алгебраического моделирования.

Для примера рассмотрим транспортную сеть дорог, графовую структуру, которая показана на рис. 1.

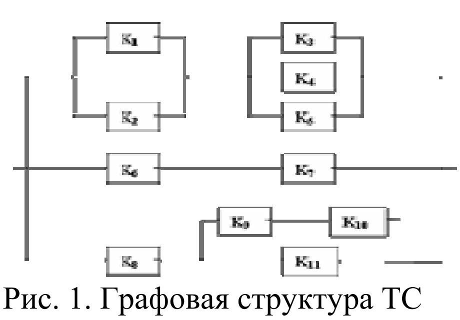

Рис. 1. Графовая структура ТС

Компоненты исследуемой системы – участки дорог $K = \{K_i\}, i = \overline{1,11}$, которые в процессе эксплуатации подвергаются процессу накопления повреждений, определяющего уровень их износа и влияющих на пропускную способность и качество эксплуатации участков.

Участки дорог описываются однотипным образом и характеризуются множеством состояний $S = \{S_j\}, j = \overline{1,20}$, соответствующих определённому уровню износа. Состояние S_1 описывает максимально новый участок, которому соответствует максимальная пропускная способность PR_1 и минимальное значение показателя временных и материальных затрат W_1. Состояние S_{20} характеризует критический уровень накопления повреждений, при котором пропускная способность PR_{20} становится меньше допустимой: $PR_{20} < PR_d$, а затраты на перемещение превышают заданную величину: $W_{20} > W_d$. Состояния $S_2,\ldots,S_{19}$ являются промежуточными. Количество состояний модели определяется исследователем при задании параметров моделирования и может быть увеличено, что приведёт к более детальному рассмотрению процесса износа участка сети.

Вероятностное изменение состояний участков дорог описывается марковскими процессами с дискретными состояниями и дискретным временем. Параметры моделирования износа участков дорог задаются матрицами переходов

$$QK_i = \left\| q_{kl}^i \right\|, k, l = \overline{1,20}, i = \overline{1,11},$$

где: $$q_{kl}^i = \begin{cases} q_{kl} & при \quad l = k \\ 1 - q_{kl} & при \quad l = k+1 \\ 0 & при \quad l \ne k, l \ne k+1 \end{cases}. \quad (12)$$

Матрицы переходных вероятностей QK_i формируются в результате статистического анализа данных, характеризующих износ участков. Предполагается, что начальные значения вероятностей состояний износа участков имеют вид $P^{i0} = (1,0,\ldots,0), i = \overline{1,11}$. В результате первичного моделирования получаем значения векторов вероятностей, характеризующих износ участков сети на заданном промежутке времени:

$$P^{it} = (p_1^{it}, p_2^{it}, ..., p_{20}^{it}), \sum_{j=1}^{20} p_j^i = 1, i = \overline{1,11}, t = \overline{1,200}.$$

Полученные вектора являются исходными данными для вероятностно-алгебраического моделирования всей сети. Изменение характеристик надёжности транспортной сети происходит по сложной “траектории”, начальные значения которой определяются исходными параметрами износа участков сети, а конечные зависят от случайных процессов, отражающих накопление повреждений участками и взаимное влияние процессов износа на характеристики функционирования системы в целом. Представленную на рис. 1 графовую модель можно интерпретировать с учётом поставленных целей моделирования. На рис. 2, а представлена графическая схема вероятностно-алгебраической модели исследования пропускной способности сети. Для исследования качества работы сети используется модель, представленная на рис. 2, b.

В первой расчётной вероятностной модели используется функция $F_1(i,j) = \min(i + j - 1, n)$ для параллельных участков сети и функция $F_2(i,j) = \max(i,j)$ для последовательных участков. При исследовании показателя качества функционирования сети используется функция $F_1(i,j) = \min(i + j - 1, n)$, отражающая связь между последовательно расположенными участками и функция $F_2(i,j) = \max(i,j)$ для параллельных участков.

В процессе динамического моделирования учитывается, что величина транспортных потоков, начальный уровень повреждений, условия внешней среды определяют случайный характер накопления повреждений и неравномерность износа участков в процессе их эксплуатации. В результате часть участков сети изнашиваются быстрее, что сказывается на соседних участках, которые вынуждены принимать часть нагрузки на себя. При этом наблюдается эволюционная зависимость состояний износа одних участков дорог от состояний других. Поэтому в процессе моделирования генерируются управляющие воздействия, учитывающие происходящие изменения и корректирующие параметры моделирования.

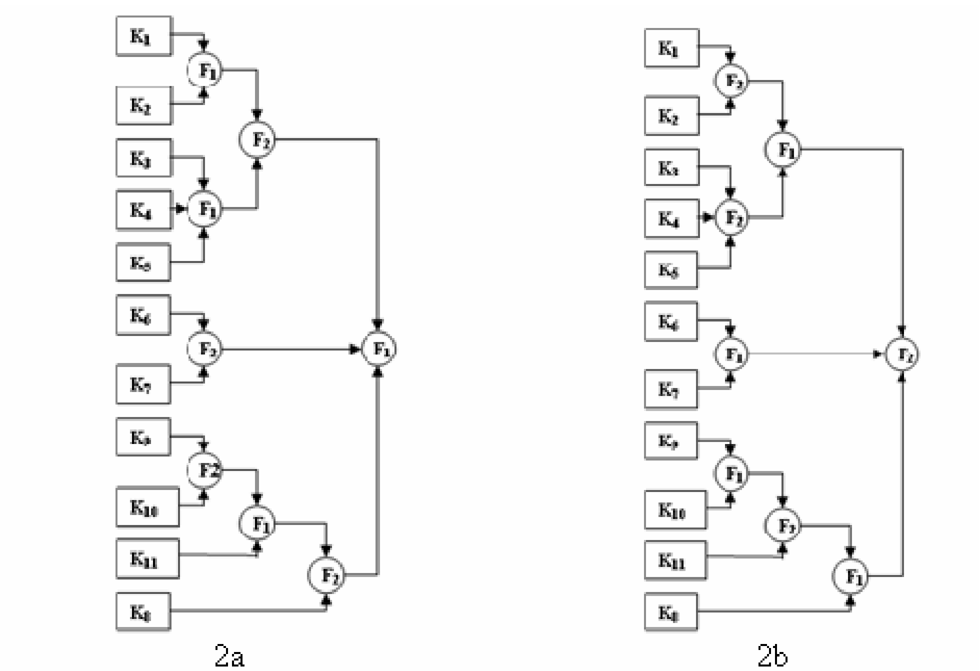

Рис. 2. Графические схемы вероятностно-алгебраических моделей: a – для оценки пропускной способности сети, b – для оценки качества функционирования сети

С использованием первой модели рис. 2, a формируются вероятностные характеристики пропускной способности сети (P_PR^{st}, PR^{st}), где PR^{st} – значения пропускной способности сети, P_PR^{st} – вероятности значений пропускной способности. В результате проведения экспериментов со второй моделью рис. 2, b определяются вероятностные характеристики качества работы сети (P_W^{st}, W^{st}), где W^{st} – значение показателя качества функционирования сети, P_W^{st} – вероятности значений показателя качества. По результатам моделирования вычисляются математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение вероятностных значений пропускной способности (m_1,σ_1) и качества функционирования сети (m_2, σ_2), которые показаны на рис. 3.

С использованием описанных моделей решаются задачи оценки вероятностных характеристик ТС при её функционировании в заданном режиме. Изменение параметров моделирования износа участков сети позволяет рассмотреть аналогичные задачи при работе сети в различных эксплуатационных и аварийных режимах. Кроме этого, в процессе моделирования имеется возможность оценить вероятностные характеристики альтернативных путей исследуемой сети и сравнить их по пропускной способности и качеству обслуживания транспортных потоков.

Одновременная эксплуатация двух видов параметризованных моделей позволит решить задачи проектного моделирования транспортной сети, обеспечивающий необходимый уровень пропускной способности с учётом заданного качества обслуживания транспортных потоков.

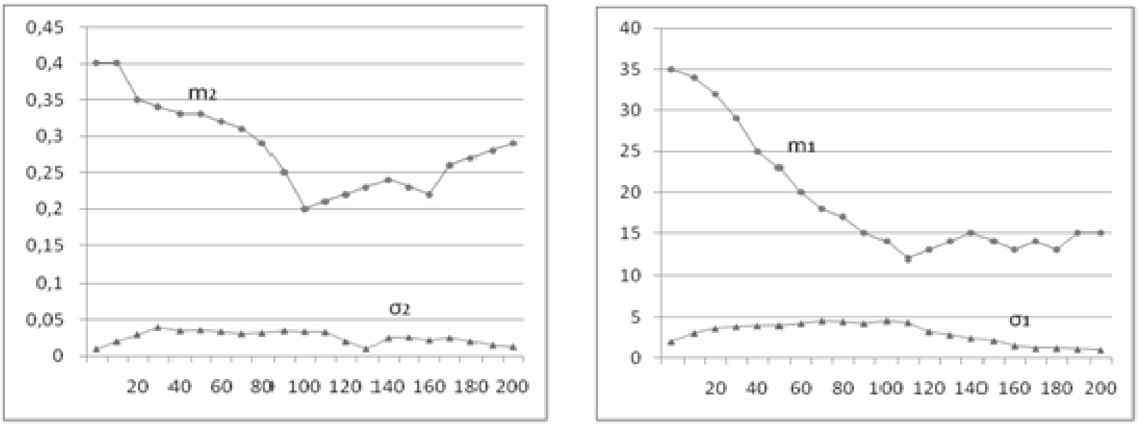

Рис. 3. Графики изменения во времени математического ожидания, среднего квадратичного отклонения вероятностных значений пропускной способности (m_1,σ_1) и качественной характеристики сети (m_2, σ_2)

Заключение

В работе предложен метод ВАЛМ и средства его реализации, оперирующие вероятностными состояниями компонентов системы. К особенностям метода можно отнести: однотипное вероятностное описание компонентов системы и всей системы; рассмотрение различных операторов, определяющих отношения между компонентами системы; учёт эволюционной зависимости вероятностного изменения компонентов системы; возможность решения как прямых, так и обратных задач. Метод имеет алгебраическую основу, позволяющую единым образом описать связи между компонентами и использовать свойства алгебр при исследовании надёжности систем из различных проблемных областей.

В методологическом плане ВАЛМ предоставляет новые возможности, позволяющие получить точное решение задач надёжности исследуемых систем, которые не могут быть решены с использованием логико-вероятностных методов. А решение подобных задач с использованием имитационных методов трудоёмко и может быть получено только в приближённом виде.

Автоматизация основных этапов ВАЛМ существенно ускоряет исследование характеристик надёжности сложных систем и позволяет уточнить вероятностные характеристики компонентов, обеспечивающие приемлемый уровень надёжности существующих систем, подобрать структурный состав компонентов проектируемых систем и экспериментировать с их моделями, а также исследовать функционирование систем в новых условиях.

Итеративная технология использования программной системы ВАЛМ предполагает возврат на более ранние этапы моделирования с целью устранения ошибок описания функциональных связей между компонентами и динамики их взаимодействия. При этом универсальность и простота аппарата ВАЛМ, а также наличие библиотеки типовых вероятностно-алгебраических моделей обеспечивают оперативность создания новых моделей путём модификации структуры существующих моделей, изменения параметров состояний компонентов этих моделей и корректировки управляющих правил динамического моделирования.

Дальнейшее развитие описанного подхода и программной системы ВАЛМ планируется за счёт пополнения состава типовых функций ВАЛМ и расширения состава библиотеки типовых моделей.

1. *Рябинин А.И.* Надёжность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2007. – 276 с.
2. *Можаев А.С.* Теоретические основы общего логико-вероятностного метода автоматизированного моделирования систем. – СПб.:Изд-во ВИТУ, 2000. – 217 с.
3. *Соложенцев Е.Д., Громов В.Н.* Управление риском и эффективностью в экономике. Логико-вероятностный подход. – СПб: Изд-во СПб ун-та, 2009 – 270 с.
4. *Райнтке К., Ушаков И.А.* Оценки ндёжности систем с использованием графов. – М.: Радио и связь, 1998. – 452 с.
5. *Максимей И.В., Демиденко О.М., Сукач Е.И.* Имитационное моделирование процессов отказов и восстановлений работоспособности оборудования вычислительной системы // Реєстрація, зберігання і обробка даних (Data Recording, Storage & Processing). – 2000. – Т. 2, N 1. – С. 33 – 46.
6. *Нозик А.А., Можаев А.С.* Программный комплекс "АРБИТР" для моделирования, расчета надежности и безопасности систем // В информ. сборнике: "Монтаж и наладка средств автоматизации и связи". – 2007. – № 2. – С. 32 – 40.
7. *Автоматизация* проектных исследований надёжности радиоэлектронной аппаратуры: Научное издание // В.В. Жаднов, Ю.Ф. Кофанов, Н.В. Малютин и др. – М.: Радио и связь, 2003.– 156 с.
8. *Источник* сети Интернет, адрес: http://www.relex.com/products
9. *Сукач Е.И., Ратобыльская Д.В., Кулага В.Н.* Расширение метода логико-вероятностного моделирования сложных систем // Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах: труды Международной научной школы МА БР – 2009, 7 – 11 июля, 2009 г. – Санкт-Петербург: ГУАП – 2009, – С. 471 – 476.
10. *Сукач Е.И., Ратобыльская Д.В., Кулага В.Н.* Моделирование вероятностных характеристик сложных систем с использованием стохастических алгебр // V Международная конференция-форум «Информационные системы и технологии». 16-17 ноября 2009. – Минск: – 2009. – Ч.1. – С. 178 – 181.

Получено 17.03.2010

Об авторе:

Сукач Елена Ивановна,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры математических проблем управления.

Место работы автора:

Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины
246019 Гомель,
ул. Советская, 104.
Тел.: 8-10-375-232-60-4237
e-mail: eisukach@gsu.by