УДК 004.7 : 004.942-028.43

А.П. Осколков

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ СИСТЕМ КРИТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

В статье проведен сравнительный анализ методов математического моделирования информационно-телекоммуникационных сетей систем критического применения. Рассмотрены методы аналитического моделирования, гибридного моделирования, а также предложены методы расчета однородных замкнутых сетей систем массового обслуживания (СеМО) общего вида.

Ключевые слова: *гибридное моделирование,идентификатор, однородная СеМО, неоднородная СеМО.*

Введение

Постановка проблемы и анализ литературы. Для качественного проектирования информационно-телекоммуникационных сетей (ИТС) необходим учет всех требований, предъявляемых к сети. В условиях быстрого развития сетей передачи данных невозможно качественное проектирование на основе одного лишь опыта и интуитивных решений. Для сведения к минимуму последствия ошибок приходится неоправданно завышать требования к оборудованию, что, в свою очередь, ведет к необоснованному увеличению стоимости строительства и эксплуатации всей ИТС. Особенно остро данная проблема стоит при проектировании ИТС систем критического применения (СКП) [1]. Однако, проблема проектирования ИТЧ достаточно сложна и её качественное решение не возможно без привлечения специального математического аппарата. В связи с вышеизложенным необходимо совершенствовать средства математического моделирования и анализа ИТС СКП. Для полного исследования ИТС СКП часто приходится строить большой набор математических моделей, которые должны друг другу не противоречить, но могут быть разными по структуре. Это, в свою очередь, приводит к необходимости использования гибридных моделей [3].

Под гибридной моделью, в отличие от имитационных или аналитических моделей, понимаются не одна модель исследуемого объекта, а некоторая структура ее моделей. Каждая из подмоделей гибридной модели также может принадлежать к классу гибридных моделей или же может принадлежать другому классу математических моделей, например, дискретные или непрерывные динамические системы, марковские процессы, сети массового обслуживания, графы, гиперграфы, гиперсети, сети Петри, статические модели и т.д. Для описания, разработки и реализации гибридного моделирования, необходимо создать соответствующий формальный аппарат, позволяющий описывать данные модели [2]. Существует ряд методов математического моделирования работы ИТС, но конечный полученный теоретический результат, очевидно, не должен отличаться от экспериментального. Для прогноза функционирования ИТС СКП необходимо провести два основных этапа исследования: теоретический и экспериментальный, и результаты сравнить. Для теоретического исследования применяют один из видов математического моделирования (аналитический или имитационный), для экспериментального – измерения при помощи анализаторов протоколов [1 – 4]. Модели исследуемой сети отличаются между собой, прежде всего уровнем использования математического аппарата.

Аналитические модели описания работы ИТС, как правило, строятся на основе понятий аппарата теорий массового обслуживания, теории вероятностей и марковских процессов, а также методов диффузной аппроксимации и декомпозиции [5]. Могут также применяться дифференциальные и алгебраические уравнения. Они требуют оперирования со строгими математическими терминами. В результате такого подхода можно получить решения для определенных задач мониторинга состояния сети, но математические упрощения, положенные в основу построения модели, часто не дают реальной картины происходящего, да и вычисления могут быть довольно громоздкими. Такими методиками целесообразно пользоваться при оценке работы ИТС в первом приближении [5].

Имитационные модели описывают объект исследования на некотором языке, который отображает элементарные явления, составляющие функционирование исследуемой системы с сохранением их логической структуры, последовательности протекания во времени, особенностей и состава информации о состоянии процесса.

При аналитическом моделировании исследование процессов или объектов заменяется построением их математических моделей и исследованием этих моделей. В основу метода положены идентичность формы уравнений и однозначность соотношений между переменными в уравнениях, описывающих оригинал и модель. Поскольку события, происходящие в МСС, носят случайный характер, то для их изучения наиболее подходящими являются вероятностные математические модели теории массового обслуживания. Объектами исследования в теории массового обслуживания являются системы массового обслуживания (СМО) и сети массового обслуживания (СеМО) [5, 6].

Целью статьи является сравнительный анализ методов математического моделирования информационно-телекоммуникационных сетей систем критического применения.

Результаты исследований

Методы аналитического моделирования

К настоящему времени сети систем массового обслуживания (СеМО) являются наиболее широко распространенным средством аналитического моделирования и анализа вероятностно-временных характеристик информационных сетевых систем различного назначения [6].

Сеть массового обслуживания определяется как некоторая структура систем массового обслуживания (СМО), по которой циркулирует множество требований различных классов [6 – 9]. Требования обслуживаются в СМО в соответствии с некоторой заданной дисциплиной обслуживания, а длительность обслуживания является случайной величиной с некоторой заданной функцией распределения. При завершении обслуживания в одной системе обслуживания, требование поступает для продолжения обслуживания в другую. Дальнейший маршрут обслуженного требования определяется заданными для всех систем сети обслуживания распределениями выходных маршрутов. Сети массового обслуживания классифицируются следующим образом [9]:

- по наличию внешних источников требований различаются: открытые, замкнутые и смешанные;
- по числу классов обслуживаемых требований различаются: однородные и неоднородные;
- по типам функций распределения длительности обслуживания требований различаются: экспоненциальные сети и сети общего вида.

Сеть массового обслуживания Γ_ξ определяется следующим набором параметров [11 – 14]:

$$\Gamma_\xi = \left\langle L_\xi, K_\xi, Q_\xi, \bar{W}_\xi, T_\xi, \bar{r}_\xi, \bar{D}_\xi, \bar{\mu}_\xi \right\rangle,$$

в котором L – число систем обслуживания $(C_i, i = 1,...,L)$ в сети – порядок сети Γ_ξ; K – число классов требований в сети (для однородной сети $K = 1$); Q – параметр внешней нагрузки на сеть,

$$Q = \begin{cases} \lambda_0, & \text{если } \Gamma - \text{открытая (СеМО);} \\ N, & \text{если } \Gamma - \text{замкнутая (СеМО);} \end{cases}$$

$\lambda_0 = \left\{\lambda_{0,k}, k = \overline{1,K}\right\}$ – вектор интенсивности внешнего потока требований, где $\lambda_{0,k}$ - интенсивность внешнего потока требований k-го класса, поступающих в сеть обслуживания; $N = \left\{N_k, k = \overline{1,K}\right\}$ – начальный вектор числа требований в сети, где N_k – начальное значение числа требований k-го класса в (СеМО), $N = \sum_{k=1}^{K} N_k$ – суммарное число требований, циркулирующих в сети обслуживания – насыщенность сети Γ; $W = \left(W_i, i = \overline{1,L}\right)$ – вектор типов функций распределений длительностей обслуживания требований в системах сети обслуживания. W_1 – тип функции распределения длительности обслуживания требований в системе C_1, (для открытой СеМО; W_0 – тип функции распределения длительности интервалов времени между последовательными требованиями во внешнем потоке). Длительности обслуживания требований в каждой системе C_i, предполагаются независимыми и одинаково распределенными случайными величинами с функциями распределения экспоненциальными $\left(W_1 = M\right)$ либо общего вида $\left(W_1 = GI\right)$ [14].

$$T = \begin{cases} \left(\vartheta_{r,j}\right), \text{где } \Gamma - \text{однородна;} \\ \left(\vartheta_{i,k,j}\right), \text{если } \Gamma - \text{неоднородна;} \end{cases} –$$

матрица передач, $k = \overline{1,K}$;

$$i, j = \begin{cases} \overline{0,L}, & \text{если } \Gamma - \text{открытаяСеМО,} \\ & C_0 - \text{источниктребований;} \\ \overline{1,L}, & \text{если } \Gamma - \text{замкнутаяСеМО,} \end{cases}$$

$\vartheta_{r,j}$ - вероятность того, что требование после обслуживания в системе C_j поступает в систему $C_j, \vartheta_{i,k,j,l}$ - вероятность того, что требования к-го класса после обслуживания в системе C_i поступает в систему C_j и при этом переходит в класс l; $r = \left\{r_i, i = \overline{1,L}\right\}$ – вектор числа обслуживающих приборов в составах систем обслуживания сети, r_i – число обслуживающих приборов в составе системы C_i; $D = \left\{D_i, i = \overline{1,L}\right\}$ - вектор дисциплин обслуживания требований в системах сети обслуживания, D_i – дисциплина обслуживания требований в системе C_i.

В качестве возможных дисциплин обслуживания D_i рассматриваются дисциплины множества {FCFS, LCFSPR, PS, IS, FS}, представляющие практический интерес при анализе и моделировании информационных сетевых систем [14].

FCFS – (First Come- First Served) - обслуживание требований в порядке поступления;

LCFSPR – (Last Come - First Served – Preemptive Resume) – обслуживание требований в порядке, обратным поступлению, с приоритетным дообслуживанием. При этой дисциплине, если в системе C_i имеется свободный обслуживающий прибор, то требование обслуживается так же, как и в системе с дисциплиной FCFS. Если все приборы заняты, то при поступлении нового требования в систему C_i с вероятностью $1 / r_l$ прерывается процесс обслуживания требования в одном из r_i приборов, и этот прибор начинает обслуживать вновь поступившее требование. Требование, обслуживание которого было прервано, устанавливается первым в очередь, и за ним закрепляется остаточное время, в течение которого оно должно будет дообслуживаться при его последующем выборе из очереди;

PS (Processor Sharing) – обслуживание требований с разделением производительности обслуживающего прибора. При этой дисциплине производится одновременное обслуживание всех требований, пребывающих в системе C_i. Интенсивность обслуживания каждого из этих требований обратно пропорциональна числу требований, пребывающих в системе;

IS (Infinitive Service) – обслуживание требований с ” бесконечным ” числом приборов. В замкнутой однородной сети обслуживания система с дисциплиной IS тождественна системе с $r_i = N$ (N – число требований, циркулирующих по сети) параллельными приборами, в которой, очевидно, отсутствует очередь;

FS (Finite Servers) – обслуживание требований “конечным” числом приборов. В замкнутой однородной сети обслуживания система с дисциплиной FS тождественна системе с $r_i(r_i < N)$ параллельными и одинаковыми обслуживающими приборами. При этом, если в СМО C_i имеется свободный прибор, то требование обслуживается так же, как и в системе с дисциплиной IS Но если все приборы заняты, то вновь поступившее требование получает отказ, и с вероятностью $\vartheta_{r,j}$ переходит в систему C_j [14].

$$\mu = \begin{cases} \mu_i(n), i = \overline{1,L}, & \text{если } \Gamma - \text{однородна;} \\ \mu_{i,k}(n), i = \overline{1,L}, k = \overline{1,K}, & \text{если } \Gamma - \text{неоднородна} \end{cases} -$$

матрица функций интенсивности обслуживания требований в сети обслуживания; $\mu_i(n)$ – функция интенсивности обслуживания требований в системе C_i в зависимости от состояния n сети обслуживания; $\mu_{i,k}(n)$ - функция интенсивности обслуживания требований k – го класса в системе C_i в зависимости от состояния n сети обслуживания.

$$n = \begin{cases} n_i(n), i = \overline{1,L}, & \text{если } \Gamma - \text{однородна;} \\ n_{i,k}(n), i = \overline{1,L}, k = \overline{1,K}, & \\ & \text{если } \Gamma - \text{неоднородна} \end{cases} -$$

вектор состояния сети обслуживания, где n_i – число требований, пребывающих в системе C_i однородной сети, а $n_{i,k}(n)$ – число требовании k-го класса, пребывающих в системе C_i неоднородной сети. Существующие метода анализа и расчета сетей обслуживания обеспечивают вычисление точных или приближенных значений их характеристик для стационарного режима.

Для однородных сетей обеспечивается вычисление следующих характеристик [15]:

1. $P(n)$ – распределение вероятностей состояний сети, где

$$n = \{n_1,...,n_L\}, n \in S(N,L), S(N,L) = \{n^{(i)}\} -$$

пространство состояний сети Γ - множество векторов, каждый из которых определяет некоторое размещение N требований по L системам сети. Мощность пространства $S(N,L)$ равна $\dfrac{L+N-1}{N}$. Состояния в $S(N,L)$ лексиграфически упорядочены. Отношение порядка состояний сети определяется следующим образом:

$$n^j > n^k, n^i = \{n_1^i,....n_L^i\} n^k = \{n_1^k,....n_L^k\},$$

если $\exists q : n_q^i > n_q^i$, $\forall 1 < q n_1^i = n_1^i$.

2. $P(n_i = s)$ – распределение вероятностей состояний системе C_i - вероятность пребывания в системе s требований, $\forall s = \overline{0,N}$.

3. $P(\rho_i = s)$ - распределение вероятностей числа занятых приборов системы C_i - вероятность одновременного обслуживания s требований в этой системе, $\forall s = \overline{0,r_i}$.

4. $P(\delta_i = s)$ - распределение вероятностей длины очереди системы C_i - вероятность одновременного ожидания обслуживания в очереди системы s требований, $\forall s = \overline{0,N}$.

5. η_i – коэффициент использования системы C_i.

6. λ_i – интенсивность входящего потока требований в систему C_i.

7. $\overline{n_i}$ - математическое ожидание числа требований, пребывающих в системе C_i.

8. $\overline{\rho_i}$ - математическое ожидание числа занятых приборов в системе C_i.

9. $\overline{\delta_i}$ - математическое ожидание длины очереди требований системы C_i.

10. $\overline{\chi_i}$ - математическое ожидание длительности обслуживания требований в системе C_i.

11. $\overline{u_i}$ - математическое ожидание времени пребывания требований в системе C_i.

12. $\overline{w_i}$ – математическое ожидание времени пребывания требований в очереди системы C_i.

13. $\overline{t_i}$ – математическое ожидание времени реакции для обслуженных в системе C_i требований (длительность интервалов времени между моментом окончания обслуживания требования в системе C_i и моментом поступления этого же требования в эту же систему).

14. $\overline{\tau_{i,j}}$ – математическое ожидание времени длительности интервала времени от момента поступления требования в систему C_i до момента поступления этого же требования в систему C_j.

Методы расчета однородных замкнутых СеМО общего вида

Класс СеМО [17], расчет которых возможен в рамках точных или приближенных методов, определяется сетями, удовлетворяющими условию локального баланса [11 – 14]. Условие локального баланса формулируется следующим образом: интенсивность перехода сети обслуживания в некоторое состояние равна интенсивности выхода сети из этого же состояния. Схематически допустимый класс сетей обслуживания изображен – на рис. 1 [17]:

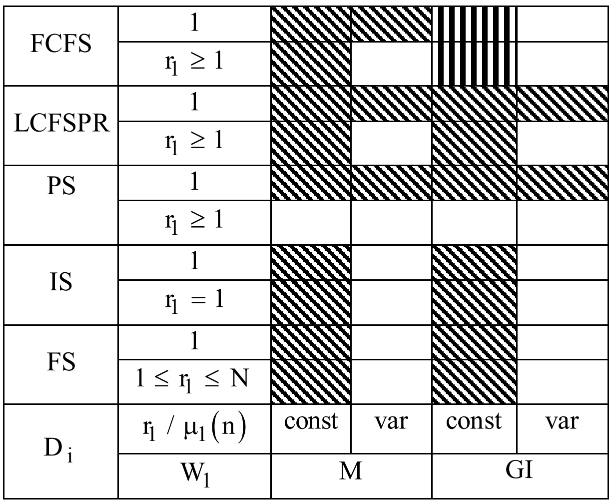

Рис. 1. Допустимый класс сетей обслуживания

На рис. 1 штриховка соответствует наличию точного метода расчета сети обслуживания, вертикальная штриховка соответствует наличию приближенного метода расчета сети обслуживания, отсутствие штриховки соответствует отсутствию метода расчета [15].

Сети обслуживания, принадлежащие допустимому классу и имеющие точное решение:

- удовлетворяют условию локального баланса, которое обеспечивает возможность разложения СеМО на составляющие ее СМО и представления стационарного режима сети в виде композиции стационарных режимов ее систем обслуживания [9, 10];

- являются инвариантными относительно функций распределения длительности обслуживания требований в системах, что обеспечивает возможность использования для вычисления стандартных характеристик СеМО общего вида методов расчета экспоненциальных сетей [16].

Функционирование СеМО описывается марковским дискретным процессом на конечном множестве состояний

$$S(N,L) = \left\{ n = (n_1,,,n_L) \mid n_j \geq 0, i = \overline{1,L}, \sum_{i=1}^{L} n_i = N \right\}.$$

Распределение $P(n)$ вероятностей состояние СеМО задается в мультипликативной форме

$$P(n) = \frac{1}{G(N,L)} \prod_{i=1}^{L} f_i(n_i),$$

где $n_i \in n, f_i(n_i)$ – величина пропорциональная вероятности того, что система C_i находится в состоянии n_i (в C_i пребывает n_i требований),

$$f_i(n_i) = \chi_i^{n_i} \Big/ \prod_{s=1}^{n_i} \gamma_i(s), \gamma_i(s) = \min(s, r_i), s = \overline{0,N},$$

$$x_i = \varpi_i / \mu_i(n),$$

где $\varpi = (\varpi_1,,,\varpi_L)$ – любое ненулевое решение однородной линейной системы уравнений $\varpi = \varpi \times T$, а $G(N,L)$ – нормализующая константа, определяемая следующим выражением:

$$G(N,L) = \sum_{n \in S(N,L)} \prod_{i=1}^{L} f_i(n_i), n_i \in n.$$

Метод гибридного моделирования

В системе математического моделирования предполагается, что задача моделирования исследуемой системы, описывается концептуальной моделью, которая в общем случае является гибридной [16]. Концептуальная модель исследуемой системы, представляется комплексом моделей сх, который является структурированным компонентом типа С , предназначенным для описания сформулированной задачи моделирования, а также метода ее решения [1 – 5]:

$$cx = \langle \tau^c, S^{cx}, H^{cx} \rangle, cx \in C_l C = \langle \tau^c, \tilde{S}^{cx}, \tilde{H}^{cx} \rangle, C \in \tilde{T}. \quad (1)$$

Комплексное время τ^c отображает последовательность стадий моделирования, выполняемых в процессе решения сформулированной задачи моделирования. Состояние $s^{cx} \in S^{cx}, s^{cx} = \{s_l{}^{cx}\}$, комплекса cx определяет множество его параметров, которые по своему функциональному назначению различаются на входные, выходные и внутренние.

Входные параметры $o^{cx} = \{s^{cx}_{l^{cx}}\}$, $cx^{cx}_{l^{cx}} \in s^{cx}$ – независимые координаты, которые определяют координаты состояния, используемые для представления исследуемых модельных характеристик, при завершении моделирования. Выходные параметры определяют множество оценок исследуемых параметров моделируемой системы. Внутренние параметры $P^{cx} = \{s^{cx}_{p_l^{cx}}\}$, $s^{cx}_{p_l^{cx}} \in s^{cx}$ – зависимые координаты, которые необходимы для определения состояния комплекса на промежуточных этапах моделирования исследуемой системы.

Алфавиты $I^{cx} \subseteq S^{cx}$ входных, $O^{cx} \subseteq S^{cx}$ выходных, $P^{cx} \subseteq S^{cx}$ внутренних параметров комплекса является подпространствами алфавита $S^{cx}, I^{cx} \bigcup P^{cx} \bigcup O^{cx} = S^{cx}$. Некоторая воспроизводимая траектория $h(t) \in H^{cx}, t \in \tau^c$, комплекса cx описывает алгоритм решения задачи моделирования, который представляется в виде последовательности решений частных задач моделирования [4].

Каждая частная задача описывается соответствующей моделью – структурным компонентом комплекса cx. Модель ml, комплекса cx определяется следующим образом [5]:

$$ml = \langle \tau^c, S^{ml}, H^{ml} \rangle \in M^{cx},\ M^{cx} = \langle \tau^c, \tilde{S}^M, \tilde{H}^M \rangle \in \tilde{T}^{cx}, \quad (2)$$

где $\tilde{T}^{cx} = A^{cx} / \phi, \tilde{T}^{cx} = \{M^{cx}\}, \forall\ cx \in C$ – множество типов компонентов, используемых для описания структурированного компонента – комплекса cx, A^{cx} - множество всех компонентов в составе комплекса cx, а $M^{cx} = \{ml_1\}$ – множество моделей, составляющих комплекс cx (единственный тип компонентов комплекса). Каждая модель $ml \in cx$ представляет в комплексе следующее семейство частных задач моделирования, которые описываются в одном классе математических моделей и решаются одинаковыми методами. Решение некоторой частной задачи семейства определяется как модельный эксперимент с соответствующей моделью комплекса. Последовательность всех модельных экспериментов образует комплексный эксперимент. Каждая модель комплекса определяются как структурированный компонент. Функционирование всех компонентов некоторой модели ml определяется на общем интервале модельного времени $\tau^{ml} \in R[0, \infty)$, а воспроизведение некоторой траектории структуры A^{ml} всех компонентов этой модели обеспечивает решение соответствующей частной задачи комплекса. Состояние $s^{ml} \in S^{ml}, s^{ml} \in \{s_l^{ml}\}$ определяется соответствующим подмножеством параметров комплекса, $s_l^{ml} = s^{cx}_{j_l^{ml}}, \forall s_l^{ml} \in s^{ml}$, где j_l^{ml} - номер параметра s_l^{ml} модели $ml \in cx$ в составе состояния s^{cx} комплекса cx.

Аналогично, как и для комплексов, для каждой модели определяются входные $i^{ml} = \{s^{ml}_{l^{ml}}\}$, $s^{ml}_{l^{ml}} \in s^{ml}$; выходные $o^{ml} = \{s^{ml}_{o^{ml}}\}$, $s^{ml}_{o^{ml}} \in s^{ml}$; внутренние $p^{ml} = \{s^{ml}_{p_l^{ml}}\}$, $s^{ml}_{p_l^{ml}} \in s^{ml}$ параметры, и их алфавиты $I^{ml} \subseteq S^{ml}, O^{ml} \subseteq S^{ml}, P^{ml} \subseteq S^{ml}$, на множестве всех моделей M определяется эквивалентность ψ, $(ml_1, ml_i) \in \psi$, если [5]:

1) множество типов компонентов, определяемых в составе этих моделей, одинаковы, $\tilde{T}^{ml_1} = A^{ml_1} / \phi \tilde{T}^{ml_l} = A^{ml_l} / \phi$;

2) модели ml_1 и ml_i имеют в своей основе математическую модель одного класса;

3) модели ml_1 и ml_i решаются одинаковым методом.

Фактор множество $M / \psi = \{t_l\}$ определяет множество типов моделей, которые реализованы в системе математического моделирования и которые могут быть использованы для описания концептуальных моделей. В составе любого комплекса могут быть определены модели следующих трех типов [5] $M / \psi = \{t_{sm1} t_{qn1} t_{un}\}$.

Модель ml типа t_{sm1} $ml \in t_{sm1}$ описывает соответствующую задачу моделирования дискретными динамическими системами, и она решается методом имитационного моделирования.

Модель ml типа t_{qn1} $ml \in t_{qn1}$ описывает соответствующую задачу моделирования структурированными сетями массового обслуживания [6] и она решается соответствующим точным или приближенным аналитическим методом анализа сетей обслуживания [5].

Модель ml типа $t_{un1} ml \in t_{un1}$ описывает соответствующую задачу моделирования произвольной математической моделью, ее метод решения специфицируется для каждой модели типа.

Процесс решения поставленной задачи моделирования рассматривается в системе MONAD как эксперимент с концептуальной моделью, который в свою очередь, определяется как эксперимент с соответствующим комплексом моделей. В ходе выполнения этого эксперимента производится воспроизведение некоторой траектории $h \in H^{cx}$ поведения H^{cx} комплекса cx, соответствующей описанному комплексному эксперименту. Комплексный эксперимент e^{cx} с комплексом cx определяется как последовательность этапов (фаз) моделирования, $e^{cx} = \{e_l\}$. Каждый этап e_l комплексного эксперимента e^{cx} определяется как модельный эксперимент e^{ml_l} с некоторой моделью $ml_l \in M^{cx} = A^{cx}$ комплекса cx. Между модельными экспериментами определяются отношения порядка выполнения $"<"$ и $"\leq"$. Модельный эксперимент $e_l < e_{j^l}$, если выполнение модельного эксперимента e_l должно предшествовать выполнению модельного эксперимента e_{j^l} и $e_l \leq e_j$ или $e_j \leq e_{j^l}$, если модельные эксперименты e_l и e_j могут выполняться одновременно и независимо друг от друга. В свою очередь, каждый модельный эксперимент e^{ml} с некоторой моделью ml определяется как последовательность произвольного числа стадий модельного эксперимента различных типов, $e^{ml} = \left\{e_l^{ml}\right\}$, между которыми также определяются аналогичные отношения порядка. На множестве $E = \{e_l\}$ стадий и фаз комплексных экспериментов различаются фазы и стадии следующих типов [5]:

- $E^{\rho r}$ - стадия подготовки модельного эксперимента;
- $E^{\rho v}$ - стадия интерпретации результатов модельного эксперимента;
- E^{sm_1pr} - стадия подготовки воспроизведения некоторой траектории структуры компонентов модели;
- E^{sm} - стадия воспроизведения траектории структуры компонентов модели;
- E^{smsv} - стадия обработки результатов измерений воспроизведенной траектории структуры компонентов модели;
- E^{ex} - фаза выполнения подэксперимента некоторой другой моделью этого комплекса комплексного или модельного экспериментов.

E^{ex} – фаза определяет выполнение подэксперимента с некоторой другой моделью, обеспечивающего решение некоторой выделенной частной подзадачи основной задачи, решение которой обеспечивается основным экспериментом (надэкспериментом) с соответствующей моделью комплекса.

Последовательность стадий комплексного эксперимента отображается комплексным временем $\tau^c = \{t_l\}$, $i = 0_l ..,\infty$ где t_l - i-й момент комплексного времени. Это время определяется как цепь идентификаторов t_l всех его стадий.

Идентификатор t стадии или фазы e_l определяется следующим выражением:

$$t = (\alpha_t, \beta_t, \gamma_t), \tag{5}$$

в котором элемент α_l определяет идентификатор фазы $E_{\alpha_l} \in E^{ex}$, которая определена в ходе надэксперимента e модельного эксперимента e_t, $e_{\alpha l} \in e$, и в ходе выполнения которой определено выполнение модельного эксперимента e_t. Элемент β_t, определяет порядковый номер модельного эксперимента e_t, в составе его надэксперимента e. Элемент γ_t, определяет порядковый номер стадии e_t в составе его надэксперимента e. Если модельный эксперимент e_t не определен как подэксперимент соответствующего надэксперимента, то у его идентификатора t элемент $\alpha_t = 0$.

Порядок идентификаторов $t_l = (\alpha_l, \beta_l, \gamma_l)$ и $t_{j=}(\alpha_j, \beta_j, \gamma_j)$ на оси комплексного времени τ^c является следующим:

$$t_l < t_j \begin{cases} 1)\alpha_l < \alpha_j; \\ 2)\beta_l < \beta_j \text{при} \alpha_l = \alpha_j; \\ 3)\gamma_l < \gamma_j, \text{при} \alpha_l = \alpha_j, \beta_l = \beta_j. \end{cases} \tag{3}$$

Между моментами комплексного времени t_l и t_j определяется расстояние $\rho(t_l, t_j) = i - j$, как число стадий модельных экспериментов, которые необходимо выполнить, начиная с момента комплексного времени t_l, а также следующие операции между моментами комплексного времени [5]:

$$\begin{aligned} &1)\ t_l + t_j = t_k, k = \min\left(i + j, \left|\tau^c\right|\right); \\ &2)\ t_l - t_j = t_k, k = \max(i - j, 0); \\ &3)\ t_l + k = t_j, j = \min\left(i + k_l \left|\tau^c\right|\right), k = 0,...\infty; \\ &4)\ t_l - k = t_j, j = \max\ (i - k, 0), k = 0,...\infty. \end{aligned} \tag{4}$$

Последовательность стадий модельного эксперимента e будем обозначать интервалом комплексного времени $\tau_e \in \tau^c$. Если некоторый модельный эксперимент e_l выполняется на интервале τ_{el} комплексного времени в составе модельного эксперимента e_j, который выполняется на интервале τ_{el}, то $\tau_{el} \subset \tau_{ej}$ [14].

Пусть решение сформулированной задачи моделирования обеспечивается комплексным экспериментом e, описывающего отображение $e: S^{cx} \to S^{cx}$, которое определяет конечную точку соответствующей траектории $h \in H^{cx}$ комплекса cx следующим образом:

$$h(t_M) = e(h(t_0)), \quad (6)$$

где множество входных параметров i^{cx} определяют начальную точку $h(t_0)$, траектории комплекса, множество выходных параметров o^{cx} определяются конечной точкой $h(t_M)$ траектории комплекса, граничные моменты комплексного времени $t_0 = \min_{t \in \tau^c} t, t_M = \max_{t \in \tau^c} t$, а отображение e является следующей суперпозицией всех отображений, описывающих модельные эксперименты, составляющие комплексный эксперимент e:

$$e = e_n \circ \left(e_{n-1} \circ \left(...e_l.... \circ \left(e_l \circ e_l\right)..\right)\right), \quad (7)$$

где $n = |e|$ - число модельных экспериментов, определенных в составе комплексного, а отображение $e_l: S^{cx} \to S^{cx}$ описывает i-ю стадию или фазу комплексного эксперимента (i-й модельный эксперимент с соответствующей моделью комплекса) [14].

В свою очередь, каждый модельный эксперимент $e_l = e^{mlk_l}$ с моделью mlk_l комплекса cx аналогично описывает решение соответствующей частной задачи моделирования в виде следующего отображения $e^{mlk_l}: S^{mlk_l} \to S^{mlk_l}$, которое определяет точки траектории комплекса и модели, связанные с модельным экспериментом e_l:

$$h^{mlk_l}(t_{ml}) = e^{mlk_l}\left(h^{mlk_l}\left(t_{0_l}\right)\right), \quad (8)$$

где множество входных параметров $i^{ml\,k_l}$ модели ml_{k_l} определяют начальные точки $h^{ml_{k_l}}\left(t_{0_l}\right)$ и $h^{cx}\left(t_{0_l}\right)$ траектории моделей ml_{k_l} и комплекса cx, в начальный момент интервала τ_{e_l} комплексного времени, соответствующего модельному эксперименту e_l, множество выходных параметров $o^{ml_{k_l}}$ модели ml_{k_l} определяются конечными точками $h^{ml_{k_l}}\left(t_{m_l}\right)$ или $h^{cx}\left(t_{m_l}\right)$ траекторией модели ml_{k_l} или комплекса cx в конечный момент этого же интервала, $t_{0_l} = \min_{t \in \tau_{e_l}} t, t_{m_l} = \max_{t \in t_{e_l}} t$, а отображение $e^{ml_{k_l}}$ является следующей позицией отображений, описывающих стадии модельного эксперимента e_l:

$$e_l = e_{l,n_i} \circ \left(e_{l,n_{i-1}} \circ \left(...e_{i,j}... \circ \left(e_{i,2} \circ e_{i,1}\right)...\right)\right), \quad (9)$$

где число $n_i = |e_i|$ определяет число стадий и фаз в составе модельного эксперимента e_i, а отображение $e_{i,j}: S^{ml_{k_l}} \to S^{ml_{k_l}}$ описывает j-ую стадию или фазу в составе модельного эксперимента e_l.

Интервал комплексного времени $\tau_e \subset \tau^c$, соответствующий стадии e, состоит из одного элемента. Длина $|\tau_e|$ интервала комплексного времени τ_{e_l} соответствующего фазе e_l определяется суммарным числом стадий всех экспериментов, выполняемых на этой фазе.

Таким образом комплексный эксперимент e с комплексом cx определяет его траекторию $h(t)$ следующим образом:

$$h(t) = e_{|t_0,t|}\left(h(t_0)\right), \forall t \in \tau^c, \quad (10)$$

где отображение $e_{|t_0,t|}$ является следующей суперпозицией отображений, составляющих этот комплексный эксперимент:

$$e_{|t_0,t|} = e_t \circ \left(e_{t-1} \circ ... \circ \left(e_{t_0+1} \circ e_{t_0}\right)\right), \quad (11)$$

а отображение $e_t: S^{cx} \to S^{cx}$ описывает стадию некоторого модельного эксперимента, соответствующую моменту t комплексного времени, и оно определяет точку траектории комплекса следующим выражением:

$$h(t) = e_t\left(h(t-1)\right), \forall t \in \tau^c. \quad (12)$$

Траектория $h^{ml}(t)$ каждой модели ml комплекса cx определяется аналогічнім образом:

$$h^{ml}(t) = e^{ml}_{\left[t_{0,t}\right]}\left(h^{ml}(t_o)\right), \forall t \in \tau^c \quad (13)$$

где отображение $e^{ml}_{\left[t_0,,t\right]}$ является суперпозиция следующих отображений:

$$e^{ml}_{\left[t_0,,t\right]} = e^{ml}_t \circ \left(e^{ml}_{t-1} \circ .... \circ \left(e^{ml}_{t_0+1} \circ e^{ml}_{t_0}\right)\right), \quad (14)$$

при этом отображение $e^{ml}_t = 1, где 1 = (x)$, если в момент t комплексного времени не определено выполнение некоторой стадии модельного эксперимента с моделью ml, и $e^{ml}_t = e_t$, если в момент комплексного времени t определено выполнение некоторой стадии модельного эксперимента с моделью ml. В этом случае способ задания отображения e_t определяется типом модели ml, а также типом стадии эксперимента с ней, соответствующей моменту t комплексного времени.

Выводы

На основе проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Для полного исследования ИТС СКП необходимо применять большой набор математических моделей, которые должны не противоречить друг другу, но могут быть разными по структуре, что приводит к необходимости использования гибридных моделей.

2. При аналитическом моделировании исследование процессов или объектов заменяется построением их математических моделей и исследованием этих моделей.

3. Актуальность использования гибридных моделей подтверждается тем, что все множество исследуемых параметров ИТС СКП в одном классе математических моделей адекватно описать практически невозможно.

Направление дальнейших исследований – разработка методики построенья гибридных моделей для ИТС СКП военного назначения.

Список литературы

1. Кучук Г.А. Інформаційні технології управління інтегральними потоками даних в інформаційно-телекомунікаційних мережах систем критичного призначення / Г.А. Кучук. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил, 2013. – 264 с.

2. Беляков В.Г., Кондратова В.А.,Митрофанов Ю.И., Математическое моделирование территориально-распределенной вычислительной сети с коммутацией пакетов: методы, средства, опыт использования / В.Г. Беляков, В.А. Кондратова, Ю.И. Митрофанов // Труды межд. НТК "Проблемы функционирования информационных сетей": Мат. конф. – Н-ск, 1991. – Ч. 1. – С. 32-40.

3. Yaroslavtsev A.F. Set-theoretic submission of simulation models in program tool MONAD / A.F. Yaroslavtsev // Proc. of the int. Conf. Distributed Computer Communication Networks. Theory and Applications., November 9-13,Tel-Aviv, Israel-Moscow, Russia: Institute for Information Transformation Problems RAS. – 1999. – P. 209-215

4. Chang X. Network simulation with OPNET / X. Chang // Proc. 1999 Winter Simulation Conf. – P 7-13.

5. Беляков В.Г. Пакет прикладных программ для математического моделирования сетевых систем / В.Г. Беляков, Ю.И. Митрофанов, А.Ф. Ярославцев // XI всесоюзная школа- семинар по вычислительным сетям: Тез. докл. – М.: ВИНИТИ, 1986. – Т. 3..– С. 145-150.

6. Кучук Г.А. Математична модель технічної структури інформаційно-телекомунікаційної мережі / Г.А. Кучук, В.В. Косенко, О.П. Давікоза // Системи обробки інформації. – Х.: ХУ ПС, 2013. – Вип. 6 (113). – С. 234 – 237.

7. Месарович М.Д. Общая теория систем: Математические основы / М.Д. Месарович, Я. Такахара. –М.: Мир, 1978. – 322 с.

8. Башарин Г.П. Анализ очередей в вычислительных сетях. Теория и методы расчета / Г.П. Башарин, П.П. Бочаров, Я.А. Коган. – М.: Наука, 1989. – 339 с.

9. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / Л. Клейнрок. – М.: Машиностроение, 1979. – 420 с.

10. Кофман А. Массовое обслуживание. Теория и приложения / А. Кофман, Р. Крюон. – М.: Мир, 1965. – 388 с.

11. Башарин Г.П. Анализ очередей в вычислительных сетях. Теория и методы расчета / Г.П. Башарин, П.П. Бочаров, Я.А. Коган. – М.: Наука, 1989. – 336 с.

12. Кучук Г.А. Метод синтезу структури зв'язного фрагменту інформаційно-телекомунікаційної мережі Єдиної автоматизованої системи управління Збройними Силами України / Г.А. Кучук // Системи озброєння і військова техніка : наук. журнал. – 2013. – № 2(34). – С. 114-119.

13. Кучук Г.А. Модель процесу буферізації пакетів в апаратних засобах мультиплексування / Г.А. Кучук // Системи обробки інформації. – Х.: ХУ ПС, 2006. – Вип. 2(51). – С. 65 – 70.

14. Беляков В.Г. Пакет прикладных программ для математического моделирования сетевых систем / В.Г. Беляков, Ю.И. Митрофанов, А.Ф. Ярославцев // Всесоюзная школа-семинар по вычислительным сетям: Тез. докл. – М.: ВИНИТИ, 1986. – С. 145-150.

15. Митрофанов Ю.И. Анализ и расчет сетей с зависимыми интенсивностями обслуживания и изменением классов требований / Ю.И. Митрофанов, В.Г. Беляков, Н.А. Кондратова // XVII межд. школа-семинар по вычислит. сетям: Тез. докл. – М.: ВИНИТИ, 1992. – С. 198-203.

16. Митрофанов Ю.И. Структурированные сети массового обслуживания в системе гибридного моделирования МОДЕС / Ю.И. Митрофанов, В.Г. Беляков, Н.А. Кондратова // XV Всесоюзная школа-семинар по вычислительным сетям. Тез. докл. – М.: ВИНИТИ, 1990. – С. 155-159.

17. Телекоммуникационные системы и сети: Т. 3. – Мультисервисные сети / В.В. Величко, Е.А. Субботин, В.В. Шувалов, А.Ф. Ярославцев. – Москва: Горячая линия-Телеком, 2005, С. 430-443.

Поступила в редколлегию 18.09.2014

Рецензент: д-р техн. наук проф. А.А. Можаев, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ СИСТЕМ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

А.П. Осколков

У статті наведений аналіз інформаційно-телекомунікаційних мереж систем критичного застосування, розглянуті методи аналітичного моделювання, метод гібридного моделювання, а також методи розрахунку однорідних замкнутих мереж системмасового обслуговування (МеМО) загального вигляду.

Ключові слова: *гібридне моделювання,ідентифікатор, однорідна МеМО, неоднорідна МеМО.*

COMPARATIVE ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELING METHODS OF INFORMATION AND TELECOMMUNICATION NETWORKS OF CRITICAL APPLYING

A.P. Oskolkov

In this article was conducted comparative analysis of mathematical modeling methods of information and telecommunication networks of critical applying, considered methods of analytical modeling, hybrid modeling method as well as methods for calculating homogeneous closed general form.

Keywords: *hybrid modeling, id, homogeneous NeMS, heterogeneous NeMS.*