

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ФОРМАЛИЗАЦИИ И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ БОЛЬШИХ И СЛОЖНЫХ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ

А. Ф. Ярославцев

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
630102, Новосибирск, Россия

УДК 519.876.5, 519.766.26

Предложен теоретико-множественный подход к описанию больших и сложных дискретных динамических систем, используемый при построении их имитационных моделей. Данный подход, основанный на классификации компонентов имитационной модели по типам поведения, позволяет формализовать описание имитационных моделей таких систем, а также осуществлять развитие изобразительных средств имитационного моделирования с учетом решаемых задач моделирования и с использованием объектно-ориентированных технологий. Приведен пример такого развития изобразительных средств, ориентированного на моделирование телекоммуникационных и информационных систем и сетей различного назначения.

Ключевые слова: имитационная модель, динамический процесс, большая и сложная дискретная система, телекоммуникационные и информационные системы и сети.

The set-theoretic approach to description of large and complex discrete dynamical systems simulation models. It is based on the classification of the components of a simulation model by type. This classification is based on the similarity of behaviour of components of type. The above approach allows us to formalize the description of simulation models of such systems, as well as to the development of effective means of simulation models taking into account the tasks of modelling and using object-oriented technology. An example of such of object-oriented tools for simulation of telecommunication networks is developed.

Key words: simulation, dynamic process, discrete complex system, communication network.

Введение. Телекоммуникационные системы и сети (ТКС) являются большими и сложными дискретными динамическими системами (ДДС). Программные средства имитационного моделирования ДДС развиваются в течение более 50 лет, тем не менее их развитие по-прежнему является актуальной задачей [1–4]. Постоянно появляются новые программные средства, в основе которых лежат различные подходы к описанию и представлению динамики поведения ДДС [5–12]. При разработке формального представления моделируемых систем необходимо учитывать различные противоречащие друг другу факторы, основными из которых являются следующие: 1) класс моделируемых систем; 2) задачи моделирования и анализа; 3) естественность и удобство изобразительных средств; 4) эффективность программной реализации; 5) возможность формального анализа модели с целью анализа ее вычислительной сложности и адекватности.

Понятие ДДС также изменялось. Предлагались подходы, когда под ДДС понимается динамическая система, поведение которой определено или в дискретном времени, или в дискретном пространстве состояний. Четкого определения большой и сложной системы не существует. Считается, что ДДС является большой и сложной, если в ее составе определено большое количество разнотипных структурных компонентов, взаимодействующих за счет большого числа разнотипных связей.

1. Теоретико-множественный подход к описанию динамических систем. Для построения математических и программных моделей больших и сложных ДДС, для развития теории их анализа и верификации разработана система понятий и терминов, представленная в данной работе. Эта система, основанная на общей теории систем и теории их моделирования [13–16], разработана в виде последовательности взаимосвязанных определений, адаптирует терминологию общей теории систем к теории гибридного моделирования больших и сложных ДДС и обеспечивает унифицированное описание различных компонентов концептуальных, математических и программных моделей таких ДДС, как информационные и телекоммуникационные системы и сети.

Сначала рассмотрим общее определение динамической системы (ДС), приведенное в [13, 16]. В качестве основного структурного элемента ДС выбран компонент.

Определение 1. Компонент cm — топологическая динамическая система, определяемая кортежем

$$cm = \langle \tau^{cm}, \mathbf{S}^{cm}, \mathbf{H}^{cm} \rangle,$$

где τ^{cm} , \mathbf{S}^{cm} , \mathbf{H}^{cm} — его время, алфавит и поведение.

Определение 2. Время τ^{cm} компонента cm — упорядоченное множество моментов времени τ^{cm} — модель реального времени, в котором происходит эволюция компонента cm .

Время τ^{cm} компонента cm может быть определено как пространство с непрерывной или решетчатой топологией, между элементами которого определяются отношения порядка. В зависимости от топологии времени τ^{cm} (непрерывной или решетчатой) cm является потоком или каскадом [17].

Определение 3. Состояние $\mathbf{s}^{cm} \in \mathbf{S}^{cm}$ компонента cm — вектор $\mathbf{s}^{cm} = \{p_i^{cm}\}$ параметров компонента cm , определяющий точку фазового пространства состояний, в котором происходит эволюция этого компонента.

Состояние \mathbf{s}^{cm} компонента cm , образованное его параметрами, может быть определено в пространстве произвольной размерности.

Определение 4. Параметр p^{cm} компонента cm — координата p^{cm} состояния \mathbf{s}^{cm} , определяющая некоторое свойство компонента cm . Различаются следующие состояния процесса: функциональное, событийное и состояние интерфейса.

Любой параметр $p_i^{cm} \in \mathbf{s}^{cm}$ компонента cm может быть элементом некоторого пространства произвольной размерности и топологии.

Определение 5. Алфавит \mathbf{P}^{cm} параметра p^{cm} компонента cm — множество \mathbf{P}^{cm} допустимых значений параметра p^{cm} компонента cm .

Определение 6. Алфавит \mathbf{S}^{cm} компонента cm — множество $\mathbf{S}^{cm} = \{\mathbf{s}_i^{cm}\}$, $\mathbf{S}^{cm} \subseteq \prod_i \mathbf{P}_i^{cm}$ всех возможных состояний компонента cm , определяющее его фазовое пространство состояний.

Определение 7. Траектория $\mathbf{h}^{cm}(t)$ компонента cm — отображение $\mathbf{h}^{cm} : \mathbf{S}^{cm} \rightarrow \tau^{cm}$ алфавита \mathbf{S}^{cm} компонента cm на его время τ^{cm} .

Любая траектория \mathbf{h}^{cm} описывается соответствующим вектором функций $\mathbf{h}^{cm}(t) = \{h_i^{cm}(t)\}$, где $h_i^{cm}(t)$ — траектория параметра p_i^{cm} во времени τ^{cm} .

Определение 8. Поведение \mathbf{H}^{cm} компонента cm — множество $\mathbf{H}^{cm} = \{\mathbf{h}_i^{cm}\}$ $\mathbf{H}^{cm} \subseteq \tau^{cm} \times \mathbf{H}^{cm}$ всех траекторий компонента cm , которые согласуются с его внутренними законами функционирования.

Определение 9. Эксперимент $\varepsilon^{cm}(\tau)$ с компонентом cm на интервале τ его времени τ^{cm} — воспроизведение в программной модели фрагмента $\mathbf{h}^{cm}(t)$, $t \in \tau$ некоторой траекто-

рии h^{cm} поведения H^{cm} , который соответствует интервалу $\tau \subseteq \tau^{cm}$ его времени. Воспроизведение этого фрагмента обеспечивает достижение поставленной цели моделирования.

В составе ДС различаются примитивные и структурированные компоненты. Поведение структурированного компонента, в отличие от примитивного, определяется поведением системы компонентов, образованной его подкомпонентами (как примитивными, так и структурированными). Функционирование этих подкомпонентов определено на общей оси времени.

Определение 10. Структурированный компонент cm — компонент cm с рядом выделенных в нем подсистем, каждая из которых описывается как компонент ДС.

Определение 11. Подкомпонент cm^{cm} компонента cm — компонент cm^{cm} , определяющий подсистему структурированного компонента cm .

Определение 12. Состав C^{cm} компонента cm — множество $C^{cm} = \{cm_i\}$ всех подкомпонентов структурированного компонента cm .

Определение 13. Суперкомпонент \widehat{cm} компонента cm — структурированный компонент \widehat{cm} , в составе которого определен подкомпонент cm .

Предполагается, что компонент cm , определенный в составе структурированного компонента \widehat{cm} , не принадлежит составу $C^{\widehat{cm}}$ его суперкомпонента.

Алфавит и траектории поведения структурированного компонента cm определяются соответствующими композициями алфавитов и траекторий всех подкомпонентов его состава C^{cm} .

С целью повышения эффективности разработки программных моделей реальных больших и сложных ДС, обеспечения возможности развития изобразительных средств описания их процессов функционирования, использования объектно-ориентированной технологии моделирования множество всех компонентов математической модели разбивается на типы.

Определение 14. Тип компонентов T — множество компонентов $T = \{cm_i\}$, $\widehat{cm}_i = \widehat{cm}_j$ для всех $cm_i, cm_j \in T$, имеющих однотипное поведение. Тип компонентов T определяется кортежем

$$T = \langle \tau^T, \tilde{S}^T, \tilde{H}^T \rangle,$$

где τ^T — время компонентов типа T ($\tau^T = \tau^{cm} \forall cm \in T$); \tilde{S}^T — характерный алфавит компонентов типа T ; \tilde{H}^T — характерное поведение компонентов типа T .

Для определения характерных алфавита и поведения компонента рассмотрим их структуры. Пусть на алфавите S^{cm} определена эквивалентность π^{cm} состояний компонента cm , которой соответствуют агрегированные состояния $\tilde{s}^{\pi^{cm}}$, траектории $\tilde{h}^{\pi^{cm}}(t)$ и поведение $\tilde{H}^{\pi^{cm}}$.

Определение 15. Агрегированное состояние $\tilde{s}^{\pi^{cm}}$ компонента cm по эквивалентности π^{cm} — некоторый класс

$$\tilde{s}^{\pi^{cm}} = \{s \mid (s, r) \in \pi^{cm} \quad \forall s, r \in \tilde{s}^{\pi^{cm}}, \quad s, r \in \tilde{S}^{cm}\}$$

эквивалентности π^{cm} состояний компонента cm .

Определение 16. Агрегированный алфавит $\tilde{S}^{\pi^{cm}}$ компонента cm , соответствующий эквивалентности π^{cm} , — разбиение $\tilde{S}^{\pi^{cm}} = \{\tilde{s}_i^{\pi^{cm}}\}$ его алфавита S^{cm} по эквивалентности π^{cm} (фактор/множество S^{cm}/π^{cm}).

Определение 17. Агрегированная траектория $\tilde{h}^{\pi^{cm}}(t)$ компонента cm , соответствующая эквивалентности π^{cm} , — отображение $\tilde{h}^{\pi^{cm}}(t) : \tilde{S}^{\pi^{cm}} \rightarrow \tau^{cm}$ его агрегированного алфавита $\tilde{S}^{\pi^{cm}}$ на его время τ^{cm} , траектория $\tilde{h}^{\pi^{cm}}(t) = \pi^{cm}(h^{cm}(t))$ по классам эквивалентности π^{cm} , представляющая соответствующее семейство траекторий $h^{cm}(t)$ его поведения H^{cm} .

Определение 18. Агрегированное поведение $\tilde{H}^{\pi^{cm}}$ компонента cm , соответствующее эквивалентности π^{cm} , — множество $\tilde{H}^{\pi^{cm}} = \{\tilde{h}_i^{\pi^{cm}}(t)\}$ всех его агрегированных траекторий, соответствующих эквивалентности π^{cm} .

На множестве \mathcal{C} всех компонентов ДС эквивалентность φ определяется следующим образом:

$$(cm_i, cm_j) \in \varphi, \text{ если } \begin{cases} 1) \tau_i = \tau_j = \tau - cm_i \text{ и } cm_j \text{ функционируют на общем времени } \tau; \\ 2) \widehat{cm}_i = \widehat{cm}_j = cm - cm_i \text{ и } cm_j \text{ определены как подкомпоненты одного суперкомпонента } cm; \\ 3) \text{ для } cm_i \text{ и } cm_j \text{ существуют эквивалентности } \pi_i \text{ и } \pi_j, \text{ такие что имеется морфизм между соответствующими агрегированными поведением } \tilde{H}_i \text{ и } \tilde{H}_j. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $cm_i = \langle \tau_i, S_i, H_i \rangle$; $cm_j = \langle \tau_j, S_j, H_j \rangle$; $\tilde{S}_i = S_i/\pi_i$; $\tilde{S}_j = S_j/\pi_j$; $\tilde{H}_i \subseteq \tau_i \times \tilde{S}_i$; $\tilde{H}_j \subseteq \tau_j \times \tilde{S}_j$.

Таким образом, класс \mathbf{T} эквивалентности φ (тип компонентов \mathbf{T}) определяет множество компонентов $cm \in \mathbf{T}$, для которых существуют эквивалентности π^{cm} их состояний, такие что соответствующие им агрегированные алфавиты $\tilde{S}^{\pi^{cm}}$ изоморфны характерному алфавиту $\tilde{S}^{\mathbf{T}}$, а их агрегированные поведения $\tilde{H}^{\pi^{cm}}$ изоморфны характерному поведению $\tilde{H}^{\mathbf{T}}$.

Определение 19. Характерное состояние $\tilde{s}^{\mathbf{T}}$ компонентов типа \mathbf{T} — вектор $\tilde{s}^{\mathbf{T}} = (\tilde{p}_i)$ параметров характерного состояния, описывающих эквивалентные по эквивалентностям π^{cm} агрегированные состояния $\tilde{s}^{\pi^{cm}}$ всех компонентов $cm \in \mathbf{T}$, входящих в состав типа \mathbf{T} .

Определение 20. Характерный алфавит $\tilde{S}^{\mathbf{T}}$ компонентов типа \mathbf{T} — множество $\tilde{S}^{\mathbf{T}} = \{\tilde{s}_i^{\mathbf{T}}\}$ всех характерных состояний компонентов типа \mathbf{T} .

Определение 21. Характерная траектория $\tilde{h}^{\mathbf{T}}(t)$ компонентов типа \mathbf{T} — отображение $\tilde{h}^{\pi^{cm}}(t) : \tilde{S}^{\mathbf{T}} \rightarrow \tau^{\mathbf{T}}$ их агрегированного алфавита $\tilde{S}^{\mathbf{T}}$ на их время $\tau^{\mathbf{T}}$, соответствующее эквивалентным по эквивалентностям π^{cm} агрегированным траекториям $\tilde{h}^{\pi^{cm}}(t)$ всех компонентов $cm \in \mathbf{T}$.

Определение 22. Характерное поведение $\tilde{H}^{\mathbf{T}}$ компонентов типа \mathbf{T} — множество $\tilde{H}^{\mathbf{T}} = \{\tilde{h}_i^{\mathbf{T}}(t)\}$ характерных траекторий компонентов типа \mathbf{T} .

Далее через \tilde{s}^{cm} , \tilde{S}^{cm} , \tilde{h}^{cm} , \tilde{H}^{cm} будем обозначать соответственно характерное состояние $\tilde{s}^{\mathbf{T}}$, характерный алфавит $\tilde{S}^{\mathbf{T}}$, характерную траекторию $\tilde{h}^{\mathbf{T}}$ и характерное поведение $\tilde{H}^{\mathbf{T}}$ типа \mathbf{T} , в составе которого определен компонент cm .

Определение 23. Тип \mathbf{T}^{cm} компонентов структурированного компонента cm — тип $\mathbf{T}^{cm} = \{c_i\}$ (см. определение 14) подкомпонентов (см. определение 11) структурированного компонента cm (см. определение 10), т. е. для каждого компонента $c \in \mathbf{T}^{cm}$, $\widehat{c} = cm$.

Фактор-множество $\hat{\mathbf{T}}^{cm} = \mathcal{C}^{cm}/\varphi = \{\mathbf{T}_i^{cm}\}$ состава \mathcal{C}^{cm} (см. определение 12) по эквивалентности φ (1) образует множество типов структурированного компонента cm , а фактор-множество $\hat{\mathbf{T}} = \mathcal{C}/\varphi = \{\mathbf{T}_i\}$ состава \mathcal{C} ДС по той же эквивалентности образует множество типов ДС.

На базе данного определения типа компонентов разработан набор $\hat{\mathbf{T}} = \mathcal{C}/\varphi = \{\mathbf{T}_i\}$ типов компонентов, обеспечивающий: 1) определение состава и структуры моделируемой ДДС; 2) описание ее алгоритмов функционирования в целом и ее компонентов в отдельности; 3) построение гибридной модели, состоящей из множества разнотипных математических моделей; 4) описание широкого класса исследуемых параметров моделируемых ДДС; 5) построение оценок этих параметров и анализ их точности.

2. Дискретные динамические системы. Большая и сложная ДДС является общепризнанной концептуальной моделью метода имитационного моделирования телекоммуникационных и информационных систем. Под ДДС понимается динамическая система (см. определение 1) с дискретным либо непрерывным временем (см. определение 2) и алфавитом (см. определение 5), поведение которой (см. определение 8) в ее времени описывается ступенчатыми функциями произвольного вида. Пусть ДДС описывается имитационной моделью ml , которая рассматривается как структурированный компонент (см. определение 10). Ее состав (см. определение 12) определяется множеством \mathbf{C}^{ml} подкомпонентов, являющихся элементарными ДДС, в составе которых не выделяются структурные элементы. Функционирование компонентов этой ДДС определяется на некотором общем интервале модельного времени $\tau^{ml} \subseteq \mathbb{R}[0, \infty]$.

Состояние \mathbf{s}^{ml} ДДС ml образуется как соответствующая композиция состояний \mathbf{s}^{cm_i} всех подкомпонентов cm_i , определенных в ее составе $\mathbf{C}^{ml} = \{cm_i \mid \widehat{cm}_i = ml\}$. Аналогично исследуемая (воспроизводимая) траектория \mathbf{h}^{ml} поведения \mathbf{H}^{ml} структуры \mathbf{C}^{ml} подкомпонентов модели ml образуется как композиция соответствующих траекторий всех ее подкомпонентов.

Рассмотрим состояния и поведения подкомпонентов, образующих ДДС ml . Любая траектория \mathbf{h}^{cm} поведения \mathbf{H}^{cm} ее компонента $cm \in \mathbf{C}^{ml}$ описывается последовательностью событий $\{e_i^{h^{cm}} \mid i = 1, 2, \dots\}$ этого компонента.

Определение 24. Событие $e^{h^{cm}}$ траектории \mathbf{h}^{cm} компонента cm модели ml — мгновенное скачкообразное изменение состояния \mathbf{s}^{cm} компонента cm , соответствующее его траектории $\mathbf{h}^{cm}(t)$ в некоторый момент модельного времени $t \in \tau^{ml}$.

Соответственно любая траектория $\mathbf{h}^{ml} \in \mathbf{H}^{ml}$ структуры компонентов \mathbf{C}^{ml} также определяется соответствующей последовательностью событий $\mathbf{h}^{ml} = \{e_i^{h^{ml}} \mid i = 1, 2, \dots\}$. Так как состояние и траектория поведения структурированного компонента определяются композицией соответствующих состояний и траекторий его подкомпонентов, любая траектория \mathbf{h}^{ml} ДДС ml будет образована только теми событиями, которые имеют место на соответствующих траекториях ее подкомпонентов и упорядочены в порядке их наступления. В то же время можно утверждать, что траектория \mathbf{h}^{cm} компонента cm определяется предварительно заданным начальным состоянием $\mathbf{h}^{ml}(t_0)$, $t_0 = \min_{t \in \tau} t$ ее воспроизводимой траектории.

Введем следующие обозначения:

- 1) $\dot{\mathbf{h}}^{ml}$ — траектория, которая воспроизводится в эксперименте $\varepsilon^{ml}(\tau)$ (см. определение 9) с ДДС ml ;
- 2) $\dot{\mathbf{h}}^{cm}$ — траектория компонента cm , образующая траекторию $\dot{\mathbf{h}}^{ml}$;
- 3) e_i^{ml} — событие с номером i на траектории $\dot{\mathbf{h}}^{ml}$, $i = 1, 2, \dots$;
- 4) $e_{j^{cm}}^{cm}$ — событие с номером j^{cm} на траектории $\dot{\mathbf{h}}^{cm}$, $j^{cm} = 1, 2, \dots$

Среди событий, которые имеют место на траектории $\dot{\mathbf{h}}^{ml}$, различаются локальные и глобальные события.

Любое локальное событие e_i^{ml} ДДС ml с номером i на траектории $\dot{\mathbf{h}}^{ml}$ является событием $e_{j^{cm}}^{cm}$ с номером j^{cm} некоторого подкомпонента cm на его траектории $\dot{\mathbf{h}}^{cm}$. Любое локальное событие $e_{j^{cm}}^{cm}$ траектории $\dot{\mathbf{h}}^{cm}$ определяется парой ее параметров

$$e_{j^{cm}}^{cm} = \langle \dot{e}_{j^{cm}}^{cm}, \ddot{e}_{j^{cm}}^{cm} \rangle,$$

где $\dot{e}_{j^{cm}}^{cm} = \dot{e}$ — образ события; $\ddot{e}_{j^{cm}}^{cm} = \ddot{e}$ — его таймер.

Определение 25. Образ \dot{e} события $e_{j^{cm}}^{cm}$ на траектории $\dot{\mathbf{h}}^{cm}$ — отображение $\dot{e} : \mathbf{S}^{cm} \rightarrow \mathbf{S}^{cm}$ алфавита \mathbf{S}^{cm} (см. определение 6) на само себя, определяющее значение $\mathbf{h}^{cm}(t_{j^{cm}})$ траектории компонента cm в момент модельного времени $t_{j^{cm}} \in \tau^{ml}$ наступления события $e_{j^{cm}}^{cm}$.

Определение 26. Таймер \ddot{e} события $e_{j^{cm}}^{cm}$ на траектории $\dot{\mathbf{h}}^{cm}$ — отображение $\ddot{e} : \mathbf{S}^{cm} \rightarrow \mathbb{R} [t_{i-1}, t_M]$ алфавита \mathbf{S}^{cm} (см. определение 6) на интервал $\mathbb{R} [t_{j^{cm}-1}, t_M] \subseteq \boldsymbol{\tau}^{ml}$ модельного времени (см. определение 2), определяющее момент модельного времени $t_{j^{cm}} \in \boldsymbol{\tau}^{ml}$ наступления события $e_{j^{cm}}^{cm}$ в зависимости от состояния $\dot{\mathbf{h}}^{cm}(t_{j^{cm}-1})$ в момент $t_{j^{cm}-1}$ наступления события $e_{j^{cm}-1}^{cm}$ с номером $j^{cm} - 1$, где $t_M = \max_{t \in \boldsymbol{\tau}^{ml}} t$.

Агрегирование траекторий $\dot{\mathbf{h}}^{cm}$, $cm \in \mathbf{C}^{ml}$ в траекторию $\dot{\mathbf{h}}^{ml}$ осуществляется в соответствии с приведенными ниже отношениями параметров событий этих траекторий.

Таймер \ddot{e}_i^{ml} события e_i^{ml} траектории $\dot{\mathbf{h}}^{ml}$ (см. определение 26) определяется следующим образом:

$$\ddot{e}_i^{ml} \left(\dot{\mathbf{h}}^{ml}(t_{i-1}^{ml}) \right) = \min_{cm \in \mathbf{C}^{ml}} \ddot{e}_{j^{cm}(i)+1}^{cm} \left(\dot{\mathbf{h}}^{cm}(t_{j^{cm}(i)}^{cm}) \right). \quad (2)$$

Здесь $j^{cm}(i)$ — номер события на траектории $\dot{\mathbf{h}}^{cm}$, которое является ближайшим к событию e_i^{ml} на траектории $\dot{\mathbf{h}}^{ml}$. Номер $j^{cm}(i)$ определяется выражением

$$j^{cm}(i) = \max_{t_{j^{cm}}^{cm} < t_i^{ml}} j^{cm}, \quad (3)$$

где t_i^{ml} , $t_{j^{cm}}^{cm}$ — времена наступления событий e_i^{ml} и $e_{j^{cm}}^{cm}$ на траекториях $\dot{\mathbf{h}}^{ml}$ и $\dot{\mathbf{h}}^{cm}$ ДДС ml и компонента cm соответственно.

Образ \dot{e}_i^{ml} события e_i^{ml} траектории $\dot{\mathbf{h}}^{ml}$ (см. определение 25) определяется следующим образом:

$$\left(\dot{e}_i^{ml} \left(\dot{\mathbf{h}}^{ml}(t_{i-1}^{ml}) \right) \right)_f = \begin{cases} \left(\dot{e}_{j^{cm}(i)}^{cm} \left(\dot{\mathbf{h}}^{cm}(t_{i-1}^{ml}) \right) \right)_{f^{cm}}, & c\acute{m} \neq \emptyset, \\ \left(\dot{\mathbf{h}}^{ml}(t_{i-1}^{ml}) \right)_f, & c\acute{m} = \emptyset. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь $c\acute{m}$ — компонент ДДС ml , который модифицировал ее параметр $p_f \in \mathbf{s}^{ml}$ при реализации события на своей траектории, соответствующего событию e_i^{ml} . Этот компонент определяется выражением

$$c\acute{m} = \begin{cases} cm, & \ddot{e}_i^{ml} \left(\dot{\mathbf{h}}^{ml}(t_{i-1}^{ml}) \right) = \ddot{e}_{j^{cm}(i)}^{cm} \left(\dot{\mathbf{h}}^{cm}(t_{i-1}^{ml}) \right), \quad p_f \in \mathbf{s}^{cm}, \\ \emptyset & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (5)$$

где $j^{cm}(i)$ определяется выражением (3). Индекс f^{cm} определяет номер параметра $p_{f^{cm}} \in \mathbf{s}^{cm}$, соответствующий параметру $p_f \in \mathbf{s}^{ml}$ модели ml .

В некоторый момент $t \in \boldsymbol{\tau}^{ml}$ на воспроизводимой траектории $\dot{\mathbf{h}}^{ml}$ могут иметь место несколько одновременных событий. Два одновременных локальных события $e_k^{ml} = e_{i_k}^{cm_{j_k}}$ и $e_l^{ml} = e_{i_l}^{cm_{j_l}}$ являются независимыми, если:

- 1) $t_k = t_l = t$;
- 2) $\dot{e}_k^{ml} \left(\dot{e}_l^{ml} \left(\dot{\mathbf{h}}^{ml}(t-0) \right) \right) = \dot{e}_l^{ml} \left(\dot{e}_k^{ml} \left(\dot{\mathbf{h}}^{ml}(t-0) \right) \right)$.

Здесь $t_k = \dot{e}_{i_k}^{cm_{j_k}} \left(\dot{\mathbf{h}}^{cm_{j_k}}(t_{i_k-1}) \right)$; $t_l = \dot{e}_{i_l}^{cm_{j_l}} \left(\dot{\mathbf{h}}^{cm_{j_l}}(t_{i_l-1}) \right)$; i_k , i_l — номера событий на траекториях $\dot{\mathbf{h}}^{cm_{j_k}}$ и $\dot{\mathbf{h}}^{cm_{j_l}}$ компонентов cm_{j_k} и cm_{j_l} , соответствующих событиям e_k^{ml} и e_l^{ml} на траектории $\dot{\mathbf{h}}^{ml}$.

На траектории \dot{h}^{ml} могут быть определены ординарные и структурированные события. Структурированное событие, в отличие от ординарного, определяется как последовательность зависимых ординарных и структурированных подсобытий.

Компоненты ДДС могут взаимодействовать с другими ее компонентами двумя способами:

- 1) посредством обмена (передачи друг другу) сообщениями различного типа;
- 2) посредством изменения и использования значений своих параметров состояния, которые являются общими со взаимодействующими компонентами.

Каждый обмен сообщениями между компонентами определяется как глобальное событие, которое всегда является подсобытием некоторого локального события, инициировавшего данный обмен. Все одновременные глобальные события являются независимыми.

Передача сообщения между компонентами осуществляется по идеальным связям, множество которых образует сеть связей компонентов. Идеальная связь предполагает бесконечную пропускную способность и абсолютную надежность передачи сообщений. Связи подсоединяются к компонентам через их клеммы. Различаются входные, выходные и неориентированные клеммы компонентов, через которые осуществляются прием и передача сообщений. Сообщения, которыми обмениваются компоненты, могут быть бесконечного размера, а их время жизни равно нулю. Сформированное компонентом сообщение направляется на его выходную клемму, после чего оно мгновенно передается по связям на соответствующие входные клеммы других компонентов. Сообщение, принятое на входной клемме, мгновенно обрабатывается компонентом и уничтожается.

Клемма a^{cm} компонента cm ДДС ml определяется как вектор, составленный из координат его состояния s^{cm} , $a^{cm} = \{p_{k_i}^{cm}\}$, $p_{k_i}^{cm} \in s^{cm}$. Множество $a^{cm} = \{a_i^{cm}\}$ всех клемм образует интерфейс компонента cm , множество $a^{+cm} \subseteq a^{cm}$ входных и неориентированных клемм образует его входной интерфейс, а множество $a^{-cm} \subseteq a^{cm}$ выходных и неориентированных клемм образует его выходной интерфейс. Множества $a^{+ml} = \bigcup_{cm \in C^{ml}} a^{+cm}$ и $a^{-ml} = \bigcup_{cm \in C^{ml}} a^{-cm}$ образуют интерфейсы входов и выходов компонентов ДДС ml соответственно.

Состояние $s^{a^{cm}}$ образуется из соответствующих координат состояний компонента cm , а состояния $s^{a^{ml}}$, $s^{a^{+ml}}$ и $s^{a^{-ml}}$ интерфейсов a^{ml} , a^{+ml} и a^{-ml} ДДС ml определяются как композиция состояний соответствующих клемм. Алфавиты $S^{a^{ml}}$, $S^{a^{+ml}}$ и $S^{a^{-ml}}$ тех же интерфейсов определяются как прямые произведения алфавитов координат состояний их клемм. Содержание сообщений, передаваемых от выходного интерфейса к входному, определяется текущими состояниями выходных клемм.

Сеть связей n^{ml} входов и выходов компонентов имитационной модели ml определяется отображением $n^{ml} : S^{a^{-ml}} \rightarrow S^{a^{+ml}}$, которое осуществляет мгновенную передачу сообщений, сформированных на выходных и неориентированных клеммах, на соответствующие входные и неориентированные клеммы в каждый момент модельного времени, в который имело место событие на траектории \dot{h}^{ml} .

Таким образом, поведение H^{ml} ДДС ml определяется поведением всех ее подкомпонентов, а также отображением n^{ml} , описывающим сеть связей ее подкомпонентов. Воспроизводимая траектория \dot{h}^{ml} определяется начальными точками $\dot{h}^{cm}(t_0)$ воспроизводимых траекторий \dot{h}^{cm} всех подкомпонентов ДДС ml . В ходе модельного эксперимента траектория \dot{h}^{ml} рекуррентно вычисляется в соответствии с приведенными ниже выражениями.

Для описания ДДС разработано следующее множество стандартных типов компонентов имитационных моделей:

$$\hat{T}_{sm} = \{Pr, Dd, Cl, Qu, Rn, Rs, Td, Mn\}.$$

Типы компонентов \hat{T}_{sm} определяют в ДДС соответственно множества процессов, требований, классов требований, очередей требований, случайных величин, ресурсов, датчиков и мониторов. Состав \hat{T}_{sm} определен практическим опытом моделирования ТКС и при необходимости может быть расширен в соответствии с возникающими задачами моделирования.

3. Процесс имитационной модели. Процесс $pr \in Pr$ является подкомпонентом ДДС ml с наиболее общим алгоритмом функционирования, описываемым в виде последовательности дискретных событий. Предполагается, что процессы ДДС могут иметь пространство состояний произвольной размерности, при этом каждая координата его состояния может принадлежать либо непрерывному, либо дискретному пространству. Кроме того, траектории поведений процессов обладают свойством марковости, т.е. следующее событие на его траектории в некоторый момент модельного времени определяется только текущим состоянием этого процесса и не зависит от предшествующей траектории развития как самого процесса, так и всей ДДС ml . Данное ограничение не является существенным, так как путем введения дополнительных параметров состояния процесса его можно легко преодолеть.

3.1. *Состояние процесса.* Состояние s^{pr} процесса pr (см. определение 3) определяется вектором его параметров (см. определение 4)

$$s^{pr} = \{s_f^{pr}, s_e^{pr}, s^{a^{pr}}\},$$

где s_f^{pr} — его функциональное состояние; s_e^{pr} — его событийное состояние; $s^{a^{pr}}$ — состояние его интерфейса a^{pr} .

Функциональное состояние $s_f^{pr} = (p_j^f)$, $j = 1, 2, \dots$ процесса pr , где p_j^f — его функциональный параметр с номером j , описывает внутренние законы функционирования этого процесса. Предполагается, что существенные аспекты функционирования процесса pr отражаются его функциональным состоянием. При этом события на траекториях его поведения отражают допустимые изменения его функциональных параметров. Состав параметров функционального состояния каждого процесса pr является индивидуальным и определяется отображаемыми этим процессом свойствами моделируемой системы. Событийное состояние $s_e^{pr} = \{\dot{e}_e^{pr}, \dot{e}_t^{pr}, \dot{e}_c^{pr}\}$ описывает множество последовательностей событий (изменений функционального состояния s_f^{pr}), которые могут иметь место на траекториях поведения H^{pr} .

Состояние интерфейса $s^{a^{pr}}$ процесса pr формируется множеством его параметров, которые образуют его клеммы, составляющие сеть связей между процессами. Его состав параметров и соответствующее ему состояние $s^{a^{pr}}$ интерфейса a^{pr} процесса pr определяются структурой связей данного процесса с другими компонентами моделируемой дискретной системы.

3.2. *Алфавит процесса.* Алфавит S^{pr} процесса pr (см. определение 6) определяется как произведение алфавитов его функционального и событийного состояний, а также алфавита состояния его интерфейса: $S^{pr} = S_f^{pr} \times S_e^{pr} \times S^{a^{pr}}$.

Алфавит функционального состояния S_f^{pr} процесса pr определяется пользователем при описании алгоритма его функционирования и является пространством произвольного типа.

Событийный алфавит S_e^{pr} процесса pr определяется следующим прямым произведением трех множеств: $S_e^{pr} = \dot{S}_e^{pr} \times \dot{S}_t^{pr} \times \dot{S}_c^{pr}$. Множество $\dot{S}_e^{pr} = \{\dot{e}_j\}$, $j = 1, 2, \dots$ отображений

$\dot{e}_j : \mathbf{S}_f^{pr} \times \mathbf{S}^{a^{pr}} \rightarrow \mathbf{S}_f^{pr} \times \mathbf{S}^{a^{pr}}$ описывает образы всех событий, которые могут иметь место на траекториях поведения \mathbf{H}_f^{pr} процесса pr . Множество $\dot{\mathbf{S}}_t^{pr} = \{\dot{t}_j\}$, $j = 1, 2, \dots$ отображений $\dot{t}_j : \mathbf{S}_f^{pr} \times \mathbf{S}^{a^{pr}} \rightarrow \mathbb{R}[0, \infty]$ описывает образы таймеров моментов времени всех событий процесса pr , которые определяют длительности интервалов времени между последовательными событиями на его траекториях. Множество $\dot{\mathbf{S}}_c^{pr} = \{\dot{c}_j\}$, $j = 1, 2, \dots$ отображений $\dot{c}_j : \mathbf{S}_f^{pr} \times \mathbf{S}^{a^{pr}} \rightarrow \{false, true\}$ описывает образы таймеров условий всех событий процесса pr , которые определяют условия наступления последующих событий на его траекториях.

3.3. *Типы событий на траекториях процессов.* Среди множества \mathbf{S}_e^{pr} событий процесса pr траекторий его поведения \mathbf{H}^{pr} выделяются функциональные и управляющие события.

Образ \dot{e}^{pr} функционального события e^{pr} определяется на функциональном алфавите \mathbf{S}_f^{pr} процесса при описании его поведения.

Реализация управляющего события, которое всегда является зависимым подсобытием некоторого функционального события другого процесса, обеспечивает изменение запланированной траектории развития процесса pr на его функциональном алфавите. Образ \dot{e}^{pr} управляющего события процесса pr определен на его событийном алфавите \mathbf{S}_e^{pr} . На траектории процесса pr могут быть определены управляющие события следующих трех типов:

- 1) возобновление в момент реализации данного события развития прерванной воспроизводимой траектории указанного процесса начиная с указанного функционального события;
- 2) прерывание развития воспроизводимой траектории указанного процесса;
- 3) изменение воспроизводимой траектории указанного процесса посредством выполнения не запланированного ранее функционального события.

3.4. *Поведение процесса.* Поведение \mathbf{H}^{pr} процесса pr (см. определение 8) задается отображением $\dot{y}^{pr} : \mathbf{S}_e^{pr} \times \mathbf{S}_f^{pr} \times \mathbf{S}^{a^{pr}} \rightarrow \mathbf{S}_e^{pr}$, которое в зависимости от его состояния $\mathbf{h}^{pr}(t_i)$ в момент времени t_i наступления события e_i^{pr} описывает образы события e_{i+1}^{pr} ; таймера момента времени события e_{i+1}^{pr} ; таймера условия события e_{i+1}^{pr} .

Любая траектория $\mathbf{h}^{pr} \in \mathbf{H}^{pr}$ поведения процесса pr :

$$\mathbf{h}^{pr}(t) = \{\mathbf{h}_f^{pr}(t), \mathbf{h}_e^{pr}(t), \mathbf{h}^{a^{pr}}(t)\}, \quad \mathbf{h}_f^{pr}(t) = (h_j^f(t)),$$

$$\mathbf{h}_e^{pr}(t) = (\dot{h}_e^{pr}(t), \dot{h}_t^{pr}(t), \dot{h}_c^{pr}(t)), \quad \mathbf{h}^{a^{pr}}(t) = (h_j^{a^{pr}}(t))$$

определяется следующим образом:

$$\mathbf{h}_e^{pr}(t) = \dot{y}^{pr}(\mathbf{h}_e^{pr}(t_{i-1}), \mathbf{h}_f^{pr}(t_{i-1}), \mathbf{h}^{a^{pr}}(t_{i-1})) \quad \forall t \in \mathbb{R}(t_{i-1}, t_i],$$

$$(\mathbf{h}_f^{pr}(t), \mathbf{h}^{a^{pr}}(t))^T = \dot{h}_e^{pr}(t_i)(\mathbf{h}_f^{pr}(t_i), \mathbf{h}^{a^{pr}}(t_i)) \quad \forall t \in \mathbb{R}(t_i, t_{i+1}),$$

$$t_{i+1} = \min(t_U, t_V).$$

Здесь

$$t_U = t_i + \dot{h}_t^{pr}(t_i)(\mathbf{h}_f^{pr}(t), \mathbf{h}^{a^{pr}}(t)); \quad t_V = \min_{t \in \mathbb{R}(t_i, \infty],} t.$$

$$\dot{h}_c^{pr}(t_i)(\mathbf{h}_f^{pr}(t), \mathbf{h}^{a^{pr}}(t)) = true$$

3.5. *Характерное состояние процесса.* Характерное состояние $\tilde{\mathbf{s}}^{pr} \in \tilde{\mathbf{S}}^{pr}$ процесса pr (см. определение 19) определяется следующим образом:

$$\tilde{\mathbf{s}}^{pr} = \{\tilde{s}_{sy}^{pr}, \tilde{s}_t^{pr}\}$$

(\tilde{s}_{sy}^{pr} — синхросостояние процесса pr ; \tilde{s}_t^{pr} — его временная отметка).

Синхросостояние $\tilde{s}_{sy}^{pr} \in \tilde{\mathbf{S}}_{sy}$ обеспечивает синхронизацию событий процессов в модельном времени и организацию их управления другими процессами (останов и возобновление развития, изменение воспроизводимой траектории). Синхросостояние обеспечивает императивную, интеррогативную и смешанную схемы планирования событий на траекториях процессов. Алфавит $\tilde{\mathbf{S}}_{sy}$ синхросостояния \tilde{s}_{sy}^{pr} процесса pr определяется функциями синхронизации и состоит из следующих элементов:

\tilde{s}^{av} — активное синхросостояние: на траектории $\dot{\mathbf{h}}^{pr}$ в текущий момент t должно произойти очередное функциональное событие, определяемое отображением $\dot{h}_e^{pr}(t)$;

$\tilde{s}^{av;ht}$ — активное предостановочное синхросостояние: на траектории $\dot{\mathbf{h}}^{pr}$ имело место управляющее событие e^{fn} и должно произойти функциональное подсобытие, определяемое отображением $\dot{h}_e^{pr}(t)$, после наступления которого развитие $\dot{\mathbf{h}}^{pr}$ должно быть остановлено;

$\tilde{s}^{pv;tm}$ — временное пассивное синхросостояние: очередное функциональное событие на траектории $\dot{\mathbf{h}}^{pr}$ должно произойти в момент, определяемый отображением $\dot{h}_t^{pr}(t)$;

$\tilde{s}^{pv;ce}$ — условное пассивное синхросостояние: очередное функциональное событие на траектории $\dot{\mathbf{h}}^{pr}$ должно произойти в момент, когда условие, определяемое отображением $\dot{h}_c^{pr}(t)$, будет истинным;

$\tilde{s}^{pv;dy}$ — комбинированное пассивное синхросостояние: очередное функциональное событие на траектории $\dot{\mathbf{h}}^{pr}$ должно произойти в ближайший из моментов, определяемый отображением $\dot{h}_t^{pr}(t)$, когда условие, определяемое отображением $\dot{h}_c^{pr}(t)$, будет истинным;

$\tilde{s}^{pv;qu-ce}$ — qu -условное пассивное синхросостояние: процесс пребывает в условном пассивном состоянии, а отображение $\dot{h}_c^{pr}(t) = \dot{v}^{qu}$, где

$$\dot{v}^{qu}(t) = \begin{cases} true, & l^{qu}(t) > 0, \\ false, & l^{qu}(t) = 0, \end{cases} \quad (6)$$

$l^{qu}(t)$ — число требований, находящихся в очереди qu в момент t ;

$\tilde{s}^{pv;qu-dy}$ — qu -комбинированное пассивное синхросостояние: процесс пребывает в комбинированном пассивном состоянии и отображение $\dot{h}_c^{pr}(t) = \dot{v}^{qu}$, где $\dot{v}^{qu}(t)$ определяется выражением (6);

$\tilde{s}^{pv;i-ce}$ — i -специальное условное пассивное синхросостояние: процесс пребывает в условном пассивном состоянии и отображение $v^{pr} = v^i$, где $v^i(t) = true$ тогда и только тогда, когда структура компонентов $\mathbf{C}^{\hat{pr}}$ модели \hat{pr} пребывает в некотором специфицированном агрегированном состоянии i -го типа;

$\tilde{s}^{pv;i-dy}$ — i -специальное комбинированное пассивное синхросостояние: процесс пребывает в комбинированном пассивном состоянии и отображение $v^{pr} = v^i$, где v^i определяется аналогично;

$\tilde{s}^{au;ht}$ — предостановочное синхросостояние: на траектории $\dot{\mathbf{h}}^{pr}$ имело место управляющее событие e^{fn} и функциональное подсобытие, определяемое отображением $w^{pr}(t)$, после совершения которого развитие процесса будет прервано;

$\tilde{s}^{au;ceht}$ — условное предостановочное синхросостояние: на траектории $\dot{\mathbf{h}}^{pr}$ имело место управляющее подсобытие e^{fn} , и при выполнении условия, определяемого отображением $v^{pr}(t)$, будет реализовано функциональное подсобытие, определяемое отображением $w^{pr}(t)$, после совершения которого развитие процесса будет прервано;

$\tilde{s}^{au;st}$ — предупредительное синхросостояние: имело место управляющее подсобытие e^{st} , развитие траектории $\dot{\mathbf{h}}^{pr}$ будет возобновлено начиная с прерванного функционального события;

$\tilde{s}^{au;av}$ — преактивное синхросостояние: на траектории $\dot{\mathbf{h}}^{pr}$ имело место управляющее

подсобытие e^{st} и будет реализовано функциональное подсобытие, определяемое отображением $w^{pr}(t)$;

$\tilde{s}^{au;fn}$ — *финальное синхросостояние*: характерная траектория процесса \tilde{h}^{pr} , соответствующая \dot{h}^{pr} , не принадлежит его характерному поведению \tilde{H}^{Pr} ;

\tilde{s}^{ht} — *остановочное синхросостояние*: развитие траектории \dot{h}^{pr} было прервано при совершении управляющего подсобытия e^{fn} .

Временная отметка процесса pr $\tilde{h}_t^{pr}(t) \in \mathbb{R}[t, \infty]$ определяет момент времени, на который запланировано очередное событие, определяемое отображением $w^{pr}(t)$. Если в момент t время наступления очередного события неизвестно, то $\tilde{h}_t^{pr}(t) = -\infty$.

3.6. *Характерное поведение процесса*. Характерное поведение \tilde{H}^{Pr} процессов (см. определение 22) образовано множеством всех возможных отображений $\tilde{h}^{pr}(t) = \left\{ \tilde{h}_t^{pr}(t), \tilde{h}_{sy}^{pr}(t) \right\}^T$, $\tilde{h}^{pr} : \tilde{S}^{Pr} \times \mathbb{R}[0, \infty] \rightarrow \mathbb{R}[0, \infty]$, удовлетворяющим следующим условиям:

1) в любой момент t модельного времени на любой характерной траектории $\tilde{h} \in \tilde{H}^{Pr}$ процессов множества Pr могут иметь место характерные события множества \tilde{E} , определяемого в составе

$$\tilde{E} = \left\{ \begin{array}{l} \left\{ \tilde{s}^{av}, \tilde{h}_t^{pr}(t) \right\} \rightarrow \left\{ \tilde{s}^{pv;ce}, t \right\}, \quad \left\{ \tilde{s}^{av}, \tilde{h}_t^{pr}(t) \right\} \rightarrow \left\{ \tilde{s}^{pv;dy}, t \right\}, \\ \left\{ \tilde{s}^{au;ceht}, \tilde{h}_t^{pr}(t) \right\} \rightarrow \left\{ \tilde{s}^{av;ht}, t \right\}, \quad \left\{ \tilde{s}^{au;ceht}, \tilde{h}_t^{pr}(t) \right\} \rightarrow \left\{ \tilde{s}^{au;dy}, t \right\}, \\ \left\{ \tilde{s}^{av;ht}, t \right\} \rightarrow \left\{ \tilde{s}^{au;ht}, t \right\}, \quad \left\{ \tilde{s}^{au;st}, t \right\} \rightarrow \left\{ \tilde{s}^{av}, t \right\}, \\ \left\{ \tilde{s}^{au;av}, t \right\} \rightarrow \left\{ \tilde{s}^{av}, t \right\}, \quad \left\{ \tilde{s}^{ht}, \infty \right\} \rightarrow \left\{ \tilde{s}^{au;st}, t \right\}, \\ \left\{ \tilde{s}^{av}, t \right\} \rightarrow \left\{ \tilde{s}^{pv;x}, t \right\}, \quad \mathbf{x} \in \{tm, ce, dy, q-ce, i-ce, q-dy, i-dy\}, \\ \left\{ \tilde{s}^{pv;x}, t \right\} \rightarrow \left\{ \tilde{s}^{av}, t \right\}, \quad \mathbf{x} \in \{tm, dy, q-dy, i-dy\}, \\ \left\{ \tilde{s}^{pv;x}, \tilde{h}_t^{pr}(t) \right\} \rightarrow \left\{ \tilde{s}^{au;av}, t \right\}, \quad \mathbf{x} \in \{tm, ce, dy, q-ce, i-ce, q-dy, i-dy\}, \\ \left\{ \tilde{s}^{pv;x}, \tilde{h}_t^{pr}(t) \right\} \rightarrow \left\{ \tilde{s}^{au;ht}, t \right\}, \quad \mathbf{x} \in \{tm, ce, q-ce, q-dy\}, \\ \left\{ \tilde{s}^{pv;x}, \infty \right\} \rightarrow \left\{ \tilde{s}^{au;ceht}, t \right\}, \quad \mathbf{x} \in \{ce, dy, q-ce, i-ce, q-dy, i-dy\}, \\ \left\{ \tilde{s}^{pv;x}, \infty \right\} \rightarrow \left\{ \tilde{s}^{av}, t \right\}, \quad \mathbf{x} \in \{ce, dy, q-ce, i-ce, q-dy, i-dy\}, \\ \left\{ \tilde{s}^{pv;x}, \infty \right\} \rightarrow \left\{ \tilde{s}^{au;av}, t \right\}, \quad \mathbf{x} \in \{ce, dy, q-ce, i-ce, q-dy, i-dy\}, \\ \left\{ \tilde{s}^{pv;x}, \infty \right\} \rightarrow \left\{ \tilde{s}^{pv;x}, \tilde{h}_t^{pr}(t) \right\}, \quad \mathbf{x} \in \{tm, dy, q-dy, i-dy\}, \end{array} \right.$$

для всех $t \in \mathbb{R}[0, \infty]$ и всех $\tilde{h}_t^{pr}(t) \in \mathbb{R}[t, \infty]$;

2) для любой характерной траектории $\tilde{h} \in \tilde{H}^{Pr}$

$$\int_{\Xi} \partial t = 0,$$

где $\Xi = \left\{ t | t \in \mathbb{R}[0, \infty]; \tilde{h}_t^{pr}(t) \in \dot{S}_{sy} \subset \tilde{S}_{sy} \right\}$; $\tilde{h}_t^{pr}(t) \in \tilde{h}$; $\dot{S}_{sy} = \left\{ \tilde{s}^{av}, \tilde{s}^{av;ht}, \tilde{s}^{au;ht}, \tilde{s}^{au;ceht}, \tilde{s}^{au;st}, \tilde{s}^{au;av} \right\}$ — подмножество синхросостояний.

4. Компоненты, описывающие информационные процессы в телекоммуникационных сетях. Одним из важнейших подклассов больших и сложных ДДС, для исследования которых широко применяется метод имитационного моделирования, являются ТКС различного назначения. Данные ТКС характеризуются тем, что в них имеют место разнообразные процессы обслуживания информационных потоков, а также всевозможные процессы распределения различных информационных, телекоммуникационных и вычислительных ресурсов [18, 19]. В качестве примеров таких процессов можно указать процессы передачи

информационных пакетов по каналам передачи данных или процессы распределения оперативной памяти между задачами, выполняющимися на компьютерах ТКС. Поэтому для описания этих процессов целесообразно использовать в составе имитационных моделей ТКС ряд специализированных компонентов. К числу таких компонентов относятся частные виды процессов (классы требований, очереди требований, а также ресурсы). Вследствие ограниченности объема данной работы ниже приводится краткое описание функционального назначения компонентов указанных выше типов.

4.1. *Требования.* Требование $dd \in \mathbf{Dd}^{ml}$ является компонентом ДДС, представляющим в ней элемент некоторого информационного потока. Передача элементов потока между компонентами может быть организована либо через сеть связей, либо с помощью компонентов специального типа — очередей требований. Информационные параметры $\mathbf{p}^{dd} = (p_i^{dd})$, требования dd определяют содержание информации, представляемой этим элементом, и являются координатами его состояния \mathbf{s}^{dd} . Число информационных параметров требования, а также их содержание произвольны. Они определяются моделируемым информационным элементом и могут динамически изменяться при обработке требования компонентами ДДС. Значения информационных параметров \mathbf{p}^{dd} принадлежат их алфавиту $\mathbf{P}^{dd} \subset \mathbf{S}^{dd}$.

Требование является компонентом, который в любой точке траектории $\dot{\mathbf{h}}^{pr}$ любого процесса $pr \in \mathbf{Pr}^{ml}$ может быть:

- 1) сформирован процессом pr ;
- 2) обработан процессом pr в течение некоторого интервала модельного времени в соответствии с его приоритетом и информационными параметрами;
- 3) передан процессом pr после завершения обработки через свои выходные клеммы для последующей обработки другими компонентами ДДС;
- 4) уничтожен процессом pr по завершении обработки требования.

Кроме того, требование может быть порождено другим требованием. Множество требований, порожденных одним требованием-родителем, образует его семейство требований. Информационные параметры требования родителя распространяются на информационные параметры требований его семейства. Данный механизм позволяет эффективно отображать процессы инкапсуляции, широко распространенные в современных ТКС.

Функциональные события на траекториях поведения требования обеспечивают модификацию значений его информационных параметров, передачу их значений другим компонентам, включение или исключение требований в его семейство, начало и завершение обработки требования другими компонентами.

4.2. *Классы требований.* Класс требований $cl \in \mathbf{Cl}^{ml}$ является компонентом ДДС ml , который представляет в ней множество однородных информационных потоков, обрабатываемых ее процессами. Фактически этот класс определяет в ДДС множество требований, информационные параметры которых принадлежат одному алфавиту:

$$cl = \{dd \mid dd \in \mathbf{Dd}^{ml}, \mathbf{P}^{dd} = \mathbf{P}^{cl}\}.$$

Здесь \mathbf{P}^{cl} — алфавит информационных параметров требований класса cl ; \mathbf{P}^{dd} — алфавит информационных параметров требования dd . Алфавит \mathbf{P}^{cl} определяется вектором $\mathbf{p}^{cl} = (p_i^{cl})$ дескрипторов информационных параметров требований класса, который является элементом состояния \mathbf{s}^{cl} класса cl и определяет состав информационных параметров требований класса. Дескриптор $p_i^{cl} = (id_i, \mathbf{P}_i^{cl}, v_i)$ параметра p_i требований класса cl определяется следующими элементами: id_i — идентификатор p_i , \mathbf{P}_i^{cl} — алфавит p_i , $v_i \in \mathbf{P}_i^{cl}$ — значение p_i в момент формирования требования класса.

Функциональные события на траекториях поведения класса требований обеспечивают формирование требования класса, уничтожение требования класса, формирование и модификацию состава информационных параметров его требований, передачу требования другому классу.

4.3. *Очередь требований.* Очередь требований $qu \in Qu^{ml}$ является компонентом ДДС ml , представляющим в ней множество требований, упорядоченных в соответствии с некоторым установленным порядком их обработки ее процессами. Очередь qu обеспечивает прием любого требования с заданными свойствами от любого процесса, хранение его в течение необходимого интервала времени и передачу для обработки в соответствии с ее порядком при получении запроса от любого процесса.

Порядок обработки требований определяется дисциплиной обслуживания очереди. Дисциплина обслуживания указывает место вновь поступающего требования в списке требований очереди. Это место может определяться в зависимости от приоритетов и классов, значений информационных параметров поступающего требования и требований очереди. Среди возможных дисциплин обслуживания выделяется ряд стандартных, которые размещают требование в начале списка требований очереди, в конце списка требований, перед первым требованием списка, уровень приоритета которого не выше (не ниже), чем у устанавливаемого.

В составе ДДС могут быть определены ординарные и агрегированные очереди. Агрегированная очередь, в отличие от ординарной, объединяет множество ординарных и агрегированных очередей. Она обеспечивает разбиение потока поступающих в нее требований по очередям ее состава и (или) для объединения потоков требований, поступающих в очереди ее состава. Критерием для разбиения потока требований может быть класс или приоритет его требований, а также насыщенности очередей требованиями, образующими агрегированную очередь.

Функциональное состояние ординарной очереди является списком $D^{qu} \in 2^{Da^{ml}}$ пребывающих в ней требований. Порядок требований в этом списке определяет последовательность их выбора из очереди. Размещение требований в списке осуществляется в соответствии с ее дисциплиной обслуживания.

Функциональное состояние агрегированной очереди образуется списком $Q^{qu} \in 2^{(Qu^{ml}/qu)}$ образующих ее очередей. Очереди в списке упорядочены в соответствии с процедурой объединения и (или) разбиения потока требований. Список требований агрегированной очереди определяется как последовательное объединение списков требований очередей, составляющих ее.

На траектории ординарной очереди qu могут иметь место следующие функциональные события: формирование процессом или передача процессу параметров очереди; установка в очередь требования; выбор из очереди требования; установка в очередь требования ее надочередью; выбор из очереди требования ее надочередью.

На траектории агрегированной очереди qu могут быть дополнительно определены следующие функциональные события: формирование состава Q^{qu} агрегированной очереди; установка надочередью в очередь требования; выбор надочередью из очереди требования; завершение установки в очередь состава требования; завершение выбора из очереди состава требования.

4.4. *Ресурс.* Ресурс $rs \in Rs^{ml}$ является компонентом ДДС ml , который представляет в ней некоторый ресурс, динамически распределяемый между процессами ДДС. Ресурс отображает такие процессы ТКС, как распределение оперативной памяти, распределение произ-

водительности каналов передачи данных и процессоров и др. Выделение и освобождение ресурса производится по запросам от процессов, которые передаются по соответствующей сети связей. Распределяемый ресурс может быть идентифицируемым или неидентифицируемым.

Минимальные распределяемые единицы идентифицируемого ресурса rs всегда отличаются друг от друга. Каждой из них присваивается свой идентификатор, а алфавит $V^{rs} \in \mathcal{S}^{rs}$ идентификаторов ресурса является дискретным конечным множеством, состав которого определяется типом распределяемого ресурса. Объем выделяемого идентифицируемого ресурса измеряется в числе его минимальных единиц. Функциональным состоянием идентифицируемого ресурса является множество $F^{rs} \in 2^{V^{rs}}$, которое определяет множество единиц ресурса, не распределенных между компонентами дискретной системы. В качестве примеров идентифицируемых ресурсов можно указать следующие: 1) символьная строка, идентифицирующая пользователя при доступе к информационному сервису; 2) целое число, идентифицирующее выполняемый процесс операционной системы; 3) сегмент реальной (физической) оперативной памяти, выделяемой некоторому системному процессу, и др.

Неидентифицируемый ресурс измеряется в произвольных единицах измерения и характеризуется только его объемом $V^{rs} \in \mathbb{R}[0, V^{rs}]$; алфавитом его объема может быть произвольное множество значений. Функциональным состоянием идентифицируемого ресурса является число $f^{rs} \in \mathbb{R}[0, V^{rs}]$, которое определяет объем нераспределенного ресурса. В качестве примеров неидентифицируемых ресурсов можно указать следующие: 1) объем виртуальной памяти, выделяемой некоторому прикладному процессу; 2) пропускная производительность выделяемого канала передачи данных; 3) число элементарных процессоров, выделяемых для решения прикладной задачи, и др.

На любой траектории поведения ресурса могут быть определены следующие функциональные события: выделение компоненту дискретной системы ресурса заданного объема; освобождение компонентом дискретной системы ресурса заданного объема; отказ в выделении компоненту дискретной системы ресурса заданного объема; постановка запроса на выделение ресурса в очередь; выбор запроса из очереди для выделения или отказа ресурса.

5. Компоненты, описывающие статистическое оценивание случайных процессов. Существенной составляющей поведения таких больших и сложных ДДС, как ТКС, является его стохастический характер. Поэтому в современных системах имитационного моделирования, в частности в ТКС, большое значение имеют средства моделирования управляющих случайных процессов и средства оценивания производных случайных процессов. Спектр таких процессов чрезвычайно широк. В их основе лежат различные вероятностные предположения. Зависимость между наблюдаемыми выборочными значениями измеряемых случайных процессов является вероятностной. Поэтому использовать только традиционные методы статистического оценивания невозможно. Необходимо применение более широкого спектра статистических методов оценивания, использование экспертных оценок их применимости [18, 20].

Предположим, что в имитационном эксперименте функции измерения и оценивания параметров воспроизводимых траекторий являются элементом алгоритма функционирования моделируемой ДДС. Данное предположение основано на том, что содержание оцениваемых параметров, их вероятностная структура полностью определяются составом, структурой и алгоритмами функционирования моделируемой ДДС.

Для моделирования стохастических процессов, измерения модельных траекторий и статистической обработки результатов моделирования в составе ДДС определяются компоненты следующих типов: случайные величины, датчики и мониторы.

5.1. *Случайная величина.* Случайная величина $sq \in \mathbf{S}q^{ml}$ является компонентом ДДС ml , который представляет в ней некоторую реализацию маркированного точечного случайного процесса. Реализация потока $\mathcal{F}_{t^{ml}}^{sq}$, на котором определяется реализация случайного процесса, задается моментами времени $\{t_i\}$, в которые процессы ДДС передают случайной величине соответствующие сообщения. Кратность $N^{sq}(t_i)$ случайного процесса определяется числом сообщений, которые переданы случайной величине sq в момент модельного времени t_i . Метки $X^{sq}(t_i) = \{x_i\}$ случайного процесса образуют последовательность случайных элементов, определенных на произвольном вероятностном пространстве. Размерность метки случайного процесса определяется его кратностью.

Функциональное состояние случайной величины sq определяется вектором $\mathbf{s}_f^{sq} = (db^{sq}, T^{sq}, gn^{sq}, k^{sq})$, в котором db^{sq} — распределение, T^{sq} — тип, gn^{sq} — генератор, k^{sq} — ядро данной случайной величины.

Распределение $db^{sq} = (\Omega^{sq}, \mathcal{A}^{sq}, \mathcal{P}^{sq})$ определяет вероятностное пространство метки X^{sq} моделируемого случайного процесса, где Ω^{sq} — пространство элементарных событий; \mathcal{A}^{sq} — алгебра событий на множестве Ω^{sq} ; \mathcal{P}^{sq} — вероятностная мера на измеримом пространстве $(\Omega^{sq}, \mathcal{A}^{sq})$. В соответствии с наиболее распространенными видами случайных процессов, которые имеют место в ТКС, определяются следующие типы распределений: непрерывное, дискретное или натуральное распределение, заданное в виде таблицы; вырожденное, нормальное, логнормальное, экспоненциальное, биномиальное, геометрическое, гипергеометрическое и γ -распределения; распределения χ^2 , Фишера, Стюдента, Бернулли, Паскаля, Пуассона и Вейбулла; распределение общего вида, определяемое произвольным числом начальных и центральных моментов. Тип T^{sq} определяет один из перечисленных выше типов распределения db^{sq} случайной величины sq .

Генератор gn^{sq} является отображением $gn^{sq}(db^{sq}, \omega^{sq})$ ($gn^{sq} : \mathbb{R}[0, 1]^{|\omega^{sq}|} \rightarrow \Omega^{sq}$), которое по заданному распределению db^{sq} и базовой последовательности ω^{sq} определяет реализацию очередного случайного элемента метки X^{sq} случайной величины sq .

Ядро $k^{sq} = \{M^{sq}, a^{sq}, b^{sq}, x^{sq}\}$ задает базовую последовательность равномерных псевдослучайных чисел $\omega^{sq} = \{\omega_i\}$, $\omega_i \in \mathbb{R}[0, 1]$, используемую для формирования очередной реализации случайной величины sq . Ядро k^{sq} определяет следующие параметры конгруэнтного метода формирования псевдослучайных чисел: M^{sq} — модуль, a^{sq} — множитель, b^{sq} — смещение, x^{sq} — начальное значение. Это ядро обеспечивает управление корреляционными зависимостями как между элементами данной случайной величины, так и между элементами различных случайных величин.

На траектории $\dot{\mathbf{h}}^{sq}$ случайной величины sq могут быть определены следующие функциональные события: формирование процессом или передача ему распределения параметров db^{sq} ; формирование процессом или передача ему параметров генератора gn^{sq} ; формирование процессом или передача ему параметров ядра k^{sq} ; формирование и передача процессу или другой случайной величине очередной реализации метки X^{sq} .

5.2. *Датчик.* Датчик $td \in \mathbf{T}d^{ml}$ является процессом ДДС ml , который осуществляет измерение траектории $\dot{\mathbf{h}}^{D^{td}}$ некоторой системы компонентов-адресантов $\mathbf{D}^{td} \subseteq \mathbf{C}^{ml}$ и передачу результатов этих измерений системе компонентов-адресатов $\mathbf{C}^{td} \subseteq \mathbf{Pr}^{ml} \cup \mathbf{Mn}^{ml} \cup \mathbf{T}d^{ml}$, образованной процессами, мониторами и датчиками ДДС. Компоненты-адресаты осуществляют построение оценок требуемых параметров измеряемой траектории $\dot{\mathbf{h}}^{D^{td}}$.

Измерение, проводимое датчиком td , включает следующие операции:

1) прием от его компонента-адресанта $cm \in \mathbf{D}^{td}$ сообщения \mathbf{x}_e — метки события e , которое имело место на траектории $\dot{\mathbf{h}}^{cm}$ в момент времени t_e . Метка $\mathbf{x}_e \in \Omega^{td}$ однозначно иденти-

фиксирует событие e множества $\mathbf{E}^{td} = \{e_i\}$ — измеряемого поля датчика td . Пространство состояний Ω^{td} метки \mathbf{x}_e определяется типом датчика и типом измеряемого компонента;

2) идентификация некоторого агрегированного события $\mathbf{e} \subseteq \mathbf{E}^{td}$, $\mathbf{e} \in \hat{\mathbf{E}}^{td}$, где $\hat{\mathbf{E}}^{td}$ — поле измерений компонентов-адресатов датчика td . Поле $\hat{\mathbf{E}}^{td}$ определяется алфавитами Ω^{cm} меток \mathbf{x}^{cm} производных случайных процессов, образованных траекториями компонентов-адресантов и предназначенных для компонентов-адресатов $cm \in \mathbf{C}^{td}$;

3) передача результатов измерений (меток измеряемых процессов \mathbf{x}^{cm} , $cm \in \mathbf{C}^{td}$) компонентам-адресатам (процессам, мониторам, датчикам).

Результаты измерений датчика td определяются его функцией измерения $f^{td}(e)$, $e \in \mathbf{E}^{td}$, которое является отображением $f^{td} : \mathbf{E}^{td} \rightarrow \prod_{cm \in \mathbf{C}^{td}} \Omega^{cm}$ его измеряемого поля \mathbf{E}^{td} на прост-

ранства состояний меток компонентов его поля адресатов \mathbf{C}^{td} . Функция измерений $f^{td} = \{f_{cm}^{td}\}$, $cm \in \mathbf{C}^{td}$ образуется композицией частных функций измерения f_{cm}^{td} или операторов датчика. Каждый оператор $f_{cm}^{td}(e)$ является отображением $f_{cm}^{td} : \mathbf{E}^{td} \rightarrow \Omega^{cm}$ измеряемого поля на пространство состояний соответствующей метки \mathbf{x}^{cm} , измеряемого компонентом cm случайного процесса. Оператор $op = f_{cm}^{td}$ датчика td определяется набором параметров $op = \{\hat{\mathbf{E}}_{op}, f_{op}^{\hat{\mathbf{E}}}, f_{op}^{\Omega}\}$, в котором:

— $\hat{\mathbf{E}}_{op} = \{e_{op}\}$, $e_{op} \subseteq \mathbf{E}^{td}$, $\hat{\mathbf{E}}_{op} \subseteq \hat{\mathbf{E}}^{td}$ — множество непересекающихся агрегированных событий, определяющих поле измерений компонента-адресата cm_{op} , связанного с оператором op ;

— $f_{op}^{\hat{\mathbf{E}}}(e)$, $f_{op}^{\hat{\mathbf{E}}} : \mathbf{E}^{td} \rightarrow \hat{\mathbf{E}}_{op} \cup \{\emptyset\}$ — индикатор измеряемого поля компонента-адресата. Данное отображение устанавливает соответствие между элементами измеряемого поля \mathbf{E}^{td} датчика и измеряемого поля $\hat{\mathbf{E}}_{op}$ компонента оператора;

— $f_{op}^{\Omega}(e)$, $e \in \hat{\mathbf{E}}_{op}$, $f_{op}^{\Omega} : \hat{\mathbf{E}}_{op} \rightarrow \Omega^{cm_{op}}$ — построитель метки $\mathbf{x}^{cm_{op}}$ измеряемого компонентом cm_{op} случайного процесса. Данное отображение определяет (в зависимости от имевшего место агрегированного события e измеряемого поля $\hat{\mathbf{E}}_{op}$ оператора op) метку измеряемого компонентом cm_{op} процесса, определяемого воспроизводимой траекторией $\hat{h}^{D^{td}}$ системы D^{td} компонентов-адресантов датчика td .

Множество датчиков ДДС ml в соответствии с типами их измеряемых полей разбивается на подмножества датчиков, регистрирующих: 1) события формирования требований; 2) события поступления требований в классы требований; 3) события поступления требований в очереди требований; 4) события уничтожения требований; 5) события выхода требований из классов требований; 6) события выбора требований из очередей; 7) события завершения процессами фазы обработки требования; 8) события формирования процессом, случайной величиной, монитором метки измеряемого процесса; 9) события формирования значения параметра требования и др.

5.3. *Монитор*. Монитор $mn \in \mathbf{Mn}^{ml}$ является компонентом ДДС ml , который представляет в ней вектор статистик $\mathbf{o}^{mn} = \{o_i^{mn}\}$ измеряемого маркированного точечного случайного процесса. Этот процесс является производным от композиции траекторий компонентов измеряемой системы компонентов \mathbf{A}^{mn} . Вероятностная мера метки \mathbf{x}^{mn} этого процесса определяется на пространстве элементарных событий Ω^{mn} , определяемого композицией траекторий компонентов системы \mathbf{A}^{mn} .

Метка \mathbf{x}^{mn} случайного процесса, измеряемого монитором mn , определяется на дискретном множестве моментов времени $\{t_j^{mn}\}$, которые являются моментами наступления событий, обусловленных изменением значений координат его измеряемого поля $\mathbf{m}^{mn} = \{m_i^{mn}\}$, $m_i^{mn} = p_{j_i}^{cm_i}$, $cm_i \in \mathbf{A}^{mn} \subseteq \mathbf{A}^{ml}$.

Измеряемая функция $f^{mn}(\mathbf{m}^{mn}(t), t)$, $f^{mn} : \mathcal{M}^{mn} \times \tau^{ml} \rightarrow \Omega^{mn}$ определяет значение метки $\mathbf{x}^{mn}(t)$ в момент времени t , соответствующий событию на траектории $\dot{\mathbf{h}}^{A^{mn}}$. Данная траектория определяется как композиция отображений множества $\{f^{mn;td}\}$, в которой ее элемент $f^{mn;td}$ является оператором датчика $td \in \mathcal{Td}^{mn}$. Датчики \mathcal{Td}^{mn} осуществляют регистрацию изменения значений координат его измеряемого поля \mathbf{m}^{mn} и передачу ему наблюдаемых значений координат метки \mathbf{x}^{mn} измеряемого процесса. Оператор $f^{mn;td}$ датчика td является отображением $f^{mn;td}(\mathbf{m}^{mn;td}(t), t)$, $f^{mn;td} : \mathcal{M}^{mn;td} \times \tau^{ml} \rightarrow \Omega^{mn;td}$ алфавита $\mathcal{M}^{mn;td} \subseteq \mathcal{M}^{mn}$ поля $\mathbf{m}^{mn;td} \subseteq \mathbf{m}^{mn}$ датчика td на алфавит $\Omega^{mn;td}$ координат метки $\mathbf{x}^{mn}(t)$, соответствующих этому датчику.

Композиция отображений f^{mn} определяется типом монитора mn , в ходе которой вычисляются операторы $f^{mn;td}$ датчиков, зарегистрировавшие свои события. Результатом данной композиции будет очередная реализация метки процесса $\mathbf{x}^{mn}(t)$, измеряемого монитором, в момент t .

Множество мониторов \mathcal{Mn} разбивается на множество типов в соответствии с их пространствами вероятностных мер. Это разбиение определяет мониторы со следующими пространствами элементарных событий меток измеряемых процессов: 1) насыщенность семейства маршрутов требованиями; 2) длительность времен прохождения требованиями семейства маршрутов; 3) длительность интервалов времени между последовательными пересечениями требованиями семейства точек их траекторий; 4) длительность пребывания требования в классе; 5) насыщенность класса требованиями; 6) случайная величина с вещественным или дискретным пространством элементарных событий; 7) временной ряд с вещественным или дискретным пространством элементарных событий; 8) маркированный точечный процесс с вещественным или дискретным пространством элементарных событий; 9) маркированный точечный процесс, пространство элементарных событий которого является произведением пространств элементарных событий заданного множества мониторов.

Статистика $\sigma^{mn} \in \mathcal{O}^{mn}$ определяет некоторую характеристику распределения метки процесса \mathbf{x}^{mn} (например, центральные и начальные моменты различных порядков, коэффициенты асимметрии и эксцесса и др.). Статистика строится на базе выборочных значений метки \mathbf{x}^{mn} , полученных на непрерывном интервале времени $\tau^{\sigma^{mn}}$.

Множество всех статистик в соответствии с их оцениваемыми характеристиками распределений измеряемых процессов разбивается на следующие типы: 1) начальный момент произвольного порядка; 2) центральный момент произвольного порядка; 3) коэффициент эксцесса; 4) коэффициент асимметрии; 5) мода; 6) медиана; 7) размах; 8) гистограмма; 9) выборочное распределение; 10) коэффициент корреляции; 11) доверительная вероятность; 12) доверительный интервал и др.

Статистика $\sigma^{mn} \in \mathcal{O}^{mn}$ типа \mathcal{O}_z строится исходя из предположения о том, что вероятностная мера \mathcal{P}^{mn} метки \mathbf{x}^{mn} процесса, измеряемого монитором mn , принадлежит некоторому классу \mathcal{P} вероятностных мер. Ее пространство элементарных событий $\Omega^{\sigma^{mn}}$ является множеством $\Omega_{y,z}$, которое определяет алфавиты каждой статистики $\sigma \in \mathcal{O}_{y,z} \subseteq \mathcal{O}_z$ каждого монитора типа \mathcal{Mn}_y . На множестве статистик \mathcal{O}^{mn} монитора mn определяется разбиение $\mathcal{O}^{mn} = \{\sigma_j^{mn}\}$, $\sigma_j^{mn} = \{\sigma_i^{mn}\}$ на множество метастатистик. Две статистики $\sigma_i^{mn}, \sigma_j^{mn} \in \mathcal{O}^{mn}$, если:

- 1) для них определена одна вероятностная мера $\mathcal{P}^{\sigma^{mn}} = \mathcal{P}^{\sigma_i^{mn}} = \mathcal{P}^{\sigma_j^{mn}}$;
- 2) они определены на одном интервале $\tau^{\sigma^{mn}} = \tau^{\sigma_i^{mn}} = \tau^{\sigma_j^{mn}}$ времени τ^{ml} ;
- 3) они являются однородными.

Две статистики однородны, если на интервале их определения используется общий алгоритм накопления результатов измерений и их построения. Множество всех метастатистик

с одинаковым набором однородных статистик образует их тип. Выделяются следующие типы метастатистик: 1) оценки моментов распределений независимых случайных величин методом их усреднения; 2) оценки моментов распределений независимых случайных величин методом их стратификации; 3) оценки моментов распределений зависимых случайных величин спектральным методом; 4) оценки моментов распределений зависимых случайных величин регенеративным методом; 5) оценки моментов распределений зависимых случайных величин методом вычисления автоковариаций; 6) оценки средних значений и автоковариационной функции стационарных маркированных точечных процессов методом аппроксимации марковским процессом; 7) оценки средних значений и автоковариационной функции стационарных маркированных точечных процессов методами аппроксимации диффузионными процессами или построения выборочной автоковариационной функции; 8) оценки распределений случайных величин методом построения гистограмм с одинаковыми или неодинаковыми границами ее разрядов; 9) оценки распределений случайных величин методом построения ее выборочной функции распределения; 10) траектория требований и др.

Функциональное состояние монитора mn определяется вектором $\mathbf{s}_f^{mn} = \{T^{mn}, \mathbf{x}^{mn}, t^{mn}, v^{mn}, p_c^{mn}, z_c^{mn}, \mathbf{s}_o^{mn}\}$, в котором T^{mn} — тип (определяет пространство Ω^{mn} метки измеряемого процесса), \mathbf{x}^{mn} — наблюдение (последняя реализация метки измеряемого процесса), t^{mn} — время наблюдения (момент времени, в который имела место последняя регистрация метки \mathbf{x}^{mn}), v^{mn} — объем наблюдений (число зарегистрированных наблюдений), p_c^{mn} — доверительные вероятности (доверительные вероятности статистик монитора), z_c^{mn} — доверительные интервалы (относительные доверительные интервалы статистик монитора).

Координата \mathbf{s}_o^{mn} состояния монитора mn зависит от числа метастатистик, определенных к моменту t модельного времени, а также от их типов.

Таким образом, алгоритм функционирования монитора mn включает следующие операции:

- 1) прием от связанных с монитором датчиков измерительной информации о воспроизводимой траектории $\dot{\mathbf{m}}^{mn}(t)$ его измеряемого поля \mathbf{m}^{mn} ;
- 2) накопление принятой информации в метастатистиках \mathbf{o}^{mn} поля монитора \mathbf{o}^{mn} , соответствующих текущему моменту t модельного времени;
- 3) вычисление на основе накопленной информации статистик поля \mathbf{o}^{mn} данного монитора.

На любой траектории монитора mn могут иметь место следующие события: наблюдение монитором очередной реализации метки измеряемого им процесса; формирование процессом новой траектории метастатистик; формирование процессом метастатистики в составе траектории метастатистики; формирование процессом или передача монитором процессу требуемого или полученного значения доверительной вероятности его статистик; формирование процессом или передача монитором процессу требуемого или полученного значения доверительного интервала его статистик; передача процессу объема накопленной выборки; передача процессу значения его статистики.

Заключение. Предложенная методология построения имитационных моделей и их формальное представление реализованы в инструментальной среде MONAD [21]. Данная реализация показала возможность построения эффективных имитационных моделей таких больших и сложных систем, как информационные и телекоммуникационные системы. Данная методология позволяет эффективно расширять изобразительные средства имитационного моделирования, в полной мере использовать преимущества объектно-ориентированной технологии программирования, а также повысить эффективность имитационных моделей за

счет использования технологий параллельного программирования и учета естественного параллелизма, который следует из изложенного выше представления.

Необходимо отметить, что предложенное представление ДДС использовалось при описании гибридных моделей и сложных структурированных экспериментов с ними [22, 23].

До настоящего времени не получено универсальных конструктивных результатов исследования методов анализа имитационных моделей на адекватность и вычислительную реализуемость. Это утверждение можно отнести не только к предложенному выше представлению, но и к таким описаниям имитационных моделей, как DEVS-схемы и HLA-архитектура. Трудности анализа обусловлены большой размерностью пространства состояний имитационных моделей, невозможностью построения аналитических выражений, описывающих элементарные события на траектории моделируемой системы, сложностью суперпозиции выражений, описывающих ее элементарные события. Представляется возможным в дальнейшем на основе разработанного определения типа компонентов выработать подходы к решению данной проблемы.

Список литературы

1. RADIYA A., FISHWICK P. A., NANCE R. E., ET AL. Discrete event simulation modeling: directions for the 1990s // Proc. of the Winter simulations conf., 1992. S. 1.: IEEE, 1992. P. 773–782.
2. GOLDSMAN D., NANCE R. E., WILSON J. R. A brief history of simulation // Proc. of the Winter simulation conf. (WSC), 13-16 Dec. 2009. Austin (USA). P. 310–313.
3. HENRIKSEN J. O. The integrated simulation environment: Simulation software of the 1990s // Oper. Res. (USA). 1993. V. 31, N 6. P. 1053–1073.
4. YUCESAN E., JACOBSON S. H. Building correct simulation models is difficult // Proc. of the Winter simulations conf. (WSC), 13-16 Dec. 1992. Arlington (USA): IEEE, 1992. P. 783–790.
5. CAI W., TURNER S. J. An algorithm for distributed discrete event simulation — the “carrier null message” approach // Distributed simulation: Proc. of the SCS multiconf., June 1990. Illinois (USA): SCS, 1990. P. 3–8.
6. Draft standard for modeling, simulation. High level architecture (HLA) — framework, rules // IEEE Unapproved Draft Std P1516/D4, 2008.
7. HOUBEN G.-J., DIETZ J. L. G., VAN HEE K. M. The SMARTIE framework for modelling discrete dynamic systems // Proc. of the 2nd ASA conf. “Discrete event systems. Models, applications”. S. 1.: Springer-Verlang, 1988. P. 179–196.
8. НЕЧЕПУРЕНКО М. И. Модели имитации в неархимедовом времени: время, системные динамики // Эффективность и структурная надежность информационных систем. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1982. С. 43–68.
9. KINDLER E. Dynamic systems, theory of simulation // Kybernetika. 1979. V. 15, N 2. P. 77–87.
10. LI Y., WONHAM W. M. A state-variable approach to the modeling, control of discrete-event systems // Proc. of the 26th Annual allerton conf. on communication, control, computing, Sept. 30 – Oct. 2, 1998. Allerton (USA): IEEE, 1988. V. 2. P. 1140–1149.
11. NANCE R. E. Model representation in discrete event simulators: Prospect for developing documentation standards // Current issues in computer simulation. N. Y.: Academic, 1979. P. 83–97.
12. ZEIGLER B. P. DEVS representation of dynamical systems: event-based intelligent control // Proc. IEEE. 1989. V. 77, N 1. P. 72–80.
13. ВИЛЛЕМС Я. От временного ряда к линейной системе // Теория систем. Математические методы и моделирование. М.: Мир, 1989. С. 8–190.
14. БУСЛЕНКО Н. П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1968.
15. БУСЛЕНКО Н. П. Лекции по теории сложных систем / Н. П. Бусленко, В. В. Калашников, И. Н. Коваленко. М.: Сов. радио, 1973.
16. МЕСАРОВИЧ М. Д. Общая теория систем: Математические основы / М. Д. Месарович, Я. Такахара. М.: Мир, 1978.
17. ВУНШ Г. Теория систем. М.: Сов. радио, 1978. 288 с.

18. БЕЛЯКОВ В. Г., КОНДРАТОВА Н. А., МИТРОФАНОВ Ю. И., ЯРОСЛАВЦЕВ А. Ф. Математическое моделирование территориально распределенной вычислительной сети с коммутацией пакетов: методы, средства, опыт использования // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. "Проблемы функционирования информационных сетей", Новосибирск, окт. 1991 г. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1991. Т. 1. С. 32–40.

19. ВЕЛИЧКО В. В., СУББОТИН Е. А., ШУВАЛОВ В. П., ЯРОСЛАВЦЕВ А. Ф. Телекоммуникационные системы и сети. Т. 3. Мультисервисные сети. М.: Горячая линия – Телеком, 2005. 592 с.

20. YI J. J., LILJA D. J., HAWKINS D. M. A statistically rigorous approach for improving simulation methodology // Proc. of the 9th Intern. symp. on high-performance computer architecture (HPCA-9-03), 8–12 Febr. 2003. S. 1.: IEEE CS, 2003. P. 281–291.

21. YAROSLAVTSEV A. F. Set-theoretic submission of simulation models in program tool MONAD // Proc. of the Intern. conf. "Distributed computer communication networks. Theory, applications", Nov. 1999. Tel-Aviv; Moscow: Inst. for inform. transmission problems RAS, 1999. P. 209–215.

22. YAROSLAVTSEV A. F. Set base methodology for hybrid modeling on communication systems // Proc. of the 2nd IASTED Intern. multi-conf. on automation, control, information technology "Communication systems", Novosibirsk, June 20–24, 2005. Novosibirsk: S. n., 2005. P. 1–7.

23. ЯРОСЛАВЦЕВ А. Ф. Гибридное моделирование в МОНАД // Тр. ИВМиМГ СО РАН. Сер. Системное моделирование. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 1997. Т. 4. С. 12–28.

*Ярославцев Александр Федорович — д-р техн. наук, проф.
Сибирского государственного университета телекоммуникаций
и информатики; e-mail: afyar@list.ru*

Дата поступления — 16.12.2010