

ФОРМАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМ СРЕДСТВАМИ ПЕТРИ-ОБЪЕКТНЫХ МОДЕЛЕЙ

В статье рассматривается новый способ формального описания систем, основывающийся на объектно-ориентированной технологии и стохастической временной сети Петри. Получены уравнения состояний стохастической временной сети Петри с конфликтными и многоканальными переходами. Предложено понятие Петри-объекта и разработана технология конструирования имитационной модели системы с использованием Петри-объектов.

The article considers the new formal methods for system's description based on object-oriented methodology and stochastic timed Petri net. The state equation of stochastic timed Petri net with conflict and multi-transitions is received. The concept of Petri-object is proposed and construction technology of simulation model with Petri-objects using is developed.

Введение

Модели сетей Петри являются универсальным средством формализации процессов функционирования дискретно-событийных систем. Однако их использование для целей имитационного моделирования ограничено, во-первых, тем, что приходится использовать большое количество элементов даже для простых систем, во-вторых, тем, что отсутствие математической теории стохастических временных сетей Петри приводит к разнообразию подходов к построению алгоритмов имитации. В [1], [2] предлагается использовать блочную структуру построения моделей сетей Петри, что позволяет создавать подобные фрагменты сетей Петри простым копированием или вставкой соответствующего блока. Это в определенной степени облегчает составление моделей, но все же не решает проблему в случае, когда система состоит из сотен подобных элементов, взаимосвязанных между собой. В [3] предлагается разбивать большую сеть Петри на функциональные подсети, что позволяет исследовать вместо свойств сети Петри свойства ее подсетей.

В последнее время появляются научные работы, в которых рассматривается объединение объектно-ориентированного подхода и моделирования сетями Петри тем или иным способом в зависимости от задачи, которая решается ([4],[5],[6],[12]). Так, термин „объектно-ориентированные сети Петри (object oriented Petri net, OPN)“ закрепился за расширенным понятием сети Петри, в котором существуют специфические элементы сети Петри (позиции, переходы или маркеры), выполняющие функции объединения составляющих частей (которые и являются объектами) сети Петри [4]. Одной из

реализаций этого подхода является язык LOOPN Чарльза Лакоса, в котором термин объектно-ориентированная сеть Петри означает, что маркеры сети Петри являются объектами в терминах объектно-ориентированного программирования, а также отдельные фрагменты сети Петри могут служить объектами [5]. Термин „иерархическая объектно-ориентированная сеть Петри с временными задержками (timed hierarchical object-oriented Petri net)“ введен в работе [6]. Есть также публикации, в которых объекты и методы представляют сетями Петри с целью перевести объектно-ориентированный подход в язык сетей Петри [7].

Во всех разработках сеть Петри модифицируется тем или другим способом, чтобы приспособить ее к требованиям объектно-ориентированной парадигмы. Эти модификации приводят к значительному усложнению инструмента сетей Петри. Кроме этого, указанные подходы позволяют реализовывать большие сети Петри только теоретически.

В настоящей работе разработана технология моделирования систем, которая, в отличие от существующих технологий, позволяет создавать модели больших систем средствами стохастических временных сетей Петри с конфликтными и многоканальными переходами.

Уравнения состояний стохастической временной сети Петри с конфликтными и многоканальными переходами

Рассмотрим сеть Петри $\text{PetriNet} = (\mathbf{P}, \mathbf{T}, \mathbf{A}, \mathbf{W}, \mathbf{K}, \mathbf{I}, \mathbf{R})$, заданную множеством позиций $\mathbf{P} = \{P\}$; множеством переходов $\mathbf{T} = \{T\}$, $\mathbf{P} \cap \mathbf{T} = \emptyset$; множеством дуг

$\mathbf{A} \subseteq (\mathbf{P} \times \mathbf{T} \cup \mathbf{T} \times \mathbf{P})$; множеством натуральных чисел $\mathbf{W} : \mathbf{A} \cup \mathbf{I} \rightarrow \mathbf{N}$, задающих кратности дуг (количество связей); множеством пар значений $\mathbf{K} = \{(c_T, b_T) \mid T \in \mathbf{T}, c_T \in \mathbf{N}, b_T \in [0;1]\}$, задающих приоритет и вероятность запуска переходов; множеством неотрицательных действительных значений $\mathbf{R} : \mathbf{T} \rightarrow \mathfrak{R}_+$, характеризующих временные задержки в переходах.

Для обозначения множества входных и множества выходных позиций перехода T будем пользоваться обозначениями, предложенными в [8], – $\bullet T$ и $T \bullet$ соответственно, множества входных переходов и множества выходных переходов позиции P – $\bullet P$ и $P \bullet$ соответственно.

Формальное описание стохастической временной сети Петри получено на основе уравнений состояний базовой сети Петри [8] и формального описания временной сети Петри с детерминированными временными задержками, которое содержится в работе [9].

Состояние сети Петри в момент времени t описывается состоянием ее позиций $\mathbf{M}(t)$ и состоянием ее переходов $\mathbf{E}(t) : (\mathbf{M}(t), \mathbf{E}(t)) = \mathbf{S}(t)$. Состояние позиций однозначно определяется маркировкой сети Петри в момент времени t : $\mathbf{M}(t) = \{M_P(t) \mid M_P(t) \in \mathbf{Z}_+, P \in \mathbf{P}\}$, где \mathbf{Z}_+ – множество целых неотрицательных чисел. Состояние переходов определяется множеством $\mathbf{E}(t) = \{E_T(t) \mid T \in \mathbf{T}\}$, где состояние каждого перехода $E_T(t)$ определяется множеством моментов выхода из переходов маркеров, которые на момент времени t находятся в переходе:

$$E_T(t) = \left\{ [E_T(t)]_q \mid [E_T(t)]_q \in \mathfrak{R}_+, q \in \mathbf{N} \right\} \quad (1)$$

где q – номер канала перехода, $q = 1, 2, \dots, |E_T(t)|$, $|E_T(t)|$ – количество занятых (активных) каналов в момент времени t .

Если выход маркеров из перехода не ожидается, что соответствует пустому (не активному) переходу, то множество $E_T(t)$ этого перехода содержит только одно значение ∞ , означающее, что «в ближайшее время не ожидается выход маркеров из перехода»:

$$E_T(t) = \{\infty\} \quad (2)$$

Функционирование временной сети Петри заключается в выполнении упорядоченной во времени последовательности событий, соответствующих ее переходам. Рассмотрим моменты

времени $t_0, t_1, \dots, t_n, \dots$ такие, что: $\forall t \in (t_{n-1}, t_n)$ $\mathbf{S}(t) = \mathbf{S}(t_{n-1})$ т.е. изменение состояния сети Петри в интервале времени (t_{n-1}, t_n) не происходит.

В каждый момент времени t_{n-1} определяется момент возникновения ближайшего события, и время продвигается в этот момент времени t_n :

$$t_n = \min_T \left(\min_q [E_T(t_{n-1})]_q \right), t_n \geq t_{n-1} \quad (3)$$

Преобразование $D^+ : \mathbf{S}(t_{n-1}) \rightarrow \mathbf{S}(t_n)$ сети Петри, соответствующее выходу маркеров из переходов имеет вид:

$$\begin{aligned} \forall P \in \mathbf{P} \quad M_P^+(t_n) &= \\ &= M_P(t_{n-1}) + \sum_{T \in \bullet P} Y(T, t_n) \cdot W_{T,P} \mid s_T(t_{n-1}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\forall T \in \mathbf{T} \mid Y(T, t_n) = 1$$

$$\begin{aligned} E_T^+(t_n) &= \\ &= \begin{cases} \{\infty\} & \text{if } |s_T(t_{n-1})| = |E_T(t_{n-1})|, \\ E_T(t_{n-1}) \setminus \{ [E_T(t_{n-1})]_q \mid q \in s_T(t_{n-1}) \} & \text{else.} \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

где $s_T(t)$ – множество каналов перехода, которым соответствует наименьший из всех моментов выхода маркеров из перехода, $s_T(t) = \{q \in \mathbf{N} \mid [E_T(t)]_q = \min_q [E_T(t)]_q\}$, $Y(T, t_n)$ – предикат, определяющий множество переходов $T \in \mathbf{T}$, для которых осуществляется выход маркеров в момент времени $t_n \in \mathfrak{R}$:

$$\begin{aligned} \left(\min_q [E_T(t_{n-1})]_q = t_n \right) &\Rightarrow Y(T, t_n) = 1 \\ \left(\min_q [E_T(t_{n-1})]_q \neq t_n \right) &\Rightarrow Y(T, t_n) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Преобразование $D^- : \mathbf{S}(t_n) \rightarrow \mathbf{S}(t_n)$ сети Петри, соответствующее входу маркеров в переходы сети Петри имеет вид:

$$\begin{aligned} \forall P \in \mathbf{P} \quad M_P(t_n) &= \\ &= M_P^+(t_n) - \sum_{T \in P \bullet} W_{P,T} \cdot X(T, t_n) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\forall T \in \mathbf{T} \mid X(T, t_n) = 1$$

$$\begin{aligned} E_T(t_n) &= \\ &= \begin{cases} \{t_n + R_T\} & \text{if } \min_q [E_T(t_{n-1})]_q = \infty, \\ E_T^+(t_n) \cup \{t_n + R_T\} & \text{else.} \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

где $X(T, t_n)$ – предикат, определяющий множество переходов $T \in \mathbf{T}$, для которых осуществляется вход маркеров в момент времени $t_n \in \mathfrak{R}$:

$$\begin{aligned} T \in \Psi'(t_n) &\Rightarrow X(T, t_n) = 1, \\ T \notin \Psi'(t_n) &\Rightarrow X(T, t_n) = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Множество $\Psi'(t_n)$ представляет подмножество множества переходов с выполненным условием запуска, которое формируется в результате выбора из конфликтных переходов, основывающегося на значениях приоритетов и вероятностей запуска переходов.

Преобразование $D^-(\mathbf{S}(t_n))$ представляет результат одного входа маркеров в переходы сети Петри. Количество маркеров во входных позициях многоканального перехода может позволять запуск не одного, а нескольких каналов этого перехода. Поэтому вход маркеров в переходы должен осуществляться многократно до тех пор, пока еще есть хоть один переход, который запускается. В противном случае может возникнуть ситуация, когда условие запуска перехода выполнено, но он не запущен в момент t_n и в результате продвижения времени сможет быть запущен только в момент времени $t > t_n$, что противоречит правилам функционирования временных сетей Петри.

Максимальное количество запусков перехода в момент времени t_n определяется величиной

$$\min_{P \in T} \left\{ \frac{M_P^+(t_n)}{W_{P,T}} \right\},$$

где операция деления является операцией деления целых чисел. Фактическое количество m входов маркеров в переходы обусловлено требованием, что в результате достигается маркировка сети Петри, в которой ни один из переходов не запускается:

$$m : (D^-)^m(\mathbf{S}(t_n)) : \bigvee_T Z(T, t_n) = 0 \quad (10)$$

где $(D^-)^m = D^- \circ D^- \circ D^- \dots \circ D^-$ - результат m -кратного применения преобразования D^- , $Z(T, t_n)$ - предикат, определяющий множество переходов $T \in \mathbf{T}$ с выполненным условием запуска в момент времени $t_n \in \mathfrak{R}$:

$$\begin{aligned} (\forall P \in T \quad M_P^+(t_n) \geq W_{P,T}) &\Rightarrow Z(T, t_n) = 1 \\ (\exists P \in T \quad M_P^+(t_n) < W_{P,T}) &\Rightarrow Z(T, t_n) = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

Пусть вектор $u_T(t_n) = \sum_{i=1}^m X(T, t_n)_i$ представляет количество входов маркеров в переход T в серии входов маркеров в переходы $(D^-)^m$, соответствующей моменту времени t_n . Тогда пре-

образование $(D^-)^m$ описывается следующими уравнениями изменения состояния сети Петри:

$$\begin{aligned} \forall P \in \mathbf{P} \\ M_P(t_n) &= M_P^+(t_n) - \sum_{T \in T} W_{P,T} \cdot u_T(t_n), \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \forall T \in \mathbf{T} \\ E_T(t_n) &= \\ &= \begin{cases} \underbrace{\{t_n + R_T\} \cup \dots \cup \{t_n + R_T\}}_{u_T(t_n)} & \text{if } \min_q [E_T(t_{n-1})]_q = \infty, \\ E_T^+(t_n) \cup \underbrace{\{t_n + R_T\} \cup \dots \cup \{t_n + R_T\}}_{u_T(t_n)} & \text{else.} \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

Отметим, что множество значений $\{u_T(t_n)\}$ в общем случае зависит от случайного выбора перехода из множества запускающихся переходов.

Таким образом, имеем следующие уравнения состояний, описывающие функционирование стохастической временной сети Петри с многоканальными и конфликтными переходами:

$$t_n = \min_T \left(\min_q [E_T(t_{n-1})]_q \right), t_n \geq t_{n-1}, \quad (14)$$

$$\mathbf{S}(t_0) = (D^-)^m(\mathbf{S}(t_0)), \quad (15)$$

$$\mathbf{S}(t_n) = (D^-)^m(D^+(\mathbf{S}(t_{n-1}))), n = 1, 2, \dots, \quad (16)$$

где преобразование $D^+ : \mathbf{S}(t_{n-1}) \rightarrow \mathbf{S}(t_n)$ описывается формулами (4),(5), преобразование $(D^-)^m : \mathbf{S}(t_n) \rightarrow \mathbf{S}(t_n)$ описывается формулами (12),(13) и условием (10).

Уравнения (14)-(16), которые получены, являются полным математическим описанием алгоритма функционирования временной стохастической сети Петри: уравнение (14) задает продвижение времени, уравнение (15) - преобразование состояния сети Петри, соответствующее начальному моменту времени, а уравнение (16) - преобразование состояния сети Петри, соответствующее всем следующим после начального моментам времени. Поскольку начальное состояние сети Петри обычно задается так, что маркеры находятся только в позициях (и не находятся в переходах), то в начальный момент времени осуществляется вход маркеров в переходы. Во все другие моменты времени осуществляется выход и вход маркеров в переходах.

Хотя уравнения (14)-(16) не накладывают никаких ограничений на размерность сети Петри, тем не менее, реализация с их помощью

больших сетей Петри, содержащих сотни элементов, приводит к непреодолимым трудностям, связанным с проверкой правильности составления сети Петри и отладкой алгоритма имитации. Для решения этой проблемы предлагается конструировать сеть Петри, моделирующей систему в целом, из фрагментов сети Петри, моделирующих элементы системы.

Понятие Петри-объекта

Объектно-ориентированная технология обладает важным свойством создания десятков, сотен и тысяч похожих элементов по одному образцу и справляется с воссозданием структуры очень сложных систем. Однако для того, чтобы объекты могли применяться для воссоздания не только структуры, но и динамики сложных систем, необходим некоторый универсальный единообразный способ задания динамики объектов. Таким способом, как показано в данной работе, могут стать сети Петри.

Введем класс объектов Петри-имитатор (PetriSim) как класс, который реализует имитацию некоторого реального объекта в соответствии с динамикой функционирования, заданной временной сетью Петри с конфликтными и многоканальными переходами (рис. 1).

Petri_Sim
— Net: Petri_net
— timeModeling: double
+ Do_T()
+ Start()
+ NextEvent()
+ DoStatistica()

Рис. 1. Основные поля и методы класса Петри-имитатор

Информация о сети Петри содержится в поле Net Петри-объекта. Метод Start() выполняет вход маркеров в переходы для начальной сети Петри в соответствии с преобразованием $(D^-)^m$. Метод NextEvent() осуществляет преобразование $(D^-)^m \circ D^+$ сети Петри, соответствующее моменту времени t_n , и продвигает время в следующий момент времени t_{n+1} . Метод DoStatistica() содержит алгоритм сбора ин-

формации о среднем количестве маркеров в позициях и среднем количестве маркеров в переходах. Для размещения информации о дополнительных действиях, которые выполняются при выходе маркеров из переходов, служит метод DoT().

Определение. Объекты моделирования, являющиеся наследниками объекта Петри-имитатор (PetriSim), назовем *Петри-объектами* (PetriObj):

$$PetriObj \xrightarrow{inherit} PetriSim \quad (17)$$

Применение механизма наследования обеспечивает воссоздание всех полей и методов супер-объекта в суб-объекте. Сеть Петри объекта создается с помощью статичной функции класса NetLibrary и затем передается конструктору Петри-объекта в качестве аргумента. Конструктор Петри-объекта размещает переданную сеть Петри в поле PetriNet. Такой подход обеспечивает возможность использования одной и той же функции из класса NetLibrary для создания сетей Петри множества однотипных объектов, что, в свою очередь, гарантирует однотипность обращения к позициям и переходам таких объектов.

Петри-объекты, во-первых, владеют всеми свойствами обыкновенного объекта (как элемента ООП), во-вторых, имитируют функционирование объекта на основе сети Петри, описание которой содержится в поле PetriNet, в-третьих, являются конструктивными элементами, из которых составляется сеть Петри сложной системы.

Конструирование модели системы из Петри-объектов

Пусть модель системы состоит из Петри-объектов $Model = \{O_j\}$, $O_j \xrightarrow{inherit} PetriSim$, принадлежащих классам C_i : $O_j \subset C_i$. Пример диаграммы классов модели, составленной таким способом, представлен на рис. 2. Модель может быть составлена как непосредственно из Петри-объектов, так и из объектов-наследников Петри-объектов или из объектов, которые агрегируют Петри-объекты.

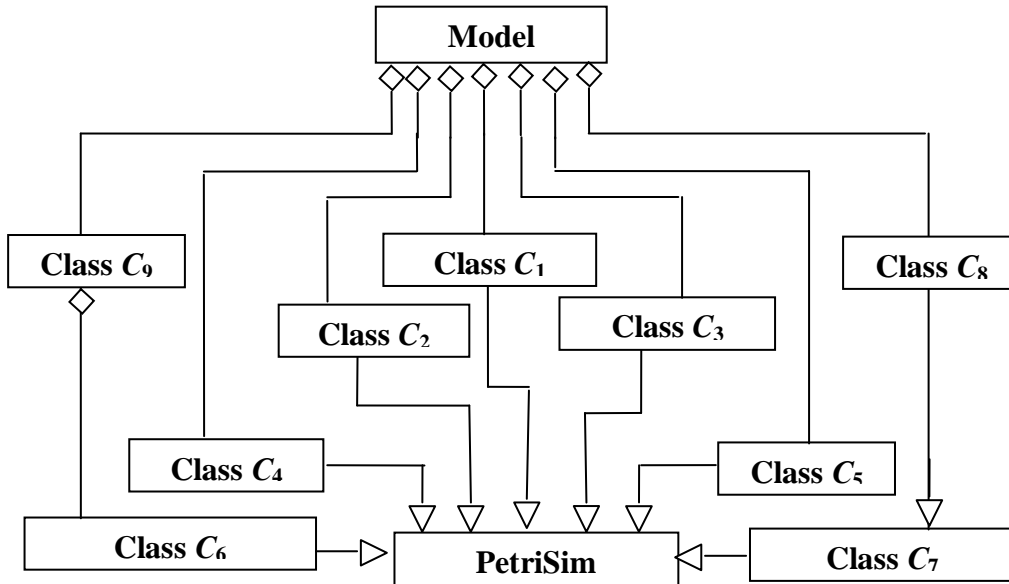


Рис. 2. Диаграмма классов модели системы

Сеть Петри объекта O_j , содержащуюся в его поле `PetriNet`, обозначим N_j :
 $N_j = (\mathbf{P}_j, \mathbf{T}_j, \mathbf{A}_j, \mathbf{W}_j, \mathbf{K}_j, \mathbf{I}_j, \mathbf{R}_j)$.

Связи Петри-объектов между собой осуществляются двумя способами:

1) с помощью общих позиций (например, позиция-счетчик либо позиция-ресурс):

$$\exists P \in \mathbf{P}_k \cap \mathbf{P}_l \quad (18)$$

2) с помощью *инициализации событий* (из перехода объекта O_k передаются маркеры в позиции других объектов O_l в заданном количестве $w_{k,l}$):

$$\begin{aligned} \exists T \in \mathbf{T}_k, \exists P \in \mathbf{P}_l: \\ M_P^+(t_n) = M_P(t_n) + Y(T, t_n) \cdot w_{k,l} \end{aligned} \quad (19)$$

Алгоритмически существование общих позиций обеспечивается совпадением адресов памяти, где хранятся значения маркировок соответствующих позиций. Таким образом, общие позиции характеризуются общим доступом к значению маркировки этой позиции разных Петри-объектов.

Инициализация событий алгоритмически реализуется при запуске дополнительных действий, соответствующих выходу маркеров из перехода, методом `DoT()`. Тогда инициализацию событий можно выполнить не только для нескольких объектов, но и для множества объектов с помощью цикла. Уравнения (19) дополняют уравнения (4) преобразования D^+ , а значит, математически инициализация событий

переходом объекта O_k означает добавление к множеству выходящих позиций этого перехода еще одной позиции, принадлежащей объекту $O_l \neq O_k$:

$$w_{k,l} > 0 \Leftrightarrow (\exists T \in \mathbf{T}_k, \exists P \in \mathbf{P}_l : P \in T^*) \quad (20)$$

Поставим в соответствие всякой передаче маркеров из перехода одного объекта в позицию другого дугу $(T, P) : T \in \mathbf{T}_k, P \in \mathbf{P}_l, w_{k,l} > 0$, и обозначим множество всех таких дуг объекта O_k $U_k = \{(T, P) | T \in \mathbf{T}_k, P \in \mathbf{P}_l, w_{k,l} > 0\}$, а соответствующие этим дугам значения кратностей $\mathbf{w}_k = \{(T, P) | T \in \mathbf{T}_k, P \in \mathbf{P}_l, w_{k,l} > 0\}$. Тогда сеть Петри модели системы, составленная из сетей Петри-объектов, имеет вид:

$$\text{PetriNet} = \left(\bigcup_j N_j \right) \cup U_j \quad (21)$$

где U_j – множество дуг, вдоль которых объект O_j осуществляет инициализацию событий в других объектах, а объединение сетей Петри понимается в смысле объединения множеств ее позиций, переходов, дуг, кратностей, значений для решения конфликта, временных задержек в переходах:

$$\begin{aligned} \bigcup_j N_j : \mathbf{P} = \bigcup_j \mathbf{P}_j, \mathbf{T} = \bigcup_j \mathbf{T}_j, \mathbf{A} = \bigcup_j \mathbf{A}_j, \\ \mathbf{W} = \bigcup_j \mathbf{W}_j, \mathbf{K} = \bigcup_j \mathbf{K}_j, \mathbf{R} = \bigcup_j \mathbf{R}_j. \end{aligned} \quad (22)$$

Связи (18), (19) обеспечивают, что модель, которая конструктивно состоит из Петри-объектов, описывается сетью Петри

$$\text{PetriNet} = (\mathbf{P}, \mathbf{T}, \mathbf{A}, \mathbf{W}, \mathbf{K}, \mathbf{R}) \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P} &= \bigcup_j \mathbf{P}_j, \quad \mathbf{T} = \bigcup_j \mathbf{T}_j, \quad \mathbf{A} = \bigcup_j (\mathbf{A}_j \cup \mathbf{U}_j), \\ \mathbf{W} &= \bigcup_j (\mathbf{W}_j \cup \mathbf{w}_j), \quad \mathbf{K} = \bigcup_j \mathbf{K}_j, \quad \mathbf{R} = \bigcup_j \mathbf{R}_j. \end{aligned} \quad (24)$$

Таким образом, конструирование модели из Петри-объектов обеспечивает, что функционирование модели описывается сетью Петри (23), являющейся объединением сетей Петри объектов, из которых она состоит.

Алгоритм имитации Петри-объектной модели состоит из следующих действий:

- Формировать список Петри-объектов;
- Осуществить вход маркеров в переходы Петри-объектов (Start());
- Пока не достигнут момент окончания моделирования
 - продвинуть время в момент ближайшего события;
 - определить список конфликтных объектов и выбрать объект из списка конфликтных объектов;
 - для выбранного объекта выполнить выход маркеров из переходов (Do_T(), StepEvent());
 - для всех других объектов осуществить вход маркеров в переходы (Start()).
- Вывести результаты моделирования.

Петри-объектная модель учебного процесса вуза

Технология конструирования модели из Петри-объектов возникла и апробировалась при разработке модели системы управления учебным процессом вуза [10]. На рис. 3 изображена Петри-объектная модель системы управления учебным процессом вуза, составленная из следующих Петри-объектов: Дисциплина, Студент, Преподаватель, Группа, Деканат, Контроль задолженностей. Как следует из этого примера, Петри-объекты представляют структурные элементы системы, очень часто являющиеся очевидными структурными единицами системы, которая исследуется.

Рассмотрим Петри-объект Дисциплина, который представляет изучение дисциплины в

соответствии с учебным планом специальности (рис. 4). Общие с объектом Расписание позиции «Начало семестра», «Продолжается экзаменационная сессия» обеспечивают начало обучения и проведение экзамена по дисциплине в установленные деканатом временные интервалы. Для связи с этими позициями используются информационные связи, обозначенные пунктирными линиями. Использование информационных связей для моделирования систем управления описано в [11]. Общая позиция «Преподаватель» позволяет контролировать занятость преподавателя, например, другими дисциплинами.

Инициализация событий происходит в переходах Начало лекции (лабораторной работы, практического занятия), Модульный контроль, Защита лабораторной работы, Экзамен. Например, в результате запуска перехода Начало лекции передаются маркеры в позицию «Есть пара по расписанию» Петри-объекта Преподаватель и Петри-объекта Студент, что создает условия для выполнения событий «Проводит занятие по расписанию» Преподавателя и «Посещает занятие» Студента. Заметим, что при этом передача маркеров осуществляется во все Петри-объекты Студент, относящиеся к объекту Группа.

Метод DoT() в применении к модели учебного процесса, кроме передачи маркеров, содержит также действия, связанные с записями в журнал успеваемости и журнал посещаемости.

Правильность функционирования Петри-объекта сильно зависит от значений, задающих приоритет и вероятность запуска переходов. Например, событие «Начало лекции» и событие «Модульный контроль» при определенных условиях могут оказаться конфликтными. Так как в учебном процессе проведение занятий по расписанию является обязательным, то следует установить большее значение приоритета для перехода «Начало лекции».

Отметим, что создание модели системы управления учебным процессом с помощью Петри-объектов позволило воспроизвести такие процессы, как проведение занятий в группах

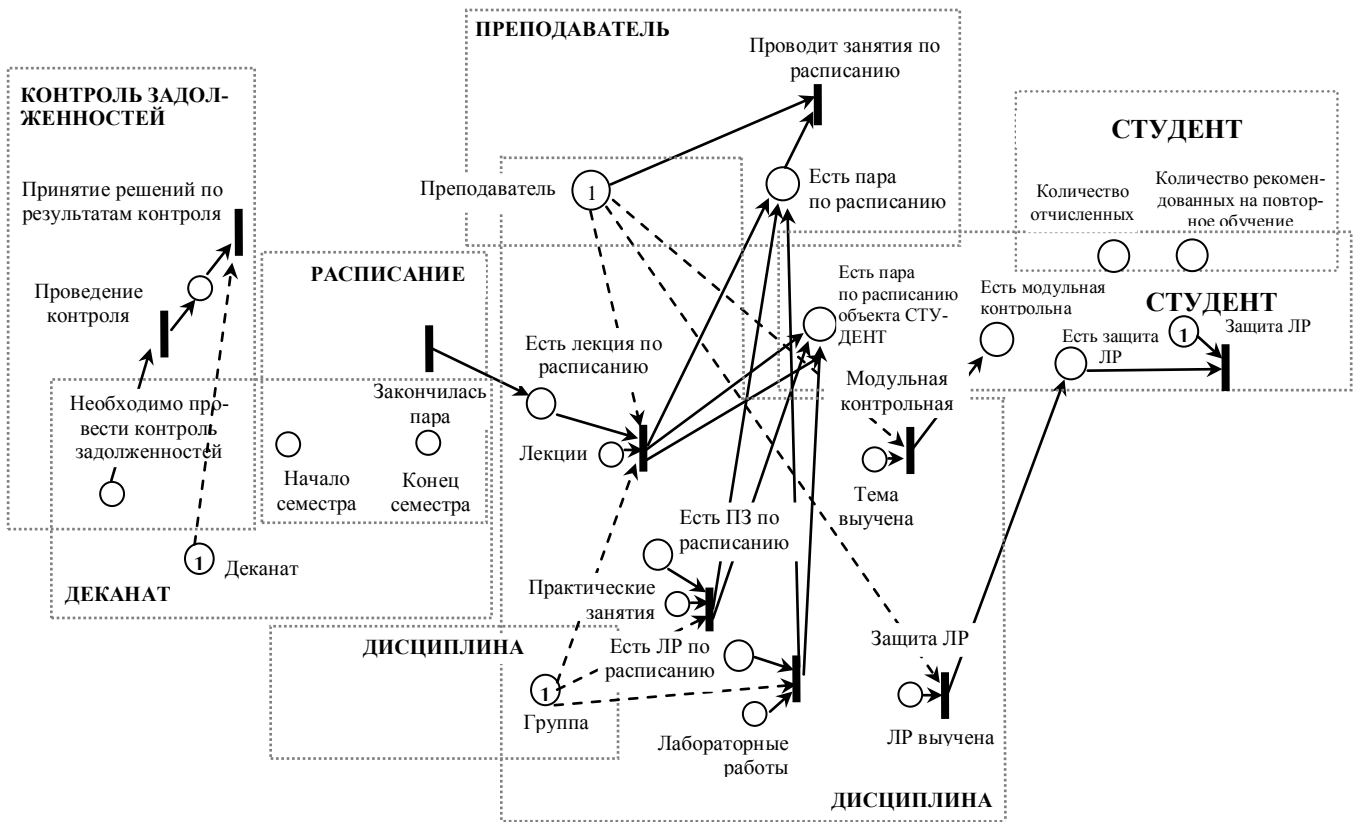


Рис. 3. Петри-объектная модель учебного процесса вуза

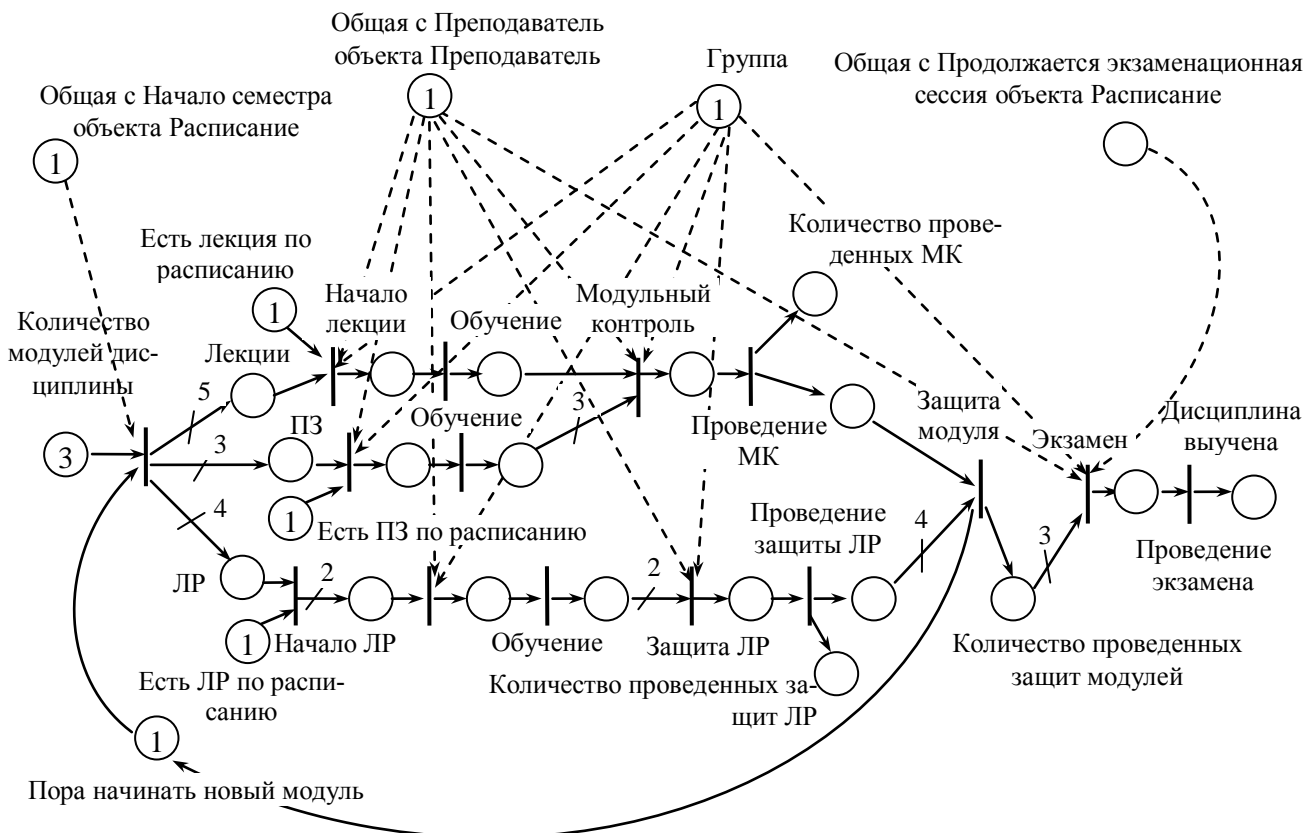


Рис. 4. Сеть Петри-объекта Дисциплина

студентов по расписанию, прием задолженностей преподавателями, сдача задолженностей по разным дисциплинам студентами, допуск

студентов к сессии деканатом, принятие решений деканатом об отчислении студента или допуске к пересдаче. Реализация Петри-объектной

моделі учебного процесу виконана засобами мови програмування Java (J2SE) і інтегрованої середовища Netbeans IDE 6.5. Верифікація моделі і результати моделювання підтвердили правильність функціонування моделі.

Заключення

В результаті наукового дослідження отримані рівняння станів часової стохастичної мережі Петрі з багатоканальними і конфліктними переходами, які відрізняються від відомих рівнянь станів часової мережі Петрі з детермінованими затримками, во-первых, поняттям стану переходу, во-вторых, наявністю рівняння, задаючого рух часу.

Введено поняття Петрі-об'єкта і розроблена технологія конструювання Петрі-об'єктних моделей, при якій об'єкти моделювання створюються з використанням механізму

наслідування на основі класу об'єктів Петрі-імітатор.

Моделювання системи з допомогою Петрі-об'єктів дозволяє досліднику зосередитися на складанні мережі Петрі елементів системи. При цьому мережа Петрі-об'єкта відображає поведінкові властивості елемента системи. Тестування Петрі-об'єктів може бути виконано до об'єднання в систему і не складно, якщо Петрі-об'єкт достатньо простий. Лише після тестування Петрі-об'єктів, які представляють елементи системи, виконується конструювання моделі системи.

Підхід до побудови моделі, який пропонується, дозволяє швидко конструювати моделі складних систем і забезпечує зменшення витрат часу на тестування і реалізацію імітаційних моделей великих систем. Технологія апробована на прикладі Петрі-об'єктної моделі системи управління навчальним процесом вузу.

Список літератури

1. Ямпольський Л.С., Лавров О.А. Штучний інтелект у плануванні та управлінні виробництвом. – К.:Вища шк., 1995. – 255с.
2. Стеценко І.В., Бойко О.В. Система імітаційного моделювання засобами сіток Петрі // Математичні машини і системи. – Київ, 2009. – №1. – С.117-124.
3. Dmitriy A. Zaitsev Functional Petri net // Universite Paris Paris-Dauphine. – Cahier N 224. – mars 2005. – P.1-62.
4. Charles Lakos Object Oriented Modeling with Object Petri Nets // Concurrent Object-Oriented Programming and Petri Nets. - 2001. - P. 1-37.
5. Lakos, C., Keen, C. LOOPN++: a new language for object-oriented Petri nets, Technical Report R94-4, Networking Research Group, University of Tasmania, Australia, April 1994.
6. Hue Xu Timed Hierarchical object-oriented Petri net // Petri Net, Theory and Applications, Book edited by: Vedran Kordic. – I-Tech Education and Publishing, Vienna, Austria. – 2008. – P.253-280.
7. Hong, J.E., Bae D.H. High-level Petri net for incremental specification of object-oriented system requirements // Institution of Engineering and Technology, IEEE Proceedings – Software. – 2001. – Vol. 148, No.1 – P.11-18.
8. Murata T. Petri Nets: Properties, Analysis and Applications. // Proceedings of IEEE. – 1989. - Vol.77, No.4. – P.541-580.
9. Зайцев Д.А. Инварианты временных сетей Петри // Кибернетика и системный анализ. - 2004. – № 2. – С. 92-106.
10. Стеценко І.В. Імітаційне моделювання системи управління навчальним процесом ВНЗ з використанням об'єктно-орієнтованого підходу // П'ята науково-практична конференція з міжнародною участю «Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС'2010». Тези доповідей. – Київ. – 2010. – 21-25 червня 2010р. – С.134-135.
11. Стеценко І.В. Моделювання систем: навч. посіб. [Текст] / Стеценко І.В.; М-во освіти і науки України, Черк. держ. технол. ун-т. - Черкаси: ЧДТУ, 2010. – 399с.
12. Jinzhong Niu, Jing Zou, Aihua Ren OOPN: an object-oriented Petri nets and its integrated development environment [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.sci.brooklyn.cuny.edu/~jniu/research/publications/files/sea03-oopn.pdf>.