

УДК 519.876:627.093:(075.8)330

А.В. СКАТКОВ, А.В. ТАРАСОВА

*Севастопольский национальный технический университет, Украина***ВЕРСИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫХ  
ТРАНСПОРТНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ**

*Моделирование структурно неоднородных транспортно-производственных систем приводит к ряду трудностей. С целью их преодоления предлагается многоверсионный подход к моделированию для решения системного конфликта между уровнем адекватности и степенью сложности модели. Применение многоверсионного подхода иллюстрируется на примере построения семейства моделей для описания логистических задач грузового порта, производится сравнение уровней сложности и адекватности построенных моделей. В качестве базы для построения моделей рассматривается аппарат сетей Петри с дальнейшим моделированием в среде AnyLogic.*

**Ключевые слова:** многоверсионное моделирование, транспортно-производственные системы, логистика, имитационное моделирование, сети Петри

**Введение**

Обеспечение высоких показателей производственных процессов является важной задачей, от решения которой зависят темпы промышленного развития страны в целом. Необходимым условием успешного развития всех отраслей промышленности является повышение эффективности автоматизированного управления транспортно-производственными системами. Особую роль в этом играет оперативно-диспетчерский уровень управления, который должен обеспечить принятие обоснованных производственно-технологических решений в режиме реального времени в условиях действия интенсивных помех и возмущений. Качество функционирования систем управления оперативно-диспетчерского уровня можно существенно повысить за счет рационального использования современных информационных технологий. На сегодняшний день созданы условия для перехода от автоматизации отдельных задач оперативного управления к созданию целостных информационных управляющих автоматизированных систем. Такие системы являются основой для информационного обеспечения поддержки управленческих решений.

Эффективность использования транспортно-производственных систем (ТПС) можно значительно повысить путем выбора оптимальных решений по их управлению. Известные на сегодняшний день результаты теоретических исследований в области принятия решений, моделирования и управления транспортными системами не удовлетворяют в полной мере потребностям практики, а существующие методики, в большинстве случаев, имеют характер

частных решений, жесткие ограничения, требуют большого объема априорной информации.

Таким образом, актуальной научной задачей является дальнейшее развитие теории, методов и способов эффективного управления транспортно-производственными комплексами на основе информационных технологий и моделей принятия решений, которые позволяют создавать интегрированные системы инструментальной поддержки оперативно-диспетчерских решений.

Научно-технический прогресс коснулся всех видов транспорта: выросла грузоподъемность, увеличились скорости, умножился подвижный состав, возросло количество транспортных узлов, изменилась функциональная нагрузка. Как следствие, современные ТПС представляют собой источник сложных и в то же время практически важных логистических задач. Примерами логистических задач являются:

1. Оценка пропускной способности транспортных систем при наличии многофазного обслуживания со сложными логистическими условиями.
2. Оценка требуемой ёмкости промежуточных накопителей для обеспечения требуемой пропускной способности.
3. Построение расписаний для реализации задачи оперативного управления.
4. Рациональное распределение ресурсов и функций транспортной сети и т.д.

Как правило, наиболее актуальные логистические задачи относятся к многокритериальным оптимизационным, сочетающим в себе описанные выше проблемы. Аналитический аппарат для решения подобного класса задач разработан в недостаточной

мере. На сегодняшний день имитационное моделирование является ведущим средством, в частности, известны три основные схемы моделирования: событийная, автоматная и непрерывно-временная. Каждая из этих схем имеет свое целевое назначение и обеспечивает определенные функции. В силу этого, предпочтение одной из схем невозможно, необходимо их комплексное использование. Но совместное использование описанных выше схем порождает системные конфликты, вызванные:

1. Языковыми трудностями описания организации транспортных потоков.
2. Специфическими особенностями между различными трансляторами при переходе от схемы к схеме.
3. Отсутствием гибких интерфейсных средств взаимосвязи модулей в режиме реального времени, реализованных на основе различных подходов.

Другой плоскостью проблем является необходимость реализации решения логистических задач, требующих надежного двухуровневого интерфейса. Первый уровень представляет собой уровень заказчика-системного аналитика, второй уровень – уровень системного оператора. Взаимодействие этих уровней затруднено ввиду общей сложности системы и невозможности создания списка спецификаций, отображающих все возможные в системе ситуации.

Авторы статьи согласны с [1], что современные системы моделирования имеют специализированные средства по реализации дополнительных возможностей организации модельных экспериментов на компьютере. Они также дают возможность учёта в моделях фактора времени, т.е. строить динамические имитационные модели, что особенно важно для многих систем, в том числе и логистических.

На наш взгляд, разрешение всех системных конфликтов в рамках единой модели не представляется возможным, поэтому предлагается рассмотрение концепции версионного моделирования логистических задач, позволяющего преодолеть отмеченные выше системные конфликты.

### 1. Многоверсионное моделирование как средство поиска компромисса между адекватностью и сложностью модели

При моделировании структурно неоднородных систем существенные трудности вызывает поиск компромисса между уровнем адекватности и сложностью модели. Простую модель целесообразно использовать на начальных этапах моделирования с целью получения опорных значений для дальнейших исследований. Её достоинствами являются про-

стога и малое время, затрачиваемое на моделирование, а недостатком – неудовлетворительная степень адекватности. Повышение адекватности модели ведёт, как правило, к существенному наращиванию сложности.

Обозначим структурно неоднородную систему как  $S$ . Входящие в ее состав подсистемы  $s_i$  относительно однородны:  $S = (s_1, s_2, s_3, \dots, s_n)$ . Введем количественные меры адекватности  $(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n)$  и меры точности  $(r_1, r_2, r_3, \dots, r_n)$  для каждой из подсистем  $s_i, i = \overline{1, n}$ . Тогда степени адекватности и сложности структурно неоднородной системы  $S$  можно оценить как

$$\begin{aligned} Q &\leq \min q_i, \\ R &\geq \max r_i. \end{aligned} \quad (1)$$

Осуществим декомпозицию общей задачи:  $\max \min q_i, \min \max r_i$ . Так, можно предложить поиск путей разрешения конфликта между уровнем адекватности и сложностью модели на следующих сочетаниях: обеспечение необходимого уровня адекватности модели и достаточного уровня сложности, обеспечение достаточного уровня адекватности модели и необходимого уровня сложности.

Процесс моделирования является динамическим, т.е. исследователь имеет дело с семействами имитационных моделей, каждое из которых в той или иной мере реализует одно из указанных сочетаний.

Не вдаваясь в метрическую оценку параметров, введем граничные  $Q_0$  и  $R_0$ . Опорное целевое требование к модели будет удовлетворять требованиям  $Q_0$  и  $R_0$ .

Оптимальное целевое требование к модели находится в области, удовлетворяющей условиям

$$Q > Q_0, R < R_0, Q \rightarrow \max. \quad (2)$$

Как отмечают многие исследователи, при моделировании сложных систем достижение оптимального соотношения уровней адекватности и сложности модели практически невозможно. Поиск оптимальных целевых требований представляет собой решение многокритериальной оптимизационной задачи. В соответствии с идеей Парето, можно отсечь заведомо бесперспективную область целевых требований, описываемую как

$$Q > Q_0, R > R_0. \quad (3)$$

Поиск решений в данной области не может удовлетворить требованиям пользователя, поскольку ведёт только к неоправданному увеличению сложности модели без повышения её адекватности.

Для достижения компромиссных результатов, поиск дальнейших системных решений должен удовлетворять условиям

$$Q > Q_0, Q \rightarrow \max, R \rightarrow \min. \quad (4)$$

Пусть наращивание сложности модели происходит с шагом  $\Delta R$ , а повышение адекватности модели с шагом  $\Delta Q$ . При этом необходимо следить, чтобы увеличение сложности  $R + \Delta R$  удовлетворяло условию  $Q + \Delta Q > Q$ , в противном случае дальнейший поиск решений при выбранном  $\Delta R$  не имеет смысла.

## 2. Многоверсионный подход к моделированию транспортно-производственной системы на примере логистики грузового порта

### 2.1. Применение сетей Петри для моделирования работы грузового порта

В качестве примера постепенного наращивания сложности модели при моделировании рассмотрим модель грузового порта.

Современные грузовые порты представляют собой своеобразные узлы, связывающие грузопотоки по ввозу и вывозу грузов всеми видами транспорта [2], являются сервисной логистической системой и представляют собой конвейерные системы последовательного типа с наличием противотока.

Технологический процесс функционирования порта является процессом с непрерывным временем, но изменения состояния системы происходят скачкообразно через достаточно длительные промежутки времени, потому для описания состояний системы целесообразно использовать дискретное время. При этом можно рассматривать систему лишь в моменты смены состояний без риска потери информации. Наиболее удобными средствами для описания систем такого вида являются асинхронные модели, рассматривающие взаимодействие событий с помощью причинно-следственных связей. Рассмотрение не непосредственных связей между событиями, а лишь тех ситуаций, в которых рассматриваемое событие может реализоваться, упрощает описание системы. Системы с дискретным временем можно представить как структуры, образованные из элементов двух типов: событий и условий. На этом принципе построен способ описания функционирования динамической системы с дискретным временем, использующий аппарат сетей Петри. Сеть Петри представляет собой двудольный граф, образованный с помощью абстрактных символов из двух непересекающихся алфавитов: множества переходов – событий, и множества состояний – условий. Состояния и переходы связаны отношениями непо-

средственной зависимости, они изображаются направленными дугами, ведущими из состояний в переходы и из переходов в состояния [3].

Одним из достоинств сетей Петри для описания процессов с дискретным временем является то, что они представляют собой аппарат, хорошо приспособленный для отражения таких важных явлений, как иерархия и параллелизм. Представление иерархичности в явном виде при использовании сетей Петри для описания дискретных иерархических процессов значительно упрощает построение модели системы, а конвейерные дискретные процессы, к которым относится и процесс обслуживания судна с грузом в порту, являются частным случаем параллельных процессов. Кроме того, применение аппарата сетей Петри для структурной идентификации транспортной системы позволяет явным образом отобразить все основные особенности ее функционирования.

Произведем декомпозицию процесса погрузки/выгрузки судов в порту:

- постановка у причала;
- разгрузка/погрузка на судно;
- транспортировка на склад/со склада;
- погрузка/выгрузка на/с железнодорожного транспорта или погрузка/выгрузка на/с автомобильного транспорта.

При таком разбиении весь процесс представляет собой конвейерную систему с наличием противотока. С целью упрощения модели исключим из рассмотрения на данном этапе процесс погрузки, устранив таким образом противоток.

### 2.2. Семейство моделей для описания работы грузового порта

**Версия №1.** Рассмотрим простейшую модель порта, содержащего одно место у причала и обслуживающего только суда внутреннего каботажа, т.е. суда, не требующие таможенного досмотра. Сеть Петри, соответствующая такой модели, изображена на рис. 1.

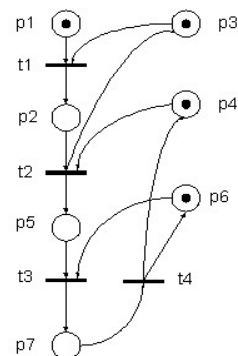


Рис. 1. Сеть Петри для логистической задачи разгрузки судна (версия №1)

Позиции p1, p2, p3, p5, p7 соответствуют возможным положениям судна в порту, p4 и p6 – состояниям причала и перегрузочного комплекса. Переходы t1, t2, t3 и t4 описывают временные события, как то заход и разгрузка судна, освобождение причала.

Начальным состоянием системы будет отсутствие судов в пределах порта и наличие судна на входе в порт. Начальная маркировка – метки в позициях p1, p3, p4, p6. Завершению одного конвейерного процесса будет соответствовать наличие меток в позициях p4, p6, а всего конвейерного процесса – наличие меток в позициях p3, p4, p6 и отсутствие во всех остальных.

**Версия №2.** Усложним модель, введя обслуживание судов внешнего каботажа. В этом случае перед заходом в порт судну будет необходим таможенный, санитарный и/или ветеринарный досмотр. Сеть Петри, соответствующая такой ситуации, представлена на рис. 2.

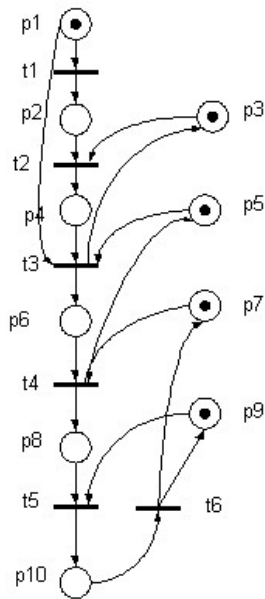


Рис. 2. Сеть Петри для логистической задачи разгрузки судна (версия №2)

В сеть, представленную на рис.2 добавлены позиции и переходы, описывающие процесс досмотра судна. Начальная маркировка – метки в позициях p1, p3, p5, p7, p9. Завершению одного конвейерного процесса будет соответствовать наличие меток в позициях p7, p9, а всего конвейерного процесса – наличие меток в позициях p3, p5, p7, p9 и отсутствие во всех остальных.

**Версия №3.** Произведем дальнейшее усложнение модели, добавив транспортировку груза по территории порта после разгрузки судна (рис. 3).

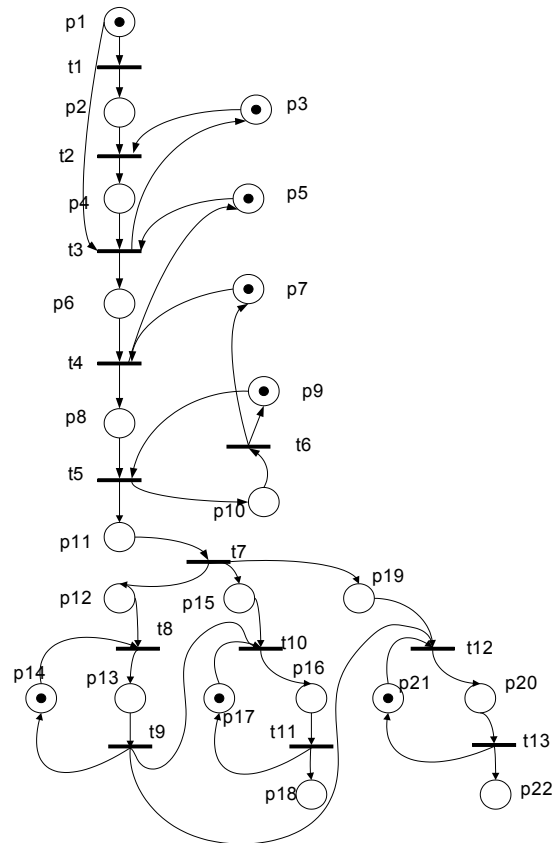


Рис. 3. Сеть Петри для логистической задачи разгрузки судна и дальнейшего перемещение груза по территории порта (версия №3)

По сравнению с сетью на рис.2, добавлены позиции и переходы, описывающие процесс транспортировки груза по территории порта, его хранение на складе и дальнейшую погрузку на автомобильный и железнодорожный транспорт.

**Сравнение версий.** Введем обозначения уровней сложности и адекватности рассмотренных выше версий моделей. Версия 1 имеет наибольший уровень абстракции, и, как следствие, наименьший уровень сложности. Обозначим его как  $R_1$ . При этом в целом модель верно отображает структуру системы, поэтому обозначим уровень адекватности первой версии как  $Q_1$ .

Версия №2 имеет более сложную, по сравнению с версией №1, структуру и рассматривает более сложные аспекты поведения моделируемой системы. Ей соответствует уровень сложности  $R_2$  и уровень адекватности  $Q_2$ . При этом выполняется неравенство

$$R_1 < R_2, \quad Q_1 < Q_2. \quad (5)$$

Версия №3 имеет более сложную структуру и отображает не только процесс перемещения судна по территории порта в процессе разгрузки, но и дальнейшую транспортировку грузов. Её сложность

можно обозначить как  $R_3$ , а адекватность как  $Q_3$ , такие, что справедливо неравенство

$$R_1 < R_2 < R_3, \quad Q_1 < Q_2 < Q_3. \quad (6)$$

При этом степень повышения сложности и адекватности при переходе от версии №2 к версии №3 выше, чем при переходе от версии №1 к версии №2, что можно записать в виде

$$\Delta R_{1,2} < \Delta R_{2,3}, \quad \Delta Q_{1,2} < \Delta Q_{2,3}. \quad (7)$$

Дальнейшее усложнение модели возможно, например, за счет введения прототока, увеличения числа меток, добавления условных переходов и т.п.

### 2.3. Программная реализация модели в среде AnyLogic

В качестве средства для моделирования работы сети Петри, была выбрана среда AnyLogic и встроенная библиотека элементов Enterprise Library, позволяющая моделировать системы с точки зрения заявок, процессов и ресурсов [4]. Пример модели в среде AnyLogic для моделирования сети Петри, описывающей процесс разгрузки судна (версия №1) приведен на рис. 4.

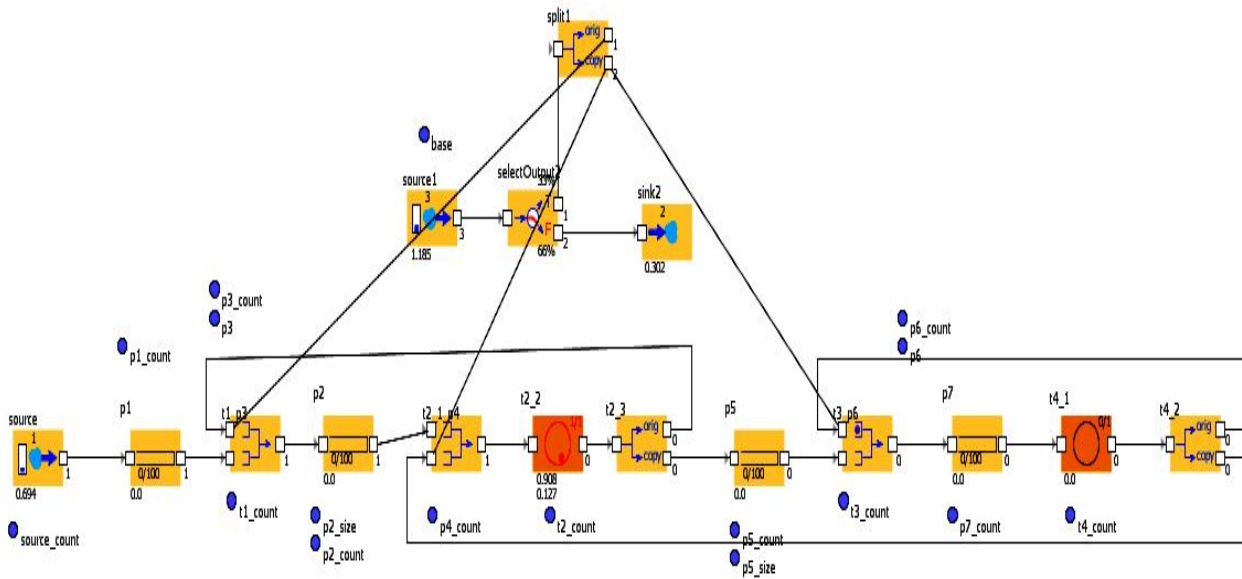


Рис. 4. Модель в среде AnyLogic 5.4.1, имитирующая сеть Петри (версия №1)

Элемент Source имитирует появление метки в начальном состоянии p1. Состояния сети Петри моделируются посредством очередей Queue, длина которых зависит от допустимого числа меток в одном состоянии. Переходы реализованы с помощью элементов объединения и копирования заявок для реализации переходов с несколькими входными и несколькими выходными дугами соответственно, а также элементами, обеспечивающими задержку при переходе на заданное время. Блок, содержащий элемент Source1, обеспечивает начальную расстановку меток в сети. Также в системе имеется ряд переменных для съема статистики о параметрах сети в процессе моделирования её работы.

### Заключение

Многоверсионный подход к моделированию сложных ТПС отличается тем, что предлагается построение множества моделей, на элементах которого возможно выполнения поиска компромиссных

между адекватностью и сложностью модели. С использованием такого множества разработчик имеет возможность как восходящего, так и нисходящего перехода с уровня на уровень для достижения требуемых степеней адекватности и сложности модели. Данный подход показал продуктивность для неоднородных ТПС, но применим и для систем других классов, например, для вычислительно-коммутативных сетей.

### Литература

1. Боев, В.Д. *Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World [Текст]: учеб. пособие / В.Д. Боев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 368 с.*
2. *Понятовский, В.В. Морские порты и транспорт [Текст] / В.В. Понятовский. – М.: РКонсульт, 2006. – 429 с.*
3. *Питерсон, Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем [Текст]: пер. с англ. / Дж. Питерсон. – М.: Мир, 1984. – 264 с.*

4. AnyLogic. Справочное руководство по доступна: <http://www.xjtek.com/support/download/documentation>. – Режим Enterprise Library [Электронный ресурс]. – Режим cumentation. – 5.09.2011 г.

Поступила в редакцию 5.03.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. каф. информационных управляющих систем О.Е. Федорович, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

### ВЕРСІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУРНО НЕОДНОРІДНИХ ТРАНСПОРТНО-ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ

*О.В. Скатков, Г.В. Тарасова*

Моделювання структурно неоднорідних транспортно-виробничих систем призводить до ряду труднощів. З метою їх подолання пропонується багатоверсійний підхід до моделювання для вирішення системного конфлікту між рівнем адекватності та ступенем складності моделі. Застосування багатоверсійного підходу ілюструється на прикладі побудови сімейства моделей для опису логістичних завдань вантажного порту, проводиться порівняння ступенів складності та адекватності побудованих моделей. За базу для побудови моделей розглядається апарат мереж Петрі з подальшим моделювання в середовищі AnyLogic.

**Ключові слова:** багатоверсійне моделювання, транспортно-виробничі системи, логістика, імітаційне моделювання, мережі Петрі

### VERSIONED SIMULATION OF STRUCTURALLY INHOMOGENEOUS TRANSPORTATION MANUFACTURING SYSTEMS

*A.V. Skatkov, A.V. Tarasova*

Simulation of structurally heterogeneous transport and production systems has number difficulties. For overcoming them is proposed multi-version method of simulation that resolve the conflict between the level of adequacy and level of difficulty of the model. The use of multi-version method is illustrated by constructing the group of models that may describe the logistical problems of cargo port, levels of difficulty and adequacy of the constructed models are compared. Petri nets are considered as a basis for constructing of the models with further modeling in AnyLogic.

**Key words:** multi-version modeling, transportation and manufacturing systems, logistics, simulation, Petri nets.

**Скатков Александр Владимирович** – д-р техн. наук, проф., проф. каф. кибернетики и вычислительной техники Севастопольского национального технического университета, Севастополь, Украина.

**Тарасова Анна Владимировна** – аспирант каф. кибернетики и вычислительной техники Севастопольского национального технического университета, Севастополь, Украина.