



ЮРИЙ ТОЛУБЕВ
Фраунгоферский институт IFF,
Магдебург,
Институт транспорта и связи, Рига,
профессор, д.т.н.



ТОБИАС РЕГГЕЛИН
Фраунгоферский институт IFF,
Магдебург,
к.т.н.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ В ПОТОКОВЫХ СИСТЕМАХ ЛОГИСТИКИ

АННОТАЦИЯ. В статье поясняются принципиальные свойства потоков, отображаемых в имитационных моделях логистических систем, и сообщается о новом перспективном методе мезоскопического моделирования потоковых систем, основанном на парадигме Discrete Rate, определенной в пакете ExtendSim.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Материальный поток, концептуальная модель, имитационное моделирование, мезоскопические модели.

ANNOTATION. The article explains the basic properties of flows that are represented in simulation models of logistics systems. A new mesoscopic modeling method for flow systems is presented which is based on the Discrete Rate paradigm specified in the simulation software ExtendSim.

KEY WORDS. Material flow, conceptual model, simulation modeling, mesoscopic models.

Хотя примененное в заголовке статьи понятие концептуальной модели может показаться слишком абстрактным, речь идет о самых простых формах описания базовых категорий, которые разработчик модели использует в процессе работы с карандашом и бумагой еще до того момента, как он приступит к реализации модели с помощью компьютера.

Под потоковой системой логистики понимается совокупность потоков одного из трех типов (материальных, информационных или финансовых), в состав которой входят также средства создания, транспортировки, накопления и преобразования потоков. В рамках конкретной логистической системы три типа потоковых систем взаимодействуют друг с другом.

С помощью моделей процессов в потоковых системах логистики, которые, как правило, создаются сегодня в форме имитационных моделей [1], оцениваются практически любые статические и динамические показатели функционирования таких систем при заданных

исследователем значения параметров, характеризующих как внутреннюю организацию процессов в системе, так и свойства внешней среды. Имитационное моделирование является самым мощным методом количественного анализа логистических систем различного назначения, и оно широко применяется в рамках проектов, связанных с реконструкцией существующих или созданием новых систем.

У авторов статьи имеется опыт разработки десятков проектов, в которых были использованы как дискретно-событийные, так и непрерывные имитационные модели, поэтому излагаемые в работе суждения о свойствах моделей основываются далеко не только на теоретических размышлениях. В первой части данной работы дается описание базовых свойств потоков, которые необходимо учитывать при разработке моделей. Далее приводится краткий обзор традиционных методов имитационного моделирования потоковых систем. В заключение сообщается о новом перспективном методе мезоскопического моделирования потоковых систем, основанном на парадигме Discrete Rate, определенной в пакете ExtendSim.

РАСПОЛОЖЕНИЕ ПОТОКОВ В МОДЕЛЯХ

В моделях логистических систем понятие потока связывается с появлением переносимого в потоке субстрата в некоторой конкретной точке пространства, которую называют точкой измерения (регистрации) потока. Таким образом, измеряемые и моделируемые потоки в логистике не имеют протяженности, а являются процессами, развивающимися в точках соприкосновения выделенных исследователем фрагментов логистической системы, в которых эти потоки могут накапливаться.

Практически любая концептуальная модель потоков логистической системы (прежде всего материальных) может быть составлена с использованием четырех типов структурных элементов, показанных на рис. 1:

- элемент типа So (source) есть источник (генератор потока), из которого моделируемый субстрат поступает в систему в соответствии с заданными правилами, например, в виде непрерывного потока материала или отдельных порций груза;
- элемент типа Si (sink) есть граничный элемент структуры (сток), с помощью которого моделируемый субстрат покидает систему;
- элемент типа DS (detaining storage) служит для отображения любых узлов структуры логистической системы, в которых накапливается и задерживается моделируемый субстрат с целью его обработки (складирования, перевалки, комплектации, упаковки и т.п.);
- элемент типа AS (advancing storage) служит для моделирования транспортных каналов любого типа, с помощью которых моделируемый субстрат перемещается между образующими основную структуру системы элементами типа So, Si и DS.

В соответствии со сформулированным выше принципом потоки в структуре концептуальной сетевой модели логистической системы отображаются лишь на связях, соединяющих ее структурные элементы. Каждый наблюдаемый или моделируемый поток показан на рис. 1 крестиком, символизирующим точку измерения потока. Обозначение EF (external flow) относится к потокам, выделенным в исходной (базовой) структуре системы, так как все они по отношению к структурным элементам являются их внешними (входными или выходными) потоками. Потоки типа IF (internal flow) возникают в том случае, когда уже на уровне концептуальной модели производится декомпозиция некоторых элементов исходной структуры и определяются их внутренние зоны (см. зоны от Z1 до Z6 на рис. 1),

на границе которых возникают соответствующие внутренние потоки.

Элементы концептуальной модели, показанные на рис. 1, имеют универсальный характер, так как на их основе могут отображаться потоки в моделях логистических систем самого различного масштаба и назначения: от систем внутренней и внешней логистики конкретных предприятий до сколь угодно сложных транспортных каналов глобальной логистики [1]. Например, элемент AS1 может отображать транспортный канал с последовательным использованием трех видов транспортных средств, а элемент DS3 — складской объект с зонами приемки, хранения и отгрузки товаров.

При разработке модели конкретной системы особенно сложным и важным моментом является выбор адекватных вариантов использования в структуре модели транспортных элементов типа AS. Не случайно транспортные элементы типа AS, так же, как и элементы типа DS, называются накопителями. В транспортном канале одновременно может находиться значительное количество переносимого субстрата. Примерами могут служить как ленточный транспортер в системе обработки багажа в аэропорту, так и морской путь из одного порта в другой, которым одновременно могут следовать десятки судов, имеющих по несколько тысяч контейнеров на борту.

При моделировании информационных потоков, не учитывающем задержки при передаче данных, отпадает необходимость применять каналы типа AS. В то же время при моделировании финансовых потоков роль каналов типа AS значительна, так как процесс перевода денежных сумм может происходить с существенными задержками.

Рисунок 1
Расположение потоков в структуре логистической системы
↓

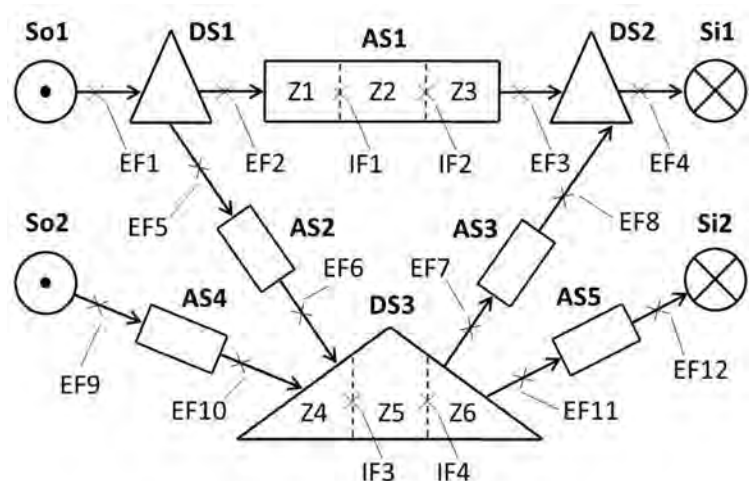
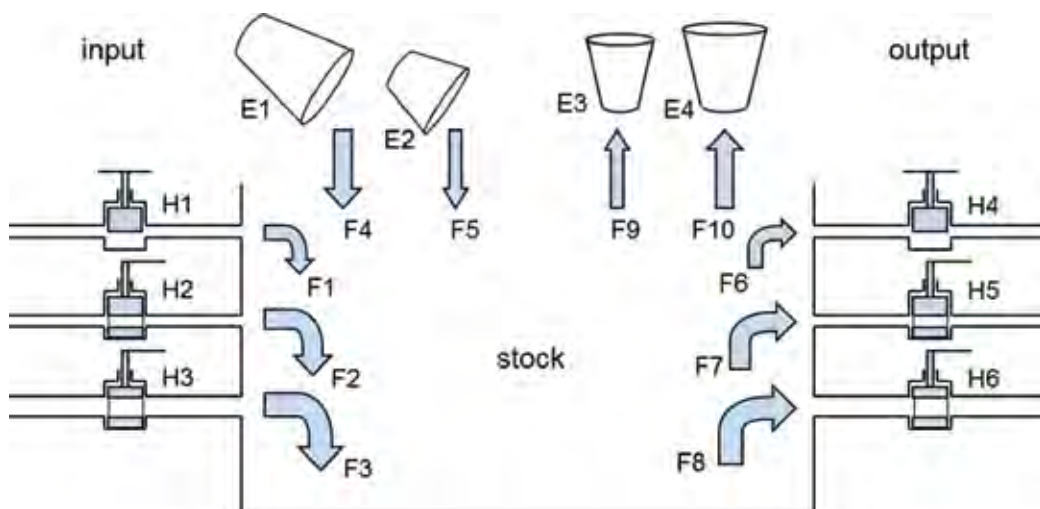




Рис. 2. →
Гидравлическая модель потоков различного типа



ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПОТОКОВ В МОДЕЛЯХ

Изображенная на рис. 2 гидравлическая система служит для иллюстрации способов возникновения практически всех типов материальных потоков в логистике. Принимается, что интенсивность потоков, проходящих через вентили H1 и H4, может регулироваться непрерывно путем вращения ручки вентиля. В свою очередь, вентили H2 и H3 (и, соответственно, H5 и H6) применяются как «ключи», которые имеют только два положения: «открыто» и «закрыто». Через вентиль в положении «открыто» проходит поток с заданной для него постоянной интенсивностью. С помощью «ведер» E1 и E2 обеспечивается возможность моментального вливания в накопитель соответствующих порций жидкости F4 и F5. «Ведра» E3 и E4 символизируют ситуации, когда из накопителя моментально удаляются соответствующие порции жидкости F9 и F10.

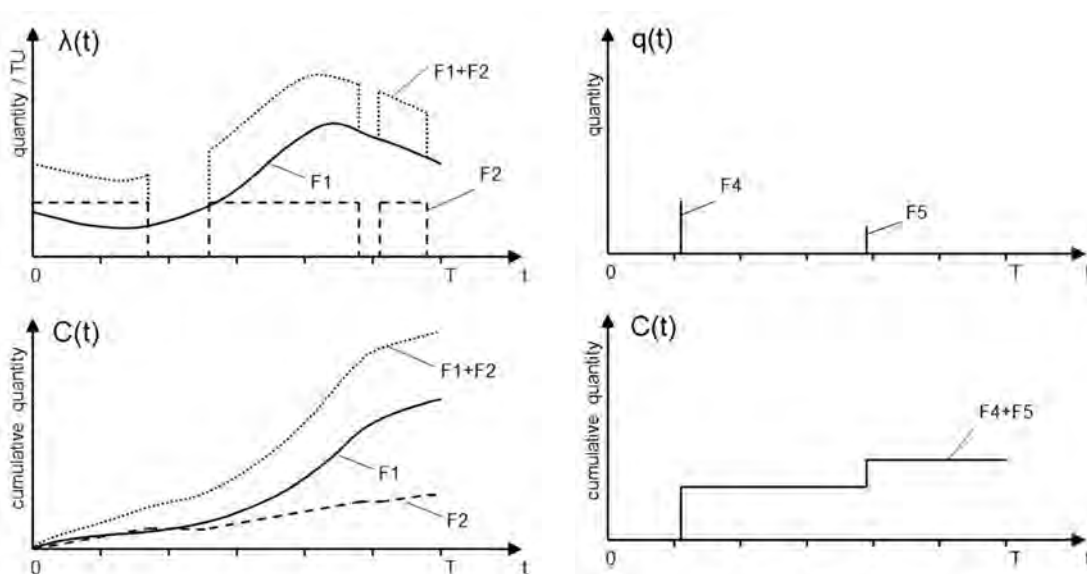
На рис. 3 и 4 показаны следующие естественные, т.е. непосредственно наблюдаемые и измеряемые типы потоков:

- непрерывный поток с непрерывными изменениями интенсивности (поток F1 на рис. 3);
- непрерывный поток с дискретными изменениями интенсивности (поток F2 на рис. 3);
- импульсный поток (события F4 и F5 на рис. 4).

Величину $\lambda(t)$, имеющую размерность «количество в единицу времени», для непрерывных потоков называют интенсивностью потока. Если около любого вентиля установить «счетчик воды», он будет показывать не интен-

Рис. 4.
Импульсный поток (события F4 и F5)
↓

Рис. 3. →
Непрерывные потоки с непрерывными (F1) и дискретными (F2) изменениями интенсивности



сивность $\lambda(t)$, а кумулятивный (накопленный) объем потока $C(t)$, зафиксированный за время t . Кумулятивный объем $C(t)$ возникает как результат интегрирования соответствующей величины $\lambda(t)$, он используется преимущественно при расчете уровня запаса в накопителе. Величина $C(t)$ имеет размерность «количество» для всех типов потоков. Обозначение TU на графиках следует понимать как time unit (единица времени). С помощью рис. 3 иллюстрируется, что для величин $\lambda(t)$ и $C(t)$ эффективно может использоваться их свойство аддитивности: показано образование суммарного потока $F1+F2$ как непрерывного потока с дискретно-непрерывными изменениями интенсивности.

Для импульсного потока вместо величины $\lambda(t)$ на рис. 4 используется величина $q(t)$, которая показывает количество субстрата, приходящее на каждую зафиксированную в потоке порцию. Величина $C(t)$ в случае импульсного потока определяется путем суммирования значений $q(t)$, наблюдаемых на интервале $[0, t]$. Следует заметить, что распространенное понятие «дискретный поток» без дополнительных пояснений не может быть однозначно интерпретировано при работе с моделями логистических систем.

Для всех вышеприведенных типов потоков легко могут быть найдены примеры их реализации в логистических системах. Свойства непрерывных потоков практически в чистом виде проявляются при транспортировке жидкостей, газов и сыпучих грузов. В случае штучных грузов эти свойства используются в том случае, когда объекты образуют массовые потоки, т.е. при их изучении интерес представляет не поведение отдельных объектов, а количество объектов, наблюдаемых в потоке в единицу времени. Типично импульсными являются потоки в транспортной или складской логистике, когда каждое событие означает отгрузку или получение партии товара определенного размера.

ТРАДИЦИОННЫЕ СПОСОБЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ПОТОВОКОВЫХ СИСТЕМАХ ЛОГИСТИКИ

Имитационное моделирование процессов в производственных и логистических системах принято делить на непрерывное и дискретное. Непрерывное моделирование применяется, как правило, в форме моделей системной динамики по Форрестеру [2]. Дискретное моделирование чаще называют дискретно-событийным (discrete event simulation) [3]. Модели системной динамики создают с помощью давно присутствующих на рынке программных пакетов DYNAMO, iThink/

STELLA, Powersim, Vensim или с помощью соответствующего раздела относительно нового пакета AnyLogic. Подавляющее число дискретно-событийных моделей создают с помощью пакетов AnyLogic, Arena, AutoMod, Enterprise Dynamics, ExtendSim, FlexSim, Plant Simulation, ProModel, QUEST и Simul8. Хотя в моделях системной динамики, в принципе, можно отображать все три вида вышеопределенных потоков, модели этого типа крайне редко применяются для исследования потоковых систем на производстве и в логистике. Причины этому — высокий уровень абстракции моделей и низкая детализация отображения исследуемых систем, явно недостаточная для решения многих практических задач. В противовес моделям системной динамики в мире ежегодно разрабатываются тысячи дискретно-событийных моделей, с помощью которых успешно решаются задачи проектирования и модернизации производственных и логистических систем. В моделях этого типа все потоки представлены как импульсные, в которых объем каждой порции (амплитуда импульса) может принимать любое числовое значение.

Хотя с помощью дискретно-событийных моделей можно отобразить практически любой реальный процесс (например, в складской или транспортной системе), принципиальное преимущество данного типа моделей (высокая степень детализации отображения системы-оригинала) часто превращается в недостаток: ввиду необходимости отображать в модели каждый конкретный объект (средство транспорта, единицу груза, ячейку хранения на складе, рабочего и т.п.) долгим и затратным становится процесс подготовки данных для модели, равно как и процесс ее программной реализации. Кроме того, из-за длительного времени реализации одного прогона модели (секунды или даже минуты) часто оказывается невозможно провести поисковую оптимизацию модели, в ходе которой, как правило, нужно выполнить тысячи таких прогонов.

МЕЗОСКОПИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА БАЗЕ ПАРАДИГМЫ DISCRETE RATE

С точки зрения прикладного моделирования производственных и логистических систем непрерывные модели системной динамики можно называть макроскопическими моделями, так как модели этого класса создаются, как правило, в форме обобщенных абстрактных моделей, предназначенных для исследования преимущественно бизнес-процессов, а не конкретных материальных потоков в логистике. Обычные дискретно-событийные модели можно называть микроскопическими моделями, так как в них отображаются изме-



нения состояния множества отдельных материальных (информационных, финансовых) объектов. В [4–6] определяется класс так называемых мезоскопических моделей, которые по уровню детализации отображения исследуемых процессов находятся между определенными ранее двумя классами моделей. Модели этого класса основаны на использовании как непрерывных потоков с дискретными изменениями интенсивности (поток F2 на рис. 3), так и импульсных потоков (рис. 4). Ориентация на непрерывные потоки с дискретными изменениями интенсивности (с кусочно-постоянными интенсивностями) имеет принципиальное значение для данного класса моделей, так как кумулятивные потоки и уровни запасов изменяются при этих условиях только как кусочно-линейные функции. Как и в моделях, основанных на идее кусочно-линейных агрегатов [7], появляется возможность прогнозировать моменты времени, когда переменные состояния модели, представленные такими кусочно-линейными функциями, будут достигать заданных критических значений. Иначе говоря, появляется возможность планировать события (как это делается в дискретно-событийных моделях) для непрерывных процессов, характеристики которых не изменяются между этими событиями.

В [4–6] поясняются логистические принципы мезоскопического моделирования потоковых процессов и описываются два основных компонента структуры мезоскопических моделей: многоканальный бункер (накопитель, воронка) и элемент задержки потока. Методологические преимущества мезоскопического подхода проявляются уже на этапе разработки концептуальных моделей, так как разработчик модели оперирует со значительно агрегированными (по сравнению с дискретно-событийными моделями) характеристиками ресурсов

и обрабатываемых потоков. Мезоскопические модели получаются не только компактнее и прозрачнее дискретно-событийных, но и значительно быстрее обрабатываются на компьютере, так как число моделируемых событий может быть сокращено на несколько порядков. К тому же они, как правило, оказываются быстрее и точнее непрерывных моделей, поскольку устраняются все негативные эффекты, связанные с использованием конечного шага времени t для представления процессов в модели.

Понятие Discrete Rate было введено для обозначения непрерывных потоков с кусочно-постоянными интенсивностями (см. поток F2 на рис. 3) разработчиками пакета имитационного моделирования ExtendSim [8–10]. Именно в этом пакете (и только в нем) парадигма Discrete Rate определяется как третья фундаментальная парадигма наряду с обычными парадигмами Continuous (непрерывное моделирование) и Discrete Event (дискретно-событийное моделирование). Для моделей, обрабатываемых в режиме Discrete Rate, создан специальный механизм отсчета модельного времени, который принципиально отличается от механизмов, применяемых в моделях типа Continuous или Discrete Event.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Точное определение типов потоков при моделировании производственных и логистических систем является ключевым моментом этапа разработки концептуальной модели, так как на нем основывается выбор одной из трех фундаментальных парадигм имитационного моделирования: Continuous, Discrete Event или Discrete Rate. Парадигма Discrete Rate совсем недавно была введена в состав коммерческого пакета имитационного моделирования ExtendSim, и с ней практически еще не знакомы специалисты, профессионально занимающиеся разработкой имитационных моделей (как правило, дискретно-событийных) для решения задач в области производства и логистики.

Условием применения концепции Discrete Rate для эффективной обработки модели на компьютере является использование мезоскопического подхода уже на этапе разработки концептуальной модели. Разработка мезоскопической модели требует выполнения шагов по абстрагированию (агрегированию) исследуемой системы, которые не характерны для дискретно-событийного моделирования, но похожи на шаги, которые исследователь делает при разработке моделей системной динамики. В отличие от подхода системной динамики вводимые при мезоскопическом подходе абстракции носят скорее экономико-

логистический, чем математический характер, поэтому они легко воспринимаются и осваиваются практичными специалистами, занимающимися планированием и анализом производственных и логистических систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Толуев Ю.И. Имитационное моделирование логистических сетей // Логистика и управление сетями поставок. — 2008. — № 2. — С. 53–63.
2. Sterman J.D. Business Dynamics: System Thinking and Modeling for a Complex World. — Irwin, McGraw-Hill, Boston, 2000.
3. Лоу А.М., Кельтон В.Д. Имитационное моделирование. — СПб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2004.
4. Schenk M., Tolujew J., Reggelin T. Mesoscopic Modeling and Simulation of Logistics Networks // Preprints of the 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing. — Moscow, Russia, June 3–5, 2009. — P. 586–591.
5. Schenk M., Tolujew J., Reggelin T. A Mesoscopic Approach to the Simulation of Logistics Systems // Advanced Manufacturing and Sustainable Logistics, W. Dangelmaier et al. (eds.) — Springer Berlin Heidelberg, 2010. — P. 15–25.
6. Толуев Ю.И., Змановская Т.П. Метод численного моделирования процессов в потоковых системах логистики // Логистика и управление цепями поставок. — 2011. — № 2. — С. 81–90.
7. Бусленко Н.П., Калашников В.В., Коваленко И.Н. Лекции по теории сложных систем. — М.: Сов. радио, 1973.
8. Damiron C., Nastasi A. Discrete Rate Simulation Using Linear Programming // Proceedings of the 2008 Winter Simulation, IEEE, Inc., Piscataway, NY. — 2008. — P. 740–749.
9. Krahl D. ExtendSim Advanced Technology: Discrete Rate Simulation // Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference, IEEE, Inc., Piscataway, NY. — 2009. — P. 333–338.
10. Terlunen S., Horstkemper D., Hellingrath B. Adaption of the discrete rate-based simulation paradigm for tactical supply chain decisions // Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference, IEEE, Inc., Piscataway, NY. — 2014. — P. 2060–2071.



Connecting Global Competence

В нужном месте в нужное время: На ведущей международной выставке логистики, мобильности, ИТ и управления цепями поставок Вас ожидают более 2000 участников из 63 стран. Вы не должны это пропустить!

КУПИТЕ БИЛЕТ ПРЯМО СЕЙЧАС – ВСЕГО ПАРА КЛИКОВ:

»» www.transportlogistic.de/tickets/en



**LOGISTICS
MAKES IT
HAPPEN**



5–8 МАЯ 2015
MESSE MÜNCHEN,
ГЕРМАНИЯ

ООО «Мессе Мюнхен Консалтинг» • info@messe-muenchen.ru • Тел. +7 495 697 16 70/72



THE LEADING EXHIBITION