

КУСОЧНО-ЛИНЕЙНЫЙ АГРЕГАТ КАК ПАРАДИГМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ПОТОКОВЫХ СИСТЕМАХ ЛОГИСТИКИ

Ю.И. Толуев (Магдебург, Рига)

Введение

Быстродействие любой имитационной модели определяется объемом вычислений, которые надо выполнить в течение заданного времени прогона. При использовании парадигмы «дискретные события» для прямого отображения поведения реальных объектов в логистических системах число обрабатываемых событий, например, при моделировании 8-часовой рабочей смены, может достигать десятков тысяч. Модели, основанные на принципах системной динамики, при достаточно больших значениях «дельта Т» работают, конечно, значительно быстрее, но они, в принципе, не применяются для анализа систем обработки материальных потоков, например, в течение 8-часовой рабочей смены. Понятие агентного моделирования как парадигмы относится только к особенностям концептуальной модели, так как в смысле способа отсчёта времени такие модели являются дискретно-событийными.

В течение уже почти 40 лет во многих университетских курсах, связанных с имитационным моделированием, присутствуют разделы, посвящённые так называемым агрегативным системам, среди которых выделяется класс кусочно-линейных агрегатов (КЛА) [1]. Практическая польза этой парадигмы моделирования осмыслена на сегодняшний день не в полной мере, так как напрямую она не поддерживалась ни одним коммерческим пакетом имитационного моделирования и попытки реализовать её в моделях приводили к необходимости писать программный код (см., например, [2]). Однако в последние годы появились, по крайней мере, два пакета, в которых имеются специальные библиотеки объектов, позволяющие без каких-либо «ухищрений» строить модели на основе парадигмы КЛА. Основное потенциальное преимущество данной парадигмы – возможность построения моделей процессов обработки массовых потоков в системах логистики (потоков грузов, транспортных средств, пассажиров и т.п.), которые могут работать на порядок быстрее традиционных дискретно-событийных или агентных моделей.

В качестве исторической справки следует заметить, что «отцом» теории КЛА является не Н.П. Бусленко, а И.Н. Коваленко, который является также соавтором книги [1]. В книге отца и сына Бусленко [3] есть фрагмент: «Такая модель, носящая замысловатое название – «кусочно-линейный агрегат», создана киевским математиком, членом-корреспондентом АН УССР И. Коваленко. Около десяти лет трудился ученый над обобщением процесса функционирования элемента».

Сущность парадигмы моделирования «дискретные интенсивности»

Полная теория КЛА, когда она излагается в традиционной абстрактно-математической форме, представляется достаточно сложной [4], и в конкретной модели все аспекты этой теории, конечно, не могут найти своё отражение. Так как главной особенностью компьютерной реализации КЛА-моделей является планирование дискретных событий для развивающихся по линейному закону непрерывных процессов, соответствующую парадигму моделирования можно называть «дискретные интенсивности». В таких моделях возрастание или убывание по линейному закону фактически демонстрируют только два типа переменных: кумулятивное (накопленное) количество вещества в потоке с постоянной интенсивностью и уровень запаса в накопителе, входные и выходные потоки которого не изменяются в течение определённого периода времени, т.е. также сохраняют значения своих интенсивностей.

Рис. 1 иллюстрирует принцип планирования событий для непрерывных процессов. При этом реализуется одна конкретная легенда, предусматривающая планирование и

реализацию пяти событий вокруг главного элемента моделей данного класса – накопителя. Разумеется, здесь сохраняется аналогия с моделями системной динамики, но метод «дельта Т» для отсчёта времени модели не используется в принципе.

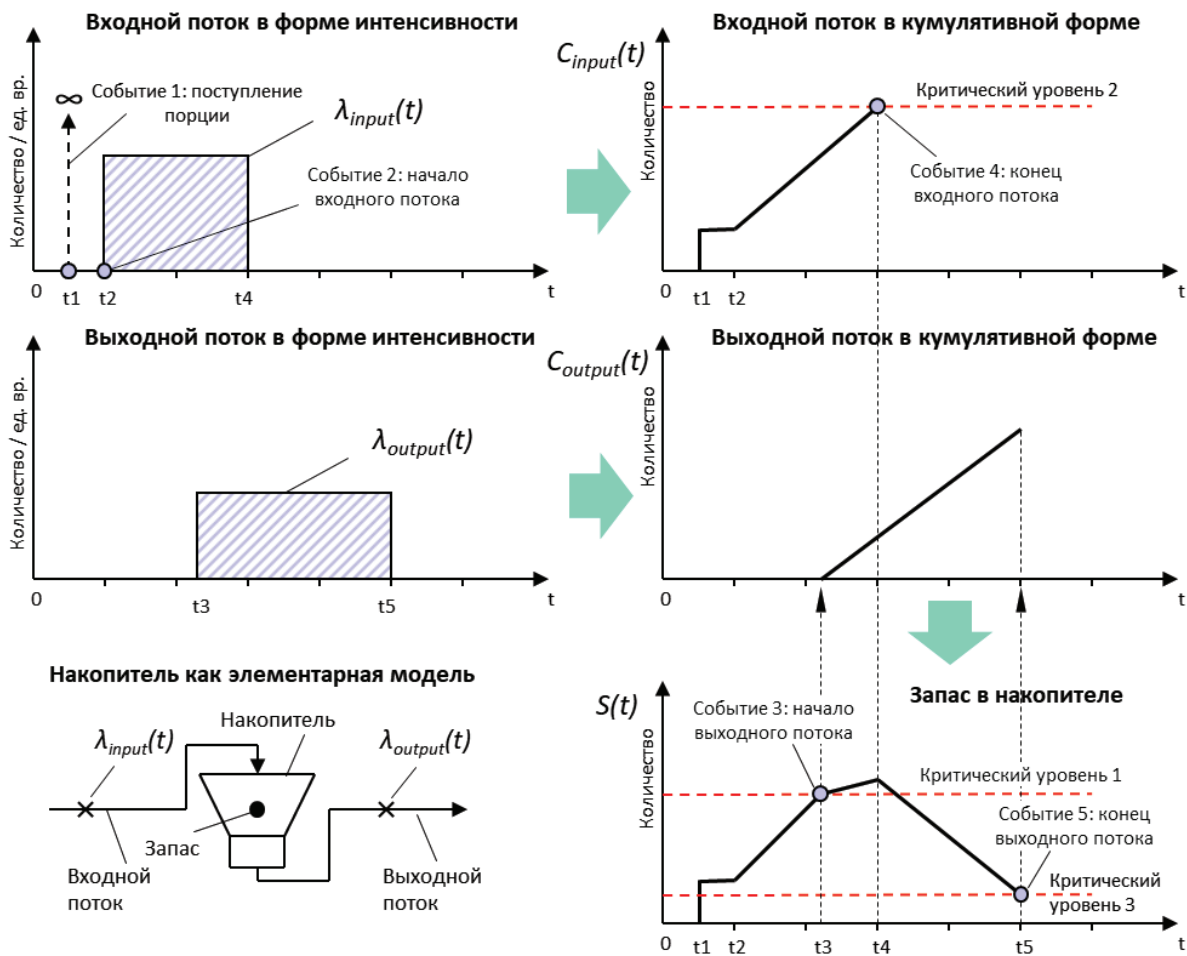


Рис. 1. Принцип планирования событий для непрерывных процессов

Событие 1. Данное событие является внешним, так как не зависит от состояния элементов модели. В момент времени $t1$ в накопитель одновременно поступает порция вещества. Понятие интенсивности потока (количество вещества в единицу времени) для такого импульсного события не существует.

Событие 2. Данное событие также является внешним и означает, что в момент времени $t2$ начинается поступление вещества во входном потоке накопителя с постоянной интенсивностью $\lambda_{input}(t)$. В результате интегрирования (накопления) этого потока появляется линейно возрастающая часть графика $C_{input}(t)$.

Событие 3. В системе был задан «Критический уровень 1», смысл которого таков: если объём вещества в накопителе $S(t)$ поднимается до этого уровня, то в момент времени $t3$ надо открыть «выходной вентиль» и получить выходной поток накопителя с интенсивностью $\lambda_{output}(t)$. Численное значение времени для момента $t3$ вычисляется аналитически в момент свершения предыдущего события, т.е. в момент времени $t2$, что и означает планирование события для непрерывного процесса.

Событие 4. В системе был задан «Критический уровень 2», смысл которого таков: если кумулятивный объём вещества во входном потоке $C_{input}(t)$ достигает этого уровня, то в момент времени $t4$ надо закрыть «входной вентиль» и прервать поток $\lambda_{input}(t)$. Численное значение времени для момента $t4$ также вычисляется аналитически в момент свершения предыдущего события, т.е. в момент времени $t3$.

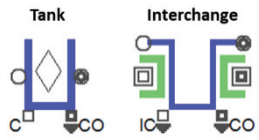
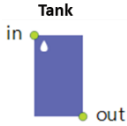
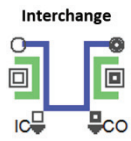
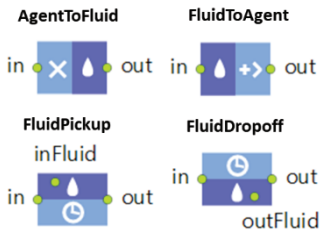
Событие 5. В системе был задан «Критический уровень 3», смысл которого таков: если объём вещества в накопителе $S(t)$ снижается до этого уровня, то в момент времени $t5$ надо закрыть «выходной вентиль» и прервать поток $\lambda_{output}(t)$. Численное значение времени для момента $t5$ вычисляется аналитически в момент свершения предыдущего события, т.е. в момент времени $t4$.

Такой принцип планирования событий впервые был реализован программно в 2007 году в пакете ExtendSim версии 7 под названием Discrete Rate (дискретная интенсивность) [5]. В 2015 году в пакете AnyLogic появилась библиотека моделирования потоков (Fluid Library), которая также позволяет в полной мере реализовать парадигму «дискретные интенсивности». Разработчики обоих продуктов ориентировались, прежде всего, на моделирование процессов перемещения и хранения жидкостей, насыпных грузов или больших количеств отдельных объектов, например, бутылок на линии розлива. Однако путем введения понятия мезоскопического моделирования удалось показать большие преимущества данной парадигмы при разработке имитационных моделей любых потоковых систем в логистике [6, 7, 8].

В первой части табл. 1 показаны блоки обоих пакетов моделирования, при настройке которых можно описать условия наступления всех типов событий, суть которых есть достижение заданного уровня вещества в накопителе при изменении этого уровня в направлении снизу вверх или сверху вниз. При свершении такого события часто выполняется специальная программа, написанная разработчиком модели. В пакете ExtendSim для задания «критических уровней» используется механизм Indicators, а в пакете AnyLogic – механизм программирования действий.

Таблица 1

Блоки пакетов моделирования, поддерживающие реализацию парадигмы «дискретные интенсивности»

Пакет ExtendSim	Пакет AnyLogic
Блоки, на базе которых осуществляется планирование событий	
	
Блоки, в которых осуществляется связь между непрерывными и дискретными процессами	
	

Построение гибридных моделей

Практика разработки потоковых моделей в логистике свидетельствует о том, что важной является возможность изменять тип потока. Например, прибытие автомобиля с паллетами есть дискретное событие, которое порождает непрерывный поток выгружаемых паллет. И наоборот: после окончания погрузки автомобиля, которая моделируется как непрерывный процесс, появляется событие «конец погрузки» и автомобиль продолжает своё движение в

модели как объект дискретного потока. На рис. 2 показан пример модели пункта разгрузки автомобилей, реализованной в пакете ExtendSim. Показанный в табл. 1 блок Interchange на входе принимает дискретный объект (автомобиль), а на своём главном выходе создаёт непрерывный поток с заданной интенсивностью, измеряемой как число принимаемых паллет в минуту. По окончании процесса разгрузки объект-автомобиль покидает блок Interchange через второй (дискретный) выход этого блока.

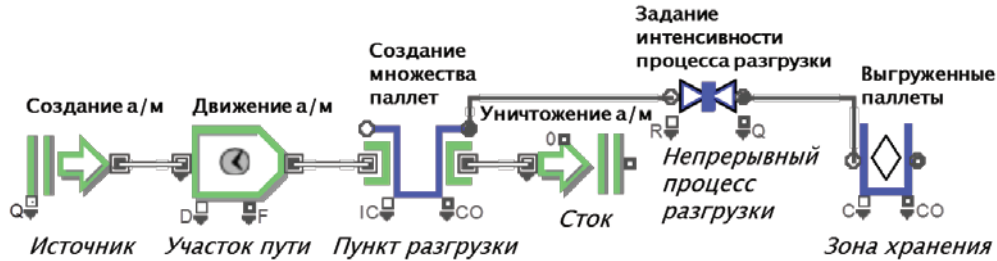


Рис. 2. Пример взаимодействия дискретного и непрерывного потоков

По такому же принципу построена более сложная модель, показанная на рис. 3. Здесь имеются три места для разгрузки автомобилей на рампе, после чего потоки паллет направляются в четыре зоны хранения на складе. На этапе контроля и предварительной сортировки из непрерывного потока паллет выделяются дискретные объекты, которые обрабатываются соответствующими блоками, работающими на основании парадигмы «дискретные события».

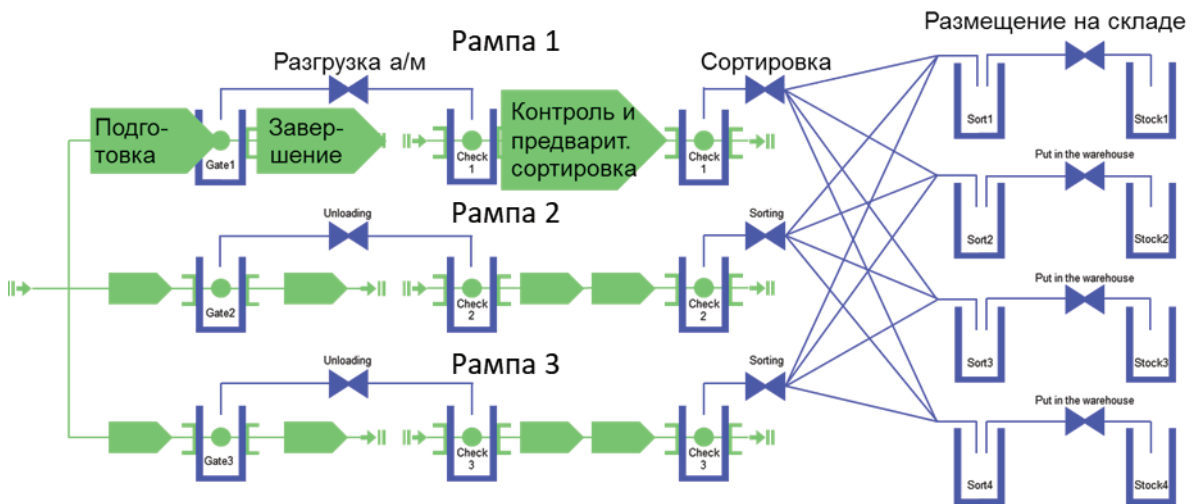


Рис. 3. Гибридная модель, построенная с использованием парадигм «дискретные события» и «дискретные интенсивности»

Следует заметить, что пакет AnyLogic предоставляет очень широкий диапазон возможностей для создания комбинированных (гибридных) моделей, использующих обе рассматриваемые парадигмы, разумеется, с использованием философии агентного моделирования. Показанные во второй части таблицы 1 блоки выполняют следующие действия:

AgentToFluid – блок преобразует агентов (дискретные элементы) в поток. Каждый агент содержит определенный объём жидкости или объёмного вещества; как только агент прибывает на вход блока, поток сразу начинает своё движение. После завершения разгрузки агент уничтожается;

FluidToAgent – блок может принимать поток вещества любой скорости и создавать «загруженных» агентов; когда агент создается, то его вещество удаляется из блока и начинает набираться новая партия;

FluidPickup – агенты, проходя через блок, забирают жидкость или сыпучее вещество; каждый агент должен забрать определенный объем вещества, поэтому по прибытии агента в блок последний начинает накапливать вещество;

FluidDropoff – агенты, проходя через блок, оставляют вещество; блок задерживает агента до тех пор, пока не сольётся всё вещество, после чего выпускает агента через порт выхода, чтобы тот продолжил выполнять свою задачу.

Заключение

Упомянутая в начале статьи проблема повышения быстродействия имитационных моделей является очень существенной, так как исследование сложных моделей, даже при условии составления плана имитационных экспериментов вручную, приводит к необходимости проводить сотни прогонов модели, а в случае реализации параллельных прогонов (с разными потоками случайных чисел) их общее число легко может превысить тысячу. Известно также, что при подключении к модели популярных на сегодняшний день метаэвристических алгоритмов (Genetic Algorithms, Ant Colony Optimization, Simulated Annealing, Tabu Search и др.) для автоматического поиска оптимальных комбинаций настраиваемых параметров модели число прогонов легко может превысить порог в 10 тысяч, даже если число параметров не превышает десяти.

Родственная идее кусочно-линейного агрегата сравнительно новая парадигма построения и обработки моделей с названием «дискретные интенсивности» требует дальнейших экспериментальных исследований, а библиотека моделирования потоков пакета AnyLogic предоставляет для этого самые широкие возможности.

Литература

1. **Бусленко Н.П., Калашников В.В., Коваленко И.Н.** Лекции по теории сложных систем. М.: Сов. радио, 1973.
2. **Молев А.А., Зайцев И.В.** Применение агрегативного подхода к моделированию элементов радиоэлектронных систем при проведении опытно-теоретических исследований их эффективности // Имитационное моделирование. Теория и практика: Сборник докладов второй всероссийской научно-практической конференции ИММОД-2005. Том 1. СПб.: ЦНИИТС. 2005. С. 143–147.
3. **Бусленко Н.П., Бусленко В.Н.** Беседы о поколениях ЭВМ. М.: Молодая гвардия, 1977.
4. **Лычкина Н.Н.** Имитационное моделирование экономических процессов: Учебное пособие. М.: ИНФРА-М, 2014.
5. **Krahl D.** ExtendSim Advanced Technology: Discrete Rate Simulation // Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference. P. 333–338.
6. **Reggelin T., Tolujew J.** A Mesoscopic Approach to Modeling and Simulation of Logistics Processes // Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference. P. 1513–1523.
7. **Толуев Ю.И., Змановская Т.П.** Метод численного моделирования процессов в потоковых системах логистики // Логистика и управление цепями поставок. 2011. № 3. С. 81–90.
8. **Толуев Ю., Реггелин Т.** Концептуальные модели процессов в потоковых системах логистики // Логистика. 2015. № 1. С. 62–67.