

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ В ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЯХ МОРСКИХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. Г. Топаж, О. В. Таровик, А. С. Реуцкий (Санкт-Петербург)

Введение

Метод математического моделирования для комплексного анализа вновь создаваемых или существующих технических систем уже давно перестал считаться экзотикой. Подобно тому, как детальная предпроектная проработка возможного поведения конкретного объекта техники (устройства, механизма, судна и т.д.) в процессе его будущей эксплуатации проводится сначала на его цифровой модели (цифровом двойнике), так и основные эксплуатационные характеристики сложных транспортно-технологических систем могут и должны быть предварительно исследованы на соответствующих имитационных моделях. Ведь стоимость построения и анализа компьютерных имитационных моделей ничтожно мала по сравнению со стоимостью самой морской, портовой или шельфовой инфраструктуры и возможными потерями от возможных ошибок при ее проектировании.

Результатом прогона имитационной модели в течение конечного периода модельного времени являются конкретные интегральные характеристики системы, и, следовательно, можно ставить и решать обратную задачу: оптимизировать эти характеристики путем варьирования внутренних определяющих параметров системы. Типичные методики комбинирования методов алгебраической оптимизации и имитационного моделирования рассмотрены во многих теоретических работах (Fu, 2002; Vachelet, Yon, 2007), где приведены различные схемы взаимодействия этих процедур. Наиболее часто встречающимся прецедентом является случай, когда оптимизация представляет собой внешний контур над динамическим имитационным движком, то есть оптимальные значения параметров исследуемой системы ищутся в ходе последовательных итераций (прогонов модели) в рамках оптимизационного вычислительного эксперимента.

Традиционно на уровне стратегического или проектного планирования морских транспортных систем выделяются две задачи, которые можно успешно решать с помощью интеграции подходов математического моделирования и алгебраической оптимизации (Fagerholt, 2010). Первая из них – так называемый анализ контрактов (Contract analysis problem), то есть определение того, какие обязательства по перевозке каких объемов груза в какие сроки может взять на себя оператор или судовладелец. Еще одна типичная задача проектного уровня – определение состава и структуры флота (Fleet size and mix problem), а более широко – определение необходимых качественных и количественных характеристик всей транспортной инфраструктуры, потребных для гарантированного обеспечения заданного объема грузопотока.

Однако при создании и последующей параметрической оптимизации имитационной дискретно-событийной или агентно-ориентированной модели сложной транспортно-технологической системы часто возникает необходимость адекватного учета и «интеллектуальных» аспектов ее будущего функционирования на уровне оперативного управления. Действительно, реальная эксплуатация любого многофункционального объекта (порта, контейнерного терминала, нефтедобывающей платформы) предполагает наличие службы локальной диспетчеризации для разрешения возникающих инцидентов различного характера и противоречивых интересов субъектов разного уровня организации. Самым простым аспектом такой диспетчеризации выступает определение очередности обслуживания всех текущих или

прогнозируемых на коротком временном интервале заявок на обслуживание. Безусловно, алгоритмы и компьютеризированные системы автоматизации календарного планирования работ и/или распределения ограниченных ресурсов относятся к другому временному уровню управления, нежели предпроектный анализ изучаемой системы. Однако пренебрежение этими аспектами в имитационной модели, то есть отсутствие в ней некоего «интеллектуального» модуля, отвечающего за оперативное планирование и перепланирование текущей загрузки в зависимости от складывающейся ситуации, может повлечь существенную недооценку интегральных показателей эффективности и пропускной способности исследуемой системы. Часто для разрешения этого противоречия используется упрощенный подход, связанный с заданием в логике модели неких жестких правил исполнения последовательности заявок на обслуживание («первым пришел – первым ушел» и т.п.). Практика построения и анализа моделей для различных транспортно-технологических систем (их краткий перечень приведен в конце статьи), показывает, что любые подобные упрощения часто оказываются внутренне противоречивыми и не позволяют получить не только адекватные численные оценки эффективности конкретной конфигурации системы, но даже сделать обоснованный вывод о том, какая из сравниваемых конфигураций предпочтительнее.

При этом единственным решением, гарантирующим получение адекватных результатов, становится реализация элементов интеллектуального оперативного управления непосредственно внутри логики имитационной модели. Как правило, математическим аппаратом такой «внутренней» оптимизации выступают алгоритмы и методы комбинаторной оптимизации и математического программирования. Таким образом, структурная схема взаимодействия процедур имитационного моделирования и оптимизации на уровне проектного анализа транспортных систем приобретает трехуровневый характер («Алгебраическая оптимизация» → «Имитационная модель» → «Комбинаторное оперативное планирование»).

Материалы и методы

Для наглядной демонстрации важности учета элементов оперативного планирования в имитационных моделях, служащих для проектного анализа и оптимизации транспортных систем, нами была построена и исследована в среде имитационного моделирования AnyLogic, пожалуй, самая элементарная из возможных дискретно-событийная модель системы обслуживания альтернативных заявок с разделяемым перемещаемым ресурсом (рис. 1). Заявки (например, транспортные суда) поступают с заданной интенсивностью (пуассоновский поток) на обслуживание во входную область. В зависимости от типа пришедшей заявки (моделируется случайным образом) она должна быть обслужена (погрузка судна) на одном из двух центров обработки, отвечающих, например, местонахождению хранилища соответствующего груза. При этом имеется всего один ресурс грузообработки (погрузчик или плавучий кран), и для обеспечения возможности обслуживания судов в разных локациях требуется время от времени перемещать его между центрами обработки. Требуется оценить пропускную способность системы в зависимости от выбранной политики интеллектуального управления и планирования работы ресурса.

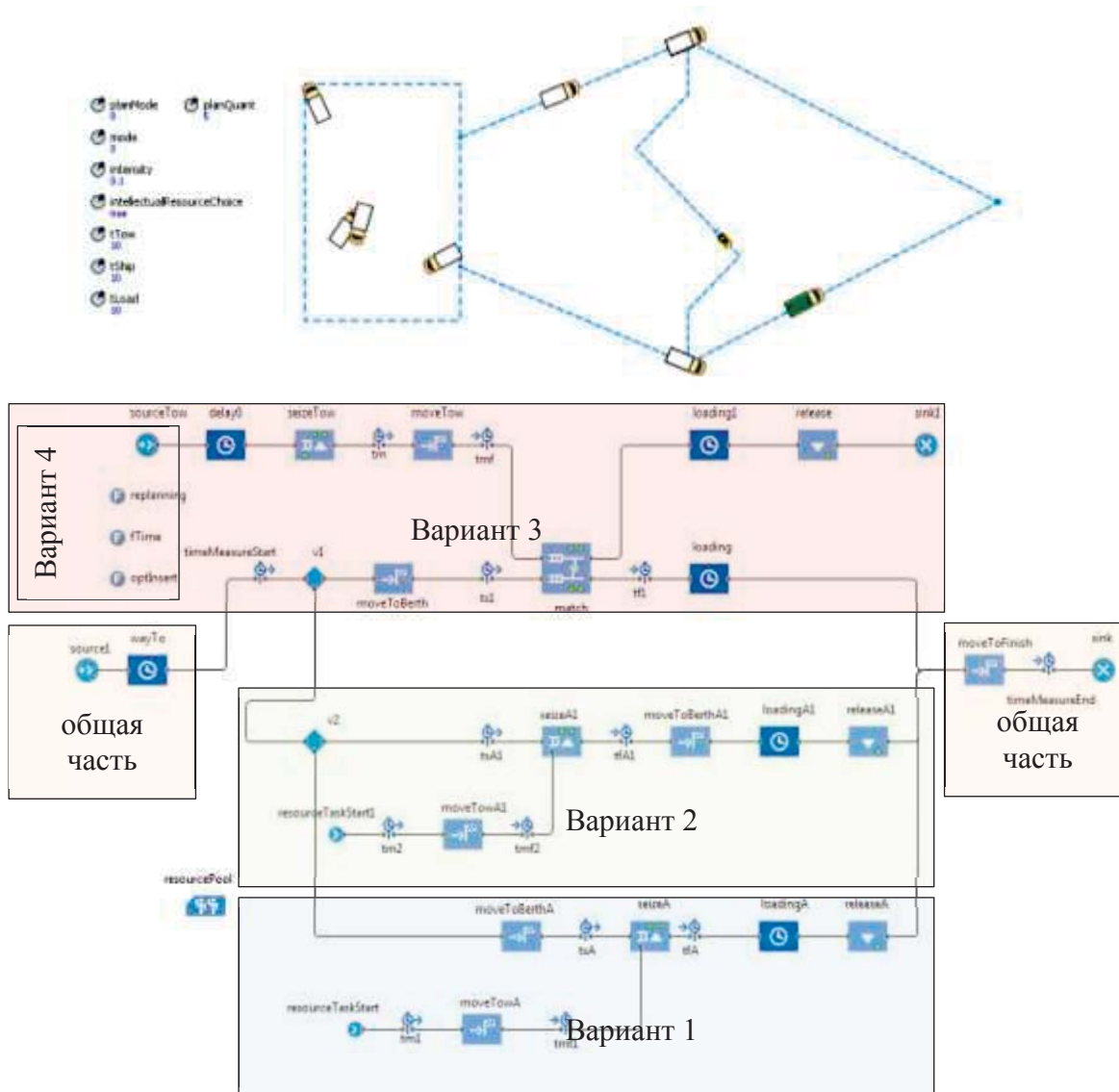


Рис. 1. Демонстрационная дискретно-событийная модель обработки заявок с разделяемым ресурсом

Процессная диаграмма исполнения заявок содержит в себе несколько альтернативных веток, соответствующих различным изучаемым режимам. В частности, были исследованы следующие варианты:

1. Последовательное исполнение пришедших заявок в порядке поступления. Запрос свободного ресурса осуществляется только после достижения заявкой соответствующего центра обработки (заявка ждет ресурс).

2. Последовательное исполнение пришедших заявок в порядке поступления. Запрос свободного ресурса осуществляется сразу при появлении заявки в стартовой точке, но она начинает движение к центру обработки только после того, как обещанный ей ресурс достигает точки обработки (ресурс ждет заявку).

3. Последовательное исполнение пришедших заявок в порядке поступления. Запрос свободного ресурса осуществляется сразу при появлении заявки в стартовой точке, при этом движение к центру обработки заявки и ресурса происходит независимо (упреждающий запрос ресурса).

4. Использование планирования для упорядочивания последовательности исполнения заявок. Как и для всех ранее рассмотренных случаев, вновь поступившие

заявки задерживаются в стартовой области на заданный промежуток времени (этим фактом эмулируется заблаговременность прогноза о поступлении очередного судна на обработку). И поступление каждой новой заявки инициирует перепланирование, то есть переупорядочение всех заявок, находящихся в «пуле ожидания», то есть не начавших движение к центру обработки. При этом, в свою очередь, реализовано несколько вариантов логики такого планирования:

- а) план исполнения формируется по принципу FIFO (первым пришел – первым ушел); можно показать, что при этом логика системы в точности отвечает варианту 3;
- б) план исполнения формируется по принципу LIFO (последним пришел – первым ушел);
- в) план исполнения формируется по случайному принципу (случайное переупорядочивание последовательности операций);
- г) план исполнения вычисляется в результате процедуры строгой оптимизации; для рассмотренной очень простой модели эту комбинаторную оптимизацию оказывается возможным и эффективным осуществить методом полного перебора всех возможных последовательностей текущего пула отложенных заявок; в качестве критерия оптимальности выбирается момент времени окончания исполнения всех имеющихся в «пуле ожидания» заявок;
- д) план исполнения вычисляется в результате процедуры строгой оптимизации, но, в отличие от рассмотренных выше вариантов, процедура перепланирования «пула ожидания» запускается не с каждой вновь поступающей заявкой, а с некой дискретностью (в рассматриваемом случае только для каждой пятой из них).

Сравнение всех рассмотренных вариантов производилось в рамках серии статистических экспериментов с воспроизводимыми прогонами на временном горизонте 10000 часов модельного времени. Длительности переходов всех заявок от стартовой точки до обоих центров обработки и перемещения ресурса между центрами как и длительность погрузки были выбраны равными 10 часам. Интенсивность случайного процесса поступления новых заявок – 0.1 заявка в час. В качестве показателей эффективности системы выбирались процент обработанных заявок за временной горизонт моделирования и статистические показатели распределения времени ожидания обслуживания единичной заявки (в статистике учитывались только те заявки, обработка которых закончилась за период моделирования).

Результаты

Выборочные результаты серии проведенных компьютерных экспериментов приведены в таблице 1. Нетрудно заметить, что если минимальная «интеллектуализация» процесса исполнения заявок (авансированный запрос ресурса с параллельным движением его и заявки к центру обработки) дает сравнительно небольшой выигрыш в интегральных показателях пропускной способности по сравнению с «нулевым» вариантом, то подключение эмулятора системы оперативного планирования позволяет качественно повысить эффективность системы. Причем существенное повышение эффективности наблюдается даже при сравнительно низкой частоте перепланирования.

Таблица 1. Показатели эффективности системы обслуживания для различных конфигураций.

Вариант конфигурации	Показатели эффективности		
	Процент обслуженных заявок	Среднее время ожидания обслуживания (час)	Максимальное время ожидания обслуживания (час)
1	68.05	1476	3130
2	40.85	2849	5823
3	68.25	1419	3120
a)	68.25	1419	3120
b)	27.75	1.3	49
c)	64.55	1347	8870
d)	94.46	216	1635
e)	92.61	376	2405

Заключение

Безусловно, рассмотренный выше пример носит чисто иллюстративный характер. Он, тем не менее, наглядно демонстрирует потенциальную важность наличия в имитационных моделях реальных транспортно-технологических систем модулей и алгоритмов, описывающих интеллектуальные процессы управления ими в ходе фактической эксплуатации. В практике исследования подобных систем методами динамического имитационного моделирования авторам неоднократно приходилось сталкиваться с упомянутой проблемой и искать адекватные и экономичные способы ее разрешения. Ниже перечислены некоторые подобные прецеденты.

Имитационные модели работы и снабжения нефтедобывающих платформ и нефтеперегрузочных комплексов (Таровик и др., 2017). В качестве основного аспекта оперативного планирования здесь выступает постоянное нахождение баланса между обслуживанием транспортных судов основного производственного контура и конкурирующих с ними за причальные места судов снабжения. А определяющими факторами при принятии оперативных решений выступают текущие уровни наполненности хранилищ различных грузов и специфичные для судов разных типов «окна погоды».

Модели арктических транспортных морских коридоров. Существенным аспектом уровня оперативного планирования, требующим адекватного учета в имитационной модели, здесь выступает проблема оптимальной маршрутизации судов ледового плавания в существенно нестационарных условиях окружающей среды (Торај et al., 2019).

Модели контейнерных терминалов. Наиболее значимый аспект оперативного планирования и управления в данном случае связан с оптимальным размещением и штабелированием контейнеров на временных площадках хранения для обеспечения минимального количества операций по их перемещению и перегрузке (Нужнов, Юрко, 2014).

Имитационные модели работы порта. В данном случае блок эмуляции оперативного планирования портовых операций с учетом ограниченности стационарных и движущихся ресурсов (причалы, буксиры, хранилища, бункеровщики, средства грузообработки и т.д.) выступает чуть ли не главным элементом имитационной модели. Одним из предлагаемых способов его реализации служит

сведение задачи предметной области к формальной математической постановке задачи удовлетворения целочисленных ограничений и ее решение с использованием специализированных внешних решателей и движков.

Литература

1. **Bachelet B., Yon L.** Model enhancement: improving theoretical optimization with simulation. *Simulation Modelling Practice and Theory*. (15). 2007. P. 703-715.
2. **Fu M.C.** Optimization for simulation: theory vs. practice. *INFORMS Journal in Computing* 14(3), 2002. P. 192-215.
3. **Топаж А.Г., Таровик О.В., Бакhareв А.А., Кондратенко А.А.** Optimal ice routing of a ship with icebreaker assistance. *Applied Ocean Research*. No 86. 2019. pp. 177-187.
4. **Нужнов Е.В., Юрко Д.С.** Возможности и средства динамического планирования и перегрузки контейнеров на смешанных транзитных терминалах // Труды конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям IS&IT'14. М., 2014. Т. 2. С. 49-56
5. **Таровик О.В., Топаж А.Г., Крестьянцев А.Б. Кондратенко А.А., Зайкин Д.А.** Комплексная имитационная модель морской транспортно-технологической системы платформы «Приразломная» // Арктика: экология и экономика. № 3 (27). 2017. С. 86-102.