

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОБЛЕМ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ МОРСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ОЧЕРЕДЕЙ

Ю. И. Рыжиков, А. В. Уланов (Санкт-Петербург)

1. Введение

Процессы массового обслуживания имеют богатую теорию (ТМО) и практически необозримый диапазон применений. В частности, Б.В. Гнеденко анализировал с ее помощью пропускную способность портов еще в 1950-х гг. К сферам ее потенциального применения в оборонно-промышленном комплексе и непосредственно на флоте, относятся, в частности,: анализ работы компьютерных сетей и сетей связи; систем ситуационного анализа на боевых информационных постах (например, при моделировании последствий решений, принятых в ходе борьбы за живучесть корабля [1]); разгрузки и погрузки кораблей; процессов радиолокационного сопровождения воздушных и космических целей; проводки ледовых караванов в Арктике и антипиратского сопровождения в южных морях; формирования железнодорожных составов на предпортовых станциях; взлета и посадки самолетов; проведения сборочных операций и процессов предстартовой подготовки изделий; процессов ликвидации аварийных и иных ситуаций, требующих быстрого реагирования (например, пожарных и медицинских).

Сразу же подчеркнем, что задачи указанных типов приходится решать не только при проектировании вновь создаваемых систем и сетей обслуживания (СМО, СеМО), но и *в процессе эксплуатации имеющихся* – при увеличении нагрузки; изменении трудоемкости обработки заявок; выходе из строя, деградации или модернизации техники; снижении квалификации персонала; пересмотре требований к оперативности обработки заявок и т. п.

Подобные задачи можно решать и методами имитационного моделирования. Однако автоматизирующие эти методы системы типа GPSS или AnyLogic лишь претендуют на универсальность, причем границы этих претензий пользователю неизвестны. Неизбежной платой за псевдоуниверсальность является переусложнение рабочей программы, что замедляет и без того немалое время счета (по опыту авторов – аж на два порядка). Названные недостатки снимаются при программировании модели на языках типа Фортран, но отладка таких моделей ввиду сложной логики и взаимной зависимости ветвей алгоритма очень не проста, а время счета остается весьма значительным. Несовершенство датчиков псевдослучайных чисел исключает надежды на неограниченное повышение точности при увеличении числа испытаний, о чем свидетельствует эксперимент автора по определению числа π методом статистических испытаний [2]. Оценка относительных погрешностей вероятностей редких событий при любом разумном числе испытаний без использования малоизвестных специальных технологий [2,3] остается недопустимо большой. Наконец, оптимизация сложных систем по данным имитационного моделирования из-за статистических флуктуаций целевой функции может оказаться фикцией. Эти соображения вынуждают прибегать к имитационному моделированию лишь при отсутствии аналитико-численных альтернатив.

2. Состояние теории очередей и управления запасами

С сожалением приходится констатировать, что *использование* результатов ТМО существенно отстает от уровня развития теории, причем не только в России. Учебная литература освещает в основном марковские (экспоненциальные) СМО, в этом смысле недалеко ушла от первых работ Эрланга и часто содержит элементарные ошибки. Университетские пособия и монографии написаны на недоступном инженеру уровне и (за единичными исключениями – [4]) не содержат никаких признаков численной реализа-

ции излагаемых методов. Извлечение из них для практического использования конечных результатов не решает проблемы: в таких случаях эти результаты выглядят менее убедительными, условия и возможности их применения – недостаточно ясными, а проведение каких-либо полезных аналогий становится невозможным. Публикуемые методы расчета немарковских систем редко позволяют довести результаты до числа, а для многоканальных систем разбросаны по журнальным статьям. Интенсивно публикуемые работы по расчету *сетей обслуживания* ограничиваются классом задач, подпадающих под условия известной теоремы ВСМР, т. е. практически бесполезны.

Еще хуже обстоит дело с методами смыкающейся с ТМО теории запасов, в настоящее время рассматриваемой как составная часть логистики. За последнее десятилетие в России было опубликовано около 100 книг по логистике, математическое содержание которых исчерпывается столетней давности формулой Уилсона для экономического объема заказа [5]. Методы расчета восстанавливаемого ЗИПа, публикуемые главным образом в американском журнале «Naval Research Logistics» в рамках серии

METRIC-проектов эшелонированных систем снабжения (см. их обзор в [5]), опираются на самые примитивные модели теории очередей. Реверсивная логистика (с возможным возвратом части использованных ресурсов на предыдущие этапы производственно-эксплуатационного цикла) и «каннибализация» (раскомплектование части изделий с целью увеличения числа непосредственно пригодных к эксплуатации) обсуждаются лишь на уровне *постановки задачи*.

В общем потенциал экономико-математических теорий, имеющих отношение к рассматриваемой проблеме, используется явно недостаточно. Необходимо соединить на современном уровне теории массового обслуживания (теории очередей), боевой эффективности, управления запасами и внедрить их в процесс обучения будущих инженеров флота; программно реализовать основные этапы расчетных методик.

3. Теоретические основы численных методов теории очередей

Главной особенностью обсуждаемых методов является их ориентация на расчетные схемы, позволяющие «довести результаты до числа». Ключевым элементом является аппроксимация вероятностных распределений *по методу моментов* (замена исходных распределений интервалов между смежными заявками и длительностей обслуживания более удобными для расчетов с сохранением максимально возможного числа моментов этих распределений). В классах фазовых распределений (Эрланга, Кокса и гиперэкспоненциального) допускаются неожиданные даже для многих профессионалов комплекснозначные параметры, что позволяет расширить области применения упомянутых распределений и организовать взаимное тестирование расчетных процедур на пересечении областей их применимости [6]. Используются также гамма-распределение с поправочным многочленом – для расчета «экспоненциальных» моментов и распределение Вейбулла с поправочным многочленом – для табулирования дополнительных функций распределения (ДФР). Оба последних распределения позволяют выравнять *произвольное* число моментов, что позволяет ставить и решать вопрос о качестве моментной аппроксимации.

Для демонстрации необходимости учета высших моментов приведем формулу Полячека-Хинчина для среднего времени ожидания начала обслуживания в системе M/G/1 (одноканальная, простейший поток заявок, произвольное распределение длительности обслуживания):

$$w = \frac{\lambda b_2}{2(1 - \lambda b_1)},$$

где λ – интенсивность входящего потока, а $\{b_i\}$ – моменты распределения длительно-сти обслуживания. Поскольку $b_2 = b_1^2(1 + \nu^2)$, где ν – коэффициент вариации, при регулярном обслуживании среднее время ожидания будет вдвое меньше, чем при экспоненциальном, а в случае $\nu = 2$ – в 2,5 раза больше. Эффект разницы в выс-ших моментах проявляется еще сильнее при сравнении результирующих *распреде-лений*.

Основой всех схем расчета систем обслуживания является применение *законов сохранения*: заявок, стационарной очереди, стационарных вероятностей, объема рабо-ты. В частности, второй из этих законов позволяет по сравнительно легко вычисляе-мым вероятностям состояний найти *временные характеристики* систем обслуживания, а четвертый – элементарно получать средние времена ожидания для одноканальных систем, в том числе формулу Полячека-Хинчина и ее продвинутые версии для дисци-плин с приоритетным обслуживанием.

Сложные многоканальные системы с *немарковским* (отличным от показательно распределенного) обслуживанием рассчитываются на основе фазовых аппроксимаций обслуживания, по которым строятся: множество возможных состояний СМО, матрицы интенсивностей переходов между ярусами диаграммы; записываемые в векторно-матричной форме уравнения баланса для векторов стационарных вероятностей состоя-ний системы. Далее эти вероятности рассчитываются с помощью итерационного мето-да Такахаси-Таками или методом матрично-геометрической прогрессии (МГП). Были проведены многочисленные доработки этих методов и их сравнительный анализ, улучшены начальные приближения, оценены скорость сходимости итераций и по фак-ту сходимости установлен предельный размер решаемых задач (число каналов).

Реальные процессы обслуживания происходят, как правило, не в системах, а в *сетях обслуживания*: заявка для получения «полного удовлетворения» должна пройти несколько специализированных узлов (возможно, с повторами). Разрабатываемые мно-гие годы методы расчета сетей, отвечающих условиям известной теоремы ВСМР, ока-зались чрезвычайно громоздкими и к тому же бесполезными для практически интерес-ных ситуаций. Гораздо более перспективны приближенные методы *потокоэквивалент-ной декомпозиции*. Построены варианты расчетных схем для разомкнутых, замкнутых и смешанных систем и – с другой точки зрения – для однородных и неоднородных по трудоемкости и видам обслуживания заявок. Разработаны две группы расчетных схем: с простейшими потоками и *с учетом преобразования потоков* в сети в процессе их прореживания, суммирования на входе очередных узлов и трансформации потока в уз-ле (изменение распределения интервалов в выходящем потоке по отношению к входя-щему при сохранении среднего интервала).

В качестве выходной характеристики обсчета сети используется ДФР времени пребывания заявки в сети, которая строится с помощью получаемых из преобразования Лапласа-Стилтьеса (ПЛС) моментов упомянутого распределения. Моменты рассчиты-ваются с помощью многократного численного дифференцирования ПЛС посредством одной из специально разработанных процедур.

4. Программная реализация

Все вышеперечисленные и многие не названные здесь задачи доведены до про-граммной реализации на современном Фортране и сведены в новую версию пакета МОСТ (Массовое Обслуживание – Стационарные задачи). Отметим, что его подмноже-ство на Алголе 60 было разработано еще в 1979 г., а версия на ПЛ/1 принята в Государ-ственный фонд алгоритмов и программ (г. Таллин) в 1987 г. Пакет состоит из несколь-ких функциональных групп:

- основные (анализ конкретных классов СМО);
- приоритетные (статические относительный, абсолютный с разными видами прерываний, смешанный; расчет в средних и с высшими моментами; динамический приоритет с линейным ростом по времени ожидания);
- имитационные (главным образом для отладки и тестирования численных методик);
- временные (переход от счетных к временным показателям);
- аппроксимационные (подбор по моментам параметров аппроксимаций и восстановление моментов по параметрам);
- математические разной степени общности и для разных типов данных (решение систем линейных алгебраических уравнений, обращение матриц различной структуры, вычисление производящих функций, расчет факториальных моментов, многократное численное дифференцирование в нуле таблично заданной функции и т. п.).

Вышеописанная модульная структура МОСТа существенно уменьшила его объем и трудоемкость разработки и отладки.

Разработана и реализована комплексная схема тестирования корректности программ на основе сопоставления с известными решениями, решения взаимобратных задач (например, расчета параметров аппроксимации распределения по моментам и вычисление моментов аппроксимации; обращения матрицы и перемножения исходной и обратной), а также сопоставления с результатами имитационного моделирования.

Пакет МОСТ используется в режиме *сборочного программирования*: главная программа состоит в основном из вызовов процедур пакета. Например, для расчета ДФР распределения времени пребывания заявки в системе $M/E_3/4$ необходима цепочка вызовов

HYPER3 – MH2N – MFACT – MTIME – FCWEIB

Здесь HYPER3 дает параметры H_2 -аппроксимации распределения обслуживания по трем моментам, MH2N – стационарное распределение числа заявок в системе, MFACT – факториальные моменты этого распределения, MTIME – рассчитанные по формулам Брюмелля моменты распределения времени пребывания заявки в системе, FCWEIB – построенную по заданному набору точек ДФР.

С. В. Кокориным разработана усеченная версия МОСТа – для непрофессионалов и с современным графическим интерфейсом В ней вызывающая программа (для решения ограниченного подмножества типичных задач) строится автоматически – в процессе диалога с пользователем.

5. Перспективы развития

Описанный пакет программ разрабатывался под действием главным образом внутренних стимулов, из соображений логической замкнутости учебной дисциплины «Компьютерное моделирование» и с ориентацией на вычислительные применения. Фантастический рост быстродействия современных ЭВМ уменьшил актуальность этих применений. Вхождение в новые области ставит перед специалистами по теории очередей задачи, совершенно новые или решавшиеся ранее при чрезмерно упрощающих предположениях. Например, пожарные службы и организаторы погрузо-разгрузочных работ заинтересованы в анализе систем «со взаимопомощью каналов». Жизнь заставила рассматривать такие специфические задачи, как появление «отрицательных» заявок,

вынуждающих прерванные «положительные» повторно проходить обслуживание в узлах сети (задачи защиты информации) или «нетерпение» заявок, покидающих систему при превышении ожиданием некоторого случайного предела (ожидание судов в портах или пациентов – на сложные обследования и госпитализацию). Неисчерпаемым источником сложных задач являются проблемы многоуровневого восстанавливаемого ЗИПа, в особенности реверсивная логистика и ситуации с «каннибализмом».

В связи с изложенным приходится отметить, что в теории очередей «сверху» уже давно ничего не валяется: простые задачи решены, а сложные (в отличие от имитации) требуют серьезных и высококвалифицированных усилий. Однако такие усилия со временем всегда окупаются благодаря высокой точности и скорости получаемых решений.

Литература

1. **Ковтун Л. И.** Супервизорная система автоматизированного иерархически структурированными организационно-техническими комплексами морской техники с использованием имитационно-вычислительных симуляторов. – СПб.: Труды ЦНИИ им. А. Н. Крылова, 2010, вып. 54 (338), с. 5-48.
2. **Рыжиков Ю. И.** Имитационное моделирование: Курс лекций. – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2007. – 125 с.
3. **Рыжиков Ю. И.** Имитационное моделирование. Теория и технологии. – СПб.: КОРОНА принт, 2004. – 380 с.
4. **Вишневский В. М.** Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.
5. **Рыжиков Ю. И.** Логистика, очереди и управление запасами: Учебное пособие. – СПб.: ГУАП, Ин-т информатики РАН, 2011. – 477 с.
6. **Рыжиков Ю. И.** Компьютерное моделирование: Курс лекций. – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2007. – 164 с.