

УДК 004.852

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОКАНАЛЬНОЙ НЕЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ ЗАЯВКАМИ И ГРУППОВЫМ УДАЛЕНИЕМ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ

Швец Т.С. (Санкт-Петербург)

Введение

Современные информационные системы разрабатываются и функционируют с использованием широкого спектра технологий. Среди них как одну из наиболее перспективных необходимо выделить технологию, базирующуюся на микросервисной архитектуре с контейнерной виртуализацией [5].

Инфраструктура микросервисной информационной системы с контейнерной виртуализацией характеризуется динамическим изменением вычислительной структуры и параметров системы. Причем при рассмотрении процессов масштабирования сервисов, реализуемых на основе контейнеризованных приложений, следует учитывать временные затраты на запуск необходимого числа контейнеров, проверку их работоспособности, а также остановку контейнеров, использование которых в данный момент не предполагается.

Динамическое управление реконфигурацией виртуальной инфраструктуры микросервисных приложений предполагает выдачу команд на ее осуществление в процессе обработки поступающих задач к сервису. Таким образом, указанные события вносят отрицательный вклад в оперативность работы приложения, так как все находящиеся на обработке задачи снимаются, а их повторный прием сервисом возможен только после применения новой конфигурации.

Рассмотренные особенности должны учитываться при моделировании таких процессов, а события реализации управляющих воздействий (например, на применение новой конфигурации) для сервиса представляются как дестабилизирующие.

Существует класс сетей массового обслуживания с двумя типами заявок, называемый G-сети. Впервые описание таких систем было введено Е. Геленбе в 1991 году, где рассматривалась экспоненциальная СеМО с положительными (целевыми) и отрицательными заявками (событиями, вынуждающими положительные заявки покидать сеть). В дальнейшем были разработаны более сложные модели G-сетей – с сигналами, триггерами, с групповым удалением положительных заявок и др. Обзор таких моделей произведен в статье J. Artalejo [1], в монографии В.М. Вишневого [2]. В этих работах говорится о возможности применения G-сетей для моделирования влияния деструктивных факторов на систему, но до конкретных способов применения таких моделей к описанию реальных воздействий дело не доходит. Кроме того, исследования в этой области направлены на развитие теории мультипликативных сетей, в которых искомое решение имеет форму произведения.

К основному недостатку данного подхода можно отнести сравнительно низкую точность получаемых решений. Это обусловлено тем, что для их получения приходится вносить значительные допущения, связанные либо с представлением исходной немарковской сети чисто экспоненциальной, либо сетью, узлы которой принадлежат к одному из четырех типов, описанных в теореме ВСМР [4]. Кроме этого, в результирующие формулы такого решения входят средние соответствующих распределений, что негативно сказывается на его точности. Недостатком методов

расчета мультипликативных сетей является их высокая трудоемкость, связанная с необходимостью рекуррентного счета по объему популяции [3].

Другим подходом к расчету показателей качества функционирования сетей, выходящих за рамки теоремы ВСМР, является получение численного решения на основе потокоэквивалентной декомпозиции сети. В этом случае можно разделить процесс расчета сети в целом и детальный расчет узлов как независимых СМО [3]. В настоящей статье рассмотрим модель многоканального узла с неэкспоненциальным распределением обслуживания и двумя типами заявок – положительными и отрицательными.

Такая модель может использоваться, например, для описания процесса функционирования сетевого коммутатора в условиях атак, приводящих к сбоям передачи пакетов. Время обслуживания в этом случае складывается из времени передачи пакета по сетевому кабелю и времени коммутации. Первая составляющая зависит от размера пакета и скорости канала передачи, вторая составляющая является характеристикой конкретной модели коммутатора и не зависит от размера кадра. Сбой передачи пакета можно представить в виде отрицательной заявки, которая при поступлении в узел вынуждает положительную заявку его покинуть. Необходимо рассчитать показатели функционирования коммутатора в указанных условиях.

Модель многоканального узла сети в виде СМО $M/H_2/n$ с положительными и отрицательными заявками

Представим узел сети в виде многоканальной СМО с двумя пуассоновскими входящими потоками заявок (положительных и отрицательных), а также с обслуживанием общего вида положительных заявок в узле. Для расчета таких систем используют метод фиктивных фаз [3], который заключается в аппроксимации неэкспоненциального распределения (в данном случае распределения обслуживания) одним из фазовых распределений, построением для него диаграмм и матриц перехода, составлением по ним уравнений баланса и решения их численными методами (итераций, матрично-геометрической прогрессии и др.). Выбор аппроксимирующего распределения по методу моментов осуществляют с учетом количества известных моментов исходного распределения и возможности предоставления тех или иных вычислительных преимуществ аппроксимирующего распределения [3]. Например, использование двухфазного гиперэкспоненциального распределения обслуживания в модели узла, позволяет при его расчете методом итераций использовать новый «продвинутый» способ задания начальных приближений, разработанный Ю.И. Рыжиковым.

В системе массового обслуживания распределение длительности обслуживания положительных заявок аппроксимируется двухфазным гиперэкспоненциальным распределением.

Подбор параметров аппроксимации

Предположим, что исходное распределение обслуживания задано тремя начальными моментами. Гиперэкспоненциальное распределение обладает рядом ограничений, которые приводят к необходимости учета исключительных ситуаций при аппроксимации некоторых видов исходных распределений. Способ подбора параметров двухфазного гиперэкспоненциального распределения зависит от вида исходного распределения, который можно определить с использованием параметра гамма-распределения $\alpha = f_1^2/D$ [3]. Типы значений параметров H_2 -распределения в зависимости от значений α представлены на рис. 1.

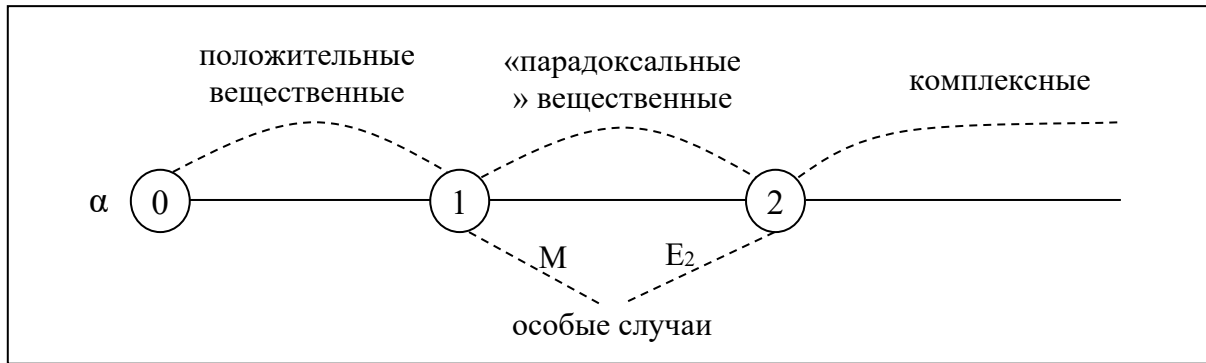


Рис. 1. Типы значений параметров H_2 -распределения в зависимости от значений α

Для подбора параметров двухфазного гиперэкспоненциального распределения по трем начальным моментам исходного существует аналитическое решение [5]. Этот подход применим в случае комплексных параметров аппроксимирующего распределения.

При значениях $0 < \alpha < 2$ параметры H_2 -аппроксимации вещественные. В этом случае их подбор можно осуществить методом, описанным в [3]. При значениях $1 < \alpha < 2$ параметры H_2 -распределения «парадоксальные» вещественные. В этом случае одна из вероятностей принимает отрицательное значение, а другая превышает единицу. Тем не менее, этот «парадоксальный» факт не мешает успешному расчету системы. Стандартный метод расчета параметров неприменим при H_2 -аппроксимации распределений, для которых $\alpha = 1$ (коэффициент вариации равен 1) или $\alpha = 2$. Эти типы распределений являются особыми случаями и нуждаются в отдельной обработке.

В случае аппроксимации исходного распределения с единичным коэффициентом вариации воспользуемся методом подбора параметров H_2 -распределения по двум начальным моментам исходного [3].

Для этого вероятности выбора фаз обслуживания принимаются $y_1 = y_2 = 0,5$, а интенсивности обслуживания в каждой экспоненциальной фазе равны $\mu_i = 1/x_i$, $i = 1, 2$, где $x_{1,2} = f_1 \pm \sqrt{f_2/2 - f_1^2}$.

С использованием коэффициента вариации v , последняя формула принимает вид:

$$x_{1,2} = f_1 \left(1 \pm \sqrt{(1 + v^2)/2 - 1} \right). \quad (1)$$

После определения x_i можно перейти к расчету интенсивностей обслуживания в экспоненциальных фазах.

Значение $\alpha = 2$ соответствует распределению Эрланга 2-го порядка, для которого стандартный метод подбора параметров H_2 -аппроксимации также неприменим. Согласно [3], аппроксимацию распределения E_k можно выполнить, умножив моменты исходного распределения, начиная с k -го, на величину $1 + j\varepsilon$, где j – порядок момента и ε – допустимая относительная погрешность, после чего расчет параметров аппроксимации выполняется стандартным методом [3].

Диаграммы переходов для СМО М/Н2/4 с учетом отрицательных заявок с групповым удалением положительных

После подбора параметров аппроксимации можно переходить к построению диаграмм переходов. Вид диаграммы зависит от типов аппроксимирующих фазовых распределений, используемых в качестве распределений потоков прибытия или

обслуживания заявок. В нашем случае аппроксимируется распределение обслуживания с помощью двухфазного гиперэкспоненциального распределения, и система обслуживания представляется в виде СМО $M/H_2/n$ с дополнительным входящим пуассоновским потоком отрицательных заявок.

Опишем идею построения диаграммы переходов на примере четырехканальной СМО. Согласно [3], работа такой системы может быть интерпретирована как процесс обслуживания неоднородного потока заявок, причем выбор типа заявки связан с выбором параметра показательного распределения обслуживания. Ключ микросостояния указывает количество находящихся в каналах обслуживания заявок каждого типа. Суммарный входящий поток является пуассоновским с интенсивностью $\Lambda = \lambda^+ + \lambda^-$, где

λ^+ – интенсивность входящего пуассоновского потока положительных заявок,

λ^- – интенсивность входящего пуассоновского потока отрицательных заявок,

μ_1, μ_2 – интенсивности обслуживания положительных заявок в первой и второй фазах соответственно.

В системе обслуживаются только положительные заявки. Они характеризуют целевые заявки, выполняемые системой (пакеты, запросы к базе данных, команды и пр.). Принимаемая на обслуживание положительная заявка с вероятностями y_1, y_2 относится к 1-му и 2-му типу соответственно. Диаграмма переходов по прибытию положительной заявки изображена на рис 2.

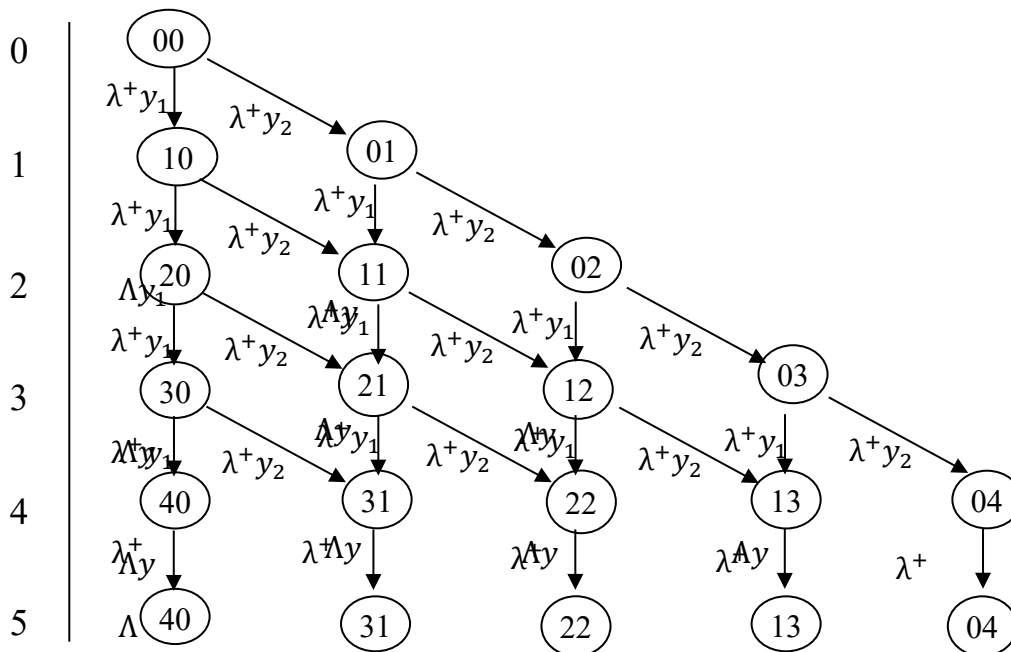


Рис. 2. Диаграмма переходов по прибытию положительных заявок в систему $M/H_2/4$

Номер яруса диаграммы соответствует числу заявок, находящихся в системе (на обслуживании и в очереди), а значение ключей микросостояний характеризуют число заявок в каждой фазе обслуживания.

Каждая прибывающая отрицательная заявка «убивает» все положительные заявки, полностью опустошает систему. Диаграмма переходов по обслуживанию положительных и прибытию отрицательных заявок в систему («убиению» положительных заявок) представлена на рис. 3.

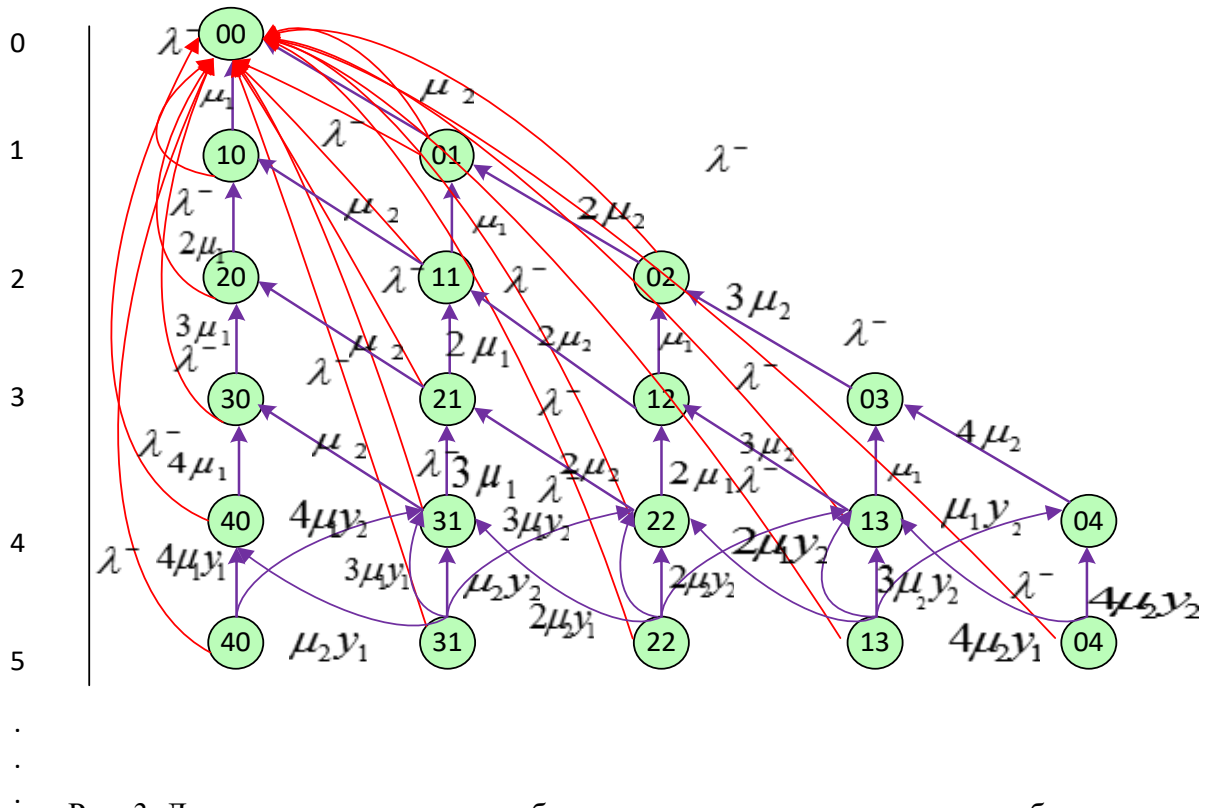


Рис. 3. Диаграмма переходов по обслуживанию положительных и прибытию отрицательных заявок в систему $M/H_2/4$

Вероятность уничтожения положительной заявки конкретного типа зависит от числа находящихся в каналах обслуживания положительных заявок каждого типа и от общего количества заявок в каналах обслуживания. Расчет ее выполняется следующим образом (см. рис. 3).

Например, система находится в состоянии $(2,1)$. В данном состоянии на обслуживании находится три положительные заявки: две – 1-го типа и одна – 2-го типа. Система перейдет в результате воздействия отрицательной заявки в состояние $(0,0)$. В данном случае вероятности выбора заявки первого и второго типа из трех обслуживаемых заявок равны соответственно $u_{v1} = 2/3$ и $u_{v2} = 1/3$.

Матрицы переходов

Построение матриц переходов между микросостояниями системы выполняется аналогично алгоритму, описанному в [3]. Для возможности учета воздействия отрицательных заявок в диаграммах добавлены соответствующие переменные, характеризующие интенсивности потока отрицательных заявок, и коэффициенты, характеризующие вероятности выбора положительной заявки, которая будет «убита». Обозначим через S_j множество всех возможных микросостояний системы, при которых на обслуживании находится ровно j заявок, а через σ_j – количество элементов в S_j . Далее, в соответствии с диаграммой переходов, построим матрицы интенсивностей инфинитезимальных переходов:

$A_j[\sigma_j \times \sigma_{j+1}]$ - в S_{j+1} (прибытие заявки),

$B_j[\sigma_j \times \sigma_{j-1}]$ - в S_{j-1} (полное завершение обслуживания или «убиение» положительной заявки),

$D_j[\sigma_j \times \sigma_j]$ – матрица ухода из состояний яруса j .

В связи с большой размерностью матриц для многоканальных систем, приводящей к значительной трудоемкости их построения, разработана программа автоматического построения матриц на языке Octave (MatLab). В качестве примера построим матрицы для системы М/Н₂/4 с учетом отрицательных заявок для диаграмм, представленных на рис. 2 и 3.

$$A_0 = |\lambda^+ y_1 \quad \lambda^+ y_2|, \quad A_1 = \begin{vmatrix} \lambda^+ y_1 & \lambda^+ y_2 & 0 \\ 0 & \lambda^+ y_1 & \lambda^+ y_2 \end{vmatrix}, \quad A_2 = \begin{vmatrix} \lambda^+ y_1 & \lambda^+ y_2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda^+ y_1 & \lambda^+ y_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda^+ y_1 & \lambda^+ y_2 \end{vmatrix},$$

$$A_3 = \begin{vmatrix} \lambda^+ y_1 & \lambda^+ y_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda^+ y_1 & \lambda^+ y_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda^+ y_1 & \lambda^+ y_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda^+ y_1 & \lambda^+ y_2 \end{vmatrix}, \quad A_4 = \begin{vmatrix} \lambda^+ & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda^+ & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda^+ & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda^+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda^+ \end{vmatrix}; \quad A_j = A_{n+1}, \quad j \geq n+1$$

$$B_1 = \begin{vmatrix} \lambda^- + \mu_1 \\ \lambda^- + \mu_2 \end{vmatrix}, \quad B_2 = \begin{vmatrix} \lambda^- + 2\mu_1 & 0 \\ \lambda^- + \mu_2 & \lambda^- + \mu_1 \\ 0 & \lambda^- + 2\mu_2 \end{vmatrix}, \quad B_3 = \begin{vmatrix} \lambda^- + 3\mu_1 & 0 & 0 \\ \lambda^- + \mu_2 & \lambda^- + 2\mu_1 & 0 \\ 0 & \lambda^- + 2\mu_1 & \lambda^- + 2\mu_2 \\ 0 & 0 & \lambda^- + 3\mu_2 \end{vmatrix},$$

$$B_4 = \begin{vmatrix} \lambda^- + 4\mu_1 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda^- + \mu_2 & \lambda^- + 3\mu_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda^- + 2\mu_2 & \lambda^- + 2\mu_1 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda^- + 3\mu_2 & \lambda^- + \mu_1 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda^- + 4\mu_2 \end{vmatrix}, \quad B_j = B_{n+1}, \quad j \geq n+1$$

$$D_0 = |\lambda^+|, \quad D_1 = \begin{vmatrix} \lambda^+ + \lambda^- + \mu_1 & 0 \\ 0 & \lambda^+ + \lambda^- + \mu_2 \end{vmatrix},$$

$$D_2 = \begin{vmatrix} \lambda^+ + \lambda^- + 2\mu_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda^+ + \lambda^- + \mu_2 + \mu_1 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda^+ + \lambda^- + 2\mu_2 \end{vmatrix},$$

$$D_3 = \begin{vmatrix} \lambda^+ + \lambda^- + 3\mu_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda^+ + \lambda^- + \mu_2 + 2\mu_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda^+ + \lambda^- + 2\mu_2 + \mu_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda^+ + \lambda^- + 3\mu_2 \end{vmatrix},$$

$$D_4 = \begin{vmatrix} \lambda^+ + \lambda^- + 4\mu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda^+ + \lambda^- + \mu_2 + 3\mu_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda^+ + \lambda^- + 2\mu_2 + 2\mu_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda^+ + \lambda^- + 3\mu_2 + \mu_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda^+ + \lambda^- + 4\mu_2 \end{vmatrix},$$

$$D_j = D_{n+1}, \quad j \geq n + 1$$

Итерационный метод для расчета системы

Основная задача расчета многоканальной СМО заключается в нахождении стационарных вероятностей ее состояний. Знание этих вероятностей позволяет получить практически все интересующие нас параметры системы, а именно – средние длины очередей, начальные моменты распределений времен ожидания и пребывания в системе массового обслуживания.

Для расчета системы воспользуемся методом, основанном на итерационном методе Такахаси-Таками, и доработанным Ю.И. Рыжиковым. Одну из последних версий подробного описания данного метода можно найти в [3]. Направление прогонки при расчете определим «сверху – вниз», то есть от первого яруса к N -му. Для расчета СМО с учетом отрицательных заявок с помощью итерационного метода в основной его части отличий нет. Изменения касаются только построения использующихся в расчете матриц переходов, а также процесса перехода к безусловным вероятностям. Здесь при выводе условия баланса заявок необходим дополнительный учет ухода из системы положительных заявок из-за воздействия отрицательных. Кроме этого, воспользуемся новым способом задания начальных приближений, разработанным Ю.И. Рыжиковым и основанным на использовании биномиального распределения для задания вероятностей микросостояний в пределах яруса. Остановимся на внесенных изменениях, а также на использовании нового способа задания начальных приближений подробнее.

Выбор начальных приближений

Использование СМО типа $M/H_2/n$ позволяет использовать следующий способ задания начальных приближений. В пределах каждого яруса диаграмм переходов условное распределение числа обслуживаемых заявок каждого типа принимается биномиальным с вероятностями, пропорциональными $\{y_i/\mu_i\}$.

Пример 1. В качестве примера рассмотрим задание начальных приближений для СМО $M/H_2/4$ с параметрами $\mu_1 = 2$; $\mu_2 = 4$; $y_1 = 0,7$; $y_2 = 0,3$. Количество

учитываемых ярусов диаграммы $N = 10$. Требуется определить начальные приближения вероятностей микросостояний в пределах каждого яруса диаграммы.

Определим параметры биномиального распределения, используя параметры гиперэкспоненциальной аппроксимации, произведя нормировку суммы отношений y_1/μ_1 и y_2/μ_2 к 1. Получим $p = 0,8235$; $q = 0,1765$. Используя значения ключей микросостояний и вероятности p и q , рассчитаем условные вероятности микросостояний для каждого яруса (табл.1):

Таблица 1

Начальные приближения для СМО M/H₂/4

0	1,0000	0	0	0	0
1	0,8235	0,1765	0	0	0
2	0,6782	0,2907	0,0311	0	0
3	0,5585	0,3590	0,0769	0,0055	0
4	0,4600	0,3942	0,1267	0,0181	0,0010
.
.
.
10	0,4600	0,3942	0,1267	0,0181	0,0010

Условие баланса с учетом отрицательных заявок

Для вывода условия баланса в системе с учетом отрицательных заявок воспользуемся законом сохранения заявок [3]. Сначала рассмотрим одноканальную систему GI/G/1. Средняя частота прибытия в нее положительных заявок равна λ^+ , а средняя частота их ухода из системы равна сумме средней частоты обслуживания и средней частоты «убиения» положительных заявок. Средняя частота обслуживания равна вероятности занятости системы $1 - p_0$, деленной на среднюю длительность обслуживания положительных заявок b_1 . Примем допущение, что в данной модели отрицательные заявки действуют только на каналы обслуживания, причем, если в канале обслуживается положительная заявка, то отрицательная ее «убивает». В противном случае, она уходит из системы, не оказывая никакого влияния. Поэтому среднюю частоту «убиения» положительных заявок можно представить как произведение вероятности занятости системы $1 - p_0$ на интенсивность прибытия в нее отрицательных заявок λ^- . В стационарном режиме получим $\lambda^+ = (1 - p_0)/b_1 + (1 - p_0)\lambda^- = (1 - p_0)(b_1^{-1} + \lambda^-)$, откуда следует

$$p_0 = 1 - \frac{\lambda^+}{(b_1^{-1} + \lambda^-)}.$$

Для n -канальной системы среднее число занятых каналов равно

$$\sum_{j=0}^{n-1} j p_j + n \left(1 - \sum_{j=0}^{n-1} p_j \right) = n - \sum_{j=0}^{n-1} (n - j) p_j,$$

тогда условие баланса для системы с учетом отрицательных заявок сводится к

$$\sum_{j=0}^{n-1} (n - j) p_j = n - \frac{\lambda^+}{(b_1^{-1} + \lambda^-)}. \quad (3)$$

Переход к безусловным вероятностям состояний

Расчет безусловных вероятностей состояний системы осуществим по алгоритму, описанному в [3]. Идея его заключается в определении из условия баланса (3) вероятности свободного состояния системы согласно

$$p_0 = \frac{n - \lambda^+ / (b_1^{-1} + \lambda^-)}{n + \sum_{j=1}^{n-1} (n-j) \prod_{i=0}^{j-1} x_i},$$

затем вероятности для $j = \overline{1, N}$ определяются рекуррентно с помощью формулы $p_{j+1} = p_j x_j$, $j = \overline{0, N-1}$.

Численный эксперимент

Тестирование алгоритмов и программ наиболее информативно для достаточно общих ситуаций, в которых не сказываются специфические свойства исходных распределений (показательная длительность обслуживания) или структуры системы (одноканальность). Указанным требованиям удовлетворяет, например, модель $M/E_3/2$. Были выбраны средняя длительность обслуживания $b = 1$ и интенсивности прибытия положительных и отрицательных заявок $\lambda^+ = 1.6$ и $\lambda^- = 0.6$ соответственно. Расчет с требованиями по точности $\varepsilon = 10^{-7}$ сошелся за 19 итераций. Полученные численным методом вероятности состояний систем массового обслуживания в сопоставлении с результатами имитационного моделирования (ИМ) представлены в таблице 2.

Таблица 2

Распределение числа заявок в модели $M/E_3/2$

j	P_j		j	P_j		j	P_j		j	P_j	
	Численны й	ИМ		Численны й	ИМ		Численн ый	ИМ		Числен ный	ИМ
0	1.076e-1	1.071e-1	6	5.641e-2	5.635e-2	12	7.868e-3	7.872e-3	18	1.093e-3	1.096e-3
1	1.847e-1	1.839e-1	7	4.069e-2	4.073e-2	13	5.663e-3	5.665e-3	19	7.869e-4	7.867e-4
2	1.789e-1	1.795e-1	8	2.931e-2	2.947e-2	14	4.076e-3	4.089e-3	20	5.663e-4	5.665e-4
3	1.425e-1	1.436e-1	9	2.110e-2	2.120e-2	15	2.933e-3	2.941e-3	21	4.076e-4	4.077e-4
4	1.066e-1	1.078e-1	10	1.519e-2	1.511e-2	16	2.111e-3	2.115e-3	22	2.933e-4	2.936e-4
5	7.791e-2	7.787e-2	11	1.093e-2	1.068e-2	17	1.519e-3	1.516e-3	23	2.111e-4	2.113e-4

Расстояние Колмогорова между результатами, полученными численным методом и имитационным моделированием, составило 0,006, что свидетельствует о приемлемой точности модели и хорошем согласии результатов.

Заключение

Математический аппарат системы массового обслуживания с отрицательными заявками с групповым удалением позволяет описывать процессы управления микросервисами и учитывает временные затраты при реконфигурировании виртуальной инфраструктурой сервиса.

Результаты работы позволяют подойти к решению более «глобальной» задачи – расчету *сети* с отрицательными заявками.

Литература

1. Artalejo J. R. G-networks: A Versatile Approach for Work Removal in Queueing Networks // Eur. J. of Operational Research. 2000. Vol. 126, P. 233–249.
2. Вишнеvский В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. М.: Техносфера, 2003. 512 с.
3. Рыжиков Ю.И. Численные методы теории очередей: учебное пособие. СПб.: Лань, 2019. 512 с.
4. Baskett F., Chandy K. M., Muntz R.R., Palacios J.G. Open, Closed, and Mixed Networks of Queueing with Different Classes of Customers // J. of the ACM. 1975. Vol. 22, no. 2. P. 248–260.
5. Ньюмен С. Создание микросервисов. СПб.: Питер, 2016. 304 с.
6. Смагин В.А. Аппроксимационные методы исследования вычислительных систем и сетей. ВКА имени А.Ф.Можайского, 1996. 91 с.