

Модель системы распределенного реестра с аппроксимацией заявок потоком Эрланга

В. А. Евсин, С. Н. Широбокова, С. П. Воробьев

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск, Российская Федерация

Аннотация. В работе предложен способ математического описания распределенного реестра как системы массового обслуживания. Представлена концептуальная модель, которая определяет основные структурные элементы топологической структуры распределенного реестра, такие как узлы сети, узлы реестра, сервисные службы распределенного реестра для проведения операций по верификации транзакций. Определены и представлены функции распределения случайной величины, характерные для данных процессов. Проведена аппроксимация распределения заявок потоками Эрланга для получения наиболее точной величины. Определены условия конструирования инфинитезимальной матрицы с учетом особенностей информационных процессов в распределенном реестре. Сформированы условия нормировки. Представлены основные интегральные характеристические показатели, требуемые для анализа распределенного реестра как системы массового обслуживания. С целью определения основных интегральных характеристических показателей системы распределенного реестра была разработана имитационная модель на платформе AnyLogic.

Ключевые слова: математическое моделирование, системы массового обслуживания, распределенный реестр, аппроксимация, метод фаз Эрланга, имитационная модель.

DOI 10.14357/20718632210107

Введение

В настоящее время все большую популярность получают системы распределенного реестра, которые позволяют сформировать защищенную среду хранения данных, что в достаточной степени актуально для многих сфер деятельности, включая финансы, медицину, промышленное производство, нефтедобывающую отрасль, сельское хозяйство, страхование, логистику и многие другие. Данная технология позволяет сформировать среду, в которой участники сети не имеют возможности внести изменения без уведомления других участвующих в данной транзакции узлов сети [1]. Актуальность данной технологии подтверждается отчетом экспертов Всемирного экономи-

ческого форума [2]. Согласно данному отчету, к 2025 году экосистема распределенных реестров будет хранить до 10% мирового ВВП (101 трлн. долларов). Технология распределенного реестра является одним из приоритетных направлений развития цифровой экономики в Российской Федерации, что подтверждается включением систем распределенного реестра в перечень сквозных технологий для развития цифровой экономики Российской Федерации и отражено в паспорте национального проекта "Национальная программа "Цифровая экономика Российской Федерации" (утв. президентом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам, протокол от 04.06.2019 №7)".

Особенностью данной технологии является размещение данных на всех узлах распределенного реестра, а также зависимость всех последующих транзакций от уже существующих с использованием хеширования данных, в частности алгоритма дерева Меркла. Все транзакции подвергаются процессу верификации с использованием алгоритма консенсуса [3].

В результате применения технологии распределенного реестра проектировщики, производители, подрядчики, а также конечные потребители могут взаимодействовать друг с другом при поддержке смарт-контрактов [4-6]. Особенно важным данное применение становится в случае, если необходимо проводить транзакции передачи цифровой модели инновационного устройства по зашифрованному каналу связи при поддержке составленных смарт-контрактов. Для описания и оценки эффективности работы системы, включающей компоненты распределенного реестра, необходимо сформировать математическую модель с учетом особенностей топологии распределенного реестра, а также аппаратного комплекса хранения реестра данных.

1. Постановка проблемы

Информационная система, построенная на основе распределенного реестра, отличается высоким уровнем масштабирования и подвергается высоким информационным нагрузкам вследствие процессов одновременного формирования и верификации транзакций во всех узлах сети [7-9]. Поэтому для определения

интегральных характеристических показателей информационных процессов в распределенном реестре необходимо построить математическую модель, чтобы определить, насколько приемлемы величины данных показателей в каждом случае, а также необходимость проведения оптимизационных изменений структуры системы. При проведении моделирования можно рассматривать распределенный реестр как систему массового обслуживания.

2. Концептуальное моделирование распределенного реестра

Топологическая структура распределенного реестра включает серверы участников сети, узлы сети, клиентские устройства, а также структурные элементы, характерные для отдельных типов распределенного реестра, такие как управляющие узлы для распределенного реестра типа *Corda* или узлы-брокеры для распределенного реестра типа *Hyperledger*. Архитектура сети распределенного реестра представляет собой одноранговую *peer-to-peer* сеть.

Сеть распределенного реестра можно в общем виде описать как систему массового обслуживания [10-13]. Концептуальная модель распределенного реестра как системы массового обслуживания представлена на Рис. 1.

Используются следующие обозначения: $I_{k,s}$ – клиентские устройства k -го участника сети, $Q_{k,1}$ – очередь сервера участника сети, $Q_{k,2}$ – очередь перед узлом сети распределенного реестра, S_k – корпоративный сервер участника

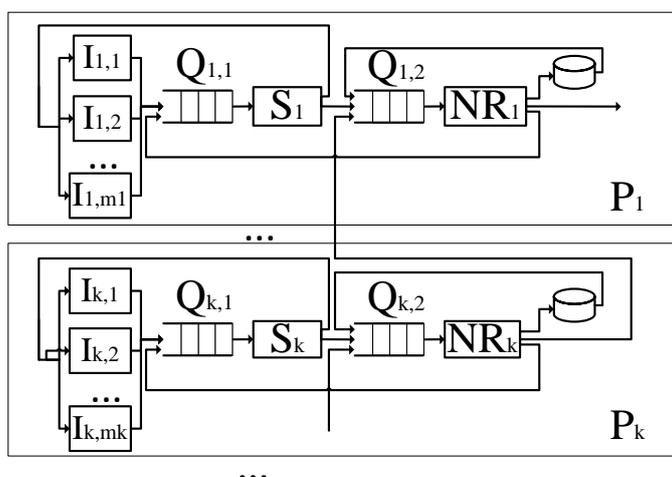


Рис. 1. Концептуальная модель сети распределенного реестра

сети, NR_k – сервер распределенного реестра участника сети. Классификационные признаки рассматриваемого распределенного реестра имеют следующие значения:

- тип процесса – простой;
- способ обеспечения целостности записи – отсутствует;
- копии баз данных – отсутствуют;
- дисциплина диспетчеризации в сервере – *FIFO*;
- режим достижения алгоритма консенсуса – *RAFT*;
- режим обновления данных распределенного реестра – для верифицированных участников смарт-контракта.

Для верификации транзакции в алгоритме консенсуса *RAFT* необходимо учитывать все транзакции, которые следовали за текущей.

Для математического описания в качестве исходных данных используются следующие множества:

- множество узлов распределенного реестра: $NR = \{NR_1, NR_2, \dots, NR_n\}$;
- множество служебных сервисов в распределенном реестре: $SR = \{SR_1, SR_2, \dots, SR_m\}$;
- множество верифицированных участников смарт-контракта: $PSC = \{PSC_1, PSC_2, \dots, PSC_p\}$;
- множество серверов: $S = \{S_1, S_2, \dots, S_q\}$;
- множество активных заявок участников сети распределенного реестра: $CAR = \{CAR_1, CAR_2, \dots, CAR_t\}$;
- множество активных заявок на обработку транзакций сервисными службами распределенного реестра, включая заявку на верификацию j -й транзакции CAR_j : $CARS_j = \{CARS_{1j}, CARS_{2j}, \dots, CARS_{cj}\}$;
- множество отношений: $REL = \{REL_1, REL_2, \dots, REL_d\}$.

3. Математическое моделирование распределенного реестра с использованием аппроксимации потоками Эрланга

Для k -го отдельного участника распределенного реестра состояние сети представляет собой вектор $(i_1, z_1, i_2, i_3, i_4, i_5)$, где i_1 – количество заявок, поступающих от клиентских устройств рассматриваемого участника сети, z_1 – номер фазы псевдосостояния немарковского процесса

для генерации заявок, i_2 – количество заявок, находящихся в очереди сервера и на обработке сервером; i_3 – количество заявок, находящихся в очереди узла и на обработке узлом, i_4 – количество заявок, поступающих от прочих участников сети распределенного реестра, i_5 – количество заявок, находящихся в соответствующей очереди и на обработке валидности транзакций на узле участника сети и на нотариальном сервере. Общая модель поступления заявок в системе представляет собой экспоненциальную модель. Полное пространство состояний для данной модели имеет следующую размерность [14-16]:

$$i_r = 0, \sum_t CAR_t + \sum_c CARS_c$$

где i_r – r -й элемент вектора пространства состояний, CAR_t – количество активных заявок t -го участника сети распределенного реестра, $CARS_c$ – количество активных заявок c -го сервисного устройства сети распределенного реестра. Ограничением для полученного пространства состояний служит следующее выражение:

$$\sum_r i_r \leq \sum_t CAR_t + \sum_c CARS_c.$$

Для более точного описания поступления заявок в распределенном реестре необходимо их рассматривать как поток событий Эрланга [13]. Эрланговский поток позволяет с высокой степенью точности описать поступление заявок в реальных системах распределенного реестра, что подтверждается экспериментальными исследованиями [17].

Порядок потока Эрланга может быть оценен в достаточной степени с использованием следующего соотношения:

$$K_s = \frac{m^2}{\sigma^2},$$

где m – математическое ожидание временного интервала между событиями, σ – среднеквадратичное отклонение временного интервала между событиями в стохастическом потоке.

Плотность распределения потока заявок по закону Эрланга для рассматриваемого участника сети составляет:

$$f_{1,k}(t) = \frac{\lambda_1 (\lambda_1 t)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\lambda_1 t}.$$

Плотность распределения потока заявок по закону Эрланга для других участников сети имеет вид:

$$f_{2,k}(t) = \frac{\lambda_2 (\lambda_2 t)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\lambda_2 t}.$$

При аналитическом исчислении показателей информационных систем целесообразно рассматривать только марковские случайные процессы [13, 18, 19]. Для реализации перехода от немарковского потока Эрланга K_3 -го порядка с последствием к марковскому потоку Пуассона без последствия необходимо провести внедрение псевдосостояний, в векторе состояний сети переход между фазами псевдосостояний обозначен как z_j . Метод псевдосостояний для потока заявок от участников сети распределенного реестра представлен на Рис. 2, где S_1 – длительность активного состояния рассматриваемого пользователя, $S_1(1) \dots S_1(k)$ – фазы псевдосостояний, время пребывания в каждой фазе распределено по закону Пуассона, S_2 – длительность активного состояния, при котором в системе существует 1 заявка от пользователя. Предельные вероятности пребывания системы в псевдосостоянии: $P_{131}, P_{132}, \dots, P_{13k}$ при этом $\sum_i P_{13i} = P_{13}$.

Описание функций распределения представлено в Табл. 1.

Для определения стационарных вероятностей может быть составлена система линейных уравнений Колмогорова-Чепмена, однако из-за большой размерности пространства состояний целесообразно сформировать инфинитезимальную матрицу. Элементы инфинитезимальной матрицы $Q = \|q_{i_1 \dots i_5, j_1 \dots j_5}\|$ представляют собой интенсивности перехода из состояния $(i_1, z_1, i_2, i_3, i_4, i_5)$ в состояние $(j_1, j_2, j_3, j_4, j_5)$ в момент времени t . При этом полное пространство состояний:

$$E = \{E_1(0,0,0,0,0, \dots, 0),$$

$E_2(1,0,0,0,0, \dots, 0), E_3(3,1,0,0,0, \dots, 0)\}$. Следовательно, состояния представляют собой разреженную матрицу, часть элементов которой является недопустимой. Диагональные элементы матрицы Q равны сумме элементов строки, взятых со знаком «минус». Условия конструирования инфинитезимальной матрицы представлены в Табл. 2.

В представленной таблице использованы следующие обозначения: p_{11} – вероятность того, что заявка будет отправлена с сервера на клиентское устройство, p_{12} – вероятность того, что заявка будет отправлена с сервера на узел сети, p_{13s} – вероятность того, что заявка будет

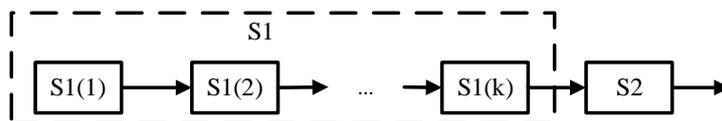


Рис. 2. Модель приведения потока Эрланга к потоку Пуассона

Табл. 1. Функции распределения активностей системы

Наименование действия	Средняя величина	Функция распределения
Длительность активного состояния пользователя	λ_1^{-1} – среднее время активности пользователя	$f_{1,k}(t) = \frac{\lambda_1 (\lambda_1 t)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\lambda_1 t}$
Длительность активного состояния пользователей прочих узлов сети	λ_2^{-1} – среднее время активности пользователя	$f_{2,k}(t) = \frac{\lambda_2 (\lambda_2 t)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\lambda_2 t}$
Время обработки сервером приложений	μ_1^{-1} – среднее время обработки сервером	$\varphi_1(t) = \mu_1 * e^{-\mu_1 t}$
Время обработки узлом сети	μ_2^{-1} – среднее время обработки узлом сети	$\varphi_2(t) = \mu_2 * e^{-\mu_2 t}$
Время достижения консенсуса	γ^{-1} – среднее время достижения консенсуса	$\varphi_3(t) = \gamma * e^{-\gamma t}$

Табл. 2. Условия конструирования инфинитезимальной матрицы для оценки интегральных характеристик распределенного реестра

Событие и качественное описание условия	Формальное представление условия	Интенсивность переходов
1. Формирование заявки	$j_1 = i_1 + 1; j_2 = i_2;$ $j_3 = i_3; j_4 = i_4;$ $j_5 = i_5; jz_1 = z_1;$	$m_1 * \lambda_1$
2. Переход заявки на s -ю фазу псевдосостояния	$j_1 = i_1; j_2 = i_2;$ $j_3 = i_3; j_4 = i_4;$ $j_5 = i_5; jz_1 = z_1 + 1;$	$p_{13s} m_1 * \lambda_1$
3. Окончание обработки заявки на сервере, после чего заявка отправляется клиентскому приложению	$j_1 = i_1 + 1; j_2 = i_2 - 1;$ $j_3 = i_3; j_4 = i_4;$ $j_5 = i_5; jz_1 = z_1;$	$p_{11} * \mu_1$
4. Окончание обработки заявки на сервере, после чего заявка отправляется на ноду	$j_1 = i_1; j_2 = i_2 - 1;$ $j_3 = i_3 + 1; j_4 = i_4;$ $j_5 = i_5; jz_1 = z_1;$	$p_{12} * \mu_1$
5. Формирование заявки на прочих узлах сети	$j_1 = i_1; j_2 = i_2;$ $j_3 = i_3; j_4 = i_4 + 1;$ $j_5 = i_5; jz_1 = z_1;$	$\sum_s m_s * \lambda_2$
6. Верификация заявки в распределенном реестре (достижение консенсуса)	$j_1 = i_1; j_2 = i_2;$ $j_3 = i_3 - 1; j_4 = i_4;$ $j_5 = i_5 + 1; jz_1 = z_1;$	γ
7. Распределение верифицированной заявки на узлах сети	$j_1 = i_1; j_2 = i_2;$ $j_3 = i_3 + 1; j_4 = i_4;$ $j_5 = i_5 - 1; jz_1 = z_1;$	μ_2
8. Получение заявки от другого узла сети	$j_1 = i_1; j_2 = i_2;$ $j_3 = i_3 + 1; j_4 = i_4 - 1;$ $j_5 = i_5; jz_1 = z_1;$	λ_2
9. Окончание обработки заявки на ноде, после чего заявка отправляется на сервер	$j_1 = i_1; j_2 = i_2 + 1;$ $j_3 = i_3 - 1; j_4 = i_4 - 1;$ $j_5 = i_5; jz_1 = z_1;$	μ_2
10. Окончание обработки заявки на ноде, после чего заявка обращается к БД	$j_1 = i_1; j_2 = i_2;$ $j_3 = i_3 - 1; j_4 = i_4;$ $j_5 = i_5; jz_1 = z_1;$	$p_3 * \mu_2$
11. Окончание обработки заявки на ноде, после чего заявка отправляется к l -му узлу сети	$j_1 = i_1; j_2 = i_2;$ $j_3 = i_3 - 1; j_4 = i_4 + 1;$ $j_5 = i_5; jz_1 = z_1;$	$p_{2l} * \mu_2$
12. Пребывание сети в текущем состоянии	$j_1 = i_1; j_2 = i_2;$ $j_3 = i_3; j_4 = i_4;$ $j_5 = i_5; jz_1 = z_1;$	$-\sum_{i_1 \dots i_5 j_1 \dots j_s} q_{i_1 \dots i_5 j_1 \dots j_s}$
13. Прочие условия		0

отправлена в s -ю фазу псевдосостояния, p_{2l} – вероятность того, что заявка будет отправлена l -му узлу сети, p_1 – вероятность того, что заявка продолжит обрабатываться на данном узле, p_2 – вероятность того, что заявка попадет на другие узлы сети, p_3 – вероятность того, что заявка будет отправлена в базу данных. При этом должны выполняться следующие условия нормировки:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{s=1}^k p_{13s} = p_{13} \\ p_{11} + p_{12} + p_{13} = p_1 \\ \sum_{l=1}^n p_{2l} = p_2 \\ p_1 + p_2 + p_3 = 1 \end{array} \right.$$

В качестве примера можно рассмотреть матрицу со следующими характеристиками для

вектора состояний: $i_1 = \overline{0,2}$; $z_1 = (0)$; $i_2 = \overline{0,2}$; $i_3 = \overline{0,2}$; $i_4 = \overline{0,2}$; $i_5 = \overline{0,2}$, при этом необходимо выполнение следующего условия:

$$\sum_{l=1}^5 i_l \leq 2.$$

С учетом ограничений формируется матрица размерностью 21×21 , пространство состояний для данной матрицы имеет следующую форму: $E = \{(000000), (100000), \dots, (000002); (000000); (100000), \dots, (000002)\}$. В виду объема представленной инфинитезимальной матрицы целесообразно рассмотреть блочную структуру мат-

рицы, состоящую из следующих укрупненных элементов:

$$Q = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & Q_{14} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} & Q_{24} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} & Q_{34} \\ Q_{41} & Q_{42} & Q_{43} & Q_{44} \end{pmatrix}$$

В представленной матрице векторы укрупненных элементов $Q_{11}, Q_{12}, \dots, Q_{43}, Q_{44}$ охватывают отдельные части пространства состояний. Общая форма охватываемого пространства состояний для каждого из элементов:

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \left\{ (000000), (100000), (200000), (001000), (101000); \right. \\ &\quad \left. (000000), (100000), (200000), (001000), (101000) \right\}; \\ Q_{12} &= \left\{ (002000), (000100), (100100), (001100), (000200); \right. \\ &\quad \left. (000000), (100000), (200000), (001000), (101000) \right\}; \\ Q_{13} &= \left\{ (000010), (100010), (001010), (000110), (000020); \right. \\ &\quad \left. (000000), (100000), (200000), (001000), (101000) \right\}; \\ Q_{14} &= \left\{ (000001), (100001), (001001), (000101), (000011), (000002); \right. \\ &\quad \left. (000000), (100000), (200000), (001000), (101000) \right\}; \\ Q_{21} &= \left\{ (000000), (100000), (200000), (001000), (101000); \right. \\ &\quad \left. (002000), (000100), (100100), (001100), (000200) \right\}; \\ Q_{22} &= \left\{ (002000), (000100), (100100), (001100), (000200); \right. \\ &\quad \left. (002000), (000100), (100100), (001100), (000200) \right\}; \\ Q_{23} &= \left\{ (002000), (000100), (100100), (001100), (000200); \right. \\ &\quad \left. (002000), (000100), (100100), (001100), (000200) \right\}; \\ Q_{24} &= \left\{ (000001), (100001), (000100), (100100), (001100), (000002); \right. \\ &\quad \left. (002000), (000100), (100100), (001100), (000200) \right\}; \\ Q_{31} &= \left\{ (000000), (100000), (200000), (001000), (101000); \right. \\ &\quad \left. (000010), (100010), (001010), (000110), (000020) \right\}; \\ Q_{32} &= \left\{ (002000), (000100), (100100), (001100), (000200); \right. \\ &\quad \left. (000010), (100010), (001010), (000110), (000020) \right\}; \\ Q_{33} &= \left\{ (000010), (100010), (001010), (000110), (000020); \right. \\ &\quad \left. (000010), (100010), (001010), (000110), (000020) \right\}; \\ Q_{34} &= \left\{ (000001), (100001), (001001), (000101), (000011), (000002); \right. \\ &\quad \left. (000010), (100010), (001010), (000110), (000020) \right\}; \\ Q_{41} &= \left\{ (000000), (100000), (200000), (001000), (101000); \right. \\ &\quad \left. (000001), (100001), (001001), (000101), (000011), (000002) \right\}; \\ Q_{42} &= \left\{ (002000), (000100), (100100), (001100), (000200); \right. \\ &\quad \left. (000001), (100001), (001001), (000101), (000011), (000002) \right\}; \end{aligned}$$

$$Q_{43} = \left\{ (000010), (100010), (001010), (000110), (000020); \right. \\ \left. (000001), (100001), (001001), (000101), (000011), (000002) \right\};$$

$$Q_{44} = \left\{ (000001), (100001), (001001), (000101), (000011), (000002); \right. \\ \left. (000001), (100001), (001001), (000101), (000011), (000002) \right\}.$$

Табл. 3. Элементы матрицы Q_{11}

$-\left(m_1 * \lambda_1 + \sum_s m_s * \lambda_2\right)$	$m_1 * \lambda_1$	0	0	0
$p_{2l} * \mu_2$	$-(p_{2l} * \mu_2 + m_1 * \lambda_1 + \sum_s m_s * \lambda_2)$	$m_1 * \lambda_1$	0	0
0	$p_{2l} * \mu_2$	$-p_{2l} * \mu_2$	0	0
0	$p_{11} * \mu_1$	0	$-(p_{11} * \mu_1 + m_1 * \lambda_1)$	0
0	0	$p_{11} * \mu_1$	$p_{2l} * \mu_2$	$-(p_{11} * \mu_1 + p_{2l} * \mu_2 + p_{12} * \mu_1)$

Табл. 4. Элементы матрицы Q_{22}

$-(p_{11} * \mu_1 + p_{12} * \mu_1)$	0	0	$p_{12} * \mu_1$	0
0	$-(p_3 * \mu_2 + m_1 * \lambda_1 + 2 * p_{2l} * \mu_2 + \sum_s m_s * \lambda_2 + \gamma)$	$m_1 * \lambda_1$	0	0
0	$p_{2l} * \mu_2$	$-(4 * p_{2l} * \mu_2 + \gamma)$	0	0
0	0	$p_{11} * \mu_1$	$-(p_3 * \mu_2 + p_{11} * \mu_1 + p_{2l} * \mu_2 + p_{12} * \mu_1 + \gamma)$	$p_{2l} * \mu_2$
0	$p_3 * \mu_2$	0	0	$-(p_3 * \mu_2 + p_{2l} * \mu_2 + p_{11} * \mu_1 + \gamma)$

Табл. 5. Элементы матрицы Q_{33}

$-(\lambda_2 + m_1 * \lambda_1 + \sum_s m_s * \lambda_2)$	$m_1 * \lambda_1$	0	0	$\sum_s m_s * \lambda_2$
0	$-(\lambda_2 + p_{2l} * \mu_2)$	0	0	0
0	$p_{11} * \mu_1$	$-(\lambda_2 + p_{11} * \mu_1 + p_{12} * \mu_1)$	$p_{12} * \mu_1$	0
$p_3 * \mu_2$	0	0	$-(\mu_2 + \lambda_2 + p_3 * \mu_2 + p_{2l} * \mu_2 + p_{12} * \mu_1 + \gamma)$	$p_{2l} * \mu_2 + p_{12} * \mu_1$
0	0	0	λ_2	$-\lambda_2$

Общая форма элемента Q_{11} представлена в Табл. 3, элемента Q_{22} – в Табл. 4, элемента Q_{33} – в Табл. 5, элемента Q_{44} – в Табл. 6.

Для нахождения стационарного распределения вероятностей $\pi = \{\pi_{000000}, \pi_{000001}, \dots, \pi_{i_1 i_2 i_3 i_4 i_5}, \dots\}$ решается

Табл. 6. Элементы матрицы Q_{44}

$-(\mu_2 + m_1 * \lambda_1 + \sum_s m_s * \lambda_2)$	$m_1 * \lambda_1$	0	0	$\sum_s m_s * \lambda_2$
$p_{2l} * \mu_2$	$-(\mu_2 + p_{2l} * \mu_2)$	0	0	0
0	0	$-(\mu_2 + p_3 * \mu_2 + 2p_{2l} * \mu_2 + \gamma)$	$2p_{2l} * \mu_2$	γ
0	0	λ_2	$-(\mu_2 + \lambda_2)$	0
0	0	μ_2	0	$-\mu_2$

система уравнений $\pi Q = 0$ совместно с условием нормировки $\sum_{i_1 i_2 i_3 i_4 i_5} \pi_{i_1 i_2 i_3 i_4 i_5} = 1$ с использованием итерационного метода Зейделя.

На основании инфинитезимальной матрицы определяются основные интегральные характеристические показатели, такие как: среднее число заявок, находящихся в системе, среднее время ожидания, средняя загруженность очереди перед сервером и узлом сети, общее время максимальной загруженности очереди перед сервером и узлом сети, среднее квадратичное время загруженности очереди перед сервером и узлом сети.

4. Имитационное моделирование распределенного реестра с использованием пакета AnyLogic

Для проведения тестирования полученных моделей был использован аппарат имитационного моделирования средствами пакета

AnyLogic, который позволяет определить работу распределенного реестра как системы массового обслуживания. Фрагмент имитационной модели распределенного реестра представлен на Рис. 3.

Условия и результаты эксперимента приведены в Табл. 7 и 8 соответственно. Основной целью ставилось определение размера очереди перед сервером и узлом сети, при котором вероятность ее загрузки будет менее 1,5%.

Результаты имитационного моделирования подтверждают корректность технических решений построения сети распределенного реестра.

Заключение

В работе исследована проблематика определения интегральных характеристических показателей распределенного реестра как системы массового обслуживания. Были определены основные компоненты распределенного реестра, составлена концептуальная модель, на основании которой были сформированы законы

Табл. 7. Условия эксперимента

Название условия	Количественная характеристика
1. Количество участников сети	30
2. Количество клиентов для рассматриваемой СМО	40
3. Максимальный размер очереди перед сервером	20
4. Средняя длительность активного состояния пользователей, с	30
5. Вероятность отправления заявки на клиент из сервера	0,25
6. Вероятность отправления заявки на сервер из ноды	0,43
7. Вероятность отправления заявки на $i+1$ – ю ноду из текущей ноды	0,27
8. Размер очереди на ноде	60
9. Время обработки заявки на сервере, с	15
10. Время обработки заявки на ноде, с	17
11. Время выполнения эксперимента, с	5000

Табл. 8. Результаты эксперимента

Наименование результата	Количественная характеристика
1. Средняя загруженность очереди перед сервером, %	74,2
2. Общее время максимальной загруженности очереди перед сервером, с	24
3. СКО загруженности очереди перед сервером	0,543
4. Вероятность нахождения очереди перед сервером в состоянии максимальной загруженности	0,25
5. Средняя загруженность очереди перед нодой, %	42,4
6. Общее время максимальной загруженности очереди перед нодой, с	0,12
7. СКО загруженности очереди перед нодой	0,652
8. Вероятность нахождения очереди перед нодой в состоянии максимальной загруженности	0,15

распределения случайных величин и обоснована аппроксимация функции распределения заявок от участников распределенного реестра потоками Эрланга, определены условия формирования инфинитезимальной матрицы, требуемые интегральные характеристические показатели системы и была разработана имитационная модель распределенного реестра. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку эвристических алгоритмов с целью оптимизации системы распределенного реестра.

Литература

1. Тапскотт Д. Технология блокчейн: то, что движет финансовой революцией сегодня / Пер. с англ. – М.: Эксмо, 2017. – 448 с. (D. Tapscott. Blockchain Technology: what drives the financial revolution today, Moscow: Eksmo, 2017. – 448p.)
2. Deep Shift – Technology Tipping Points and Societal Impact (2015) / World Economic Forum Survey Report. Доступно по ссылке: http://www3.weforum.org/docs/WEF_GAC15_Technological_Tipping_Points_report_2015.pdf#page=2 (проверен доступ 15 декабря 2020).
3. Swan M. Blockchain. Blueprint for a New Economy. – Gravenstein Highway North, Sebastopol: O'Reilly, 2015. – 149 p.
4. Евсин В.А., Широбокова С.Н., Продан Е.А. Использование технологии распределенных реестров при проектировании информационной системы "Аренда недвижимости" с применением искусственных нейронных сетей // Инженерный вестник Дона, 2018, №1. – С.42. (Доступно по ссылке: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4655>)
5. Нараевский О.А., Евсин В.А. Модель автоматизации бизнес-процессов документооборота с использованием технологии распределенных реестров // Моделирование. Фундаментальные исследования, теория, методы и средства: материалы 18-ой Национальной молодежной науч.-практ. конф., Новочеркасск, 30-31 июля 2018 г. Новочеркасск: ООО «Лик», 2018. – С.165-170.
6. Савельев А.И. Договорное право 2.0: "умные" контракты как начало конца классического договорного права // "Вестник гражданского права". – 2016. – №3. – С. 32-60.
7. Д. Дрешер Основы Блокчейн Пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 312с. (D. Drescher, The basics of the blockchain. Moscow: DMK Press, 2017, 312 p.)
8. Андрушин С.А. Технология распределенных реестров в финансовой сфере России // Банковское дело, 2018. №2. – С. 4-15.
9. Нараевский О.А., Евсин В.А. Формализованный анализ функциональной полноты платформ распределенных реестров // Фундаментальные основы, теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики: материалы 19-ой Национальной молодежной науч.-практ. конф., Новочеркасск, 27–28 февраля 2018 г. Новочеркасск: ООО «Лик», 2018. – С. 396-404.
10. Евсин В.А., Продан Е.А., Евсина В.А. Аспекты проектирования информационной системы по аренде недвижимости с использованием технологии распределенных реестров // Фундаментальные основы, теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики: материалы 19-ой Национальной молодежной науч.-практ. конф., Новочеркасск, 27–28 февраля 2018 г. Новочеркасск: ООО «Лик», 2018. – С. 318-323.
11. Косоруков О.А. Исследование операций. – М: Экзамен, 2003. – 448с.
12. Халин В.Г. Теория принятия решений. – М: Юрайт, 2017. – 432 с.
13. Черноморов Г.А. Теория принятия решений: Учебное пособие / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. – 3-е изд. перераб. и доп. – Новочеркасск: Ред.журн. «Изв.Вузов. Электромеханика», 2005. – 448с.
14. R. Chakka and G. P. Garrison, "Markovsky modulated multi-server queue with negative applications-IgE mm NCL/gr/gr/LG-queue," Informatika ASTA , 2001, vol. 37. – pp. 785-799.
15. Абрамов П.Б., Леньшин А.В. Оценка параметров систем массового обслуживания при аппроксимации дисциплины обслуживания потоками Эрланга // Вестник Воронежского института МВД России. 2012. – №2. – С. 13-18.

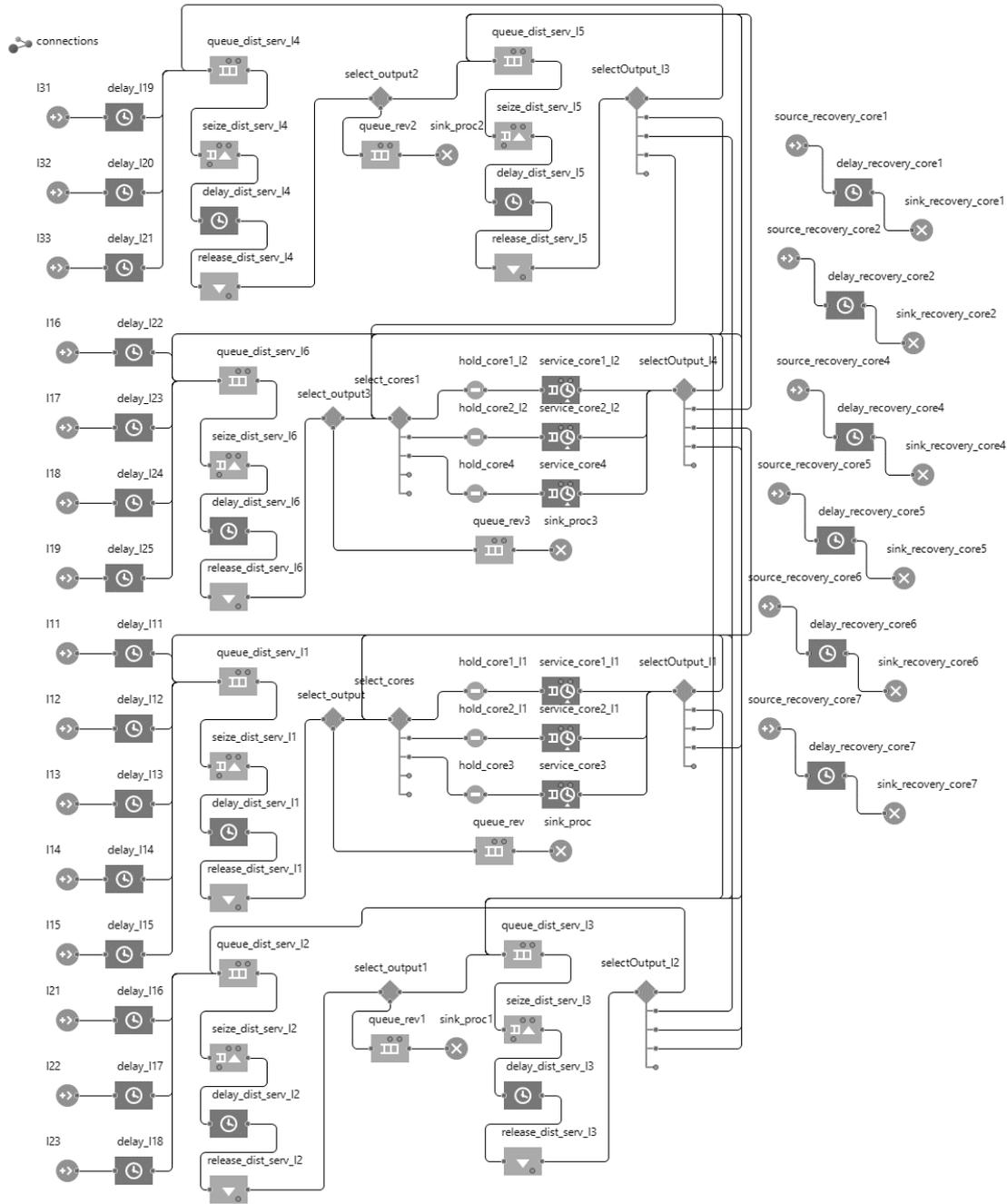


Рис. 3. Фрагмент имитационной модели распределенного реестра

16. Gross D., Harris C. M. Fundamentals of Queueing Theory. – Fourth edition N.-Y.: Wiley, 2008. – 528p.
 17. Паномарев Д.Ю. Теория телеграфика. - Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетникова, 2017. – 160 с. (Panomarev D. Yu. The theory of telegraf. Krasnoyarsk: SibSU named after M. F. Reshetnikov, 2017. – 160 p.)
 18. Евсин В.А., Литвяк Р.К. Математическая модель информационной системы высокой готовности на базе

кластерной архитектуры // Моделирование. Теория, методы и средства: материалы 16-ой Междуна. науч.-практ. конф., Новочеркасск, 06–07 декабря 2016 г. Новочеркасск: ООО «Лик», 2016. – С. 176-179.
 19. Хемди А. Таха Введение в исследование операций - 7 изд. / Пер. с англ. – М.: Вильямс, 2005. – 912с. (A. Hemdi, Taha Introduction to operations research, 7 rd ed. Moscow: Williams, 2005. – 912p.)

Евсин Владимир Александрович. Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Российская Федерация. Ассистент кафедры «Информационные и измерительные системы и технологии». Количество печатных работ: 54. Область научных интересов: вычислительная математика, математическое моделирование и проектирование информационных систем, оптимизация информационных процессов, искусственный интеллект. e-mail: ewsin.wladimir95@gmail.com

Широбоква Светлана Николаевна. Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Российская Федерация. Доцент кафедры «Информационные и измерительные системы и технологии», кандидат технических наук, доцент. Количество печатных работ: 203. Область научных интересов: вычислительная математика, прикладная информатика, математическое моделирование информационных систем и процессов, информационные технологии, предметно-ориентированные информационные системы, e-mail: shirobokova_sn@mail.ru

Воробьев Сергей Петрович. Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Российская Федерация. Доцент кафедры «Информационные и измерительные системы и технологии», кандидат технических наук, доцент. Количество печатных работ: 134. Область научных интересов: математическое моделирование, многоуровневая топология, распределённая информационная система, архитектура вычислительной сети, e-mail: vsp1999@yandex.ru

A Model of a Distributed Registry System with the Approximation of Applications by the Erlang Flow

V. A. Evsin, S. N. Shirobokova, S. P. Vorobyev

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russian Federation

Abstract. In this paper, we propose a method for mathematically describing a distributed registry as a queuing system. A conceptual model is presented that defines the main structural elements of the topological structure of a distributed registry, such as network nodes, registry nodes, and distributed registry services for conducting transaction verification operations. The distribution functions of a random variable characteristic of these processes are determined and presented. The application distribution is approximated by Erlang flows to obtain the most accurate value. The conditions for constructing an infinitesimal matrix are determined, taking into account the features of information processes in a distributed registry. Formed the conditions for the normalization. The main integral characteristic indicators required for the analysis of the distributed registry as a queuing system are presented. In order to determine the main integral characteristic indicators of the distributed registry system, a simulation model was developed on the AnyLogic platform.

Keywords: mathematical modeling, queuing systems, distributed registry, approximation, Erlang phase method, simulation model.

DOI 10.14357/20718632210107

References

1. D. Tapscott. 2017. Blockchain Technology: what drives the financial revolution today, Moscow: Eksmo, 448p.
2. Deep Shift – Technology Tipping Points and Societal Impact. 2015. World Economic Forum Survey Report. Available at: http://www3.weforum.org/docs/WEF_GAC15_Technological_Tipping_Points_report_2015.pdf#page=2 (accessed January 25, 2021).
3. Swan M. 2015. Blockchain. Blueprint for a New Economy. - Gravenstein Highway North, Sebastopol: O'Reilly, 149 p.
4. Evsin V.A., Shirobokova S.N., Prodan E.A. 2018. Ispol'zovanie tekhnologii raspredelennyh reestrov pri proektirovanii informacionnoj sistemy "Arenda nedvizhimosti" s primeneniem iskusstvennyh nejronnyh setej [Use of distributed registry technology in the design of the information system "real estate rental" using artificial neural networks] Inzhenernyj vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don], 1 Available at: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4655> (accessed January 25, 2021).
5. Naraevskij O.A., Evsin V.A. 2018. Model' avtomatizacii biznes-processov dokumentooborota s ispol'zovaniem tekhnologii raspredelennyh reestrov. Modelirovanie. Fundamental'nye issledovaniya, teoriya, metody i sredstva: materialy 18-oj Nacional'noj molodezhnoj nauch.-prakt. konf. [Model of automation of business processes of workflow using technology of distributed

- registries,” Modeling. Fundamental research, theory, methods and tools: the 18th international conference. youth scientific-practical Conf.] Novocherkassk. 165-170.
6. Savel'ev A.I. 2016. Dogovornoe pravo 2.0: "Umnye" kontrakty kak nachalo konca klassicheskogo dogovornogo prava [Contract Law 2.0: «Smart» contracts as the beginning of the end of classical contract law]. "Vestnik grazhdanskogo prava" [Bulletin of Civil Law]. 3:32-60.
 7. D. Drescher. 2017. The basics of the blockchain. Moscow: DMK Press, 312 p.
 8. Andryushchin S.A. 2018. Tekhnologiya raspredelennyh reestrov v finansovoj sfere Rossii [Technology of distributed registers in the financial sphere of Russia]. Bankovskoe delo [Banking]. 2:4-15.
 9. Naraevskij O.A., Evsin V.A. 2018. Formalizovannyj analiz funkcional'noj polnoty platform raspredelennyh reestrov. Fundamental'nye osnovy, teoriya, metody i sredstva izmerenij, kontrolya i diagnostiki: materialy 19-oj Nacional'noj molodezhnoj nauch.-prakt. konf. [Formalized analysis of the functional completeness of the platforms of distributed ledger. Fundamentals, theory, methods and tools of measurement, control and diagnostics: the 19th international conference. youth scientific and practical Conf.] Novocherkassk. 396-404.
 10. Evsin V.A., Prodan E.A., Evsina V.A. 2018. Aspekty proektirovaniya informacionnoj sistemy po arende nedvizhimosti s ispol'zovaniem tekhnologii raspredelennyh reestrov. Fundamental'nye osnovy, teoriya, metody i sredstva izmerenij, kontrolya i diagnostiki: materialy 19-oj Nacional'noj molodezhnoj nauch.-prakt. konf. [Aspects of design of information systems real estate rental using the technology of distributed registries. Fundamentals, theory, methods and means of measurement, control and diagnostics: the 19th international conference. youth scientific-practical Conf.], Novocherkassk. 318-323.
 11. Kosorukov O.A. 2003. Issledovanie operacij. [Operation research] – Moscow: Ekzamen. 448p.
 12. Halin V.G. 2017. Teoriya prinyatiya reshenij [Theory of decision-making]. - Moscow: Yurajt. 432 s.
 13. Chernomorov G.A. 2005. Teoriya prinyatiya reshenij: Uchebnoe posobie / YUzh.-Ros. gos. tekhn. un-t. - 3-e izd. pererab. i dop. [Theory of decision-making, South-Russian state technical University, 3 rd ed]. Novocherkassk: «Izv.Vuzov. Elektromekhanika». 448p.
 14. R. Chakka and G. P. Garrison. 2001. “Markovsky modulated multi-server queue with negative applications-IgE mm NCL/gr/gr/LG-queue,” Informatika ASTA. 785-799.
 15. Abramov P.B., Len'shin A.V. 2012. Ocenka parametrov sistem massovogo obsluzhivaniya pri approksimacii discipliny obsluzhivaniya potokami Erlanga [Estimation of mass service systems parameters at approximation of service discipline by Erlang streams]. Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii. [Bulletin of the Voronezh Institute of the ministry of internal affairs of Russia].2:13-18.
 16. Gross D., Harris C. M. 2008. Fundamentals of Queueing Theory. – Fourth edition N.-Y.: Wiley. 528p.
 17. Panomarev D. Yu. The theory of teletraf. Krasnoyarsk: SibSU named after M. F. Reshetnikov, 2017. – 160 p.
 18. Evsin V.A., Litvyak R.K. 2016. Matematicheskaya model' informacionnoj sistemy vysokoj gotovnosti na baze klasternoj arhitektury. Modelirovanie. Teoriya, metody i sredstva: materialy 16-oj Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [“Mathematical model of information high availability system based on cluster architecture,” Modeling. Theory, methods and tools: the 16th international conference. scientific-practical Conf.], Novocherkassk. 176-179.
 19. A. Hemdi Taha. 2005. Introduction to operations research, 7 rd ed. Moscow: Williams. 912p.

Evsin V. A. assistant of Information and measuring systems and technologies department, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132 Prosveshcheniya str., Novocherkassk, 346428, Russia, e-mail: ewsin.wladimir95@gmail.com

Shirobokova S. N. Associate professor of Information and measuring systems and technologies department, PhD in Economics, associate professor, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132 Prosveshcheniya str., Novocherkassk, 346428, Russia, e-mail: shirobokova_sn@mail.ru

Vorobyev S. P. Associate professor of Information and measuring systems and technologies department, PhD in Technology, associate professor, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132 Prosveshcheniya str., Novocherkassk, 346428, Russia, e-mail: vsp1999@yandex.ru