

Научная статья

УДК 519.872, 621.391

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-46-54>

Оценка эффективности адаптивного алгоритма блокчейн-сетей, как части мультиконсенсусной системы на сетях связи

Альбина Владимировна Помогалова, pomogalova.av@sut.ru

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация.

Аннотация

Актуальность предлагаемых в работе подходов и решений обусловлена стремлением к распределенным вычислениям и децентрализации модулей систем с помощью технологии блокчейн с целью повышения автономности, безопасности и независимости компонентов системы. Внедрение технологии блокчейн для децентрализации затрудняется отсутствием гибкости с точки зрения алгоритма принятия единого решения в системе – консенсуса, влияющего на количество генерируемого сетевого трафика и требованиям к аппаратной составляющей. В связи с меняющимся характером передаваемого трафика, загруженности канала связи, времени суток передачи трафика, оборудования, используемых сетевых протоколов разработка единого универсального алгоритма консенсуса не является возможной, так как зависит от очень широкого ряда изменяемых и специфичных параметров, характерных для разных задач. Внесение механизмов адаптации к текущим сетевым условиям и изменение алгоритма консенсуса без потери информации и с удовлетворяющим уровнем задержек позволило бы обеспечить достаточную гибкость для дальнейшего внедрения в существующие телекоммуникационные системы.

Целью настоящей работы является оценка эффективности предлагаемого адаптивного алгоритма выбора консенсуса блокчейн-сетей. Его сущность заключается в смене алгоритма консенсуса на участке сети связи блокчейн-сети при достижении определенных условий, позволяющий регулировать количество генерируемой нагрузки на сеть связи для снижения потерь блоков транзакций и последующей задержки их обработки.

Предложенная модель оценки эффективности базируется на **методах** математического моделирования, анализе дифференциальных уравнений, теории массового обслуживания и сетевых графов. Анализ **результатов** показал эффективность предложенной модели при сравнении результатов аналитического расчета и проведенного эксперимента.

Научная новизна заключается в предлагаемом подходе разработки адаптивного алгоритма выбора консенсуса, в отличие от разработки универсального алгоритма консенсуса, и модели оценки эффективности предлагаемого подхода на сети связи с учетом ряда параметров, характеризующих устройства и участок сети связи.

Теоретическая значимость заключается в универсальности предлагаемой модели оценки эффективности для расчета скорости синхронизации всех узлов блокчейн-сети при задаваемых сетевых параметрах.

Практическая значимость предложенного алгоритма и метода оценки эффективности заключается в формировании новых подходов и возможностей при интеграции технологии блокчейн в современные сети связи, абстрагируя от проблематики подбора консенсуса в изменяющихся условиях участка сети связи.

Ключевые слова: блокчейн, алгоритм консенсуса, адаптивный алгоритм выбора консенсуса, эффективность, модель оценки эффективности, TRP

Ссылка для цитирования: Помогалова А.В. Оценка эффективности адаптивного алгоритма блокчейн-сетей, как части мультиконсенсусной системы на сетях связи // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 5. С. 34–42. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-5-46-54. EDN:VOXXAK

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-46-54>

The Efficiency Assessment of the Blockchain Networks Adaptive Algorithm as Part of a Multi-Consensus System on Communication Networks

Albina V. Pomogalova, pomogalova.av@sut.ru

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Annotation

The relevance of the approaches and solutions proposed in the work is due to the desire for distributed computing and decentralization of system modules using blockchain technology in order to increase the autonomy, security and independence of system components. The implementation of blockchain technology for decentralization is hampered by the lack of flexibility in terms of the algorithm for making a single decision in the asynchronous system – consensus, which affects the amount of generated network traffic and the requirements for the hardware component. Due to the changing nature of the transmitted traffic, the load on the communication channel, the time of day of traffic transmission, the equipment, and the network protocols used, the development of a single universal consensus algorithm is not possible, since it depends on a very wide range of variable and specific parameters characteristic of different tasks. The introduction of adaptation mechanisms to current network conditions and a change in the consensus algorithm without losing information and with a satisfactory level of delays would provide sufficient flexibility for further implementation in existing telecommunication systems. **The purpose** of this paper is to evaluate the effectiveness of the proposed adaptive algorithm for choosing a consensus for blockchain networks.

The essence of the presented algorithm is to change the consensus algorithm on a section of the blockchain network upon reaching certain network conditions, which allows regulating the amount of generated load on the communication network to reduce the loss of transaction blocks and the subsequent delay in their processing. The proposed efficiency assessment model is based on mathematical modeling methods, differential equation analysis, queueing theory and network graphs. The analysis of the results showed the efficiency of the proposed model when comparing the results of the analytical calculation and the experiment. **The scientific novelty** of the proposed approach is to developing an adaptive consensus selection algorithm, as opposed to developing a universal consensus algorithm, and the efficiency assessment model of the proposed algorithm on the communication network, taking into account a number of parameters characterizing the devices and the section of the communication network.

The theoretical significance is in the universality of the proposed efficiency assessment model for calculating the synchronization speed of all nodes of the blockchain network with specified network parameters.

The practical significance of the proposed algorithm and efficiency assessment method lies in the formation of new approaches and opportunities for integrating blockchain technology into modern communication networks, abstracting from the problem of consensus selection in changing conditions of the communication network section.

Keywords: blockchain, consensus algorithm, adaptive consensus selection algorithm, efficiency, efficiency evaluation model, DLT

For citation: Pomogalova A.V. The Efficiency Assessment of the Blockchain Networks Adaptive Algorithm as Part of a Multi-Consensus System on Communication Networks. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(5):34–42. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-5-46-54. EDN:VOXXAK

Введение

На сегодняшний день представлено множество работ, посвященных исследованиям в области взаимодействия с технологией блокчейн, интеграции в современные телекоммуникационные, гетеро-

генные сети. В работах рассматриваются проблемы сетевого характера, аспекты безопасности в блокчейн-сетях [1], форматов данных, способах оптимизации и ускорения блокчейн-сетей [2–4]. К проблемам, влияющим на интеграцию решений на основе

распределенного реестра и технологии блокчейн, как частного случая, можно отнести низкую пропускную способность, задержку транзакций, отсутствие гарантий доставки, асинхронность, вычислительные ресурсы, энергопотребление.

Многие из обозначенных проблем могут быть решены с помощью корректно подобранного алгоритма консенсуса и правил сети [1], которые включают в себя:

- размер транзакции;
- размер блока;
- частоту выпуска блоков транзакций;
- порядок создания блока;
- способ проверки корректности блока и соответствия правилам сети.

Совокупность правил сети и алгоритма консенсуса позволяют достаточно гибко масштабировать систему, адаптировать под сетевые условия в некоторый момент времени T . На сегодняшний день исследователями и разработчиками представлено более 30 вариаций алгоритмов консенсуса, каждый из которых отлично проявляет себя при определенных сетевых условиях, что, к сожалению, не решает проблемы для сетей передачи данных в целом, а может быть решением для частных, конкретных кейсов [3].

Но если речь идет о современных телекоммуникационных сетях связи, где частота передаваемых сетевых пакетов постоянно меняется и зависит от множества факторов (время суток, праздничные дни, район, регион, мировые события), где помимо пользовательской активности, может присутствовать понятие приоритетного трафика, то подбор универсального алгоритма консенсуса становится крайне многокритериальной задачей [5]. Если же речь идет о, например, интеллектуальных транспортных сетях связи, то дополнительным фактором является изменчивость аппаратного обеспечения инфраструктуры участка связи (центр города снабжен более современными устройствами с более широкой площадью покрытия в сравнении с удаленной трассой в регионах).

Однако, если бы система узлов блокчейн-сети могла реагировать на изменения сетевого характера, учитывать их и при наступлении определенных условий менять правила сети и алгоритм консенсуса до последующих изменений, то это позволило бы снизить зависимость от аппаратного обеспечения и предоставить достаточный уровень гибкости при интеграции технологии блокчейн [5, 6]. Поиск единого универсального алгоритма консенсуса является не самым лучшим решением в случае современных сетей передачи данных. Это обусловлено меняющимся характером трафика, аппаратным и программным обеспечением. Так, какие-то сети более чувствительны к задержкам и большим

объемам данных, в других – аппаратная составляющая стандартизирована и всегда обладает одинаковым набором параметров и мощностью [6, 7]. Наиболее верным решением будет создание адаптивного алгоритма выбора консенсуса в системе, позволяющего выбирать наиболее подходящий алгоритм консенсуса в момент времени T при текущих условиях окружающей системы, который можно назвать одним из ключевых компонентов мультиконсенсуса.

Гетерогенная сеть строится из подсетей, работающих в разных стандартах, по разным технологиям. При этом все они образуют единую интегрированную среду, где обеспечен бесшовный, незаметный для пользователя переход из одной подсети в другую. То есть, гетерогенная сеть функционирует как единая система. Интеграция технологии блокчейн в современные телекоммуникационные сети должна отвечать требованиям к гетерогенной сети [8]. Так, мультиконсенсусная блокчейн-сеть является аналогом гетерогенной сети связи в контексте технологии блокчейн, где в зависимости от сетевых характеристик или аппаратного обеспечения происходит выбор алгоритма консенсуса для участка сети. Последний, в свою очередь, совместно образует единую сеть передачи информации и распространения блоков данных (рисунок 1) для уязвимых участников дорожного движения (VRU, аббр. от англ. Vulnerable Road Users), устройств, установленных в транспортном средстве (OBU, аббр. от англ. On-Board Unit) и устройств, установленных на дорожной инфраструктуре (RSU, аббр. от англ. Roadside Unit).

Адаптивный алгоритм выбора консенсуса

Неотъемлемым компонентом рассматриваемой концепции является адаптивный алгоритм выбора алгоритма консенсуса в зависимости от сетевых условий [9], который позволяет корректировать такие характеристики информационных потоков блокчейн, как:

- максимальный или минимальный размер блока;
- максимальный или минимальный размер транзакции;
- частоту появления новых блоков в сети (сложность);
- правила построения блока и его валидации.

Принцип работы адаптивного алгоритма представлен в виде блок-схемы на рисунке 2. Каждый узел блокчейн-сети обладает собственным модулем оценки сетевых характеристик в момент времени T , для принятия решения о смене алгоритма консенсуса и корректировки параметров формирования новых блоков данных.

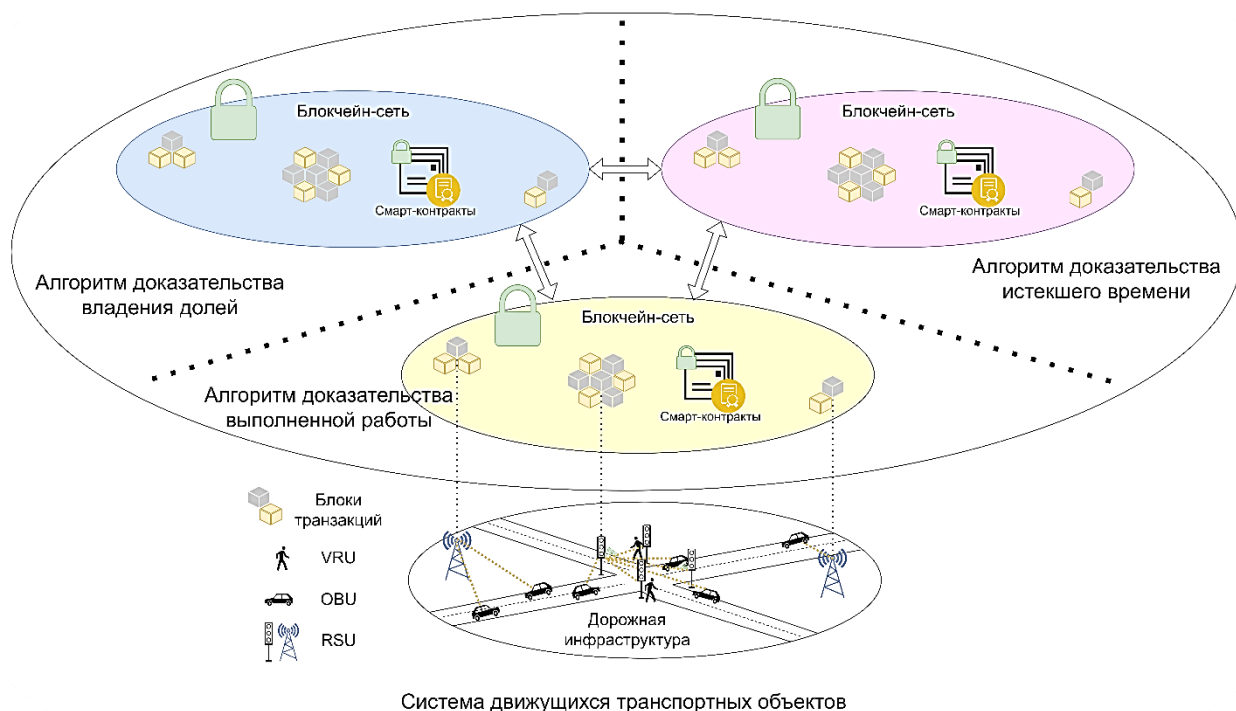


Рис. 1. Пример мультиконсенсусной блокчейн-сети для интеллектуальной транспортной системы
 Fig. 1. An Example of a Multi-Consensus Blockchain Network for an Intelligent Transportation System

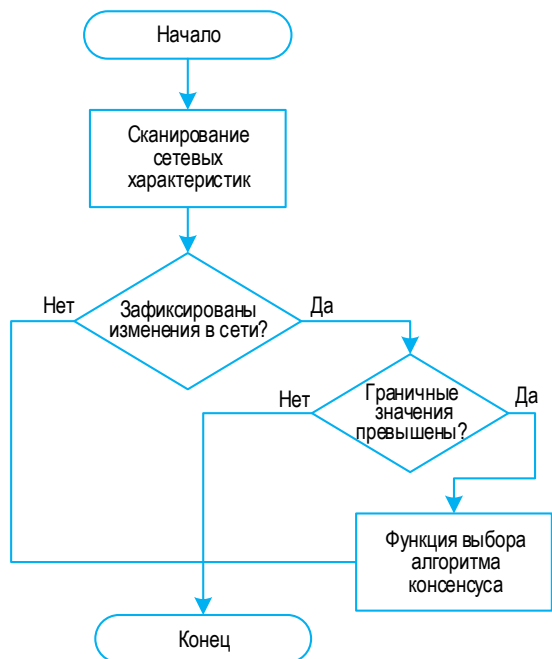


Рис. 2. Блок-схема адаптивного алгоритма выбора консенсуса на основе данных изменения сетевых характеристик
 Fig. 2. Block Diagram of an Adaptive Consensus Selection Algorithm Based on Network Characteristic Change Data

Далее, информация об обновлении правил создания и валидации блоков распространяется от узла к другим узлам с целью смены общего алгоритма консенсуса в сети. Этот процесс делится на несколько этапов передачи информации, что напрямую зависит от количества связей узла. На рисунке

3 представлена общая схема сценария изменения алгоритма консенсуса в связи с изменением сетевых параметров. Как можно заметить, вторым этапом после обнаружения необходимости узлом сменить алгоритм консенсуса является передача сведений о смене. Первыми сообщением о смене консенсуса получают узлы, адреса которых знает исходный узел, с которым производится синхронизация данных. После получения информации эти узлы передают запрос на смену консенсуса далее.

Однако, эффективность данного подхода ограничена количеством устройств и их связей, количеством «уровней» передачи информации – чем меньше связей у узла сети, тем больше будет этапов передачи информации до границы сети (аналогично принципам систем с графами). Ограничение появляется в связи с функционированием сети во время смены алгоритма консенсуса, так как каждый узел продолжает работу по формированию блоков транзакций, сформированного на основе правил алгоритма консенсуса 1, не может быть проверено и добавлено в сеть узлом, чей активный алгоритм консенсуса при валидации отличается, что влечет за собой потерю блоков транзакций, и, как следствие, задержку в обработке транзакций [11].

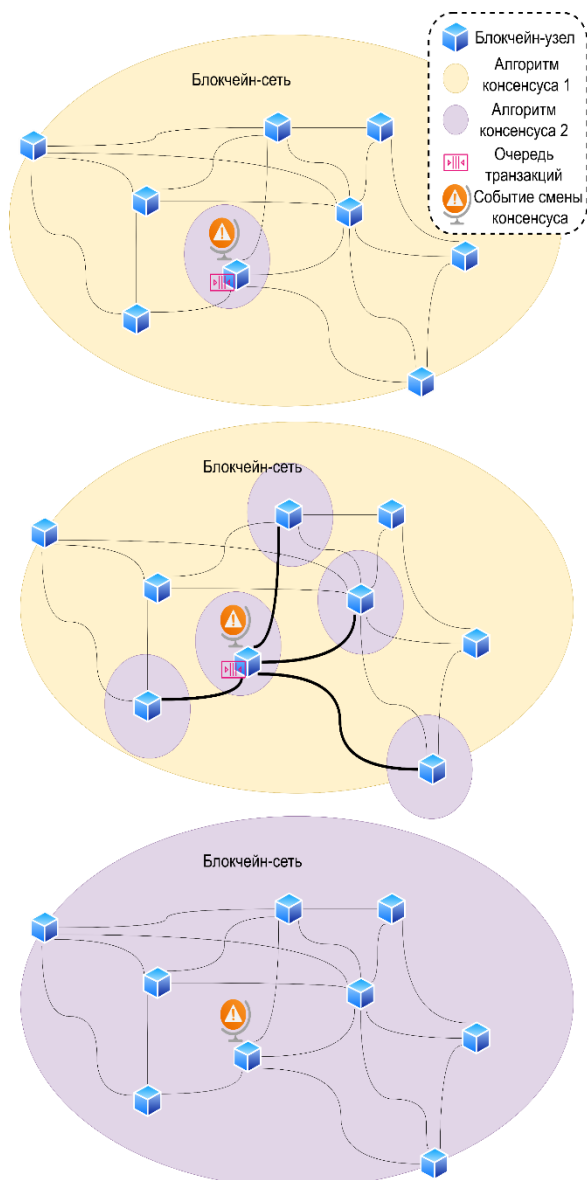


Рис. 3. Схема распространения информации о смене алгоритма консенсуса в сети устройств

Fig. 3. Scheme of Distribution of Information about Change of Consensus Algorithm in the Network of Devices

Расчет временных характеристик распространения информации по сети связи

Как можно заметить из приведенной схемы (см. рисунок 3), распространение блоков информации напоминает систему графов. Одной из важных характеристик графа является его диаметр $D(G)$, который определяет максимальное расстояние между любыми двумя узлами. Диаметр графа может быть использован для оценки времени полного распространения информации [12].

Для сетей с топологией малого мира (тип графа, в котором большинство узлов не являются соседями друг друга, но до большинства узлов можно добраться из любого другого с помощью небольшого числа переходов), например, в децентрализованных

системах диаметр графа $D(G)$ приближенно равен $\log N$, где N — количество узлов в сети.

Если предположить, что каждое сообщение передается с фиксированной частотой c (обратная величина ко времени передачи сообщения τ_{ij} , где τ_{ij} — время передачи от узла i к узлу j), то время полного распространения информации по графу G можно оценить через диаметр:

$$T_{full} \approx \frac{D(G)}{c}, \quad (1)$$

где c — частота передачи сообщений между узлами; $D(G)$ — диаметр графа сети G (максимальное расстояние между узлами); T_{full} — время полного распространения информации о переключении алгоритма консенсуса по сети.

Во время периода T_{full} узлы, которые еще не получили информацию о переключении, продолжают генерировать блоки по старому алгоритму. Это может привести к конфликтам или форкам в блокчейне, что неизбежно ведет к потере блоков транзакций [11].

Пусть $P_{informed}(t)$ — доля узлов, получивших информацию к моменту времени t . Смоделируем распространение информации по экспоненциальной функции:

$$P_{informed}(t) = 1 - e^{-\beta t}, \quad (2)$$

где β — коэффициент скорости распространения информации, зависящий от c и топологии сети.

Доля узлов, не получивших информацию к моменту t , будет выглядеть следующим образом:

$$P_{uniformed}(t) = e^{-\beta t}. \quad (3)$$

Поскольку процессы происходят в сетях с множеством узлов и зависят от большого количества случайных факторов, экспоненциальная функция помогает отразить вероятностные свойства систем и их динамику. С помощью полученных выражений для вычисления скорости распространения информации на основе графов можно представить модель для определения эффективности адаптивного алгоритма на сети связи.

Расчет эффективности адаптивного алгоритма для сети связи

Оценка эффективности адаптивного алгоритма напрямую зависит от количества создаваемых блоков, которые не будут утеряны в рамках смены алгоритма консенсуса.

Для оценки общего числа блоков, созданных по исходному алгоритму консенсуса B_{old} , необходимо вычислить интеграл (4), представляющий собой произведение количества узлов N , интенсивности генерации блоков λ и вероятности того, что узел

еще не получил информацию о переключении алгоритма консенсуса $P_{uninformed}$, в течение времени от

$t = 0$ до $t = T_{full}$ – полного времени переключения всех узлов сети.

$$B_{old} = N\lambda \int_0^{T_{full}} P_{uninformed}(t)dt = N\lambda \int_0^{T_{full}} e^{-\beta t} dt. \quad (4)$$

Выполнив преобразования, получим:

$$B_{old} = N\lambda \left(\frac{1 - e^{-\beta T_{full}}}{\beta} \right). \quad (5)$$

Если $\beta T_{full} \gg 1$, то $e^{-\beta T_{full}} \approx 0$, и тогда:

$$B_{old} \approx \frac{N\lambda}{\beta}. \quad (6)$$

В этом случае общее количество блоков, созданных всеми узлами за период времени T , составит:

$$B_{total} = N\lambda T, \quad (7)$$

где λ – средняя частота создания блоков узлом.

Разумно будет ввести понятие «полезных» блоков. Так как часть блоков, создаваемых во время смены консенсуса на сети, может быть утеряна, то абсолютно корректными с точки зрения гарантии принятия сетью можно считать блоки, созданные в сети, когда она полностью перешла на другой алгоритм консенсуса.

«Полезными» называют блоки, созданные после полного переключения на новый алгоритм консенсуса, то есть после времени T_{full} :

$$B_{useful} = N\lambda(T - T_{full}). \quad (8)$$

Эффективность адаптивного алгоритма η можно определить как отношение числа «полезных» блоков к общему числу созданных блоков:

$$\eta = \frac{B_{useful}}{B_{total}} = \frac{N\lambda(T - T_{full})}{N\lambda T} = 1 - \frac{T_{full}}{T}. \quad (9)$$

Выражение (9) демонстрирует, что эффективность уменьшается линейно с увеличением времени распространения информации T_{full} относительно общего времени T .

Учтем влияние количества узлов и скорости передачи данных и подставим выражение для T_{full} :

$$\eta = 1 - \frac{T_{full}}{T} = 1 - \frac{D(G)}{cT}. \quad (10)$$

При фиксированном T эффективность η зависит от:

- диаметра графа $D(G)$: чем больше диаметр, тем больше T_{full} и ниже эффективность;
- частоты передачи сообщений c : чем больше частота передачи, тем меньше T_{full} и выше эффективность.

Также необходимо учесть влияние скорости передачи транзакций на обработку и формирование блока, который затем распространяется по сети, уменьшая пропускную способность всего другого трафика канала связи.

Пусть частота создания транзакций λ_{tx} влияет на нагрузку сети и потенциально на время передачи сообщений, можно выразить c как функцию от λ_{tx} :

$$c = c_0 - k\lambda_{tx}, \quad (11)$$

где c_0 – базовая частота передачи при отсутствии транзакций; k – коэффициент, показывающий, как увеличение скорости транзакций уменьшает частоту передачи сообщений из-за сетевой загруженности.

Обобщенную математическую модель для оценки эффективности адаптивного алгоритма с учетом количества узлов N , скорости передачи данных c , скорости создания транзакций λ_{tx} и времени T можно представить в виде выражения:

$$\eta = 1 - \frac{D(G)}{(c_0 - k\lambda_{tx})T}. \quad (12)$$

Учтем, что диаметр графа $D(G)$ обычно зависит от количества узлов N . Для графов типа «малый мир» или случайных графов Эрдаша – Реньи принимает вид $D(G) \approx \log N$ и выражение эффективности адаптивного алгоритма примет вид:

$$\eta = 1 - \frac{\log N}{(c_0 - k\lambda_{tx})T}. \quad (13)$$

Теперь расширим модель, добавив в нее зависимость от времени генерации блоков T_{block} и размера блоков B_{size} с коэффициентом α для корректировки уровня влияния размера блока на сеть. Время генерации блоков и их размер – ключевые параметры, так как при активной генерации транзакций в сети начнет формироваться буфер (очередь), который в блокчейне называется mempool (сокр. mempool), влияющий на нагрузку сети и эффективность работы консенсуса [13].

С учетом обозначенных добавляемых параметров модель примет следующий вид:

$$\eta = 1 - \frac{D(G) * \alpha * B_{size}}{(c_0 - k\lambda_{tx}) * T * T_{block}}. \quad (14)$$

Исходя из выражений, представленных выше, можно заключить, что при увеличении:

- количества узлов N : эффективность η уменьшается логарифмически, так как увеличивается диаметр графа;
- частоты передачи c : эффективность η увеличивается, так как уменьшается время распространения информации;
- времени создания блока T_{block} : эффективность η увеличивается, так как уменьшается количество некорректно создаваемой информации;
- частоты создания транзакций λ_{tx} : эффективность η уменьшается, если λ_{tx} существенно влияет на c .

Апробация математической модели оценки эффективности адаптивного алгоритма

Финальный вид математической модели расчета эффективности адаптивного алгоритма представлен в выражении 14. Чтобы оценить корректности работы представленной модели проведем теоретический расчет и моделирование (таблица 1 и рисунок 4) для сравнения результатов [14].

В ходе экспериментального моделирования применим следующие параметры сети:

- количество узлов N : 100;
- диаметр графа $D(G)$: 4,6;
- частота передачи данных c_0 : 100 сообщений в секунду;
- размер блока B_{size} : 50 транзакций на блок;
- частота создания транзакций λ_{tx} : от 50 до 200 транзакций в секунду;
- время генерации блока T_{block} : от 10 до 50 секунд на блок;
- время наблюдения T : 200 секунд.

Количество узлов и диаметр графа постоянны на период всех теоретических и экспериментальных измерений и не представлены в таблице 4.

ТАБЛИЦА 1. Сравнительные данные теоретических и экспериментальных расчетов

TABLE 1. Comparative Data of the Theoretical and Experimental Calculations

T_{block} (сек)	λ_{tx}	Эффективность η (%)		Отклонение (%)
		теоретическая	экспериментальная	
10	50	79,8	77,9	-1,9
20	50	82,5	81,2	-1,3
40	50	85,0	84,1	-0,9
50	50	86,2	85,4	-0,8
10	200	64,5	62,1	-2,4
20	200	67,3	65,8	-1,5
40	200	70,2	69,0	-1,2
50	200	72,1	71,3	-0,8

Примечание: λ_{tx} – частота создания транзакций (транзакций/сек)

Исходя из полученных результатов, можно сделать следующие выводы.

Во-первых, меньшее время генерации блоков T_{block} (например, 10 секунд) приводит к значительному снижению эффективности, так как больше блоков генерируются и теряются до переключения алгоритма.

Во-вторых, с увеличением времени генерации блоков эффективность алгоритма повышается, что связано с меньшим количеством блоков, созданных по старому алгоритму.

В-третьих, с увеличением частоты создания транзакций λ_{tx} эффективность снижается, особенно при более высоких значениях λ_{tx} . Это связано с тем, что в блоке с высокой частотой создается большее количество транзакций, и, соответственно, больше из них теряется, если блок сгенерирован узлами, не перешедшими на новый алгоритм консенсуса.

В-четвертых, высокая частота создания транзакций существенно снижает эффективность сети, так как большее количество транзакций теряется до завершения процесса переключения алгоритма консенсуса.

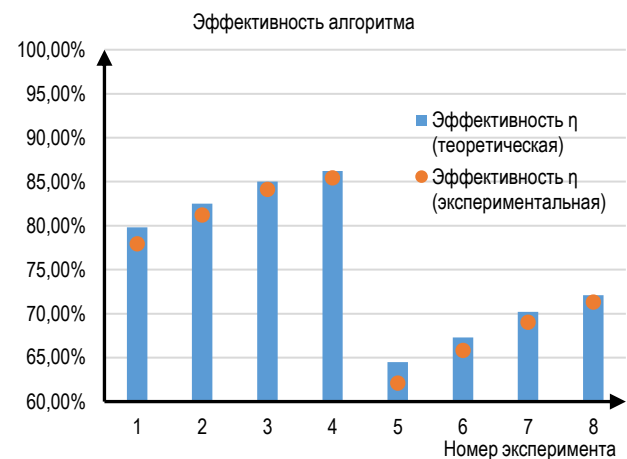


Рис. 4. Сравнительный график теоретических и экспериментальных расчетов

Fig. 4. Comparative Graph of Theoretical and Experimental Calculations

Заключение

В работе рассмотрена методика оценки эффективности адаптивного алгоритма переключения консенсуса в сети на основе математического моделирования, с учетом таких параметров, как время генерации блоков, размер блока (количество транзакций) и частота создания транзакций. Предложенная модель учитывает влияние указанных факторов на эффективность адаптивного алгоритма для участка сети при переключении между алгоритмами консенсуса, а также потери блоков, сгенерированных по старому алгоритму, до момента полного перехода сети на новый консенсус.

Показано, что разработанная модель позволяет точно оценить потери транзакций и блоков в зависимости от времени генерации блока и скорости создания транзакций. Приведены примеры, демонстрирующие, что увеличение времени генерации блока и уменьшение скорости создания транзакций способствует повышению эффективности адаптивного алгоритма для участка сети. Экспериментальные данные подтвердили, что предложенная модель достаточно точно позволяет оценить

эффективность адаптивного алгоритма для участка сети, при этом отклонение от теоретических расчетов не превышает 2–3 %. Таким образом, предложенный подход позволяет получить оценку эффективности адаптивного алгоритма для участка сети при переключении алгоритмов консенсуса с высокой точностью, что может быть использовано для дальнейшей оптимизации сетевых параметров и улучшения работы сетей связи при интеграции технологии блокчейн.

Список источников

1. Бахвалова Е.А., Судаков В.А. Исследование алгоритмов консенсуса для блокчейн-платформ // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2021. № 26. 16 с. DOI:10.20948/prepr-2021-26
2. Багдасарян К.М., Еремин В.Д. Теоретические аспекты развития криптоэкономики и перспективы использования технологии блокчейн в финансовом секторе // Вестник евразийской науки. 2021. Т. 13. № 1. С. 21. EDN:SLAEMB
3. Вербицкий А.С., Барсуков Н.М. Предназначение и подходы к созданию интеллектуальных систем в военном деле // XXXVI Международная научно-практическая конференция «Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации» (Пенза, Российская Федерация, 25 апреля 2024). Пенза: Наука и Просвещение, 2024. С. 49. EDN:TYHIZU
4. Кашеварова Н.А., Куликова М.Е. Интеграция блокчейна и искусственного интеллекта как механизма модернизации различных отраслей экономики // Вестник университета. 2024. № 5. С. 54–67. DOI:10.26425/1816-4277-2024-5-54-67. EDN:YMKWPE
5. Грепан В.Н. Анализ и эффективность применения кодов коррекции ошибок в блокчейне // Вестник науки. 2024. Т. 3. № 7(76). С. 253–262. EDN:SMSYYR
6. Киямов Ж.У. О проблемах оптимизации и безопасности для многоуровневой виртуальной сети. Дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2023. URL: https://diss.spbu.ru/files/2023/disser_kiyamov.pdf (дата обращения 15.10.2024)
7. Звозникова Г.О. Обзор алгоритмов технологий blockchain // Теория и практика современной науки. 2020. № 5(59). С. 187–190. EDN:LNYGCV
8. Канатъев К.Н., Большаков В.Н., Анисимов А.Р., Скоморохина Е.Р., Чикенев С.Д. Анализ возможностей технологии блокчейн в управлении данными // Инновации и инвестиции. 2023. № 5. С. 174–178. EDN:XVVEUW
9. Pomogalova A.V., Elagin V.S., Vladyko A.G., Donskov E.A. Methods for evaluating network characteristics on blockchain-v2x system nodes // Proceedings of the Conference on Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications (SOSG, Moscow, Russian Federation, 15–17 March 2022). IEEE, 2022. DOI:10.1109/IEEECONF53456.2022.9744263. EDN:JDDQVF
10. Гарипов Р.И., Максимова Н.Н. Анализ методических подходов к оценке эффективности блокчейна // Управление в современных системах. 2020. № 1(25). С. 13–17. EDN:URBTFO
11. Pomogalova A.V., Donskov E.A., Elagin V.S., Vladyko A.G. Aspects of Data Transfer and Synchronization for Vulnerable Road Users Emergency Scenarios Based on Blockchain Technology in ITS // Proceedings of the Conference on Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO, Vyborg, Russian Federation, 1–3 July 2024). IEEE, 2024. DOI:10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617888
12. Андрианова Е.Г., Головин О.Л. Концептуальные аспекты построения доверенных неоднородных блокчейн-сред нового технологического уклада // ИТ-Стандарт. 2017. № 3(12). С. 1–6. EDN:ZTUOER
13. Елагин В.С., Спиркина А.В., Владыко А.Г., Иванов Е.И., Помогалова А.В., Аптриева Е.А. Основные сетевые характеристики blockchain трафика и подходы к моделированию // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 4. С. 39–45. DOI:10.36724/2072-8735-2020-14-4-39-45. EDN:QWRTMK
14. Шалева А.С. Моделирование и оптимизация алгоритма распространения сообщений в одноранговой блокчейн-сети NEO. СПб.: СПбГУ, 2021. URL: <https://dSPACE.spbu.ru/bitstream/11701/32274/1/st050450.pdf> (дата обращения 15.10.2024)

References

1. Bakhvalova E.A., Sudakov V.A. Research of consensus algorithms for blockchain platforms. *Keldysh IPM preprints*. 2021;26:16. (in Russ.) DOI:10.20948/prepr-2021-26
2. Bagdasaryan K.M., Yeremin V.D. Theoretical Aspects of Cryptoeconomics Development and Prospects for the Use of Blockchain Technology In The Financial Sector. *The Eurasian Scientific Journal*. 2021;13(1):21. (in Russ.) EDN:SLAEMB
3. Verbitskiy A.S., Barsukov N.M. Purpose and Approaches to Creating Intelligent Systems in Military Affairs. *Proceedings of the XXXVIth International Scientific and Practical Conference on Modern Science: Topical Issues, Achievements and Innovations, 25 April 2024, Penza, Russian Federation*. Penza: Nauka i Prosveshchenie Publ.; 2024. p.49. (in Russ.) EDN:TYHIZU
4. Kashevarova N.A., Kulikova M.E. Integration of Blockchain and Artificial Intelligence as a Mechanism for Modernisation of Various Economic Sectors. *Vestnik Universiteta* 2024;5:54–67. (in Russ.) DOI:10.26425/1816-4277-2024-5-54-67. EDN:YMKWPE
5. Grepan V.N. Analysis and Efficiency Applying Correction Codes Errors in Blockchain. *Vestnik nauki*. 2024;3(7):253–262. (in Russ.) EDN:SMSYYR


6. Kiyamov J.U. *About Problems of Optimisation and Safety for Multilevel Virtual Network*. Ph.D. Thesis. St. Petersburg, 2023. (in Russ.) URL: https://disser.spbu.ru/files/2023/disser_kiyamov.pdf [Accessed 15.10.2024]
7. Zvoznikova G.O. Overview of Blockchain Technology Algorithms. *Teoriia i praktika sovremennoi nauki*. 2020;5(59): 187–190. (in Russ.) EDN:LNYGCV
8. Timofeev G.A., Bolshakov V.N., Anisimov A.R., Skomorokhina E.R., Chikenev S.D. Analysis of Blockchain Technology Possibilities in Data Management. *Innovatsii i investitsii*. 2023;5:174–178. (in Russ.) EDN:XVVEUW
9. Pomogalova A.V., Elagin V.S., Vladyko A.G., Donskov E.A. Methods for evaluating network characteristics on blockchain-v2x system nodes. *Proceedings of the Conference on Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG, 15–17 March 2022, Moscow, Russian Federation*. IEEE; 2022. DOI:10.1109/IEEECONF53456.2022.9744263. EDN:JDDQVF
10. Garipov R.I., Maximova N.N. Analysis of Methodical Approaches to Evaluating Blockchain Efficiency. *Upravlenie v sovremennykh sistemakh*. 2020;1(25):13–17. (in Russ.) EDN:URBTF0
11. Pomogalova A.V., Donskov E.A., Elagin V.S., Vladyko A.G. Aspects of Data Transfer and Synchronization for Vulnerable Road Users Emergency Scenarios Based on Blockchain Technology in ITS. *Proceedings of the Conference on Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO, 1–3 July 2024, Vyborg, Russian Federation*. IEEE; 2024. DOI:10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617888
12. Andrianova E.G., Golovin O.L. Conceptual Aspects of Building a Trusted Heterogeneous Blockchain-Environments of a New Technological Structure. *IT-Standard*. 2017;3:1–6. (in Russ.) EDN:ZTUOER
13. Elagin V.S., Spirikina A.V., Vladyko A.G., Ivanov E.I., Pomogalova A.V., Aptrieva E.A. The Main Network Characteristics of Blockchain Traffic and Modeling Approaches. *T-Comm*. 2020;14(4):39–45. (in Russ.) DOI:10.36724/2072-8735-2020-14-4-39-45. EDN:QWRTMK
14. Shaleva A.S. *Modelling and Optimisation of the Message Distribution Algorithm in Peer-to-Peer Blockchain NEO Network*. St. Petersburg: St Petersburg University Publ.; 2021. URL: <https://dspace.spbu.ru/bitstream/11701/32274/1/st050450.pdf> [Accessed 15.10.2024]

Статья поступила в редакцию 16.09.2024; одобрена после рецензирования 22.10.2024; принята к публикации 23.10.2024.

The article was submitted 16.09.2024; approved after reviewing 22.10.2024; accepted for publication 23.10.2024.

Информация об авторе:

ПОМОГАЛОВА
Альбина Владимировна

старший преподаватель кафедры программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0001-8129-989X>

Автор сообщает об отсутствии конфликтов интересов.

The author declares no conflicts of interests.