

Н. С. Подопригорова¹, С.А. Козырев¹, С. С. Подопригорова¹, А. В. Балдин^{1,2},
А.А. Коценко¹, Гун Шэншо¹

¹Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
105005, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1, Москва, Россия

²АО НИИ Вычислительных комплексов им. М. А. Карцева,
117437, ул. Профсоюзная, д. 108, Москва, Россия

РАЗРАБОТКА МИВАРНОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ВЫБОРА АЛГОРИТМА КОНСЕНСУСА РАСПРЕДЕЛЁННЫХ РЕЕСТРОВ

N. S. Podoprigrorova¹, S. A. Kozyrev¹, S. S. Podoprigrorova¹, A. V. Baldin^{1,2},
A. A. Kotsenko¹, Gong Shenshuo¹

¹Bauman Moscow State Technical University
105005, 2-ya Baumanskaya st., bld. 5, building 1, Moscow, Russia

²JSC M. A. Kartsev Research Institute of Computing Systems,
117437, Profsoyuznaya st., bld. 108, Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF A MIVAR EXPERT SYSTEM FOR SELECTING A CONSENSUS ALGORITHM FOR DISTRIBUTED LISTS

В работе миварная экспертная система (МЭС) создана для определения оптимального алгоритма консенсуса в распределённых реестрах при различных ситуациях пользователей и их предметных областей. Проведено сравнение 23 алгоритмов консенсуса из 6 категорий (на основе графов, на основе доказательств, на основе веса, византийские на основе голосования, невизантийские на основе голосования, рандомизированные). В процессе анализа существующих алгоритмов консенсуса выявлено 15 значимых критериев выбора, включая такие как масштабируемость, децентрализация, пропускная способность, энергоэффективность и т.д. Программный комплекс КЭСМИ Wi!Mi Разуматор служит основным инструментом для создания МЭС, которая позволяет выбирать подходящие алгоритмы консенсуса на основе запросов пользователей. МЭС по выбору алгоритма консенсуса будет полезна разработчикам распределённых реестров при выборе наилучшего алгоритма из множества доступных вариантов и с учетом специфики каждой предметной области.

Ключевые слова: мивар, миварные сети, миварные экспертные системы, КЭСМИ, Wi!Mi, искусственный интеллект, распределённые реестры, алгоритмы консенсуса.

In this paper, a mivar expert system (MES) was created to determine the optimal consensus algorithm in distributed registries for various user situations and their subject areas. A comparison of 23 algorithms was conducted consensus from 6 categories (graph-based, proof-based, weight-based, Byzantine voting-based, non-Byzantine voting-based, randomized). In the process of analyzing existing consensus algorithms, 15 significant selection criteria were identified, including such as scalability, decentralization, throughput ability, energy efficiency, etc. The Wi!Mi Razumator software package serves as the main tool for creating an MES, which allows choosing appropriate consensus algorithms based on user requests. The MES for choosing a consensus algorithm will be useful for distributed ledger developers when choosing the best algorithm from a variety of available options and taking into account the specifics of each subject area.

Keywords: mivar, mivar networks, mivar expert systems, KESMI, Wi!Mi, artificial intelligence, distributed registries, consensus algorithms.

Введение

Как известно, распределённые реестры (DLT) применяются ко многим аспектам человеческой жизни, включая здравоохранение, сельское хозяйство, фармацевтику, транспорт и цепочки поставок. Целью данной работы является создание миварной экспертной системы для выбора алгоритма консенсуса распределённого реестра, сочетающего желаемые пользователем свойства.

Миварные технологии [1] логического искусственного интеллекта [2] можно применять для решения задач принятия решений в различных областях, т.к. они позволили реализовать логический вывод [3] с линейной вычислительной сложностью [4]. Например, миварные технологии успешно применяют для комплексного моделирования процессов [5] понимания текста [6] и распознавания изображений [7]; для разработки учебных программ [8], создания активной интернет-энциклопедии [9] и в дистанционном обучении [10]. В медицине применяют миварные базы знаний [11] для диагностики сахарного диабета [12] и подбора лекарственных форм [13].

Важно отметить, что использовать миварные технологии для робототехники было предложено еще в 2004 году [14], затем добавились АСУ ТП [15], а с 2016 года исследования расширились в плане создания систем принятия решений [16] автономных роботов [17], определения метрики автономности [18] и интеллектуальности [19] робототехнических комплексов, выполняющих сложные действия в реальном времени [20]. Кроме того, в настоящее время миварные технологии [21] используются в следующих областях: принятие решений в видеоаналитике [22], подбор творческих хобби [23], планирование маршрутов для автономного транспорта [24], создание интерактивных справочных систем [25], подбор заданий в системе-тренажере [26], оценка отряда в игровом проекте [27], оценка метаболического синдрома [28], создание систем полного жизненного цикла изделий [29], организация управления проектами компании [30] и другие области. Таким образом, миварные технологии являются достаточно универсальными для создания различных систем обработки информации и принятия решений в самых сложных областях науки и техники, включая и обоснование выбора технологии распределенного реестра.

Наиболее важным компонентом каждой технологии распределенного реестра является алгоритм консенсуса, который используется для доказательства подлинности транзакций и гарантии того, что все узлы в сети согласуются с текущим состоянием сети [31]. Существует множество алгоритмов консенсуса [32], но их жизнеспособность для конкретных приложений варьируется, что делает их компромиссы решающим фактором, который следует учитывать при внедрении DLT в конкретной области [33].

Виды алгоритмов консенсуса

Алгоритм консенсуса обеспечивает согласованность данных между узлами распределённого реестра. На рис. 1 показаны различные категории алгоритмов консенсуса и примеры для каждой категории.

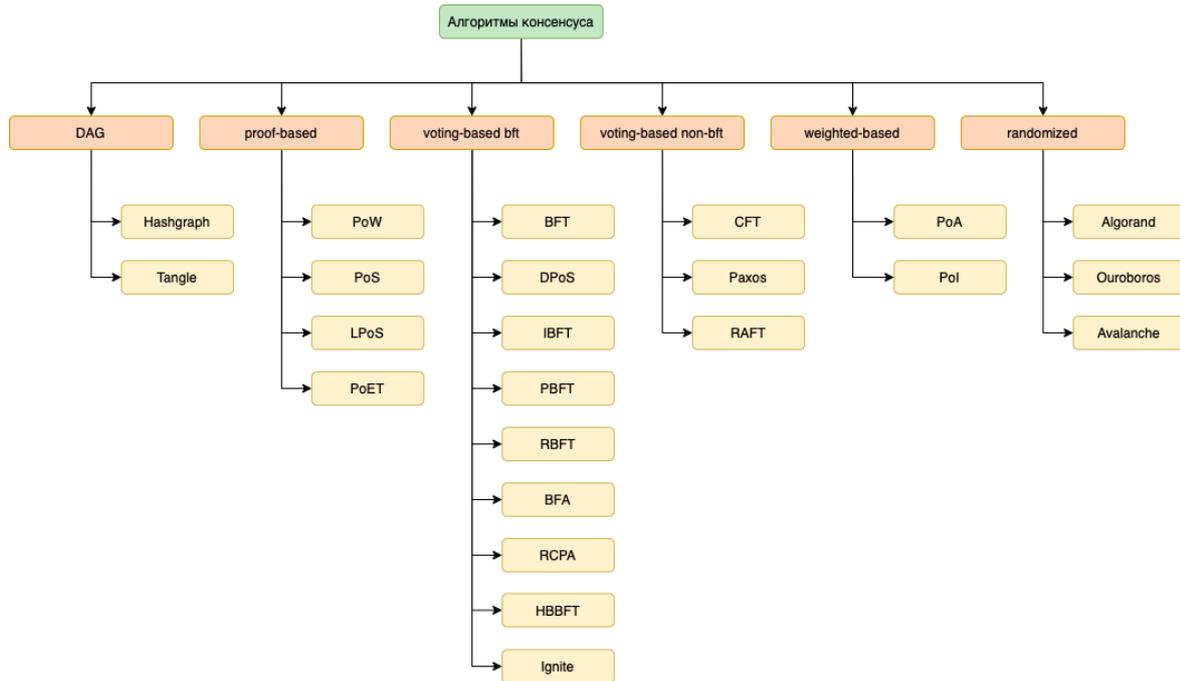


Рисунок 1 – Типы алгоритмов консенсуса

Алгоритмы консенсуса более подробно изложены во многих научных работах, а мы сразу перейдем к созданию миварной базы знаний.

Формализованное описание предметной области.

Модель миварной базы знаний состоит из 2 основных классов – запрос и предложение системы. В таблице 1 приведено описание класса запрос с входными параметрами, необходимых для реализации МЭС.

Таблица 1 – Класс запрос, входные параметры и ограничения

Название класса	Родительский класс	Параметры	Допустимые значения	Описание
Запрос	Выбор алгоритма консенсуса			Выбор необходимых пользователю параметров
Свойства DLT	Запрос			Выбор характеристик распределённого реестра
Децентрализация	Свойства DLT	Высокая децентрализация	{0, 1}	Децентрализованный DLT рассредоточен по сети узлов, в отличие от централизованного DLT, которым управляет один объект (в такой сети есть узел-лидер).
		Слабая децентрализация	{0, 1}	
		Централизация	{0, 1}	
Доступ	Свойства DLT	Публичный	{0, 1}	Доступ открыт для всех.
		Приватный	{0, 1}	Для корпоративных решений.
		Консорциум	{0, 1}	Используются для банковской отрасли.
Масштабируемость	Свойства DLT	Масштабируемость высокая	{0, 1}	Возможность увеличения размера сети и

Название класса	Родительский класс	Параметры	Допустимые значения	Описание
		Масштабируемость низкая	{0, 1}	функциональности без ухудшения показателей производительности исходной системы.
Синхронность системы	Свойства DLT	Система асинхронная	{0, 1}	
		Система синхронная	{0, 1}	В синхронных системах все коммуникации происходят раундами.
Разрешение на добавление	Свойства DLT	Разрешение нужно	{0, 1}	Пользователи должны быть авторизованы
		Разрешение не нужно	{0, 1}	Позволяет любому присоединиться к сети
Свойства алгоритма	Запрос			Выбор характеристик алгоритма консенсуса
		Минимальная пропускная способность	> 0	Минимальное количество транзакций, которые алгоритм обрабатывает за секунду.
		Максимальная пропускная способность	> 0	Максимальное количество транзакций, которые алгоритм обрабатывает за секунду.
		Сложность коммуникации	В нотации Big O	
		Сопrotивляемость	< 1	Максимальная доля неисправных узлов, при которой алгоритм продолжает работать.
Базовый механизм	Свойства алгоритма	Голосование	{0, 1}	Процесс голосования в алгоритме может производиться в один или несколько этапов.
		Лотерея	{0, 1}	В основе лотереи может находиться либо вероятностный механизм на основе криптографии, либо другие рандомизированные механизмы.
Защита от ошибок	Свойства алгоритма	Защита от византийских ошибок	{0, 1}	Намеренные атаки от вредоносных узлов
		Защита от невинантийских ошибок	{0, 1}	
Сложность реализации	Свойства алгоритма	Простая реализация	{0, 1}	
		Сложная реализация	{0, 1}	
Энергоэффективность	Свойства алгоритма	Высокая энергоэффективность	{0, 1}	Показатель количества потребляемой алгоритмом энергии

Название класса	Родительский класс	Параметры	Допустимые значения	Описание
		Низкая энергоэффективность	{0, 1}	
Задержка	Свойства алгоритма	Низкая задержка	{0, 1}	
		Средняя задержка	{0, 1}	
		Высокая задержка	{0, 1}	

На основе введенного запроса пользователю будут предлагаться все подходящие категории (из 6 возможных) и конкретные алгоритмы в этих категориях (из 23 рассмотренных в данной работе). В табл. 2 перечислены классы с выходными параметрами. В табл. 3 приведен фрагмент таблицы миварных правил в формате если-то (всего было выделено 29 правил).

Таблица 2 – Класс предложение системы и выходные параметры

Название класса	Родительский класс	Параметры	Описание
Предложение системы	Выбор алгоритма консенсуса		Определение подходящих под запрос алгоритмов
Категория алгоритма	Предложение системы	DAG	
		proof-based	
		voting-based bft	
		voting-based non-bft	
		weighted-based	
randomized			
Алгоритм	Предложение системы		
DAG	Алгоритм	Hashgraph	aBFT
		Tangle	Lightweight PoW (IOTA)
proof-based	Алгоритм	PoW	
		PoS	
		LPoS	
		PoET	
voting-based bft	Алгоритм	BFT	
		DPoS	
		IBFT	
		RBFT	
		PBFT	
		BFA	
		RCPA	
		HBBFT	
		Ignite (Tendermint)	PoS + bft
voting-based non-bft	Алгоритм	CFT	
		Paxos	
		Raft	
weighted-based	Алгоритм	PoA	Proof of authority
		PoI	Proof of importance
randomized	Алгоритм	Avalanche	
		Ouroboros	
		Algorand	Pure Proof-of-Stake

Таблица 3 – Список миварных правил в формате «Если (вход), то (выход)»

№	Входные параметры	Выходные параметры	Правило
Определение категории			
1.	масштабируемость высокая	DAG	Если (масштабируемость высокая) && (защита от византийских ошибок)
2.	защита от византийских ошибок		
3.	доступ публичный	Proof-based	Если (доступ публичный) && (базовый механизм лотерея) && (защита от византийских ошибок)
4.	базовый механизм лотерея		
5.	защита от византийских ошибок		
Определение алгоритма			
6.	DAG > 0	Hashgraph	Если (DAG > 0) && (централизация) && (сложная реализация) && (сопротивляемость < 1/3) && (сложность коммуникации $O(n \cdot \log(n))$) && (Максимальная пропускная способность < 10000) && (Задержка высокая) && (Высокая энергоэффективность) && (асинхронная система)
7.	сопротивляемость < 1/3		
8.	сложность коммуникации $= O(n \cdot \log(n))$		
9.	Централизация		
10.	Сложная реализация		
11.	Максимальная пропускная способность < 10000		
12.	Задержка высокая		
13.	высокая энергоэффективность		
14.	асинхронная система	PoW	Если (proof-based > 0) && (слабая энергоэффективность) && (высокая децентрализация) && (Задержка средняя Задержка высокая) && (масштабируемость низкая) && (сопротивляемость < 1/2) && (сложность коммуникации $O(n)$) && (Максимальная пропускная способность < 7)
15.	proof-based > 0		
16.	слабая энергоэффективность		
17.	высокая децентрализация		
18.	Задержка средняя		
19.	масштабируемость низкая		
20.	сопротивляемость < 1/2		
21.	сложность коммуникации $O(n)$		
22.	Максимальная пропускная способность < 7	PoET	Если (proof-based > 0) && (Разрешение на добавление нужно) && (высокая масштабируемость) && (высокая энергоэффективность) && (Задержка средняя Задержка высокая) && (сложность коммуникации $= O(n^3)$) && (Минимальная пропускная способность > 470) && (Максимальная пропускная способность < 1250) && (синхронная система) && (сопротивляемость < 1/4)
23.	proof-based > 0		
24.	Разрешение на добавление нужно		
25.	высокая масштабируемость		
26.	высокая энергоэффективность		
27.	сложная реализация		
28.	Задержка средняя		
29.	сопротивляемость < 1/4		
30.	сложность коммуникации $= O(n^3)$		
31.	Минимальная пропускная способность > 470		
32.	Максимальная пропускная способность < 1250		

На рис. 2 приведён граф для выбора категории алгоритма консенсуса, на котором можно увидеть, какими параметрами определяется этот выбор.

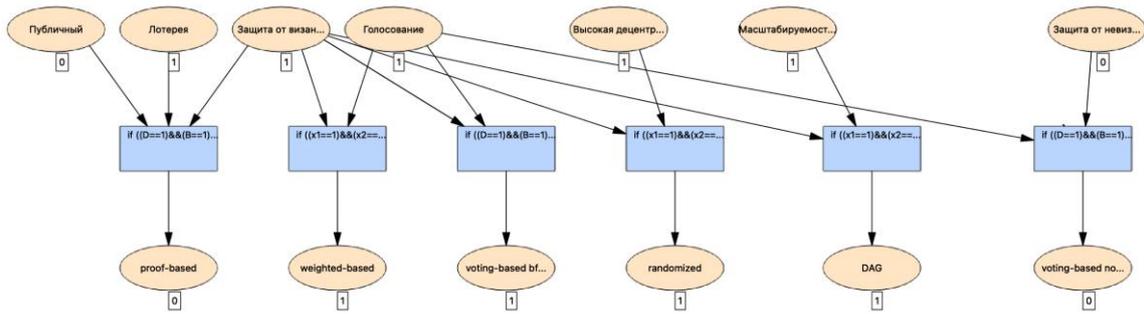


Рисунок 2 – Граф выбора категории алгоритма

Для тестирования модели были определены несколько контрольных наборов параметров. На рисунках 3 и 4 приведены значения для одного из тестовых случаев, при котором наилучшим выбором является категория алгоритмов на основе графов или невизантийский на основе голосования, а именно алгоритм Paxos.

Спроектированная МЭС вывела пользователю корректный результат. На рисунке 5 приведён граф, показывающий производимые проверки.

Запрос

- Свойства алгоритма
 - Базовый механизм
 - Голосование 0
 - Лотерея 1
 - Задержка
 - Задержка высокая 0
 - Задержка низкая 0
 - Задержка средняя 1
 - Защита от ошибок
 - Защита от византийских ошибок 1
 - Защита от невизантийских ошибок 0
 - Пропускная способность максимальная 500
 - Пропускная способность минимальная 1000
 - Сложность реализации
 - Простая реализация Число
 - Сложная реализация Число
 - Сопrotивляемость 0,2
 - Энергоэффективность
 - Высокая энергоэффективность 1
 - Слабая энергоэффективность 0
- Свойства DLT
 - Децентрализация
 - Высокая децентрализация Число
 - Слабая децентрализация Число
 - Централизация Число
 - Доступ
 - Консорциум 0
 - Приватный 0
 - Публичный 1
 - Масштабируемость
 - Масштабируемость высокая 1
 - Масштабируемость низкая 0
 - Разрешение на добавление
 - Разрешение не нужно 0
 - Разрешение нужно 1
 - Синхронность системы
 - Система асинхронная 0
 - Система синхронная 1

Рисунок 3 – Запрос, введённый при тестировании модели

Алгоритм

- DAG
 - Hashgraph
 - Tangle
- Proof-based
 - PoET
- Randomized
 - Algorand
- Voting-based BFT
 - IBFT
 - RBFT
- voting-based non-bft
 - Paxos
- Weighted-based
 - PoA
- Категория алгоритма
 - DAG
 - proof-based
 - randomized
 - voting-based bft
 - voting-based non-bft
 - weighted-based

Рисунок 4 – Результат, выведенный при тестировании модели

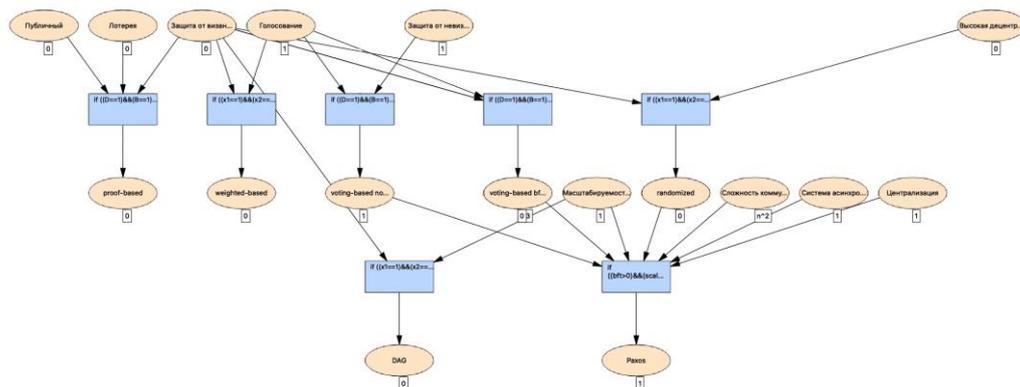


Рисунок 5 – Граф тестирования модели

Заключение

DLT является перспективной технологией, которая очень актуальна в наше время, когда очень многие действия и предметы переносят в виртуальную реальность, в том числе бумажные документы и деньги.

Хотя каждый алгоритм консенсуса имеет свои сильные и слабые стороны, при выборе подходящего механизма консенсуса крайне важно учитывать конкретные требования и ограничения варианта использования. Кроме того, важно исследовать потенциальные модификации и адаптации этих алгоритмов для устранения их ограничений и трудностей. В конечном итоге выбор алгоритма консенсуса будет зависеть от оптимального баланса между желаемым уровнем безопасности, производительностью, децентрализацией и другими факторами, специфичными для приложения.

В процессе работы исследованы 23 различных алгоритма консенсуса. В данной работе были исследованы 6 групп алгоритмов консенсуса: DAG, proof-based, voting-based bft, voting-based non-bft, weighting-based, randomized. Определены 15 ключевых свойств алгоритмов консенсуса. Были определены классы, параметры и правила и реализована МЭС для выбора оптимального алгоритма консенсуса, свойства которого будут соответствовать заданным пользователям параметрам.

Список литературы

1. Варламов О.О. *Эволюционные базы данных и знаний для адаптивного синтеза интеллектуальных систем. Миварное информационное пространство*. М.: «Радио и связь», 2002. 286 с. EDN: RWTCOP.
2. Варламов О.О., Антонов П.Д., Чибирова М.О. и др. МИВАР: машино-реализуемый способ автоматизированного построения маршрута логического вывода в базе знаний. *Радиопромышленность*. 2015. № 3. С. 28-43. EDN: UQEPGD.
3. Владимиров А.Н., Варламов О.О., Носов А.В., Потапова Т.С. Программный комплекс "УДАВ": практическая реализация активного обучаемого логического вывода с линейной вычислительной сложностью на основе миварной сети правил. *Труды Научно-исследовательского института радио*. 2010. № 1. С. 108-116. EDN: MKQGGT.
4. Варламов О.О., Чибирова М.О., Сергушин Г.С., Елисеев Д.В. Практическая реализация универсального решателя задач "УДАВ" с линейной сложностью логического вывода на основе миварного подхода и "облачных" технологий. *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. 2013. № 11. С. 45-55. EDN: SQKHXX.
5. Варламов О.О., Адамова Л.Е., Елисеев Д.В. и др. Комплексное моделирование процессов понимания компьютерами смысла текстов, речи и образов на основе миварных технологий. *Искусственный интеллект*. 2013. № 4. С. 15-27. EDN: TZWCPV.

6. Варламов О.О., Майборода Ю.И., Сергушин Г.С., Хадиев А.М. Применение миварных экспертных систем для решения задач понимания текста и распознавания изображений. *В мире научных открытий*. 2015. № 6 (66). С. 205-214. EDN: TVPWED.
7. Волков А.С., Варламов О.О. О создании двухуровневой нейросетевой структуры для применения в машиностроении. *МИВАР'22*. Москва, 2022. С. 251-261. EDN: TXESUT.
8. Блохина С.В., Адамова Л.Е., Колупаева Е.Г. и др. Разработка учебных программ с элементами искусственного интеллекта для обучения в области информационной безопасности и защиты персональных данных. *Искусственный интеллект*. 2009. № 3. С. 328-335. EDN: TIFIGN.
9. Бадалов А.Ю., Варламов О.О., Санду Р.А. и др. Активная миварная интернет-энциклопедия и развитие миварных сетей на основе многомерных бинарных матриц для одновременной эволюционной обработки более 10 000 правил в реальном времени. *Искусственный интеллект*. 2010. № 4. С. 549-557. EDN: UIMXAV.
10. Подкосова Я.Г., Варламов О.О., Остроух А.В., Краснянский М.Н. Анализ перспектив использования технологий виртуальной реальности в дистанционном обучении. *Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского*. 2011. № 2 (33). С. 104-111. EDN: NUAКВР.
11. Ким Х., Чувииков Д.А., Аладин Д.В. и др. Создание базы знаний для миварной экспертной системы диагностики сахарного диабета. *Медицинская техника*. 2020. № 6 (324). С. 38-41. EDN: EDXBGK.
12. Белоусов Е.А., Попов И.А., Евдокимов А.А. и др. Рекомендательная система диагностики сахарного диабета на основе механизма миварного вывода. *Естественные и технические науки*. 2021. № 7 (158). С. 169-174. EDN: JSFUSI.
13. Честнова Е.А., Федосеева Е.Ю., Ваганов Д.Д. и др. Разработка базы знаний МЭС по подбору лекарственных форм для антибиотиков и антимикотиков. *Естественные и технические науки*. 2023. № 5(180). С. 29-33. DOI 10.25633/ETN.2023.05.01. EDN WOZCUJ.
14. Варламов О.О. Системы обработки информации и взаимодействие групп мобильных роботов на основе миварного информационного пространства. *Искусственный интеллект*. 2004. № 4. С. 695-700. EDN: TIFIQD.
15. Сергушин Г.С., Варламов О.О., Чибирова М.О. и др. Исследование возможностей информационного моделирования сложных систем управления технологическими процессами на основе миварных технологий. *Автоматизация и управление в технических системах*. 2013. № 2 (4). С. 51-66. EDN: RDWXUT.
16. Варламов О.О., Аладин Д.В., Сараев Д.В. и др. О возможности создания систем принятия решений для автономных роботов на основе миварных экспертных систем, обрабатывающих более 1 млн производственных правил/с. *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2017. № 6-2 (80). С. 54-61. EDN: TIVUDN.
17. Варламов О.О., Лазарев В.М., Чувииков Д.А., Джха П. О перспективах создания автономных интеллектуальных роботов на основе миварных технологий. *Радиопромышленность*. 2016. № 4. С. 96-105. EDN: UQEVLG.
18. Варламов О.О. Об одном подходе к метрике автономности и интеллектуальности робототехнических комплексов. *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2017. № 6-2 (80). С. 43-53. EDN: YWNDPI.
19. Варламов О.О. О метрике автономности и интеллектуальности робототехнических комплексов и киберфизических систем. *Радиопромышленность*. 2018. № 1. С. 74-86. EDN: YQYQPV.
20. Варламов О.О., Аладин Д.В. Успешное применение миварных экспертных систем для MIPRA - решения задач планирования действий робототехнических комплексов в реальном времени. *Радиопромышленность*. 2019. № 3. С. 15-25. EDN: EVFEAK.
21. Алпеев В.С., Ли М.В., Савельев А.А. и др. О применении мультипредметных нейронных сетей и миварных экспертных систем для создания гибридных интеллектуальных информационных систем. *Информация и образование: границы коммуникаций*. 2022. № 14(22). С. 224-226. EDN SFJNWC.
22. Васильченко Д.Д., Мартынова П.В., Балашов А.М. и др. МЭС для принятия решений в видеоаналитике. *Мивар'23*. Москва: ИНФРА-М, 2023. С. 384-389. EDN NHXEAB.
23. Бессонова К.С., Ноздрова В.С., Попов Н.А. и др. БЗ МЭС по подбору творческих хобби. *Мивар'23: Сборник студенческих статей*. Москва: ИНФРА-М, 2023. С. 249-254. EDN LAIPCC.
24. Андреев А.А., Коценко А.А., Воронцов Н.А. и др. О разработке МЭС для поиска маршрутов автономного транспорта маркетплейса. *Информация и образование: границы коммуникаций*. 2023. № 15(23). С.316-319. DOI 10.59131/2411-9814_2023_15(23)_316. EDN YAMOFZ.
25. Байбарин Р.Г., Кучеренко М.А., Тюлькина Н.В. и др. О создании интеллектуальной системы "миварная активная энциклопедия". *Естественные и технические науки*. 2022. № 3(166). С. 148-155. EDN HDNGFL.
26. Перова А.Е., Чиварзин А.Е., Карпов Д.К. и др. МЭС подбора заданий в системе-тренажёре для слабыхшащих студентов. *Мивар'23*. Москва: ИНФРА-М, 2023. С. 148-154. EDN FEJNHM.
27. Лисин А.А., Микаилов Р.Р. и др. МЭС для оценки отрядов персонажей в бою против боссов в игровом проекте Genshin Impact 3.0 *Мивар'23: Сборник ст.* М.: Инфра-М, 2023. С. 123-129. EDN UMRUME.

28. Чувиков Д.А., Адамова Л.Е., Булатова И.Г. и др. МЭС "метаболический синдром" для терапевта и эндокринолога. *Мивар'22*. Москва: Инфра-М, 2022. С. 105-114. EDN UYRARA.
29. Трищенко А.В., Осипов В.Г., Лялин Е.С. и др. 2022: развитие машиностроительного ИИ для СПЖЦ. *Мивар'22: Сборник научных статей*. Москва: Инфра-М, 2022. С. 433-439. EDN REMJXP.
30. Абросимова Н.Г., Арбузов А.П., Саврасов П.А. и др. О разработке миварной экспертной системы для организации управления проектами ИТ-компаний. *Информация и образование: границы коммуникаций*. 2022. № 14(22). С. 153-156. EDN KADRSN.
31. Hussein Z., Salama M.A., El-Rahman S.A. Evolution of blockchain consensus algorithms: a review on the latest milestones of blockchain consensus algorithms. *Cybersecurity* 6, 30. 2023. <https://doi.org/10.1186/s42400-023-00163-y>.
32. Alkhodair A., Ahmad J., Saraju P. Mohanty and Elias Kougianos. *Consensus Algorithms of Distributed Ledger Technology - A Comprehensive Analysis*. ArXiv abs/2309.13498. 2023.
33. Aguilera M. K. Stumbling over Consensus Research: Misunderstandings and Issues. Replication. *Lecture Notes in Computer Science*. 2010. Vol. 5959. pp. 59–72. doi:10.1007/978-3-642-11294-2_4. ISBN 978-3-642-11293-5.

References

1. Varlamov O. O. Evolutionary databases and knowledge bases for adaptive synthesis of intelligent systems. Mivar information space. Moscow: "Radio and communication", 2002. 286 p. EDN RWTCOP.
2. Varlamov O. O., Antonov P. D., Chibirova M. O., et al. MIVAR: a machine-implemented method for automated construction of a logical inference route in a knowledge base // *Radio Industry*. 2015. No. 3. Pp. 28-43. EDN: UQEPGD.
3. Vladimirov A. N., Varlamov O. O., Nosov A. V., Potapova T. S. Software package "UDAV": practical implementation of active learning logical inference with linear computational complexity based on a mivar rule network // *Transactions of the Radio Research Institute*. 2010. No. 1. Pp. 108-116. EDN: MKQGGT.
4. Varlamov O. O., Chibirova M. O., Sergushin G. S., Eliseev D. V. Practical implementation of the universal problem solver "UDAV" with linear complexity of logical inference based on the mivar approach and "cloud" technologies // *Devices and systems. Management, control, diagnostics*. 2013. No. 11. Pp. 45-55. EDN: SQKHxz.
5. Varlamov O. O., Adamova L. E., Eliseev D. V. et al. Complex modeling of the processes of understanding the meaning of texts, speech and images by computers based on mivar technologies // *Artificial Intelligence*. 2013. No. 4. Pp. 15-27. EDN: TZWCVP.
6. Varlamov O. O., Maiboroda Yu. I., Sergushin G. S., Khadiev A. M. Application of mivar expert systems for solving text understanding and image recognition problems // *In the world of scientific discoveries*. 2015. No. 6 (66). P. 205-214. EDN: TVPWED.
7. Volkov A. S., Varlamov O. O. On the creation of a two-level neural network structure for use in mechanical engineering // *In the collection: MIVAR'22. Moscow, 2022*. P. 251-261. EDN: TXESUT.
8. Blokhina S. V., Adamova L. E., Kolupaeva E. G. et al. Development of educational programs with elements of artificial intelligence for training in the field of information security and personal data protection // *Artificial Intelligence*. 2009. No. 3. P. 328-335. EDN: TIFIGN.
9. Badalov A.Yu., Varlamov O.O., Sandu R.A., et al. Active mivar internet encyclopedia and development of mivar networks based on multidimensional binary matrices for simultaneous evolutionary processing of more than 10,000 rules in real time // *Artificial Intelligence*. 2010. No. 4. P. 549-557. EDN: UIMXAV.
10. Podkosova Ya.G., Varlamov O.O., Ostroukh A.V., Krasnyansky M.N. Analysis of prospects for using virtual reality technologies in distance learning // *Issues of modern science and practice. Vernadsky University*. 2011. No. 2 (33). P. 104-111. EDN: NUAKBP.
11. Kim H., Chuvikov D.A., Aladin D.V., et al. Creation of a knowledge base for a mivar expert system for diagnosing diabetes mellitus // *Medical equipment*. 2020. No. 6 (324). P. 38-41. EDN: EDXBGK.
12. Belousov E.A., Popov I.A., Evdokimov A.A., et al. A recommender system for diagnosing diabetes mellitus based on the mivar inference mechanism // *Natural and technical sciences*. 2021. No. 7 (158). P. 169-174. EDN: JSFUSI.
13. Chestnova E.A., Fedoseeva E.Yu., Vaganov D.D., et al. Development of a knowledge base of the MES for the selection of dosage forms for antibiotics and antimycotics // *Natural and technical sciences*. 2023. No. 5(180). P. 29-33. DOI 10.25633/ETN.2023.05.01. EDN WOZCUJ.
14. Varlamov O. O. Information processing systems and interaction of groups of mobile robots based on mivar information space // *Artificial Intelligence*. 2004. No. 4. P. 695-700. EDN: TIFIQD.
15. Sergushin G. S., Varlamov O. O., Chibirova M. O. et al. Study of the possibilities of information modeling of complex process control systems based on mivar technologies // *Automation and control in technical systems*. 2013. No. 2 (4). P. 51-66. EDN: RDWXUT.
16. Varlamov O.O., Aladin D.V., Saraev D.V., et al. On the possibility of creating decision-making systems for autonomous robots based on mivar expert systems processing more than 1 million production rules/sec. // *Bulletin of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2017. No. 6-2 (80). P. 54-61. EDN: TIVUDN.

17. Varlamov O.O., Lazarev V.M., Chuvikov D.A., Jha P. On the prospects for creating autonomous intelligent robots based on mivar technologies // Radio Industry. 2016. No. 4. P. 96-105. EDN: UQEVLG.
18. Varlamov O.O. On one approach to the metrics of autonomy and intelligence of robotic complexes // Bulletin of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2017. No. 6-2 (80). P. 43-53. EDN: YWNDPI.
19. Varlamov O. O. On the metrics of autonomy and intelligence of robotic complexes and cyber-physical systems // Radio Industry. 2018. No. 1. P. 74-86. EDN: YQYQPV.
20. Varlamov O. O., Aladin D. V. Successful application of mivar expert systems for MIPRA - solving problems of planning actions of robotic complexes in real time // Radio Industry. 2019. No. 3. P. 15-25. EDN: EVFEAK.
21. Alpeev, V.S.; Lee, M.V.; Savelyev, A.A., et al. On the application of multi-subject neural networks and mivar expert systems to create hybrid intelligent information systems // Information and Education: communication boundaries. 2022. № 14(22). С. 224-226. EDN SFJNWC.
22. Vasilchenko, D.D.; Martynova, P.V.; Balashov, A.M. et al. MES for decision making in video analytics // Mivar'23. Moscow: INFRA-M, 2023. С. 384-389. EDN HHXEAB.
23. Bessonova, K.S.; Nozdova, V.S.; Popov, N.A., et al. BZ MES on the selection of creative hobbies // Mivar'23: Collection of student articles. Moscow: INFRA-M, 2023. С. 249-254. EDN LAIPCC.
24. Andreev A.A., Kotsenko A.A., Vorontsov N.A., et al. On the development of MES for searching routes of autonomous transportation marketplace // Information and Education: communication boundaries. 2023. № 15(23). С.316-319. DOI 10.59131/2411-9814_2023_15(23)_316. EDN YAMOFZ.
25. Baibarin R.G., Kucherenko M.A., Tyulkina N.V., et al. On the creation of an intellectual system "mivar active encyclopedia" // Natural and Technical Sciences. 2022. № 3(166). С. 148-155. EDN HDNGFL.
26. Perova, A.E.; Chivarzin, A.E.; Karpov, D.K. et al. MES of task selection in a system-trainer for hearing-impaired students // Mivar'23. Moscow: INFRA-M, 2023. С. 148-154. EDN FEJJHM.
27. Lisin A.A., Mikailov R.R., et al. MES for evaluating character squads in combat against bosses in the game project Genshin Impact 3.0// Mivar'23: Collection of articles. Moscow: Infra-M, 2023. С. 123-129. EDN UMRUME.
28. Chuvikov D.A., Adamova L.E., Bulatova I.G. et al. MES "metabolic syndrome" for the therapist and endocrinologist // Mivar'22. Moscow: Infra-M, 2022. С. 105-114. EDN UYRARA.
29. Trishchenkov A.V., Osipov V.G., Lyalin E.S., et al. 2022: development of machine-building AI for SPWC // Mivar'22: Collection of scientific articles. Moscow: Infra-M, 2022. С. 433-439. EDN REMJXP.
30. Abrosimova N.G., Arbuzov A.P., Savrasov P.A., et al. On the development of a mivar expert system for the organization of IT-company project management // Information and Education: communication boundaries. 2022. № 14(22). С. 153-156. EDN KADRSH.
31. Hussein Z., Salama M.A., El-Rahman S.A. Evolution of blockchain consensus algorithms: a review on the latest milestones of blockchain consensus algorithms. Cybersecurity 6, 30. 2023. <https://doi.org/10.1186/s42400-023-00163-y>.
32. Alkhodair A., Ahmad J., Saraju P. Mohanty and Elias Kougianos. Consensus Algorithms of Distributed Ledger Technology - A Comprehensive Analysis. ArXiv abs/2309.13498. 2023.
33. Aguilera M. K. Stumbling over Consensus Research: Misunderstandings and Issues. Replication. Lecture Notes in Computer Science. 2010. Vol. 5959. pp. 59–72. doi:10.1007/978-3-642-11294-2_4. ISBN 978-3-642-11293-5.

RESUME

N. S. Podoprigrorova, S. A. Kozyrev, S. S. Podoprigrorova, A. V. Baldin, A. A. Kotsenko, Gong Shenshuo
Development Of A Mivar Expert System For Selecting A Consensus Algorithm For Distributed Lists

There are many works devoted to the analysis and research of distributed ledger technologies (DLT), as they are applied to many aspects of human life, including healthcare, agriculture, pharmaceuticals, transportation and supply chains. DLT is a promising technology that is very relevant in a time when many actions and objects are transferred to virtual reality, including paper documents and money.

While each consensus algorithm has its own strengths and weaknesses, it is critical to consider the specific requirements and constraints of the use case when choosing the right consensus mechanism. In addition, it is important to explore potential modifications and adaptations of these algorithms to address their limitations and difficulties. Ultimately, the choice of consensus algorithm will depend on the optimal balance between the desired level of security, performance, decentralization, and other application-specific factors.

The Mivar Expert System (MES) is designed to determine the optimal consensus algorithm in distributed ledgers for different user situations and domains. . In the process of work, 23 different consensus algorithms were studied, united into groups: DAG, proof-based, voting-based bft, voting-based non-bft, weighting-based, randomized.

In the process of analysis of existing consensus algorithms, 15 significant selection criteria were identified , including such as scalability, decentralization, throughput, energy efficiency, etc. The KESMI Wi!Mi Razumator software suite serves as the main tool for creating an MES that allows selecting appropriate consensus algorithms based on user requests.

The classes, parameters, and rules of the mivar base are defined knowledge, and then an MES is implemented to select the optimal consensus algorithm, the properties of which will correspond to the parameters specified by the users. The IES for choosing a consensus algorithm will be useful for distributed ledger developers when choosing the best algorithm from a variety of available options and taking into account the specifics of each subject area.

РЕЗЮМЕ

*Н. С. Подопригорова, С.А. Козырев, С. С. Подопригорова, А. В. Балдин,
А.А. Коценко, Гун Шэншо*

Разработка миварной экспертной системы для выбора алгоритма консенсуса распределённых реестров

Вопросам анализа и исследований технологий распределённых реестров (DLT) посвящено множество работ, т.к. они применяются ко многим аспектам человеческой жизни, включая здравоохранение, сельское хозяйство, фармацевтику, транспорт и цепочки поставок. DLT является перспективной технологией, которая очень актуальна в наше время, когда многие действия и предметы переносят в виртуальную реальность, в том числе бумажные документы и деньги.

Хотя каждый алгоритм консенсуса имеет свои сильные и слабые стороны, при выборе подходящего механизма консенсуса крайне важно учитывать конкретные требования и ограничения варианта использования. Кроме того, важно исследовать потенциальные модификации и адаптации этих алгоритмов для устранения их ограничений и трудностей. В конечном итоге выбор алгоритма консенсуса будет зависеть от оптимального баланса между желаемым уровнем безопасности, производительностью, децентрализацией и другими факторами, специфичными для приложения.

Миварная экспертная система (МЭС) создана для определения оптимального алгоритма консенсуса в распределённых реестрах при различных ситуациях пользователей и их предметных областей. В процессе работы исследованы 23 различных алгоритма консенсуса, объединенных в группы: DAG, proof-based, voting-based bft, voting-based non-bft, weighting-based, randomized.

В процессе анализа существующих алгоритмов консенсуса было выявлено 15 значимых критериев выбора, включая такие как масштабируемость, децентрализация, пропускная способность, энергоэффективность и т.д. Программный комплекс КЭСМИ Wi!Mi Разуматор служит основным инструментом для создания МЭС, которая позволяет выбирать подходящие алгоритмы консенсуса на основе запросов пользователей.

Определены классы, параметры и правила миварной базы знаний, а затем реализована МЭС для выбора оптимального алгоритма консенсуса, свойства которого будут соответствовать заданным пользователям параметрам. МЭС по выбору алгоритма консенсуса будет полезна разработчикам распределённых реестров при выборе наилучшего алгоритма из множества доступных вариантов и с учетом специфики каждой предметной области.

Подопригорова Наталья Сергеевна, магистр, ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия, n.podoprigorova@icloud.com
Область научных интересов: искусственный интеллект, миварные технологии логического искусственного интеллекта, обработка информации, кибернетика

Козырев Сергей Александрович, магистр, ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия, kozyurevsa@student.bmstu.ru
Область научных интересов: искусственный интеллект, миварные технологии логического искусственного интеллекта, обработка информации, кибернетика

Подопригорова Светлана Сергеевна магистр, ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия, s.podoprigorova@icloud.com
Область научных интересов: искусственный интеллект, миварные технологии логического искусственного интеллекта, обработка информации, кибернетика

Балдин Александр Викторович, доктор технических наук, профессор,
1) главный научный сотрудник АО «НИИ «Вычислительных комплексов»»,
2) профессор кафедры Систем обработки информации и управления МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия, iu5baldin@bmstu.ru
Область научных интересов: искусственный интеллект, базы данных, электронный университет, экспертные системы, логика, миварные технологии логического искусственного интеллекта, обработка информации, принятие решений, распознавание образов, понимание естественного языка, кибернетика, автономные робототехнические комплексы

Коценко Антон Александрович, аспирант, ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия, randeren@mail.ru
Область научных интересов: искусственный интеллект, миварные технологии логического искусственного интеллекта, обработка информации, принятие решений, распознавание образов, понимание естественного языка, кибернетика, автономные робототехнические комплексы

Гун Шэншо, аспирант, ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия, hiteyeb@163.com
Область научных интересов: искусственный интеллект, миварные технологии логического искусственного интеллекта, обработка информации, распознавание образов, кибернетика

Статья поступила в редакцию 20.06.2024.