



УДК 004.9

МРНТИ 20.01.01

[https://doi.org/10.53364/24138614\\_2025\\_38\\_3\\_17](https://doi.org/10.53364/24138614_2025_38_3_17)

Р. Оспанов<sup>1</sup>, Е. Сейткулов<sup>1</sup>, Н. Ташатов<sup>1</sup>, Б. Ергалиева<sup>1</sup>, К. Утебаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева,  
Астана, Казахстан

<sup>2</sup>Филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»,  
Алматы, Казахстан

\*E-mail: [ergalieva\\_banu@mail.ru](mailto:ergalieva_banu@mail.ru)

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ МЕТОДОВ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА С ПОМОЩЬЮ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОТОКОЛА КОНСЕНСУСА В СЕТЯХ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

**Аннотация.** Задача выбора оптимальных механизмов консенсуса блокчейна в сетях Интернета вещей может быть рассмотрена как задача многокритериального принятия решений. Целью данной работы является определение наиболее подходящего метода многокритериального принятия решений в рамках этой задачи. В настоящее время существует множество различных методов многокритериального анализа. Кроме того, появляются новые методы, а уже существующие продолжают развиваться. В таких условиях представляется очень важным правильно определить наиболее подходящий метод многокритериального принятия решений для рассматриваемой задачи. Предполагается, что такой правильный выбор даст большую уверенность в объективности и точности при оценке и принятии решений. Это также существенно, учитывая, что рассматриваемая задача характеризуется большим количеством альтернатив (множество различных протоколов консенсуса) и большим количеством критериев (например, энергопотребление, пропускная способность, устойчивость к атакам, задержка обработки транзакций и т.п.). В настоящее время существуют открытые программные инструменты, предназначенные для автоматизации процесса выбора наиболее подходящих методов многокритериального принятия решений. Такие системы поддержки принятия решений помогают аналитикам и исследователям в различных сферах применения многокритериального анализа. В данной работе представлен подход к выбору оптимальных методов многокритериального принятия решений, основанный на применении такого специализированного программного обеспечения в случае задачи выбора оптимального механизма консенсуса для IoT. Как результат, были выбраны известные методы TOPSIS, VIKOR, а также их интервальные и нечеткие модификации. Дополнительно, для взвешивания критериев был выбран метод аналитической иерархии (АИР). Практическим применением этого результата стала разработка системы выбора оптимального протокола консенсуса для сетей Интернета вещей на основе блокчейна, а также соответствующей программной реализации на языке Python.

**Ключевые слова:** технологии распределенного реестра, блокчейн, протокол консенсуса, Интернет вещей, методы многокритериального принятия решений.

### **Введение.**

Как известно к сетям Интернета вещей (IoT) предъявляются различные высокие требования (ограничения на вычислительные ресурсы, высокая динамичность сетевых узлов, необходимость обеспечения безопасности при хранении и передаче данных и т.п.). Это следует учитывать при решении задачи выборе оптимальных механизмов консенсуса, применяемых в технологиях распределенных реестров, в сетях Интернета вещей. Таким образом, это весьма сложная и комплексная задача, при решении которой необходимо учитывать множество разнообразных и зачастую противоречивых критериев, таких как, например, устойчивость к атакам, задержка обработки транзакций, энергопотребление, пропускная способность и т.п. В таких сложных условиях методы многокритериального принятия решений могут помочь в поиске и оценке возможных альтернатив решения в подобных задачах. Применение таких методов может помочь в решении задачи выбора наиболее подходящего протокола консенсуса.

Целью данной работы является выбор наиболее подходящего метода многокритериального принятия решений для определения оптимального консенсусного механизма для сетей Интернета вещей, основанных на применении технологий распределенного реестра. Ранее в работах [1], [2] были рассмотрены первоначальные этапы этой задачи, заключающиеся в составлении набора альтернатив, и далее набора критериев для оценивания альтернатив. Для достижения поставленной цели данной работы был избран подход, состоящий в применении специализированного программного обеспечения. В настоящее время существуют специализированные инструменты MCDA Methods Selection Software (MCDA-MSS) [3] и WEighting Methods Selection Software (WEMSS) [4], которые автоматизируют процесс выбора оптимального метода. С помощью этих программ можно подобрать наиболее подходящие методы для выбора протокола консенсуса.

### **Материалы и методы.**

Далее рассмотрим детально процесс работы с программой MCDA-MSS.

Для того чтобы определиться с тем, какой метод или, возможно, несколько методов многокритериального принятия решений подходит для рассматриваемой задачи, необходимо ответить на ряд вопросов, состоящий из четырех групп. Каждый вопрос имеет несколько вариантов ответов, в том числе и ответ «не знаю» (т.е. допускается, что пользователь может и не знать на момент работы с инструментом как ответить на вопрос). К вопросам и ответам имеются поясняющие их смысл описания. При выборе ответов на часть вопросов или на все вопросы автоматически появляется список методов, которые система рекомендует для рассматриваемой задачи. Причем для каждого метода дается описание со списком соответствующих этому методу ответов на вопросы. Выбранные ответы будут выделены жирным шрифтом.

Первая группа вопросов называется «Формулировка проблемы». Ответы на них помогают определиться, к какому типу относится рассматриваемая задача, и какую структуру она имеет.

Первый вопрос группы помогает определиться с типом рекомендации по решению задачи, рассматриваемой пользователем системы. Доступны следующие ответы: «ранжирование», «сортировка», «кластеризация», «выбор». Тип «ранжирование» означает, что рассматриваемые альтернативы упорядочиваются от наиболее предпочтительной альтернативы к наименее предпочтительной. Тип «сортировка» означает, что выполняется назначение альтернатив предопределенным классам предпочтений (от наиболее предпочтительной альтернативы к наименее предпочтительной). Тип «кластеризация» означает, что выполняется разделение альтернатив на группы в соответствии с некоторой мерой подобия или отношением предпочтения. Тип «выбор» означает, что выполняется выбор наиболее предпочтительного подмножества альтернатив.

К каждому из этих вариантов системой предлагаются дополнительные вопросы. Так, например, в случае выбора «ранжирования» пользователю предлагается ответить на два

дополнительных вопроса. В одном из них выясняется, какой порядок альтернатив запрашивается: «частичный» или «полный». «Частичный» порядок допускает отношение несравнимости, это имеет преимущество в том, что выделяет альтернативы, которые значительно отличаются друг от друга. А в случае «полного» порядка все альтернативы упорядочены от лучших к худшим, без какой-либо возможности несравнимости. В следующем вопросе выясняется, какая шкала, ведущая к рекомендации, запрашивается: «порядковая» или «количественная». При «порядковой» шкале рекомендация основана на бинарных отношениях, где только порядок альтернатив имеет значение. При «количественной» шкале окончательная рекомендация обусловлена оценкой, где расстояния между оценками всех альтернатив имеют количественное значение.

В случае выбора «сортировки» пользователю предлагаются три дополнительных вопроса. В одном из них выясняется, какой порядок классов запрашивается: «частичный» или «полный». В случае «частичного» порядка допускается отношение несравнимости между классами принятия решений, это имеет преимущество в том, чтобы выделить классы, которые значительно отличаются друг от друга. При «полном» порядке все классы упорядочены от лучшего класса к худшему, без какой-либо возможности несравнимости. В следующем вопросе выясняется, какая шкала, ведущая к рекомендации, запрашивается: «порядковая» (рекомендация основана на бинарных отношениях, где только задание классов альтернатив имеет значение) или «количественная» (окончательная рекомендация обусловлена оценкой, где расстояния между оценками всех альтернатив имеют количественное значение). И в третьем вопросе определяется, какая требуется мощность классов: «с ограничениями» (в этом случае учитываются ограничения на количество альтернатив, которые могут быть заданы в каждом классе) или «без ограничений» (не включает ограничения на количество альтернатив, которые могут быть заданы в каждом классе).

В случае выбора «кластеризации» появляется еще один дополнительный вопрос, в котором определяется, какой требуется тип кластеризации: «неупорядоченные кластеры» или «упорядоченные кластеры». Первый тип означает, что альтернативы группируются на основе парных отношений предпочтений без установления порядка в результирующих кластерах. Второй тип означает, что альтернативы группируются на основе парных отношений предпочтений с установлением порядка в полученных кластерах.

Для типа «выбор» появляется дополнительный вопрос, в котором определяется, какая требуется мощность альтернатив: «с ограничениями» (в этом случае учитываются ограничения на количество выбираемых альтернатив) или «без ограничений» (не включает ограничения на количество выбираемых альтернатив).

Следующий вопрос после вопроса о типе рекомендации по решению – это вопрос о характере набора альтернатив. Доступны следующие варианты: «стабильный» и «возрастающий». Вариант «стабильный» означает, что новых альтернатив не предвидится и не добавляется в набор, а второй вариант означает, что новые альтернативы продолжают появляться по мере развития контекста принятия решения.

В следующем вопросе группы определяется, какова структура используемых для оценки критериев. Доступные варианты ответов: «плоская» и «иерархическая» структуры. «Плоская» структура означает, что все критерии находятся на одном уровне. «Иерархическая» структура означает, что критерии организованы по уровням, иерархически, от общих критериев до детализированных.

Далее следует вопрос, с помощью которого пользователь может определиться с типом характеристик критериев: «детерминированный» или «неопределенный». Тип «детерминированный» означает, что входные данные являются точными. В случае выбора этого ответа появляется еще один дополнительный вопрос, в котором определяется тип детерминированных характеристик: «за альтернативу» (это относится к характеристикам альтернативы по критерию) или «сравнение относительной характеристики» (это относится

к характеристикам альтернативы по критерию относительно характеристик другой альтернативы по тому же критерию). Тип «неопределенный» означает, что входные данные не являются точными. В случае выбора этого ответа появляется еще один дополнительный вопрос, в котором определяется тип неопределенных характеристик. Аналогично предыдущему вопросу доступны варианты «за альтернативу» и «сравнение относительной характеристики».

В следующем вопросе определяется, каково знание предпочтения для значений каждого критерия. Варианты: «известно» или «следует обнаружить». Первый вариант означает, что порядок предпочтения известен. Второй вариант означает, что порядок предпочтения относительно характеристик неизвестен и должен быть обнаружен. Если знание предпочтения для значений каждого критерия является «известным», то пользователю предлагается определить тип известного порядка предпочтения для критериев: «монотонный» или «немонотонный». «Монотонный» порядок определяется как постоянно неубывающий или невозрастающий по отношению к предпочтениям по критериям. «Немонотонный» порядок определяется как неубывающий или невозрастающий в разных областях шкалы характеристик в отношении предпочтений по критериям.

Наконец последний вопрос первой группы предназначен для определения статуса полноты набора критериев. Статус может быть определен как «полный» или «неполный». В первом случае все критерии, имеющие отношение к рассматриваемой задаче и имеющие влияние на рекомендацию, определены на этапе моделирования проблемы и включены в набор критериев. Во втором случае, по крайней мере, один критерий, имеющий отношение к рассматриваемой задаче и имеющий потенциальное влияние на рекомендацию, не включен в набор критериев.

На следующем рисунке показана часть интерфейса с вопросами первой группы (Рис.1).

**Section 1:** Here you can define how the problem is framed by (i) choosing the type of decision-making challenge under consideration and (ii) describing the criteria used to assess the alternatives.

<b>Problem statement</b> What type of decision recommendation is requested?	I don't know ▾	(117)
<b>Set of alternatives</b> What is the nature of the problem in relation to the alternatives that constitute the set?	I don't know ▾	(205)
<b>Criteria structure</b> What is the structure of the criteria used for the assessment?	I don't know ▾	(204)
<b>Evaluation of alternatives on the criteria</b> What is the type of performance of the criteria?	I don't know ▾	(204)

Рисунок 1 – MCDA-MSS: часть интерфейса с вопросами первой группы

Вторая группа вопросов называется «Модель предпочтений». С помощью них можно выяснить, какой тип модели следует применить к рассматриваемой задаче.

С помощью первого вопроса этой группы пользователь системы может определиться с тем, каким образом входная информация/данные о характеристиках должны использоваться искомым методом или методами. Доступны следующие ответы: «качественно», «количественно» и «относительно».

В случае варианта «качественно» рассматривается только порядок характеристик. При выборе этого варианта возможен выбор типа метода на основе качественных

характеристик: «основанный на характеристиках» (при оценке качества характеристик, назначенных отдельным альтернативам, рассматривается только их порядок без интерпретации различий или соотношений характеристик) или «основанный на парных сравнениях» (сравниваются характеристики альтернатив в паре, интерпретируя только их порядок относительно их качества).

Во втором варианте для выражения силы предпочтения используются различия между характеристиками. При выборе этого варианта возможен выбор типа метода на основе количественных характеристик: «линейный», «кусочно-линейный» или «нелинейный». В случае «линейного» типа применяется линейная функция для определения того, насколько предпочтительны различные характеристики по критериям. В случае «кусочно-линейного» типа применяется кусочно-линейная функция (с линейной интерполяцией между контрольными точками) для определения того, насколько предпочтительны различные характеристики по критериям. В случае «нелинейного» типа применяется произвольно нелинейная функция для определения того, насколько предпочтительны различные характеристики по критериям.

При варианте «относительно» для выражения силы предпочтения используются относительные сравнения характеристик. При выборе этого варианта возможен выбор типа метода на основе сравнений: «порядковый» (относительные сравнения характеристик используются для выражения интенсивности предпочтений в порядковых терминах) или «относительный» (относительные сравнения характеристик используются для выражения интенсивности предпочтений в терминах отношения).

На следующем рисунке показана часть интерфейса с вопросами второй группы (Рис.2).

**Section 2:** Here you can define what type of model you would like to apply, accounting for (i) how the input data is used by the method, (ii) comparison of criteria performances, (iii) compensation between the criteria performances, (iv) aggregation of the criteria evaluations, and (v) the capacity of the MCDA methods to deal with inconsistent preference information.

<p><b>Scale used by the method(s)</b> How should the input information/performance data be used by the method(s)?</p> <p><b>Qualitative-based method(s) type</b> What type of method that only considers the qualitative information from the criteria performances should be selected?</p> <p><b>Comparison of performances</b> How should the comparison of the performances on the criteria be performed?</p>	<div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">             qualitatively ▾ (129)           </div> <div style="margin-bottom: 5px;"> <input type="checkbox"/> I don't know (205)           </div> <div style="background-color: #007bff; color: white; padding: 2px 5px; margin-bottom: 5px;"> <input checked="" type="checkbox"/> qualitatively (129) (83)           </div> <div style="margin-bottom: 5px;"> <input type="checkbox"/> quantitatively (93)           </div> <div style="margin-bottom: 5px;"> <input type="checkbox"/> relatively (1)           </div> <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px;">             I don't know ▾ (89)           </div>
--	--

Рисунок 2 – MCDA-MSS: часть интерфейса с вопросами второй группы

В следующем вопросе группы рассматривается сравнение характеристик. Пользователь может выбрать следующие ответы:

1) показатели преобразуются с помощью подхода нормализации на основе данных, а затем сравниваются (в этом случае показатели по всем критериям приводятся к одинаковой шкале перед агрегацией с помощью метода нормализации на основе данных);

2) показатели сравниваются лицом, принимающим решение, относительно градуированной силы предпочтения (в этом случае сравнения выполняются лицом, принимающим решение, который должен выбрать одно значение из шкалы, которая заранее определена);

3) показатели сравниваются лицом, принимающим решение, относительно неградуированной силы предпочтения (в этом случае сравнения выполняются лицом, принимающим решение, чья сила предпочтения не определена заранее в наборе значений);

4) сырые характеристики сравниваются напрямую (в этом случае показатели сравниваются лицом, принимающим решение, относительно неоцененной силы предпочтения).

Следующий вопрос касается весов критериев. Пользователь системы может определить, следует ли использовать веса критериев для дифференциации роли критериев в процедуре агрегации, ведущей к окончательной рекомендации по решению. Пользователь может дать положительный или отрицательный ответ.

В следующем вопросе выясняется, следует ли использовать пороги парного сравнения по каждому критерию для моделирования несовершенного знания характеристик критериев и/или для характеристики чувствительности предпочтений лица, принимающее решение, при сравнении двух альтернатив по одному критерию. Пользователь также может дать положительный или отрицательный ответ. Положительный ответ означает, что используются пороговые значения в сравнениях альтернатив по критериям для выражения различий в показателях, которые имеют значение для безразличия и предпочтения, или можно наложить вето на всеобъемлющее отношение предпочтения. Отрицательный ответ означает, что использование пороговых значений в показателях при сравнении альтернатив по критериям не требуется, поскольку каждая ненулевая разница показателей означает предпочтение для лица, принимающее решение.

Следующий вопрос касается взаимодействия между критериями. Определяется, следует ли рассматривать взаимодействия между критериями как отражение неаддитивной природы предпочтений. В случае положительного ответа показатели альтернатив по некоторым критериям влияют на восприятие лица, принимающее решение, ценности показателей по другим критериям, что означает, что эти два набора критериев являются преимущественно зависимыми. В отрицательном случае критерии являются преимущественно независимыми, что означает, что при построении комплексного отношения предпочтений значения показателей по отдельным критериям не зависят от показателей альтернатив по любому другому критерию.

Далее следует вопрос, следует ли использовать профили критериев, не соответствующие рассматриваемым альтернативам, для получения рекомендации по решению. В случае положительного ответа многокритериальные профили — это фиктивные альтернативы, с которыми сравниваются реальные альтернативы для разработки окончательной рекомендации по решению. В случае отрицательного ответа нет необходимости определять многокритериальные профили, служащие фиктивными альтернативами, с которыми сравниваются реальные альтернативы для разработки окончательной рекомендации по решению.

Следующий вопрос касается компенсации между критериями. Выясняется, в какой степени хорошая характеристика по критерию может компенсировать плохую характеристику по другому критерию. Доступны варианты: «никак», «частично» или «полностью». В случае первого варианта никакая хорошая характеристика по критерию не может компенсировать плохую характеристику по другому критерию. Второй вариант означает, что хорошая характеристика по критерию может частично компенсировать плохую характеристику по другому критерию. Третий означает, что хорошая характеристика по критерию может полностью компенсировать плохую характеристику по другому критерию.

В следующем вопросе, выясняется, можно ли агрегировать характеристики по стандартным методам для предоставления рекомендаций для принятия решения. Положительный ответ означает, что показатели по нескольким критериям суммируются с помощью метода для предоставления рекомендаций по решению. Отрицательный означает, что показатели по нескольким критериям не суммируются с помощью метода для предоставления рекомендации по принятию решения.

В случае положительного ответа определяется тип агрегации оценок нескольких критериев, а именно, какой подход следует использовать для агрегации нескольких критериев для предоставления рекомендации по решению: «функция подсчета», «бинарные отношения» или «правила». При подходе «функция подсчета» функция, которая агрегирует отдельные показатели критериев, используется для определения общего качества каждой альтернативы; относится к методам, которые используют показатели по каждому критерию и агрегируют нормализованные данные для построения рекомендации по решению. В случае «бинарных отношений» попарные сравнения альтернатив используются для разработки комплексной оценки каждой альтернативы. При подходе «правила» показатели агрегируются с помощью правил принятия решений, обычно выражаемых в форме утверждений "если ..., то ...".

Следующий вопрос, должен ли метод многокритериального принятия решений быть способным обрабатывать несоответствующую информацию о предпочтениях: «да» (метод должен быть способен обрабатывать противоречивую информацию о предпочтениях) или «нет» (не обязательно, чтобы метод был способен обрабатывать противоречивую информацию о предпочтениях).

В случае положительного ответа возникает дополнительный вопрос о том, какой тип несоответствующей информации о предпочтениях должен быть способен обрабатывать метод: «только нарушение доминирования», «только другие типы несоответствий, не включая доминирование» или «нарушение доминирования и другие типы несоответствий». В первом случае обрабатываются несоответствия, подразумеваемые только нарушением отношения доминирования предпочтениями пользователя. Во втором случае обрабатываются несоответствия, подразумеваемые исключительно внутренне конфликтующими предпочтениями пользователя. В третьем случае обрабатываются несоответствия между предпочтениями пользователя и моделью предпочтений, не способной их воспроизвести (включая нарушение доминирования).

Третья группа вопросов называется «Выявление предпочтений». Вопросы этой группы предназначены для определения типа, модальности и частоты предпочтений модели.

На следующем рисунке показана часть интерфейса с вопросами третьей группы (Рис.3).

**Section 3:** Here you can define what type of preferences information you can provide, how and with what frequency.

<b>Type of preferences elicitation</b> What type of preference information is provided?	direct ▾ (129)	(129)
	<input type="checkbox"/> I don't know (129)	
<b>Specify criteria weights</b> Do you want to specify the weights of the criteria?	<input checked="" type="checkbox"/> direct (129)	(86)
	<input type="checkbox"/> indirect (64)	
<b>Specify per-criterion pairwise comparison thresholds</b> Do you want to specify the per-criterion pairwise comparison thresholds?	I don't know ▾	(86)

Рисунок 3 – MCDA-MSS: часть интерфейса с вопросами третьей групп

В первом вопросе группы определяется, какой тип информации о предпочтениях предоставляется: «прямой» или «непрямой». Тип «прямой» означает, что параметры модели задаются непосредственно лицом, принимающим решение. Тип «непрямой» означает, что параметры модели выводятся на основе косвенных (локальных или целостных) суждений экспертов/лиц, принимающих решение.

В случае выбора первого типа появляется ряд дополнительных вопросов. Есть ли необходимость указывать веса критериев? И если да, то, какие типы весов использовать

(точные или неточные)? Есть ли необходимость указывать пороги парного сравнения по каждому критерию? И если да, то какой тип порогов парного сравнения следует использовать? Есть ли необходимость указывать информацию о взаимодействиях критериев? И если да, то, какой тип взаимодействия следует обрабатывать? И есть ли необходимость указывать профили критериев?

Следующим вопросом группы определяется, с какой частотой предоставляется информация о предпочтениях: «разовая» (все предпочтения предоставляются в начале процесса выявления) или «возрастающая» (предпочтения предоставляются последовательно, в разных итерациях).

И последний вопрос определяет, включать ли уровень достоверности предпочтений при предоставлении параметров. И если да, то он может указать уровни достоверности (например, для назначения, например, «абсолютно уверен», «уверен», «слегка уверен»).

Последняя группа вопросов называется «Использование отношения предпочтений, заданного моделью предпочтений». Определяет стратегию, используемую для получения и улучшения рекомендаций по принятию решений. В последней группе изначально один вопрос, в котором следует выбрать один из двух следующих типов использования отношения предпочтения, заданного моделью предпочтения: «однозначная рекомендация» или «анализ изменчивости выходных данных». В первом варианте обеспечивается однозначный результат для выбранной формулировки проблемы. Второй вариант рассматривает, насколько изменчивой может быть рекомендация, когда есть неопределенность относительно производительности альтернатив и/или представления предпочтений лица, принимающего решение, предполагаемой моделью предпочтений.

В случае выбора первого варианта возникает еще один вопрос о типе использования модели предпочтений с однозначной рекомендацией. Возможны два варианта: однозначная рекомендация, основывающаяся на анализе изменчивости выходных данных, и однозначная рекомендация, не основывающаяся на анализе изменчивости выходных данных. Первый вариант означает, что предоставляется единая, точная рекомендация, при этом, все еще учитывая, насколько изменчивой может быть рекомендация, когда есть неопределенность относительно характеристик альтернатив и/или представления предпочтений лица, принимающего решение, предполагаемой моделью предпочтений. Второй вариант означает, что не учитывается, насколько изменчивой может быть рекомендация, когда есть неопределенность относительно производительности альтернатив и/или представления предпочтений лица, принимающего решение, предполагаемой моделью предпочтений.

После выбора каждого из этих вариантов системой предлагается выявить желаемый тип модели предпочтений для получения рекомендации по решению. При однозначной рекомендации, основывающейся на анализе изменчивости выходных данных возможны «компромиссный» и «репрезентативный» типы, а при однозначной рекомендации, не основывающейся на анализе изменчивости выходных данных – «одионочный» (для получения рекомендации используется только одна модель) и «множественный» (для получения рекомендации используется несколько моделей).

В свою очередь при выборе «одионочного» типа далее можно уточнить тип: «детерминированный» или «репрезентативный». Тип «детерминированный» означает, что экземпляр модели предпочтений с точными значениями параметров либо напрямую указывается лицом, принимающим решение, либо определяется методом (в последнем случае не существует других возможных экземпляров модели предпочтений). Тип «репрезентативный» означает, что экземпляр модели предпочтений с точными значениями параметров либо выбирается методом, либо напрямую выбирается лицом, принимающим решение, (в обоих случаях не существует других возможных экземпляров модели предпочтений). Также в свою очередь «репрезентативный» тип может быть «алгоритмическим» или «с прямым участием». В первом случае метод выбирает один из

многих возможных экземпляров модели предпочтений, используя некоторую predetermined procedure, правило или алгоритм. Во втором случае лицо, принимающее решение, выбирает один из многих возможных экземпляров модели предпочтений, используя интерактивное программное обеспечение.

В случае выбора типа «анализ изменчивости выходных данных» возникает вопрос о том, каким образом необходимо проводить анализ изменчивости выходных данных. Возможные варианты: «экстремальные результаты со всеми совместимыми моделями» и «распределение результатов с помощью выборки совместимых моделей». Первый вариант означает, что все совместимые экземпляры модели предпочтений рассматриваются с помощью методов математического программирования (т. е. необходимых/возможных отношений). Второй вариант означает, что выборка всех совместимых экземпляров модели предпочтений, полученных с помощью стохастического моделирования, например, Монте-Карло.

Таким образом, в результате получения ответов на вышеописанные вопросы пользователь может получить список рекомендуемых методов. Однако возможен случай, когда список будет пустой. В настоящее время база данных MCDA-MSS содержит более 205 методов многокритериального принятия решений и 156 ключевых характеристик принятия решений. MCDA-MSS может быть полезной для исследователей и практиков, работающих в области многокритериального принятия решений [5], [6], [7].

При работе с системой WEMSS пользователь аналогичным образом на ряд интерактивных вопросов, сгруппированных в три раздела. В результате получения ответов пользователь получает список рекомендуемых методов взвешивания. В настоящее время база данных WEMSS содержит 35 методов взвешивания и 50 ключевых характеристик принятия решений.

На следующем рисунке показана часть интерфейса WEMSS с вопросами первой группы (Рис.4).

**Section 1:** They shape the operational capabilities of the required method

<b>Meaning of weights</b> What meaning should the weights have?	I don't know ▾	(19)
<b>Temporal discounting</b> Should the method allow for the inclusion of discounting?	I don't know ▾	(35)
<b>Cultural differentiations</b> Should the method account for different cultural backgrounds of the affected population?	I don't know ▾	(35)

Рисунок 4 – WEMSS: часть интерфейса с вопросами первой группы

### Результаты и обсуждение.

Проведенные исследования привели к следующим качественным результатам. В процессе работы с инструментом MCDA-MSS отвечая на предлагаемые системой вопросы, были определены основные характеристики, которым должен удовлетворять выбираемый метод многокритериального принятия решений. Весь процесс работы с системой имеет вид дерева вопросов с вариантами ответов (Рис.5.).

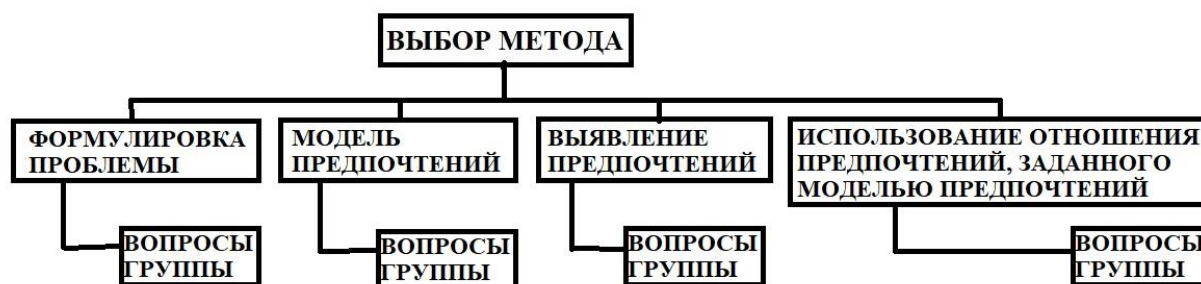


Рисунок 5 – Дерево вопросов системы MCDA-MSS

В итоге системой были предложены следующие варианты: TOPSIS [8], Fuzzy TOPSIS [9], TOPSIS interval [10], TOPSIS interval and fuzzy [11], VIKOR [12], Fuzzy VIKOR [13].

Метод TOPSIS (анг. Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) является известным методом многокритериального принятия решений, который основан на вычислении расстояний между каждой альтернативой и идеальной альтернативой, а также между каждой альтернативой и анти-идеальной альтернативой. Метод VIKOR (серб. ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje, означает «Многокритериальная оптимизация и компромиссное решение») – это также известный метод многокритериального принятия решений. В этом методе учитываются компромиссные решения. Он может быть полезен, когда имеется набор противоречивых критериев. Методы Fuzzy TOPSIS и Fuzzy VIKOR является расширением метода TOPSIS, и работает с нечеткими данными. Метод может применяться в том случае, когда критерии оцениваются с некоторой степенью неопределенности, т.е., например, вместо точных числовых значений указываются значения типа "низкое", "среднее", "высокое". Метод TOPSIS interval также является расширением метода TOPSIS, который работает с интервальными данными, т.е. когда оценки критериев выражены не точными числовыми значениями, а диапазонами возможных значений. Метод TOPSIS interval and fuzzy является более сложным расширением метода TOPSIS, который работает как с интервальными, так и нечеткими данными.

Таким образом, характер входных данных в рассматриваемой задаче многокритериального принятия решений влияет на окончательный выбор из предложенных системой MCDA-MSS методов. Если имеющиеся входные данные являются четкими и детерминированными, и необходимо найти альтернативу, ближайшую к идеальной альтернативе, то можно выбрать метод TOPSIS. Если входные данные являются четкими и детерминированными, и важно учитывать компромисс между критериями, то можно выбрать метод VIKOR. Если входные данные являются нечеткими, и требуется строгое упорядочивание критериев, то можно выбрать метод Fuzzy TOPSIS. Если входные данные являются нечеткими, и важны компромиссные решения, то можно выбрать метод Fuzzy VIKOR. Если данные являются интервальными, то можно выбрать метод TOPSIS interval. Если же данные включают как интервальные, так и нечеткие данные, то можно выбрать метод TOPSIS interval and fuzzy.

В процессе работы с инструментом WEMSS был определен оптимальный метод взвешивания критериев. В контексте данной задачи наилучшим выбором оказался метод аналитической иерархии (АИП, Analytic Hierarchy Process) [14].

Практическим применением и результатом проведенных исследований является то, что на основе выбранных оптимальных методов многокритериального принятия решений была разработана система выбора оптимального протокола консенсуса для сетей Интернета вещей, основанная на применении технологий распределенного реестра, а также соответствующая программная реализация на языке Python. Получено авторское свидетельство (Свидетельство об авторском праве, № 62332 от 23.09.2025 года).

Разработанный программный инструмент реализует следующий функционал. Инструмент предоставляет пользователю возможность выбрать:

- 1) Добавлять, редактировать и удалять в базу данных альтернативы (протоколы консенсуса), которые подходят или частично подходят для IoT.
- 2) Добавлять, редактировать и удалять в базу данных критерии оценки альтернатив.
- 3) Применять выбранные методы мультикритериального принятия решений для выбора оптимального протокола консенсуса для сетей Интернета вещей на основе блокчейна.

В базу данных системы был внесен следующий список альтернатив: Proof of Stake (PoS), Delegated Proof of Stake (DPoS), Proof of Importance (PoI), Proof of Supply Chain Share (PoSCS), Credit-Based Proof of Work (CBPoW), RapidChain, OmniLedger, Raft, Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT), dPBFT, Proof of Elapsed Work and Luck (PoEWAL), Microchain, Proof of Elapsed Time (PoET), Tangle, Ripple Protocol Consensus Algorithm (RPCA), Stellar Consensus Protocol (SCP), CBCIoT, Proof of Block & Trade (PoBT), Proof of Accumulated Trust (PoAT), hierarchical and location-aware consensus protocol LH-Raft, Proof of Chance (PoCh), Honesty-based Distributed Proof of Authority (HDPoA), Proof of Reputation X, Proof of X-repute.

На следующем рисунке показана часть интерфейса с разделом «Альтернативы и Критерии» (Рис.6).

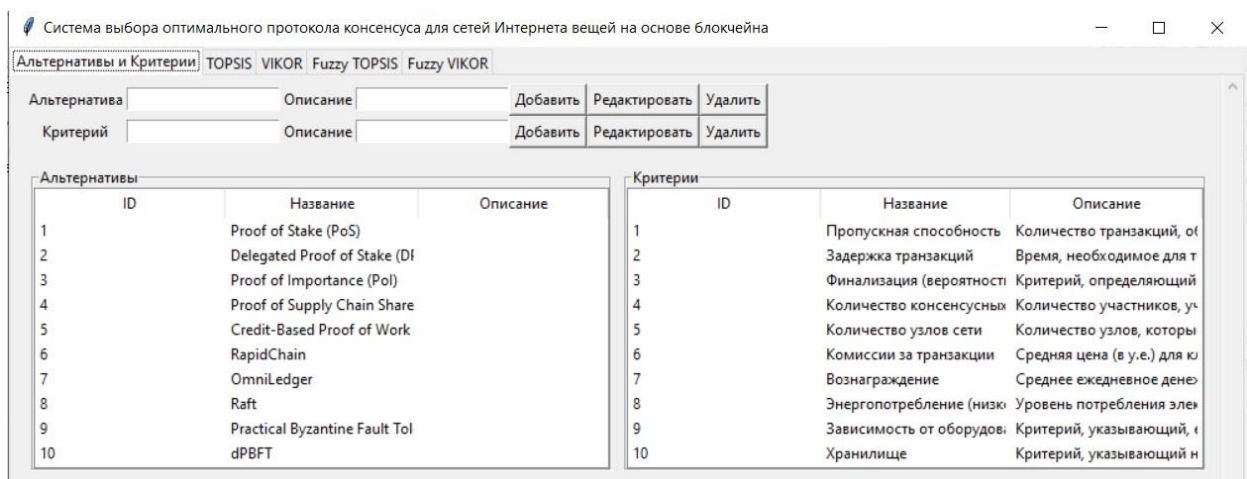


Рисунок 6 – Часть интерфейса система выбора оптимального протокола консенсуса

Далее был составлен и внесен в базу данных следующий список критериев: пропускная способность ( $C_1$  - транзакций в секунду (TPS),  $C_2$  - задержка транзакций (с),  $C_3$  - финализация (вероятностная/детерминированная)), децентрализация ( $C_4$  - количество консенсусных узлов,  $C_5$  - количество узлов сети), стимулирование ( $C_6$  - комиссии за транзакции (у.е./транзакции),  $C_7$  - вознаграждение (у.е. в день)), устойчивость ( $C_8$  - энергопотребление (низкое/среднее/высокое),  $C_9$  - зависимость от оборудования (нет/да),  $C_{10}$  - хранилище), безопасность ( $C_{11}$  - отказоустойчивость,  $C_{12}$  - атака 51% (Уязвимый/Безопасный),  $C_{13}$  - двойная трата (Уязвимый/Сложный/Безопасный)).

Пользователь системы с помощью созданной базы данных имеет возможность определять список альтернатив  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ , список критериев  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ , список весов соответствующих критериев  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ , где  $w_j \in [0,1]$ ,  $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ . Также определяется тип каждого критерия (положительный или отрицательный). В случае критерия положительного типа, чем больше его значение, тем лучше альтернатива, а в случае критерия отрицательного типа, чем меньше его значение, тем лучше альтернатива. В случае, когда значения некоторого критерия выражаются в словесно (например, "низкое", "среднее", "высокое"), они преобразовываются в числовые значения с помощью

специальных шкал (например, девятибалльная шкала Саати). Далее, каждая альтернатива оценивается по каждому критерию, и из полученных оценок формируется матрица решений  $X = [x_{ij}]_{m \times n}$ . В случае применения нечетких методов определяется список нечетких весов соответствующих критериев  $\tilde{W} = \{\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_n\}$ , где  $\tilde{w}_j$ ,  $j = 1, \dots, n$  – нечеткие треугольные числа, тип каждого критерия (положительный или отрицательный). Задается шкала перевода лингвистических оценок в нечеткие треугольные числа. Далее, каждая альтернатива оценивается по каждому критерию, используя числовые коды лингвистических оценок, и из полученных оценок формируется матрица решений  $X = [x_{ij}]_{m \times n}$ . Затем матрица решений  $X = [x_{ij}]_{m \times n}$  преобразовывается в нечеткую матрицу решений  $\tilde{X} = [\tilde{x}_{ij}]_{m \times n}$ , где  $\tilde{x}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$ ,  $i = 1, \dots, m$ ,  $j = 1, \dots, n$  – соответствующие оценкам  $x_{ij}$  нечеткие треугольные числа. Далее на основе определенных данных выполняются вычисления, предусмотренные выбранным пользователем методом.

Использование MCDA-MSS и WEMSS имеет ряд преимуществ. Во-первых, это некоторая степень автоматизации процесса выбора оптимальных методов многокритериального принятия решений. Во-вторых, это возможность учитывать множество различных параметров, что, в свою очередь, снижает риск появления субъективных ошибок при принятии решений. В-третьих, это гибкость инструмента за счет обширных баз данных MCDA-MSS и WEMSS. Кроме того, MCDA-MSS дает возможность пользователю выбирать из списка нескольких альтернативных методов, и в дальнейшем проводить их сравнительный анализ.

Однако этот подход имеет и некоторые ограничения. Во-первых, функционирование систем MCDA-MSS и WEMSS запрограммировано на основе встроенных алгоритмов, и, очевидно, не может полностью заменить экспертный анализ. В системе используется фиксированная таксономия, которая определяет прохождение пользователем по дереву вопросов данных систем. Для этого требуется полное и объективное понимание пользователем анализируемой задачи. И в случае несоответствия анализируемой задачи заложенным в системе алгоритмам возможны ошибочные рекомендации систем. Кроме того, с течением времени возможно появление необходимости модернизации таксономии и обновления в целом систем. Во-вторых, функционирование систем напрямую зависят от исходных данных пользователя, и, следовательно, любые ошибочные данные могут привести к неправильным рекомендациям систем. Существует зависимость от квалификации, знаний и опыта пользователя. В-третьих, функционирование систем зависит от их баз данных, которые могут устаревать в связи с тем, что появляются новые методы, а существующие развиваются. И если эти базы своевременно не обновлять, то возможны ошибочные и не актуальные рекомендации систем. Таким образом, работа с этими системами требует от их пользователя понимания методов многокритериального принятия решений, предварительного изучения функционала систем, а также критического отношения к полученным рекомендациям систем. Одним из возможных способов преодоления перечисленных ограничений является применение технологий искусственного интеллекта, в частности, машинного обучения.

В целом, использование таких программных инструментов, как MCDA-MSS и WEMSS, для решения сложных задач выбора в области технологий распределенного реестра для IoT имеет большой потенциал, и может быть полезным при разработке специализированных интеллектуальных систем поддержки принятия решений в области технологий распределенного реестра.

#### **Заключение.**

В данной работе представлен эффективный подход по выбору оптимальных методов многокритериального принятия решений, состоящий в использовании систем MCDA-MSS и WEMSS. С помощью этих специализированных был составлен список ряда методов

(TOPSIS, Fuzzy TOPSIS, TOPSIS Interval, TOPSIS Interval and Fuzzy, VIKOR и Fuzzy VIKOR, а также АНР) для решения задачи выбора оптимального протокола консенсуса в сетях IoT.

Этот подход имеет ряд достоинств, таких как автоматизация процесса выбора методов, возможность учитывать множество различных параметров, гибкость. Однако имеются и некоторые ограничения: зависимость функционирования систем от встроенных алгоритмов, зависимость от исходных данных пользователя, зависимость актуальности баз данных систем. В целом, рассмотренный подход показывает потенциал использования таких программных инструментов для решения сложных задач выбора в области технологий распределенного реестра для IoT. Можно считать, это может быть полезным при разработке специализированных интеллектуальных систем поддержки принятия решений в области технологий распределенного реестра. А также возможна будущая интеграция с технологиями искусственного интеллекта, которая повысит эффективность и адаптивность принимаемых решений, особенно в условиях высокой неопределенности данных и изменяющихся требований к протоколам консенсуса в сетях IoT.

***Благодарность.** Работа выполнена при финансовой поддержке КН МНВО РК, No AP23487259.*

### Список литературы

1. Оспанов, Р., Сейткулов, Е., Ташатов, Н., Ергалиева, Б., Сергазин, Г. (2024). Об альтернативах по методу многокритериального принятия решений при выборе протокола консенсуса блокчейна для сетей Интернета Вещей. Вестник КазАТК, 134(5), 426-436. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-134-5-426-436>
2. Оспанов, Р., Сейткулов, Е., Ташатов, Н., Ергалиева, Б., Сергазин, Г. (2024). О разработке критериев оценки альтернатив по методу многокритериального принятия решений при выборе протокола консенсуса блокчейна для сетей Интернета Вещей. Вестник КазАТК, 135(6), 263-271. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-135-6-263-271>
3. MCDA-MSS (MCDA Methods Selection Software). [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://mcda.cs.put.poznan.pl/index.php> (дата обращения: 29.03.2025).
4. WEMSS (WEighting Methods Selection Software). [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://mcda.cs.put.poznan.pl/wemss/index.php> (дата обращения: 29.03.2025).
5. Cinelli, M., Kadziński, M., Miebs, G., Gonzalez, M., Słowiński, R. (2022). Recommending multiple criteria decision analysis methods with a new taxonomy-based decision support system. European Journal of Operational Research, 302(2), 633-651. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.01.011>
6. Cinelli, M., Kadziński, M., Gonzalez, M., Słowiński, R. (2020). How to support the application of multiple criteria decision analysis? Let us start with a comprehensive taxonomy. Omega, 96, 102261. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2020.102261>
7. Online workshop on the Multiple Criteria Decision Analysis Methods Selection Software. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.universiteitleiden.nl/en/events/2023/10/online-workshop-on-the-multiple-criteria-decision-analysis-methods-selection-software> (дата обращения: 29.03.2025).
8. Bilbao-Terol, A., Arenas-Parra, M., Cañal-Fernández, V., Antomil-Ibias, J. (2014). Using TOPSIS for assessing the sustainability of government bond funds. Omega, 49, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.04.005>
9. Nădăban, S., Dzitac, S., Dzitac, I. (2016). Fuzzy TOPSIS: A General View. Procedia Computer Science, 91, 823-831. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.07.088>
10. Jahanshahloo, G.R., Hosseinzadeh Lotfi, F., Izadikhah, M. (2006). An algorithmic method to extend TOPSIS for decision-making problems with interval data. Applied Mathematics and Computation, 175(2), 1375-1384. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2005.08.048>
11. Chen, T.-Y., Tsao, C.-Y. (2008). The interval-valued fuzzy TOPSIS method and experimental analysis. Fuzzy Sets and Systems, 159(11), 1410-1428. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2007.11.004>

12. Opricovic, S. (1998). Multicriteria Optimization of Civil Engineering Systems. PhD Thesis, Faculty of Civil Engineering, Belgrade, 302 p.
13. Opricovic, S. (2011). Fuzzy VIKOR with an application to water resources planning. *Expert Systems with Applications*, 38(10), 12983-12990. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.097>
14. Saaty, T.L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9-26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)

### References

1. Ospanov, R., Seitkulov, E., Tashatov, N., Ergaliyeva, B., Sergazin, G. (2024). Ob al`ternativax po metodu mnogokriterial`nogo prinyatiya reshenij pri vy`bore protokola konsensusa blokchejna dlya setej Interneta Veshhej. *Vestnik KazATK*, 134(5), 426-436. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-134-5-426-436>
2. Ospanov, R., Seitkulov, E., Tashatov, N., Ergaliyeva, B., Sergazin, G. (2024). O razrabotke kriteriev ocenki al`ternativ po metodu mnogokriterial`nogo prinyatiya reshenij pri vy`bore protokola konsensusa blokchejna dlya setej Interneta Veshhej. *Vestnik KazATK*, 135(6), 263-271. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-135-6-263-271>
3. MCDA-MSS (MCDA Methods Selection Software) from <https://mcda.cs.put.poznan.pl/index.php>
4. WEMSS (WEighting Methods Selection Software) from <https://mcda.cs.put.poznan.pl/wemss/index.php>
5. Cinelli, M., Kadziński, M., Miebs, G., Gonzalez, M., Słowiński, R. (2022). Recommending multiple criteria decision analysis methods with a new taxonomy-based decision support system. *European Journal of Operational Research*, 302(2), 633-651. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.01.011>
6. Cinelli, M., Kadzinski, M., Gonzalez, M., Słowinski, R. (2020). How to support the application of multiple criteria decision analysis? Let us start with a comprehensive taxonomy. *Omega*, 96, 102261. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2020.102261>
7. Online workshop on the Multiple Criteria Decision Analysis Methods Selection Software from <https://www.universiteitleiden.nl/en/events/2023/10/online-workshop-on-the-multiple-criteria-decision-analysis-methods-selection-software>
8. Bilbao-Terol, A., Arenas-Parra, M., Cañal-Fernández, V., Antomil-Ibias, J. (2014). Using TOPSIS for assessing the sustainability of government bond funds. *Omega*, 49, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.04.005>
9. Nădăban, S., Dzitac, S., Dzitac, I. (2016). Fuzzy TOPSIS: A General View. *Procedia Computer Science*, 91, 823-831. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.07.088>
10. Jahanshahloo, G.R., Hosseinzadeh Lotfi, F., Izadikhah, M. (2006). An algorithmic method to extend TOPSIS for decision-making problems with interval data. *Applied Mathematics and Computation*, 175(2), 1375-1384. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2005.08.048>
11. Chen, T.-Y., Tsao, C.-Y. (2008). The interval-valued fuzzy TOPSIS method and experimental analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, 159(11), 1410-1428. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2007.11.004>
12. Opricovic, S. (1998). Multicriteria Optimization of Civil Engineering Systems. PhD Thesis, Faculty of Civil Engineering, Belgrade, 302 p.
13. Opricovic, S. (2011). Fuzzy VIKOR with an application to water resources planning. *Expert Systems with Applications*, 38(10), 12983-12990. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.097>
14. Saaty, T.L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9-26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)

## **ИОТ ЖЕЛІЛЕРІНДЕГІ КОНСЕНСУС ХАТТАМАСЫН АНЫҚТАУ ҮШІН МАМАНДАНДЫРЫЛҒАН БАҒДАРЛАМАЛЫҚ ЖАСАҚТАМАНЫ ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, КӨП КРИТЕРИАЛДЫ ТАЛДАУДЫҢ ОҢТАЙЛЫ ӘДІСТЕРІН ТАҢДАУ**

***Аңдатпа:** Интернет желісіндегі блокчейн консенсусының оңтайлы механизмдерін таңдау мәселесін шешім қабылдаудың көп критерийлі мәселесі ретінде қарастыруға болады. Бұл жұмыстың мақсаты осы мәселе аясында көп критерийлі шешім қабылдаудың ең қолайлы әдісін анықтау болып табылады. Қазіргі уақытта мультикритериалды талдаудың көптеген әртүрлі әдістері бар. Сонымен қатар, жаңа әдістер пайда болып, барлары дамып келеді. Мұндай жағдайларда қарастырылып отырған мәселе бойынша көп критериалды шешім қабылдаудың ең қолайлы әдісін дұрыс анықтау өте маңызды болып көрінеді. Мұндай дұрыс таңдау бағалау мен шешім қабылдауда объективтілік пен дәлдікке үлкен сенімділікті қамтамасыз етеді деп күтілуде. Қарастырылып отырған мәселе көптеген баламалармен (көптеген әртүрлі консенсус хаттамалары) және көптеген критерийлермен (мысалы, энергияны тұтыну, өткізу қабілеті, шабуылдарға төзімділік, транзакцияларды өңдеу кідірісі және т.б.) сипатталатынын ескерсек, бұл да маңызды. Қазіргі уақытта көп критериалды шешім қабылдаудың ең қолайлы әдістерін таңдау процесін автоматтандыруға арналған ашық бастанқы бағдарламалық құралдар бар. Мұндай шешімдерді қолдау жүйелері талдаушылар мен зерттеушілерге мультикритериалды талдауды қолданудың әртүрлі салаларында көмектеседі. Бұл жұмыс IoT үшін оңтайлы консенсус механизмін таңдау мәселесі жағдайында осындай мамандандырылған бағдарламалық қамтамасыз етуді пайдалану негізінде көп критериалды шешім қабылдаудың оңтайлы әдістерін таңдау тәсілін ұсынады. Нәтижесінде белгілі TOPSIS, VIKOR әдістері, сонымен қатар олардың интервалдық және анық емес модификациялары таңдалды. Сонымен қатар, критерийлерді салмақтау үшін аналитикалық иерархиялық процесс (AHP) әдісі таңдалды.*

***Түйін сөздер:** бөлінген тізілім технологиялары, блокчейн, консенсус протоколы, заттар интернеті, көп критериалды шешім қабылдау әдістері.*

## **SELECTION OPTIMAL MULTICRITERIA ANALYSIS METHODS USING SPECIALISED SOFTWARE TO DETERMINE CONSENSUS PROTOCOL IN INTERNET OF THINGS NETWORKS**

***Abstract:** The task of selecting optimal blockchain consensus mechanisms in the IoT networks can be considered as a multi-criteria decision-making task. The goal of this paper is to determine the most appropriate method of multi-criteria decision-making for this task. Currently, there are many different methods of multi-criteria analysis. In addition, new methods are emerging, and the existing ones continue to evolve. In such conditions, it seems very important to correctly determine the most appropriate method of multi-criteria decision-making for the task at hand. It is assumed that such a correct choice will provide greater confidence in the objectivity and accuracy of evaluation and decision-making. This is also important given that the task at hand is characterized by a large number of alternatives (many different consensus protocols) and a large number of criteria (e.g., energy consumption, throughput, attack resistance, transaction processing delay, etc.). Currently, there are open source software tools designed to automate the process of selecting the most appropriate methods of multi-criteria decision-making. Such decision support systems help analysts and researchers in various areas of multi-criteria analysis application. This paper presents an approach to selecting optimal methods for multi-criteria decision making based on the use of such specialized software in the case of the problem of selecting the optimal consensus mechanism for IoT. As a result, the well-known TOPSIS, VIKOR methods, as well as their interval and fuzzy modifications, were selected. Additionally, the analytical hierarchy process (AHP) method was selected for weighting the criteria.*

**Keywords:** *distributed ledger technologies, blockchain, consensus protocol, Internet of Things, multi-criteria decision making methods.*

### Сведение об авторах

Руслан Оспанов	научный сотрудник, ЕНУ им. Л.Н.Гумилева, E-mail: <a href="mailto:ospanovrm@gmail.com">ospanovrm@gmail.com</a>
Ержан Сейткулов	к.ф.-м.н., главный научный сотрудник, ЕНУ им. Л.Н.Гумилева, E-mail: <a href="mailto:yerzhan.seitkulov@gmail.com">yerzhan.seitkulov@gmail.com</a>
Нурлан Ташатов	к.ф.-м.н., главный научный сотрудник, ЕНУ им. Л.Н.Гумилева, E-mail: <a href="mailto:yerzhan.seitkulov@gmail.com">yerzhan.seitkulov@gmail.com</a>
Бану Ергалиева	научный сотрудник, ЕНУ им. Л.Н.Гумилева, E-mail: <a href="mailto:ergalieva_banu@mail.ru">ergalieva_banu@mail.ru</a>
Куат Утебаев	магистрант филиала НИЯУ МИФИ, Алматы.

### Авторлар туралы мәлімет

Руслан Оспанов	ғылыми қызметкері, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, E-mail: <a href="mailto:ospanovrm@gmail.com">ospanovrm@gmail.com</a>
Ержан Сейткулов	ф.-м.ғ.к., бас ғылыми қызметкері, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, E-mail: <a href="mailto:yerzhan.seitkulov@gmail.com">yerzhan.seitkulov@gmail.com</a>
Нурлан Ташатов	п.ғ.д., бас ғылыми қызметкері, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, <a href="mailto:tash.nur@mail.ru">E-mail: tash.nur@mail.ru</a>
Бану Ергалиева	ғылыми қызметкер, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан, E-mail: <a href="mailto:ergalieva_banu@mail.ru">ergalieva_banu@mail.ru</a>
Куат Утебаев	магистрант, Ұлттық зерттеу ядролық университетінің филиалы, Алматы.

### Information about the authors

Ruslan Ospanov	Researcher, L.N. Gumilyov Eurasian National University, <a href="mailto:ospanovrm@gmail.com">ospanovrm@gmail.com</a>
Yerzhan Seitkulov	Ph.D, Chief Researcher, L. N. Gumilyov Eurasian National University, E-mail: <a href="mailto:yerzhan.seitkulov@gmail.com">yerzhan.seitkulov@gmail.com</a>
Nurlan Tashatov	Ph.D., Chief Researcher, L. N. Gumilyov Eurasian National University, E-mail: <a href="mailto:tash.nur@mail.ru">tash.nur@mail.ru</a>
Banu Yergaliyeva	researcher, L. N. Gumilyov Eurasian National University E-mail: <a href="mailto:ergalieva_banu@mail.ru">ergalieva_banu@mail.ru</a>
Kuat Utebayev	master student, Almaty Branch of the National Research Nuclear University