

# Выбор технологий с помощью метода TOPSIS

Катаржина Халицкая

Профессор, k.halicka@pb.edu.pl

Белостокский технический университет (Bialystok University of Technology), Польша, 45А,  
Wiejska Street, 15-351 Bialystok, Poland

## Аннотация

Конкурентные преимущества предприятий все чаще определяются инновационными технологиями, которые лежат в основе современных производственных процессов, нацеленных на удовлетворение потребностей общества. Вокруг необходимости технологического развития сложился широкий консенсус, подтверждаемый международными и национальными программами, научно-исследовательской деятельностью и появлением новых институтов. Учитывая растущий спрос на инновационные технологии, представляется важным использовать специальные методы и инструменты для их эффективного анализа и отбора. В статье описано, как в этом могут помочь многомерные методы принятия решений.

Предложенная автором концепция сочетает анализ жизненного цикла на основе S-образной кривой (*S-life-cycle analysis, S-LCA*), которая позволяет оценить производительность технологии, с методами уровней готовности технологий (*technology readiness levels, TRL*), с помощью которых оценивается степень их проработки, и методом TOPSIS, используемым для расчета рейтинга технологий. Подход верифицирован на материале ранжирования и отбора лучших технологий дорожного строительства в Польше на базе предложенного набора критериев и подкритериев. В дополнение к методам S-LSA и TRL для оценки применялись критерии инновационности, конкурентоспособности и удобства пользования.

**Ключевые слова:** технологии; инновации; отбор; оценка технологий; уровень готовности технологии; TOPSIS; многомерные методы принятия решений

**Цитирование:** Halicka K. (2020) Technology Selection Using the TOPSIS Method. *Foresight and STI Governance*, vol. 14, no 1, pp. 85–96. DOI: 10.17323/2500-2597.2020.1.85.96

# Technology Selection Using the TOPSIS Method

**Katarzyna Halicka**

Professor, k.halicka@pb.edu.pl

Bialystok University of Technology, 45A, Wiejska Street, 15-351 Bialystok, Poland

## Abstract

Innovative technologies are increasingly determining the competitive advantage of enterprises. They also form the basis for modern manufacturing processes, enabling them to meet the needs of society. Awareness of the need for technological development has become widespread, which has been confirmed by international and national programs, scientific and research activities, as well as emerging institutions. Considering the increasing demand for innovative technologies and the developed market, it appears important to use specific methods and tools for the effective analysis and selection of technologies. This paper presents a proposal to use multi-attribute decision-making methods

during technology assessment and selection. The proposed concept combines an S-life-cycle analysis (S-LCA), which determines the performance of a technology, the method of Technology Readiness Levels (TRL), which examines the technological maturity, and the TOPSIS method, which allows for developing a technology ranking. To verify this approach, the example of a ranking and selection of the best road technology in Poland is presented, considering the proposed set of criteria and sub-criteria. In the technology assessment, the criteria for innovation, competitiveness, and usefulness of this technology were used in addition to S-LSA and TRL methods.

**Keywords:** technology; innovation; technology selection; technology assessment; technology readiness levels; TOPSIS; Multi-Attribute Decision-Making methods

**Citation:** Halicka K. (2020) Technology Selection Using the TOPSIS Method. *Foresight and STI Governance*, vol. 14, no 1, pp. 85–96. DOI: 10.17323/2500-2597.2020.1.85.96

При отборе технологий используются заранее определенные критерии, агрегирование которых позволяет рассчитать рейтинг каждой из них. Тем самым удается собрать информацию о различных технологиях из разных источников и затем оценить альтернативы с учетом приоритетов компании, которая выполняет или заказывает такую работу. Эмпирической оценке подвергаются текущие параметры и потенциал развития технологий, причем как индивидуально, так и в составе портфелей принадлежащих предприятию технологий, продуктов или запатентованных изобретений. Селекция и ранжирование предполагают либо объективное измерение соответствующих параметров (касающихся самой технологии, фирмы и ее рыночного окружения), либо экспертизу некоторых из них.

Оценка технологий (ОТ) составляет неотъемлемую часть ранжирования. Концепция ОТ была впервые предложена в середине 1960-х гг. для прогнозирования последствий разработки новых технологий [van den Ende et al., 1998; Carlsen et al., 2010]. С течением времени она была усовершенствована и распространена на весь спектр эффектов создания и внедрения или создания новых технологий, прежде всего негативных. Такова была неизбежная реакция на технологическое развитие второй половины XX в., которое породило технологии (био-, нано- или ядерные), воспринятые многими как рискованные или прямо опасные [Goulet, 1994; Coates, 1998; Tran, Daim, 2008]. Система ОТ рассматривалась как механизм «раннего предупреждения», позволяющий выявить возможности и угрозы, связанные с теми или иными технологиями, и на этой основе определить целесообразность их разработки и внедрения. Многие годы от специалистов требовали сведений о потенциале новых технологий, чтобы убедить общество в необходимости внедрять инновации [Halicka, 2017; Halicka, 2018].

Обзор литературы показывает, что концепция ОТ первоначально использовалась для помощи в принятии политических решений. Речь преимущественно шла о стратегической оценке экономического эффекта сложных технологий, в частности энергетических (для традиционной и ядерной энергетики) и авиационных. Большинство таких технологий разрабатывались и эксплуатировались государственными организациями. Со временем ОТ взял на вооружение бизнес, заинтересованный в экспертизе и отборе технологий. Анализ источников позволил выделить несколько разновидностей ОТ (табл. 1) [Carlsen et al., 2010; Tran, Daim, 2008; van den Ende et al., 1998].

Суть партисипаторной ОТ в том, чтобы повысить уровень участия и роль общества в процессе принятия решений на основе фактических сведений о технологии (в отличие от попыток предвидеть их возможные будущие эффекты) [Goulet, 1994; Tavella, 2016]. Вместе с тем оценка технологической осведомленности нацелена на прогнозирование технологического развития и его эффектов с акцентом на непредусмотренных и непредсказуемых последствиях [Coates, 1998; Arora et al., 2014]. Конструктивная ОТ позволяет менять направления такого развития в зависимости от общественного запроса [van den Ende et al., 1998; Schot, Rip, 1997; Versteeg et al.,

2017]. Суть ретрополяции состоит в построении сценариев желаемого будущего и стимулировании соответствующих инновационных процессов [Zimmermann et al., 2012]. Стратегическая ОТ выполняется для помощи конкретным организациям или группам организаций в разработке инициатив и стратегий технологического развития [Daim et al., 2018; Grimaldi et al., 2015]. Первые четыре разновидности ОТ в настоящее время служат для сопровождения политических решений, тогда как в последней воплощено новое направление исследований ОТ в бизнесе, промышленности и неправительственном секторе.

Стратегическая ОТ практикуется с 1980-х гг., однако ее процедурные аспекты были детально проработаны лишь в 1990-е гг. Подход применим к экономической экспертизе альтернативных технологий, селекции и закупке стратегических технологий, а также к стратегическому планированию с учетом уровня их готовности, коммерческого потенциала и инновационности. Ключевая роль при этом принадлежит потенциальным и фактическим поставщикам или заинтересованности пользователей во внедрении более релевантных решений. Стратегическую ОТ могут осуществлять организации-разработчики (например, научно-исследовательские институты) или предприятия, заинтересованные в определении и внедрении технологий, в наибольшей степени отвечающих задачам бизнеса. Технологии оцениваются с точки зрения актуальных и отдаленных планов их внедрения пользователями и иными акторами. Это наиболее сложный аспект отбора.

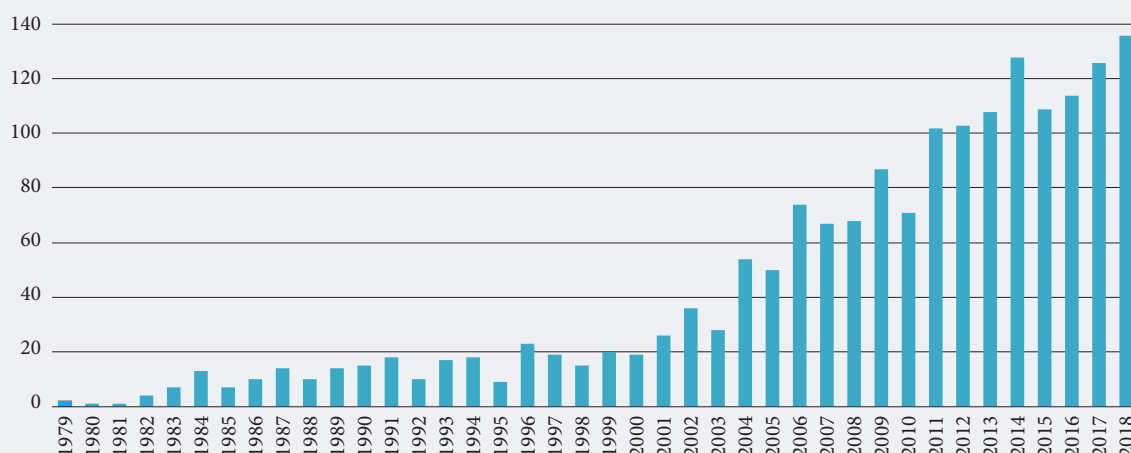
## Обзор литературы

Отбор технологий — динамично развивающееся направление, о чем свидетельствует рост числа посвященных этой теме публикаций. В базе данных Scopus за последние 40 лет проиндексировано 1753 публикации с термином *technology selection* среди ключевых слов. Динамика упоминаний за период 1979–2018 гг., приведенная на рис. 1, показывает, что изначально (в первые 25 лет) интерес к этим вопросам оставался незначительным. До 2003 г. ежегодно выходило не более 40 релевантных статей. Лишь начиная с 2004 г. интерес к отбору технологий начал расти быстрыми темпами, что нашло отражение в статистике Scopus.

Наибольшее число публикаций, посвященных отбору технологий, принадлежит журналам *SAE Technical Papers* (31 статья), *A Journal of Cleaner Production* (31), *International Journal of Production Research* (18) и *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (16 статей).

Для селекции можно использовать как качественные, так и количественные методы. Первые позволяют вычлнить характеристики, определяющие потенциальный эффект внедрения и коммерциализации технологий. Методы второго типа нацелены на идентификацию параметров, обуславливающих различия между технологиями. На практике эти методы обычно используются в сочетании друг с другом, а опыт исследований в разных странах показывает, что разработать

Рис. 1. Число публикаций в базе данных Scopus (1979–2018)



Источник: составлено автором на основе результатов поиска по базе данных Scopus с использованием ключевых слов «отбор технологий» (*technology selection*) (поиск по названиям, аннотациям и ключевым словам статей).

универсальный метод анализа технологий невозможно (чем и объясняется их комбинирование в ходе каждой процедуры оценки).

Экспертиза и отбор технологий — сложный процесс, сопряженный с неопределенностью производственных технологий, неоднозначностью оценок (суждений) экспертов, участвующих в их ранжировании, взаимозависимостью и многомерной природой технологий. Все это делает востребованными многомерные методы принятия решений [Winebrake, Creswick, 2003], которые представляют собой процедуры обработки информации, анализа имеющихся вариантов на основе различных критериев приоритизации и определения наилучшего из них. Такой подход позволил очертить широкий спектр методов [Zavadskas et al., 2016; Mardania et al.,

2018; Vavrek et al., 2017; Tamošiūnas, 2018; Roszkowska, Kacprzak, 2016; Chodakowska, Nazarko, 2017], в частности методы ранжирования — простое аддитивное взвешивание (*simple additive weighting, SAW*), исключение и выбор для характеристики реальности (*elimination and choice expressing the reality, ELECTRE*), организацию ранжирования предпочтений для более всесторонней оценки (*preference ranking organization method for enrichment evaluation, PROMETHEE*) и оценки близости к идеалу/антиидеалу, включая многокритериальную оптимизацию и поиск компромиссного решения (*multicriteria optimisation and compromise solution — VIsekriterijumska optimizacija i KOmpromisno Resenje, VIKOR*). К числу наиболее важных относятся упомянутый VIKOR, методы приоритизации предпочтений на основе близости

Табл. 1. Типы оценки технологий

| Типы ОТ  | Применение                              | Пользователи              | Некоторые критерии оценки  |
|--|---|---------------------------|--|
| Партисипаторная ОТ ( <i>participatory technology assessment, PTA</i> ) [Goulet, 1994; Tavella, 2016]   | Поддержка принятия политических решений | Политики                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Экономическая ценность технологии</li> <li>• Потенциал получения преимуществ за счет диверсификации</li> <li>• Возможности влияния на технологическое развитие через государственные интервенции</li> <li>• Целесообразность государственных интервенций</li> <li>• Низкая вероятность незаконного использования</li> <li>• Значительные социальные выгоды</li> </ul> |
| Оценка устойчивости технологий ( <i>sustainability assessment of technologies, SAT</i> ) [Ren et al., 2017]                                    |   |                           |  |
| Оценка технологической осведомленности ( <i>awareness assessment of technologies, ATA</i> ) [Coates, 1998; Arora et al., 2014]                 |   |                           |  |
| Конструктивная ОТ ( <i>constructive assessment of technologies, CTA</i> ) [van den Ende et al., 1998; Schot, Rip, 1997; Versteeg et al., 2017] |   |                           |  |
| Ретрополяция ( <i>backcasting</i> ) [Zimmermann et al., 2012]  |   |                           |  |
| Стратегическая ОТ ( <i>strategic assessment of technologies, STA</i> ) [Daim et al., 2018; Grimaldi et al., 2015]                              | Поддержка принятия бизнес-решений       | Лица, принимающие решения | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ценность с точки зрения реципиента</li> <li>• Планы текущего внедрения/применения</li> <li>• Планы будущего внедрения/применения</li> <li>• Сроки вывода на рынок</li> <li>• Число поставщиков/продавцов</li> </ul>   |

Источник: составлено автором на основе [Goulet, 1994; Tavella 2016; Ren et al., 2017; Coates, 1998; Arora et al., 2014; van den Ende et al., 1998; Schot, Rip, 1997; Versteeg et al., 2017; Zimmermann et al., 2012; Daim et al., 2018; Grimaldi et al., 2015].

**Табл. 2. Число публикаций, посвященных отбору технологий, в базе данных Scopus за 1999–2019 гг.**

| Год  | Число публикаций |
|------|------------------|
| 1999 | 1                |
| 2009 | 1                |
| 2011 | 1                |
| 2012 | 4                |
| 2013 | 3                |
| 2014 | 1                |
| 2015 | 2                |
| 2016 | 5                |
| 2017 | 5                |
| 2018 | 6                |
| 2019 | 4                |

Источник: составлено автором на основе результатов поиска по базе данных Scopus с использованием ключевых слов «выбор технологий» (*technology selection*) и «TOPSIS» или «оценка технологий» (*technology assessment*) И «TOPSIS» (поиск по названиям, аннотациям и ключевым словам статей).

к идеальному решению (*technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS*) и анализа иерархий (*analytic hierarchy process, AHP*), процесс формирования аналитических сетей (*analytic network process, ANP*) и измерение привлекательности методом категориальной оценки (*measuring attractiveness by a categorical based evaluation technique, MACBETH*).

Анализ литературы показал, что для отбора технологий чаще всего применяются АНР и TOPSIS. Характерная особенность первого заключается в том, что он позволяет сопоставлять выбранные критерии и строить матрицу сравнения. С ее помощью на следующем этапе определяются глобальные и локальные предпочтения и рассчитывается фактор соответствия. На

**Табл. 3. Тематическая структура выявленных публикаций**

| Предметная область                         | Число публикаций |
|--|------------------|
| Инжиниринг                                 | 19               |
| Компьютерные науки                         | 8                |
| Экология                                   | 7                |
| Бизнес                                     | 5                |
| Энергетика                                 | 3                |
| Медицина                                   | 4                |
| Социальные науки                           | 2                |
| Принятие решений                           | 2                |
| Материаловедение                           | 2                |
| Сельскохозяйственные и биологические науки | 1                |
| Биохимия                                   | 1                |
| Химия                                      | 1                |
| Математика                                 | 1                |
| Физика и астрономия                        | 1                |

Источник: составлено автором на основе базы данных Scopus.

завершающей стадии оценки составляется итоговый рейтинг приемлемых альтернатив на основе расчета функции их полезности. TOPSIS сводится к измерению сходства с идеальным решением и представляет собой метод классификации по степени близости: альтернативные варианты располагаются на шкале совпадения с идеалом и антиидеалом. Результаты ранжируются с учетом веса используемых критериев в рамках стандартной процедуры. Наилучшим решением считается то, которое ближе всего к идеалу или дальше всего от него. Полученный подобным способом интегральный показатель определяет позицию того или иного варианта в рейтинге. Метод АНР редко применяется при наличии большого набора критериев. Так, при 24 критериях матрица будет включать по 24 столбца и строки, тогда как обычно их число не превышает 10. Кроме того, метод АНР зачастую предполагает субъективное определение веса критериев в зависимости от мнений экспертов. Порождает проблемы и взаимозависимость альтернатив и критериев, которая может привести к несоответствию оцениваемых вариантов критериям ранжирования и инверсии рейтинга [Nermed, 2015; Velasquez, Hester, 2013; Anand, Vinodh, 2018; Mobinizadeh et al., 2016; Oztaysi, 2014]. Вот почему, например, для выбора технологий дорожного строительства нами используется метод TOPSIS.

Прежде всего, был подготовлен подробный обзор литературы и выполнен библиографический анализ публикаций, посвященных отбору технологий с помощью метода TOPSIS. За период 1999–2019 гг. в базе данных Scopus проиндексированы 33 работы, в которых присутствуют ключевые слова «выбор технологий» (*technology selection*) и TOPSIS или «оценка технологий» (*technology assessment*) И TOPSIS. Динамика таких публикаций представлена в табл. 2. Первая статья была опубликована в 1999 г.

Выявленные публикации были проанализированы с точки зрения предметных областей (табл. 3). Каждую из статей можно одновременно отнести к нескольким областям. Более половины публикаций посвящены инженерной тематике. В восьми статьях рассматриваются вопросы, относящиеся к компьютерным наукам, в семи — к экологии, в остальных — к бизнесу, энергетике, материаловедению и социальным наукам.

Анализ публикаций свидетельствует, что для отбора энергетических (способы хранения энергии или использование возобновляемых источников) и медицинских технологий чаще всего используется метод TOPSIS (табл. 4). Он же применяется при ранжировании экологических технологий (утилизация и очистка отходов, опреснение, очистка балластных и сточных вод, а также медицинских отходов) и технологий автомобильной промышленности (восстановление двигателей, датчики ABS). Кроме того, метод TOPSIS служит для оценки и отбора таких технологий, как производство «умного» стекла, новых трехмерных интегральных микросхем (3DIC), железа и создание сложных подводных систем.

Рассмотрим использование метода TOPSIS для ранжирования следующих пяти технологий дорожного покрытия [Nazarko et al., 2015; Nazarko, 2017; Kikolski,



Табл. 4. Примеры использования метода TOPSIS для отбора технологий

| Публикация (год)   | Виды технологий  |
|--|--|
| [Habbal et al., 2019]  | Технологии радиосвязи  |
| [Gladysz et al., 2017; Wan et al., 2016]   | Радиочастотная идентификация (RFID)  |
| [Zhang et al., 2019]   | Технологии хранения энергии  |
| [Restrepo-Garcés et al., 2017; Hirushie et al., 2017]                                | Возобновляемые источники энергии   |
| [Karatas et al., 2018]   | Энергетические технологии  |
| [Streimikiene, 2013a,b; Streimikiene et al., 2013; Streimikiene, Balezentiene, 2012] | Электромобиль  |
| [Zheng et al., 2012]   | Экологичные здания   |
| [Peng et al., 2019]  | Технологии восстановления автомобильных двигателей                           |
| [Aloini et al., 2018]  | Сложные подводные системы  |
| [Büyükoçkan, Güler, 2017]  | «Умное» стекло   |
| [Ansari et al., 2016; Puthanpura et al., 2015]                                       | Технологии производства автомобилей  |
| [Elahi et al., 2011]   | Технологии датчиков ABS  |
| [Govind et al., 2018]  | Технологии очистки и утилизации  |
| [Ren, 2018]  | Очистка балластных вод   |
| [Vivekh et al., 2017]  | Технологии опреснения  |
| [Kalbar et al., 2012; Fu et al., 2012]   | Технологии очистки сточных вод   |
| [Jiří, 2018; Mobinizadeh et al., 2016; Gajdoš et al., 2015; Lu et al., 2016]         | Медицинские технологии   |
| [Lee, James Chou, 2016]  | Новые трехмерные интегральные микросхемы (3DIC)                              |
| [Tavana et al., 2013]  | Сложные технологии для проектов НАСА   |
| [Oztaysi, 2014]  | Информационные технологии  |
| [Towhidi et al., 2009]   | Технологии производства железа   |
| [Parkan, Wu, 1999]   | Роботы для выполнения повторяющихся, сложных и опасных высокоточных операций |

Источник: составлено автором.

Chien-Но Ко, 2018]: покрытие с резино-асфальтовым связующим веществом (Т1), из пористой асфальтовой смеси (Т2), «вечная мостовая» (*perpetual pavement*) (Т3), традиционный цементобетон (Т4) и покрытие с эластомерными связующими веществами (Т5). Анализ литературы по материалам поисковых исследований позволил сформулировать следующие вопросы. (1) Как использовать метод TOPSIS для оценки технологий дорожного покрытия? (2) Какие критерии следует применять для оценки технологий дорожного покрытия? (3) Какие результаты были получены после оценки технологий с использованием различных критериев?

### Методы исследования

Процесс выбора технологии дорожного покрытия включал четыре последовательных этапа. Схема данного процесса представлена в табл. 5.

На первом этапе автор и авторитетные эксперты-практики оценили степень развития основных технологий дорожного покрытия, применяемых в Польше. Для этого использовалась модель уровней готовности технологий (*technology readiness levels, TRL*), общее значение которой применительно к дорожному покрытию, оценивается как низкое. Для трех уровней этого показателя описаны, а также аналитически и экспериментально проверены основные принципы анализируемой технологии, концепция ее самой и/или ее применения. TRL технологий со средним уровнем готовности колеблется в диапазоне от 4 до 6. Подобные технологии уже испытывались в условиях, максимально приближенных к реальным. Значения TRL технологий с высоким уровнем готовности составляет от 7 до 9. Детальное изучение технологий с низким и средним уровнями готовности, включая лежащие в их основе принципы и эмпирические характеристики, не позволило найти им приклад-

Табл. 5. Элементы процесса оценки и выбора технологий дорожного покрытия

| Задача исследования                            | Исполнитель     | Метод  | Результат  |
|--|-----------------|--|--|
| 1. Оценка зрелости и продуктивности технологий | Автор, эксперты | Анализ литературы, уровни готовности технологий, анализ жизненного цикла на основе S-образной кривой | Стадии жизненного цикла технологий, уровни зрелости технологий |
| 2. Определение критериев оценки технологий     | Автор           | Анализ литературы  | Список критериев   |
| 3. Оценка технологий                           | Эксперты        | Проведение обследований  | Заполненные анкеты с ОТ  |
| 4. Выбор технологии                            | Автор           | TOPSIS   | Ранжированный список технологий                                |

Источник: составлено автором.

ное или промышленное применение. Такие исследования нацелены на получение новых знаний и навыков для разработки новых или существенного улучшения существующих продуктов, процессов и услуг. Далее определяются стадии жизненного цикла технологий, из которых в литературе упоминаются следующие: зарождение (характеризуется большой неопределенностью, высокой интенсивностью исследований и низким уровнем инвестиций); разработка (средний уровень неопределенности, акцент на практическом использовании, значительные инвестиции); зрелость (низкий уровень неопределенности, сокращение затрат и инвестиций и снижение рейтинга технологии, поскольку она устаревает и заменяется новой, более конкурентоспособной).

При выполнении второй задачи исследования на основе анализа литературы были выбраны три группы критериев ОТ [Ejdys et al., 2016; Ejdys, 2015]: (1) инновационность, (2) конкурентоспособность и (3) удобство эксплуатации. Эти критерии были представлены в форме 22 вопросов по каждому из них: три — по инновационности технологий (I1–I3), семь — по их конкурентоспособности (C1–C7) и десять — по удобству

применения (U1–U10). Список критериев ОТ дорожного покрытия приведен в табл. 6. Отбор этих технологий ранее не выполнялся, т. е. речь идет о первом (пилотном) исследовании такого рода в Польше. Важная его цель состояла в формировании объективного рейтинга технологий дорожного покрытия, в котором положение каждой технологии определялось бы исключительно ее характеристиками относительно указанных критериев. С этим связано требование не обсуждать выбор критериев ОТ с лицами, принимающими решения. В свою очередь весовые коэффициенты критериев не должны устанавливаться на основе экспертных оценок (в том числе от принимающих решения лиц). С помощью метода энтропии были рассчитаны веса анализируемых критериев оценки альтернативных вариантов на основе расхождения их значений [Lotfi, Fallahnejad, 2010; Kasprzak, 2017].

Далее эксперты оценили технологии по пятибалльной шкале Лайкерта, где 1 — минимальная оценка, 5 — максимальная. Каждый оценивал одну технологию в рамках своего круга компетенций и опыта работы с технологиями дорожного покрытия в Польше. К экс-

Табл. 6. Критерии ОТ

| Аббревиатура                 | Критерии  |
|------------------------------|---|
| TRL                          | Уровни готовности технологий  |
| S                            | Анализ жизненного цикла на основе S-образной кривой   |
| <b>Инновационность</b>       |   |
| I1                           | Каков уровень инновационности технологии?   |
| I2                           | Является ли технология оригинальной в контексте современного уровня знаний?   |
| I3                           | Является ли технология более совершенной, чем имеющиеся альтернативы?   |
| <b>Конкурентоспособность</b> |   |
| C1                           | Угрожают ли существующие решения рыночным позициям технологии?  |
| C2                           | Как распространение технологии повлияет на существующие альтернативные решения?   |
| C3                           | Сопоставимы ли возможности, которые открывает технология, с существующими альтернативами с точки зрения пользователей дорог?  |
| C4                           | Важен ли дополнительный комфорт, который создает технология по сравнению с альтернативами, для пользователей дорог?   |
| C5                           | Сколько альтернатив, похожих на данную технологию, имеется на польском рынке?   |
| C6                           | Насколько популярны существующие альтернативы технологии?   |
| C7                           | Существуют ли рыночные барьеры для потенциальных конкурентов?   |
| <b>Удобство пользования</b>  |   |
| U1                           | Можно ли измерить ценность технологии для пользователей?  |
| U2                           | Получат ли потенциальные пользователи технологии дополнительные выгоды, которых не дают альтернативы?   |
| U3                           | Обеспечивает ли технология или продукты, изготовленные с ее помощью, большее удобство пользования по сравнению с альтернативами?  |
| U4                           | Соответствует ли технология или продукты, изготовленные с ее помощью, формальным требованиям, действующим в Польше и ЕС?  |
| U5                           | Может ли спрос на технологию или продукты, изготовленные с ее помощью, объясняться сиюминутной модой?   |
| U6                           | Способствуют ли недавние перемены повышению привлекательности технологии или продуктов, изготовленных с ее помощью, в глазах пользователей (например, новые законы, тенденции спроса, технологические стандарты)? |
| U7                           | Как скоро технология или продукты, изготовленные с ее помощью, могут устареть?  |
| U8                           | Решает ли технология технические проблемы, которые потенциальные клиенты считают важными?   |
| U9                           | Важны ли для потенциальных клиентов технические преимущества, которые дает технология?  |
| U10                          | Считают ли потенциальные клиенты важными возможные проблемы, связанные с использованием технологии?   |

Источник: составлено автором.

Табл. 7. Матрица решений

|    | TRL | S  | I1 | I2 | I3 | K1 | K2 | K3 | K4 | K5 | K6  |
|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| T1 | 8   | 2  | 4  | 4  | 4  | 1  | 3  | 4  | 4  | 2  | 1   |
| T2 | 8   | 2  | 4  | 1  | 4  | 3  | 3  | 4  | 4  | 3  | 1   |
| T3 | 7   | 1  | 5  | 3  | 4  | 5  | 4  | 5  | 5  | 5  | 5   |
| T4 | 9   | 3  | 1  | 1  | 1  | 1  | 3  | 3  | 1  | 2  | 1   |
| T5 | 9   | 2  | 4  | 3  | 3  | 3  | 2  | 4  | 3  | 3  | 4   |
|    | K7  | U1 | U2 | U3 | U4 | U5 | U6 | U7 | U8 | U9 | U10 |
| T1 | 3   | 5  | 5  | 3  | 4  | 4  | 4  | 5  | 4  | 4  | 3   |
| T2 | 4   | 3  | 3  | 4  | 4  | 4  | 4  | 5  | 4  | 4  | 1   |
| T3 | 3   | 5  | 5  | 4  | 5  | 4  | 4  | 5  | 5  | 5  | 4   |
| T4 | 4   | 3  | 2  | 1  | 5  | 2  | 3  | 5  | 3  | 3  | 2   |
| T5 | 5   | 4  | 1  | 1  | 5  | 5  | 1  | 5  | 4  | 4  | 4   |

Источник: составлено автором.

пертизе были привлечены сотрудники Варшавского технологического университета (Warsaw University of Technology), специализирующиеся по направлению «Технологии материалов и дорожных покрытий» (Materials and Road Surfaces Technology). Затем в ходе реализации четвертой задачи исследования соответствующие технологии были ранжированы с помощью метода TOPSIS.

### Результаты

Ранжирование технологий по методу TOPSIS [Hwang, Yoon, 1981] состояло из семи последовательных шагов.

Шаг 1. Формирование набора из 24 критериев:

$$\{C_j, j = 1, \dots, n\} \quad (1)$$

Первым критерием стал TRL, затем — стадия жизненного цикла технологии, три критерия ее инновационности, семь — конкурентоспособности и десять — удобства пользования. Значение TRL могло варьировать в интервале 1–9, стадии жизненного цикла технологии — от 1 до 4, остальные критерии — от 1 до 5.

Шаг 2. Построение матрицы решений на основе экспертных ОТ с применением указанных критериев (табл. 7):

$$X = (x_{ij}), \quad (2)$$

где  $x_{ij} \in R$

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}, i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (3)$$

Из табл. 7 видно, что для технологии T1 значение TRL равно 8, и она находится на второй стадии жизненного цикла. Значение критерия I1 для технологии T1 эксперты оценили на уровне 4, критерия K1 — 1, критерия U1 — 5. Для технологии T4 критерии I1 и K1 были оценены на уровне 1, а критерий U1 — на уровне 3.

Шаг 3. Построение нормализованной (векторной) матрицы решений (табл. 8):

$$R = (r_{ij}), \quad (4)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\text{где } r = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (6)$$

Шаг 4. Определение вектора весов критериев (табл. 9) по методу энтропии [Kacprzak, 2017; Rudnik, Kacprzak, 2017]:

$$E = (e_1, e_2, \dots, e_n), \quad (7)$$

где E — вектор энтропии,

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m z_{ij} \ln z_{ij}, \quad (8)$$

$$z_{ij} \ln z_{ij} = 0, \text{ где } z_{ij} = 0, \quad (9)$$

и вектор весов критериев:

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_n), \quad (10)$$

$$w_j \in [0, 1], \sum_{j=1}^n w_j = 1, \quad (11)$$

где  $w_j$  — вес критерия.

Если все критерии были одинаково действительны, веса рассчитывались по формуле:

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (12)$$

Табл. 8. Нормализованная матрица решений

|    | TRL   | S     | I1    | I2    | I3    | K1    | K2    | K3    | K4    | K5    | K6    |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| T1 | 0.435 | 0.426 | 0.465 | 0.667 | 0.525 | 0.149 | 0.438 | 0.442 | 0.489 | 0.280 | 0.151 |
| T2 | 0.435 | 0.426 | 0.465 | 0.167 | 0.525 | 0.447 | 0.438 | 0.442 | 0.489 | 0.420 | 0.151 |
| T3 | 0.380 | 0.213 | 0.581 | 0.500 | 0.525 | 0.745 | 0.583 | 0.552 | 0.611 | 0.700 | 0.754 |
| T4 | 0.489 | 0.640 | 0.116 | 0.167 | 0.131 | 0.149 | 0.438 | 0.331 | 0.122 | 0.280 | 0.151 |
| T5 | 0.489 | 0.426 | 0.465 | 0.500 | 0.394 | 0.447 | 0.292 | 0.442 | 0.367 | 0.420 | 0.603 |
|    | K7    | U1    | U2    | U3    | U4    | U5    | U6    | U7    | U8    | U9    | U10   |
| T1 | 0.346 | 0.546 | 0.625 | 0.457 | 0.387 | 0.456 | 0.525 | 0.447 | 0.442 | 0.442 | 0.442 |
| T2 | 0.462 | 0.327 | 0.375 | 0.610 | 0.387 | 0.456 | 0.525 | 0.447 | 0.442 | 0.442 | 0.147 |
| T3 | 0.346 | 0.546 | 0.625 | 0.610 | 0.483 | 0.456 | 0.525 | 0.447 | 0.552 | 0.552 | 0.590 |
| T4 | 0.462 | 0.327 | 0.250 | 0.152 | 0.483 | 0.228 | 0.394 | 0.447 | 0.331 | 0.331 | 0.295 |
| T5 | 0.577 | 0.436 | 0.125 | 0.152 | 0.483 | 0.570 | 0.131 | 0.447 | 0.442 | 0.442 | 0.590 |

Источник: составлено автором.



Табл. 9. Веса критериев оценки

|   | TRL   | S     | I1    | I2    | I3    | K1    | K2    | K3    | K4    | K5    | K6    |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| e | 0.997 | 0.967 | 0.944 | 0.916 | 0.949 | 0.894 | 0.986 | 0.992 | 0.940 | 0.961 | 0.840 |
| d | 0.003 | 0.033 | 0.056 | 0.084 | 0.051 | 0.106 | 0.014 | 0.008 | 0.060 | 0.039 | 0.160 |
| w | 0.003 | 0.033 | 0.058 | 0.087 | 0.053 | 0.109 | 0.014 | 0.008 | 0.061 | 0.040 | 0.164 |
|   | K7    | U1    | U2    | U3    | U4    | U5    | U6    | U7    | U8    | U9    | U10   |
| e | 0.988 | 0.984 | 0.916 | 0.906 | 0.996 | 0.977 | 0.949 | 1.000 | 0.992 | 0.992 | 0.940 |
| d | 0.012 | 0.016 | 0.084 | 0.094 | 0.004 | 0.023 | 0.051 | 0.000 | 0.008 | 0.008 | 0.060 |
| w | 0.012 | 0.016 | 0.087 | 0.097 | 0.004 | 0.024 | 0.053 | 0.000 | 0.008 | 0.008 | 0.062 |

Источник: составлено автором.

$$d_j = 1 - e_j \quad (13)$$

Для определения энтропии матрицу решений следовало нормализовать:

$$Z = (z_{ij}), \quad (14)$$

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & \dots & z_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{m1} & \dots & z_{mn} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

где

$$z = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (16)$$

Все весовые коэффициенты представлены в табл. 9.

Наиболее важными критериями, согласно табл. 9, оказываются K6 (w=0.164), K1 (w=0.109) и U3 (w=0.097), наименее важными — U7 (w=0.000), TRL (w=0.003) и U4 (w=0.004).

На основе полученных весовых коэффициентов была построена нормализованная матрица решений (табл. 10):

$$V = (v_{ij}), \quad (17)$$

где

$$v_{ij} = r_{ij} w_j \quad (18)$$

Шаг 5. Определение идеального решения  $A^+$  и наихудшего решения  $A^-$  [Kacprzak, 2019]:

$$A^+ = [v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+] = [\max v_{i1} \max v_{i2} \dots \max v_{in}] \quad (19)$$

$$A^- = [v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-] = [\min v_{i1} \min v_{i2} \dots \min v_{in}] \quad (20)$$

После выбора меры близости для каждой альтернативы были рассчитаны значения условной, интуитивной близости к идеальному ( $A^+$ ) и наихудшему ( $A^-$ ) решениям. В статье использовано нормализованное евклидово расстояние:

$$s_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_i^+ - v_{ij}^+)^2}, \quad (21)$$

$$s_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_i^- - v_{ij}^-)^2}, \quad (22)$$

Шаг 6. Расчет коэффициента относительной близости. Применительно к близости альтернативы  $A_i$  к идеальному решению  $A^+$  коэффициент был определен следующим образом:

$$C_i = \frac{s_j^-}{s_j^+ + s_j^-}, \quad (23)$$

где  $0 \leq C_i \leq 1$ .

$C_i$  — показатель эффективности альтернативных вариантов, на основе которого формируется рейтинг альтернатив и определяется наилучшая из них.

Шаг 7. Ранжирование альтернатив в порядке убывания значения  $C_i$  [Boran et al., 2009; Yuc, 2014].

Наиболее предпочтительным продуктом среди оцениваемых альтернатив в конечном счете оказалась «вечная мостовая» (T3), ее ближайшим конкурентом стало покрытие с эластомерными связующими веществами (T5), на третьем месте — покрытие с резино-асфальтовым связующим веществом (T1), за ним — покрытие из пористой асфальтовой смеси (T2) и на последнем месте — традиционный цементобетон (T4) (табл. 11).

Табл. 10. Взвешенная нормализованная матрица решений

|    | TRL   | S     | I1    | I2    | I3    | K1    | K2    | K3    | K4    | K5    | K6    |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| T1 | 0.001 | 0.014 | 0.027 | 0.058 | 0.028 | 0.016 | 0.006 | 0.004 | 0.030 | 0.011 | 0.001 |
| T2 | 0.001 | 0.014 | 0.027 | 0.014 | 0.028 | 0.049 | 0.006 | 0.004 | 0.030 | 0.017 | 0.001 |
| T3 | 0.001 | 0.007 | 0.034 | 0.043 | 0.028 | 0.081 | 0.008 | 0.004 | 0.037 | 0.028 | 0.001 |
| T4 | 0.001 | 0.021 | 0.007 | 0.014 | 0.007 | 0.016 | 0.006 | 0.003 | 0.007 | 0.011 | 0.001 |
| T5 | 0.001 | 0.014 | 0.027 | 0.043 | 0.021 | 0.049 | 0.004 | 0.004 | 0.022 | 0.017 | 0.001 |
|    | K7    | U1    | U2    | U3    | U4    | U5    | U6    | U7    | U8    | U9    | U10   |
| T1 | 0.025 | 0.004 | 0.009 | 0.054 | 0.044 | 0.001 | 0.011 | 0.028 | 0.000 | 0.004 | 0.004 |
| T2 | 0.025 | 0.006 | 0.005 | 0.032 | 0.059 | 0.001 | 0.011 | 0.028 | 0.000 | 0.004 | 0.004 |
| T3 | 0.124 | 0.004 | 0.009 | 0.054 | 0.059 | 0.002 | 0.011 | 0.028 | 0.000 | 0.004 | 0.004 |
| T4 | 0.025 | 0.006 | 0.005 | 0.022 | 0.015 | 0.002 | 0.005 | 0.021 | 0.000 | 0.003 | 0.003 |
| T5 | 0.099 | 0.007 | 0.007 | 0.011 | 0.015 | 0.002 | 0.013 | 0.007 | 0.000 | 0.004 | 0.004 |

Источник: составлено автором.

**Табл. 11. Относительная близость к идеальному решению и рейтинг альтернативных вариантов**

| Технология дорожного покрытия | $s_j^+$     | $s_j^-$     | $C_i$          | Рейтинг  |
|-------------------------------|-------------|-------------|----------------|----------|
| T1                            | 0.121653105 | 0.082644528 | <b>0.40453</b> | <b>3</b> |
| T2                            | 0.119536825 | 0.073261956 | <b>0.37999</b> | <b>4</b> |
| T3                            | 0.020692762 | 0.149284031 | <b>0.87826</b> | <b>1</b> |
| T4                            | 0.147440469 | 0.024541157 | <b>0.14270</b> | <b>5</b> |
| T5                            | 0.081536767 | 0.095672852 | <b>0.53989</b> | <b>2</b> |

*Источник: составлено автором.*

### Заключение

В статье описано применение метода TOPSIS для ОТ дорожного покрытия и выбора наилучшей из нескольких альтернатив: покрытие с резино-асфальтовым связующим веществом (Т1), из пористой асфальтовой смеси (Т2), «вечная мостовая» (Т3), традиционный цементобетон (Т4) и покрытие с эластомерными связующими веществами (Т5). Анализ литературы позволил определить уровень зрелости и эффективность этих техноло-

гий, а затем — критерии отбора технологий для оценки их инновационности, конкурентоспособности и удобства пользования, общее число которых составило 22. В результате экспертного ранжирования лучшей оказалась технология «вечной мостовой» (Т3), худшей — традиционный цементобетон (Т4).

В ходе исследования были получены ответы на следующие вопросы: как использовать метод TOPSIS для ОТ дорожного покрытия?; какие критерии должны при этом применяться?; какие результаты ОТ были получены с использованием различных критериев?

Описанный метод принятия решений представляется применимым к анализу и более сложных ситуаций. В ходе дальнейшей работы при отборе критериев для формирования рейтинга будут учитываться мнения лиц, принимающих решения, сам набор критериев и методов исследования будет расширен, а в выборку будут включены другие европейские государства, что позволит провести межстрановые сравнения соответствующих рейтингов технологий дорожного покрытия.

*Исследование выполнено в рамках проекта S/WZ/1/2017 при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Польши (Polish Ministry of Science and Higher Education).*

### Библиография

Aloini D., Dulmin R., Mininno V., Pellegrini L., Farina G. (2018) Technology assessment with IF-TOPSIS: An application in the advanced underwater system sector // *Technological Forecasting and Social Change*. Vol. 131. P. 38–48. DOI: 10.1016/j.techfore.2017.07.010.

Anand M.B., Vinodh S. (2018) Application of fuzzy AHP — TOPSIS for ranking additive manufacturing processes for microfabrication // *Rapid Prototyping Journal*. Vol. 24. № 2. P. 424–435. DOI: 10.1108/RPJ-10-2016-0160.

Ansari R., Soltanzadeh J., Tavassoli A. (2016) Technology selection between technology management and decision making: A case study from the Iranian automotive industry // *International Journal of Automotive Technology and Management*. Vol. 16. № 4. P. 365–388. DOI: 10.1504/IJATM.2016.081618.

Arora S.K., Foley R.W., Youtie J., Shapira P., Wiek A. (2014) Drivers of technology adoption: The case of nanomaterials in building construction // *Technological Forecasting and Social Change*. Vol. 87. P. 232–244. DOI: 10.1016/j.techfore.2013.12.017.

Boran F.E., Genç S., Kurt M., Akay D. (2009) A multi-criteria intuitionistic fuzzy group decision making for supplier selection with TOPSIS method // *Expert Systems with Applications*. Vol. 36. № 8. P. 11363–11368.

Büyüközkan G., Güler M. (2017) A hesitant fuzzy based TOPSIS approach for smart glass evaluation // *Proceedings of: EUSFLAT-2017 — The 10th Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology, September 11–15, 2017, Warsaw, Poland / Eds. J. Kacprzyk, E. Szmidt, S. Zadrozny, K. Atanassov, M. Krawczak. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer. P. 330–341. DOI: 10.1007/978-3-319-66830-7\_30.*

Carlsen H., Dreborg K.H., Godman-Hansson S.O., Johansson L., Wikman-Svahn P. (2010) Assessing socially disruptive technological change // *Technology in Society*. Vol. 32. P. 209–218. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2010.07.002>, дата обращения 14.03.2019.

Chodakowska E., Nazarko J. (2017) Environmental DEA method for assessing productivity of European countries // *Technological and Economic Development of Economy*. Vol. 23. № 4. P. 589–607. DOI: 10.3846/20294913.2016.1272069.

Coates J.F. (1998) Technology assessment as guidance to governmental management of new technologies in developing countries // *Technological Forecasting and Social Change*. Vol. 58. № 1–2. P. 35–46. DOI: 10.1016/S0040-1625(97)00087-5.

Daim T.U., Yoon B.S., Lindenberg J., Grizzi R., Estep J., Oliver T. (2018) Strategic roadmapping of robotics technologies for the power industry: A multicriteria technology assessment. *Technological Forecasting and Social Change*. Vol. 131. P. 49–66. DOI: 10.1016/j.techfore.2017.06.006.

Ejdys J. (2015) Innovativeness of residential care services in Poland in the context of strategic orientation // *Procedia — Social and Behavioral Sciences*. Vol. 213. P. 746–752. DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.11.461.

Ejdys J., Matuszak-Flejszman A., Szymanski M., Ustinovicus L., Shevchenko G., Lulewicz-Sas A. (2016) Crucial factors for Improving the ISO14001 Environmental Management System // *Journal of Business Economics and Management*. Vol. 17. № 1. P. 52–73. DOI: 10.3846/16111699.2015.1065905.

Elahi M., Alvandi M., Valehzagharad H.K., Memarzade M. (2011) Selecting the best ABS sensor technology using fuzzy MADM // *Scientific Research and Essays*. Vol. 6. № 31. P. 6487–6498. DOI: 10.5897/SRE11.1079.

Fu J., Xie L., Qu M., Liang G., Ma X., Tang J., Zhang R., Bai Y. (2012) The application of entropy weight TOPSIS method to the optimization of wastewater treatment technology in livestock and poultry slaughtered plant // *Shenyang Jianzhu Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban) / Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*. Vol. 28. № 5. P. 909–914.

Gajdoš O., Juříčková I., Otawova R. (2015) Health technology assessment models utilized in the chronic care management // *Proceedings of the Third International Conference, IWBBIO 2015, Granada, Spain, April 15–17, 2015 / Eds. F. Ortuño, I. Rojas. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer. P. 54–65.*

- Gladysz B., Nalepa K., Santarek K. (2017) Justification of RFID implementation. A case study of white goods manufacturer // *Management and Production Engineering Review*. Vol. 8. № 4. P. 91–104. DOI: 10.1515/MPER-2017-0040.
- Govind Kharat M., Murthy S., Jaisingh Kamble S., Raut R.D., Kamble S.S. (2018) Fuzzy multi-criteria decision analysis for environmentally conscious solid waste treatment and disposal technology selection // *Technology in Society*. Vol. 57. P. 20–29. DOI: 10.1016/j.techsoc.2018.12.005.
- Goulet D. (1994) Participatory Technology-Assessment — Institutions and Methods // *Technological Forecasting and Social Change*. Vol. 45. № 1. P. 47–61. DOI: 10.1016/0040-1625(94)90062-0.
- Grimaldi M., Cricelli L., Di Giovanni M., Rogo F. (2015) The patent portfolio value analysis: A new framework to leverage patent information for strategic technology planning // *Technological Forecasting and Social Change*. Vol. 94. P. 286–302. DOI: 10.1016/j.techfore.2014.10.013.
- Habbal A., Goudar S.I., Hassan S. (2019) A context-aware radio access technology selection mechanism in 5G mobile network for smart city applications // *Journal of Network and Computer Applications*. Vol. 135. P. 97–107. DOI: 10.1016/j.jnca.2019.02.019.
- Habbal A., Goudar S.I., Hassan S. (2017) Context-aware radio access technology selection in 5G ultra dense networks // *IEEE Access*. Vol. 5. P. 6636–6648. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2689725.
- Halicka K. (2017) Main Concepts of Technology Analysis in the Light of the Literature on the Subject // *Procedia Engineering*. Vol. 182. P. 291–298.
- Halicka K. (2018) The reference methodology of prospective analysis of technology in production engineering // 8th International Conference on Engineering, Project, and Product Management (EPPM 2017) Proceedings / Ed. S. Şahin. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer. P. 99–107. DOI: 10.1007/978-3-319-74123-9\_11.
- Hirushie K., Kasun H., Rehan S. (2017) Renewable energy technology selection for community energy systems: A case study for British Columbia. Paper presented at the 2017 CSCE Annual General Conference, Vancouver, BC, Canada. Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/326211412\\_Renewable\\_energy\\_technology\\_selection\\_for\\_community\\_energy\\_systems\\_A\\_case\\_study\\_for\\_British\\_Columbia](https://www.researchgate.net/publication/326211412_Renewable_energy_technology_selection_for_community_energy_systems_A_case_study_for_British_Columbia), дата обращения 26.04.2019.
- Hwang C.L., Yoon K. (1981) *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Berlin: Springer-Verlag.
- Jiří M. (2018) The robustness of TOPSIS results using sensitivity analysis based on weight tuning // *IFMBE Proceedings*. Vol. 68. № 2. P. 83–86. DOI: 10.1007/978-981-10-9038-7\_15.
- Kacprzak D. (2017) Objective Weights Based on Ordered Fuzzy Numbers for Fuzzy Multiple Criteria Decision Making Methods // *Entropy*. Vol. 19. № 373. DOI: 10.3390/e19070373. Режим доступа: <https://pdfs.semanticscholar.org/9ff9/552d78357f946c5fd35b4822d5c6be693cas.pdf>, дата обращения 12.04.2019.
- Kacprzak D. (2019) A doubly extended TOPSIS method for group decision making based on ordered fuzzy numbers // *Expert Systems with Applications*. Vol. 116. P. 243–254. DOI: 10.1016/j.eswa.2018.09.023.
- Kalbar P.P., Karmakar S., Asolekar S.R. (2012) Selection of an appropriate wastewater treatment technology: A scenario-based multiple-attribute decision-making approach // *Journal of Environmental Management*. Vol. 113. P. 158–169. DOI: 10.1016/j.jenvman.2012.08.025.
- Karatas M., Sulukan E., Karacan I. (2018) Assessment of Turkey's energy management performance via a hybrid multi-criteria decision-making methodology // *Energy*. Vol. 153. P. 890–912. DOI: 10.1016/j.energy.2018.04.051.
- Kikolski M., Chien-Ho Ko (2018) Facility layout design — review of current research directions // *Engineering Management in Production and Services*. Vol. 10. № 3. P. 70–79. DOI: 10.2478/emj-2018-0018.
- Lee Y., James Chou C. (2016) Technology evaluation and selection of 3DIC integration using a three-stage fuzzy MCDM // *Sustainability (Switzerland)*. Vol. 8. № 2. P. 1–15. DOI: 10.3390/su8020114. Режим доступа: <https://ideas.repec.org/a/gam/jsusta/v8y2016i2p114-d62915.html>, дата обращения 23.04.2019.
- Lotfi F.H., Fallahnejad R. (2010) Imprecise Shannon's Entropy and Multi Attribute Decision Making // *Entropy*. Vol. 12. P. 53–62.
- Lu C., You J., Liu H., Li P. (2016) Health-carewaste treatment technology selection using the interval 2-tuple induced TOPSIS method // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. Vol. 13. № 6. DOI: 10.3390/ijerph13060562.
- Mobiniazadeh M., Raeissi P., Nasiripour A.A., Olyaeemanesh A., Tabibi S.J. (2016) A model for priority setting of health technology assessment: The experience of AHP-TOPSIS combination approach // *DARU, Journal of Pharmaceutical Sciences*. Vol. 24. P. 1. DOI: 10.1186/s40199-016-0148-7. Режим доступа: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4827190/>, дата обращения 11.05.2019.
- Mardania A., Jusoha A., Halicka K., Ejdays J., Magruk A., Ungku Norulkamar U.A. (2018) Determining the utility in management by using multi-criteria decision support tools: A review // *Economic Research/Ekonomika Istrazivanja*. Vol. 31. P. 1666–1716. Режим доступа: <https://doi.org/10.1080/1331677X.2018.1488600>, дата обращения 18.06.2019.
- Nazarko J., Radziszewski P., Dębkowska K., Ejdays J., Gudanowska A., Halicka K., Kilon J., Kononiuk A., Kowalski K., Król J., Nazarko Ł., Sarnowski M., Vilutiene T. (2015) Foresight Study of Road Pavement Technologies // *Procedia Engineering*. Vol. 122. P. 129–136.
- Nazarko Ł. (2017) Future-Oriented Technology Assessment // *Procedia Engineering*. Vol. 182. P. 504–509. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.03.144.
- Nermed K. (2015) Wielokryterialna metoda wektora preferencji jako narzędzie wspomagające proces decyzyjny [Multi-Criteria Preference Vector Method (PVM) as a tool supporting the decision making process] // *Przegląd Statystyczny*. Vol. 62. № 1. P. 93–115 (in Polish). Режим доступа: <http://cejsh.icm.edu.pl/cejsh/element/bwmeta1.element.desklight-0f4c6200-68b5-4c3f-b307-ad24fcb0eef4>, дата обращения 18.04.2019.
- Nouri F.A., Esbouei S.K., Antucheviciene J. (2015) A hybrid MCDM approach based on fuzzy ANP and fuzzy TOPSIS for technology selection // *Informatica (Netherlands)*. Vol. 26. № 3. P. 369–388. DOI: 10.15388/Informatica.2015.53.
- Oztaysi B. (2014) A decision model for information technology selection using AHP integrated TOPSIS-grey: The case of content management systems // *Knowledge-Based Systems*. Vol. 70. P. 44–54. DOI: 10.1016/j.knsys.2014.02.010.
- Parkan C., Wu M. (1999) Decision-making and performance measurement models with applications to robot selection // *Computers and Industrial Engineering*. Vol. 36. № 3. P. 503–523.
- Peng S., Li T., Li M., Guo Y., Shi J., Tan G.Z., Zhang H. (2019) An integrated decision model of restoring technologies selection for engine remanufacturing practice // *Journal of Cleaner Production*. Vol. 206. P. 598–610. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.09.176.
- Puthanpura A.K., Khalifa R., Chan L. (2015) Assessing emerging automotive technologies for the future // 2015 Proceedings of PICMET '15: Management of the Technology Age. P. 2113–2120. DOI: 10.1109/PICMET.2015.7273223. Режим доступа: <https://pdfs.semanticscholar.org/9fe1/3e67e3ba91d29f8c9c0a3787355bf9519ae6.pdf>, дата обращения 22.04.2019.
- Ren J. (2018) Technology selection for ballast water treatment by multi-stakeholders: A multi-attribute decision analysis approach based on the combined weights and extension theory // *Chemosphere*. Vol. 191. P. 747–760. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.10.053.

- Ren J.Z., Liang H.W., Chan F.T.S. (2017) Urban sewage sludge, sustainability, and transition for Eco-City: Multi-criteria sustainability assessment of technologies based on best-worst method // *Technological Forecasting and Social Change*. Vol. 116. P. 29–39. DOI: 10.1016/j.techfore.2016.10.070.
- Restrepo-Garcés A.R., Manotas-Duque D.F., Lozano C.A. (2017) Método Híbrido Multicriterio-ROA, para la selección de fuentes de energía renovables: Caso de estudio centros comerciales [Multicriteria hybrid method — ROA, for the choice of generation of renewable sources: Case study in shopping centers] // *Ingeniare*. Vol. 25. № 3. P. 399–414. DOI: 10.4067/S0718-33052017000300399 (in Spanish).
- Roszkowska E., Kacprzak D. (2016) The fuzzy SAW and fuzzy TOPSIS procedures based on ordered fuzzy numbers // *Information Sciences*. Vol. 369. P. 564–584.
- Rudnik K., Kacprzak D. (2017) Fuzzy TOPSIS method with ordered fuzzy numbers for flow control in a manufacturing system // *Applied Soft Computing*. Vol. 52. P. 1020–1041. DOI: 10.1016/j.asoc.2016.09.027.
- Schot J., Rip A. (1997) The past and future of constructive technology assessment // *Technological Forecasting and Social Change*. Vol. 54. № 2–3. P. 251–268. DOI: 10.1016/S0040-1625(96)00180-1.
- Streimikiene D. (2013a) Assessment of road transport technologies based on GHG emission reduction potential and costs // *Transformations in Business and Economics*. Vol. 12. № 2. P. 138–147.
- Štreimikiene D. (2013b) Assessment of energy technologies in electricity and transport sectors based on carbon intensity and costs // *Technological and Economic Development of Economy*. Vol. 19. № 4. P. 606–620. DOI: 10.3846/20294913.2013.837113.
- Streimikiene D., Baležentienė L. (2012) Assessment of electricity generation technologies based on GHG emission reduction potential and costs // *Transformations in Business and Economics*. Vol. 11. № 2A. P. 333–343.
- Streimikiene D., Baležentis T., Baležentienė L. (2013) Comparative assessment of road transport technologies // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 20. P. 611–618. DOI: 10.1016/j.rser.2012.12.021.
- Tamošiūnas A. (2018) Managing selection of wind power generation technologies // *Business: Theory and Practice*. Vol. 19. P. 309–321. DOI: 10.3846/btp.2018.31.
- Tavana M., Khalili-Damghani K., Abtahi A. (2013) A hybrid fuzzy group decision support framework for advanced-technology prioritization at NASA // *Expert Systems with Applications*. Vol. 40. № 2. P. 480–491. DOI: 10.1016/j.eswa.2012.07.040.
- Tavella E. (2016) How to make Participatory Technology Assessment in agriculture more 'participatory': The case of genetically modified plants // *Technological Forecasting and Social Change*. Vol. 103. P. 119–126. DOI: 10.1016/j.techfore.2015.10.015.
- Towhidi N., Tavakkoli-Moghaddam R., Peymandar M. (2009) Iron-making technology selection using a fuzzy hierarchical TOPSIS method // *Proceedings of the 5th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking (ICSTI) 2009*. P. 1039–1044.
- Tran T.A., Daim T. (2008) A taxonomic review of methods and tools applied in technology assessment // *Technological Forecasting and Social Change*. Vol. 75. P. 1396–1405. DOI: 10.1016/j.techfore.2008.04.004.
- van den Ende J., Mulder K., Knot M., Moors E., Vergragt P. (1998) Traditional and modern technology assessment: Toward a toolkit // *Technological Forecasting and Social Change*. Vol. 58. № 1–2. P. 5–21. DOI: 10.1016/S0040-1625(97)00052-8.
- Vavrek R., Adamisin P., Kotulic R. (2017) Multi-Criteria Evaluation of Municipalities in Slovakia — Case Study in Selected Districts // *Polish Journal of Management Studies*. Vol. 16. № 2. P. 290–301. DOI: 10.17512/pjms.2017.16.2.25.
- Velasquez M., Hester P.T. (2013) An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods // *International Journal of Operations Research*. Vol. 2. № 10. P. 56–66.
- Versteeg T., Baumann M.J., Weil M., Moniz A.B. (2017) Exploring emerging battery technology for grid-connected energy storage with Constructive Technology Assessment // *Technological Forecasting and Social Change*. Vol. 115. P. 99–110. DOI: 10.1016/j.techfore.2016.09.024.
- Vivekh P., Sudhakar M., Srinivas M., Vishwanthkumar V. (2017) Desalination technology selection using multi-criteria evaluation: TOPSIS and PROMETHEE-2 // *International Journal of Low-Carbon Technologies*. Vol. 12. № 1. P. 24–35.
- Wan S.-P., Wang F., Dong J.-Y. (2016) A novel group decision making method with intuitionistic fuzzy preference relations for RFID technology selection // *Applied Soft Computing Journal*. Vol. 38. P. 405–422. DOI: 10.1016/j.asoc.2015.09.039.
- Winebrake J.J., Creswick B.P. (2003) The future of hydrogen fueling systems for transportation: An application of perspective-based scenario analysis using the analytic hierarchy process // *Technological Forecasting and Social Change*. Vol. 70. № 4. P. 35–384. DOI: 10.1016/S0040-1625(01)00189-5.
- Zavadskas E.K., Mardani A., Turskis Z., Jusoh A., Nor K.M.D. (2016) Development of TOPSIS method to solve complicated decision-making problems: An overview on developments from 2000 to 2015 // *International Journal of Information Technology and Decision Making*. Vol. 15. № 3. P. 645–682.
- Zhang C., Chen C., Streimikiene D., Baležentis T. (2019) Intuitionistic fuzzy MULTIMOORA approach for multi-criteria assessment of the energy storage technologies // *Applied Soft Computing Journal*. Vol. 79. P. 410–423. DOI: 10.1016/j.asoc.2019.04.008.
- Zheng G., Jing Y., Huang H., Zhang X. (2011) Multihierarchical gray evaluation method to assess building energy conservation // *Journal of Energy Engineering*. Vol. 137. № 2. P. 88–98. DOI: 10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000041.
- Zimmermann M., Darkow I.L., von der Gracht H.A. (2012) Integrating Delphi and participatory backcasting in pursuit of trustworthiness — The case of electric mobility in Germany // *Technological Forecasting and Social Change*. Vol. 79. № 9. P. 1605–1621. DOI: 10.1016/j.techfore.2012.05.016.
- Yue Z. (2014) TOPSIS-based group decision-making methodology in intuitionistic fuzzy setting // *Information Sciences*. Vol. 277. P. 141–153.