

УДК 656.13.08

**АЛГОРИТМЫ РАНЖИРОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ  
МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ  
ДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

**ALGORITHMS FOR RANKING ENGINEERING MEASURES  
TO IMPROVE THE SAFETY OF ROAD INFRASTRUCTURE**

**Богданович С. В.**, канд. техн. наук, доц.  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
S. Bogdanovich, Ph.D. in Eng., Ass. Prof.,  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

*В статье рассматриваются алгоритмы ранжирования инженерных мероприятий по повышению безопасности дорожной инфраструктуры. Предлагаются подходы к определению приоритетов мероприятий на основе анализа данных об аварийности, интенсивности движения, геометрических параметров дорог и экономической эффективности. Разработанные алгоритмы учитывают множественные критерии и позволяют формировать оптимальные программы повышения безопасности.*

*The article considers algorithms for ranking engineering measures to improve the safety of road infrastructure. New approaches to prioritization of measures based on the analysis of data on accident rate, traffic intensity, geometric parameters of roads and economic efficiency are proposed. The developed algorithms take into account multiple criteria and allow to form optimal safety improvement programs.*

**Ключевые слова:** безопасность дорожного движения, дорожная инфраструктура, алгоритмы ранжирования, многокритериальный анализ, аварийно-опасные участки, экономическая эффективность.

**Keywords:** road safety, road infrastructure, ranking algorithms, multicriteria analysis, accident-prone areas, economic efficiency.

## ВВЕДЕНИЕ

Повышение безопасности дорожного движения является приоритетной задачей для большинства стран мира. Ежегодно в результате

дорожно-транспортных происшествий погибают более 1,3 млн. человек, а миллионы получают травмы различной степени тяжести. Дорожные аварии наносят колоссальный экономический ущерб, оцениваемый в триллионы долларов. Одним из ключевых факторов обеспечения безопасности является совершенствование дорожной инфраструктуры путем реализации инженерных мероприятий на аварийно-опасных участках дорог.

Инженерные мероприятия по повышению безопасности дорожной инфраструктуры включают широкий спектр работ, начиная от установки дорожных знаков и нанесения разметки и заканчивая реконструкцией пересечений, строительством развязок, устройством тротуаров и велосипедных дорожек. Выбор наиболее эффективных мероприятий и определения приоритета их реализации является сложной многокритериальной задачей, требующей применения научно-обоснованных алгоритмов ранжирования.

Традиционно для определения первоочередности реализации инженерных мероприятий используются экспертные оценки и простые показатели аварийности, такие как количество дорожно-транспортных происшествий на участке или коэффициент тяжести последствий. Однако такой подход не учитывает множество важных факторов, влияющих на безопасность движения и эффективность мероприятий. Более перспективными являются алгоритмы, основанные на комплексном анализе больших данных о дорожных условиях, интенсивности движения, аварийности и экономической эффективности мероприятий.

## АЛГОРИТМЫ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО РАНЖИРОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

Разработка эффективных алгоритмов ранжирования инженерных мероприятий по повышению безопасности дорожной инфраструктуры представляет собой сложную многокритериальную задачу. Необходимо учитывать множество факторов, влияющих на аварийность и эффективность мероприятий, таких как интенсивность движения, геометрические параметры дороги, состав транспортного потока, состояние дорожного покрытия, наличие пешеходных переходов и многие другие.

Одним из ключевых критериев ранжирования является потенциал снижения аварийности на участке в результате реализации инженерных мероприятий. Для его оценки используются модели прогнозирования аварийности, учитывающие множество факторов риска. Важно также рассматривать тяжесть последствий дорожно-транспортных происшествий, выраженную в количестве погибших и пострадавших [1].

Наряду с безопасностью, в алгоритмах ранжирования должны учитываться экономические критерии, такие как стоимость реализации мероприятий и ожидаемый экономический эффект от снижения аварийности. Для этого применяются методы оценки затрат и выгод, позволяющие рассчитывать чистую приведенную стоимость, внутреннюю норму доходности и другие показатели эффективности инвестиций.

Помимо вышеперечисленных критериев, алгоритмы ранжирования могут учитывать социальные факторы, такие как транспортная доступность для маломобильных групп населения, воздействие на окружающую среду, влияние на экономическое развитие региона и другие.

Ниже будут рассмотрены несколько перспективных алгоритмов многокритериального ранжирования инженерных мероприятий по повышению безопасности дорожной инфраструктуры.

## АЛГОРИТМ НА ОСНОВЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

Один из перспективных подходов к ранжированию инженерных мероприятий основан на методе анализа иерархий (МАИ). Данный метод предполагает декомпозицию проблемы на иерархию критериев, альтернативных решений и определение весовых коэффициентов их важности путем попарных сравнений [2].

В рамках МАИ строится иерархическая модель, на верхнем уровне которой находится главная цель – выбор наиболее эффективных инженерных мероприятий. На следующем уровне располагаются основные критерии, такие как потенциал снижения аварийности, экономическая эффективность, социальные последствия и т. д. Каждый критерий может иметь подкритерии более низкого уровня. На нижнем уровне иерархии находятся альтернативные варианты инженерных мероприятий.

После построения иерархической модели осуществляется попарное сравнение критериев и альтернатив по 9-балльной шкале относительной важности. На основе матриц попарных сравнений рассчитываются весовые коэффициенты критериев и оценки альтернатив по каждому критерию. Окончательный ранжированный список мероприятий формируется путем синтеза весовых коэффициентов и оценок альтернатив.

Преимущество МАИ заключается в возможности комплексного учета разнородных критериев – как количественных (стоимость, интенсивность движения и т. п.), так и качественных (транспортная доступность, влияние на окружающую среду). Кроме того, метод позволяет анализировать согласованность экспертных оценок.

## АЛГОРИТМ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

Другой перспективный подход к ранжированию инженерных мероприятий по повышению безопасности основан на теории нечетких множеств. Он позволяет учитывать неопределенность и неточность данных, характерные для задач, связанных с безопасностью дорожного движения.

В рамках данного подхода определяются нечеткие критерии (например, «значительное снижение аварийности», «высокая экономическая эффективность»), которым соответствуют функции принадлежности. Альтернативные варианты инженерных мероприятий оцениваются по каждому критерию с помощью степени принадлежности нечеткому множеству.

Для агрегации нечетких оценок используются методы нечеткой логики, такие как нечеткие правила вывода, взвешенное среднее и т. п. В результате для каждой альтернативы получается комплексная нечеткая оценка, на основании которой и формируется итоговое ранжирование [3–5].

Преимущество данного алгоритма состоит в возможности корректной обработки неточных, неполных и противоречивых данных, характерных для задач безопасности дорожного движения. Кроме того, применение нечетких правил позволяет формализовать экспертные знания о взаимовлиянии различных факторов на эффективность инженерных мероприятий.

## АЛГОРИТМ НА ОСНОВЕ КОГНИТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В последние годы активно развиваются алгоритмы ранжирования, основанные на методах когнитивного моделирования и искусственного интеллекта. Они позволяют анализировать сложные взаимосвязи между критериями и альтернативными вариантами инженерных мероприятий [6–15].

В рамках данного подхода строится когнитивная модель в виде ориентированного графа, вершины которого соответствуют факторам, влияющим на эффективность мероприятий (интенсивность движения, геометрические параметры дороги, состав транспортного потока и т. д.), а дуги – причинно-следственным связям между ними. Веса дуг определяются с помощью экспертных оценок, статистического анализа или методов машинного обучения.

Далее с помощью импульсного моделирования или других методов анализа когнитивных карт осуществляется расчет влияния альтернативных инженерных мероприятий на целевые факторы, такие как снижение аварийности и экономическая эффективность. На основе полученных оценок формируется ранжированный список мероприятий.

Преимущество когнитивного подхода заключается в возможности комплексного анализа множества взаимосвязанных факторов, влияющих на безопасность дорожной инфраструктуры. Он позволяет выявлять косвенные и нелинейные эффекты реализации инженерных мероприятий.

Таким образом, рассмотренные алгоритмы многокритериального ранжирования потенциально способны обеспечить повышение научной обоснованности и эффективности управленческих решений по развитию безопасной дорожной инфраструктуры. Дальнейшие исследования должны быть направлены на их апробацию, совершенствование и интеграцию с современными технологиями обработки больших данных.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение следует отметить, что разработка эффективных алгоритмов ранжирования инженерных мероприятий по повышению безопасности дорожной инфраструктуры имеет важнейшее значение для снижения аварийности на дорогах и смягчения негативных социально-экономических последствий дорожно-транспортных происшествий.

Предложенные в статье алгоритмы, основанные на методе анализа иерархий, теории нечетких множеств и когнитивном моделировании, позволяют осуществлять многокритериальную оценку и ранжирование альтернативных вариантов инженерных мероприятий с учетом широкого спектра факторов, влияющих на безопасность движения и эффективность мероприятий.

Использование данных алгоритмов дает возможность формировать научно-обоснованные программы развития дорожной инфраструктуры, обеспечивающие максимальное снижение аварийности при заданных бюджетных ограничениях. Это, в свою очередь, позволит значительно повысить эффективность инвестиций в обеспечение безопасности дорожного движения.

Перспективным направлением дальнейших исследований является интеграция рассмотренных алгоритмов с современными технологиями обработки больших данных (BigData), пространственного анализа, искусственного интеллекта. Это позволит создавать более точные модели прогнозирования аварийности и эффективности инженерных мероприятий на основе разнородной информации о дорожных условиях, транспортных потоках, климате и других факторах.

В целом, применение научно-обоснованных алгоритмов многокритериального ранжирования будет способствовать совершенствованию системы управления безопасностью дорожной инфраструктуры и достижению национальных целей по существенному сокращению смертности в результате дорожно-транспортных происшествий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Jie Yu. Prioritizing highway safety improvement projects: A multi-criteria model and case study with SafetyAnalyst : [web-site] / Yu Jie, Liu Yue. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925753511003080> (date of access: 08.05.2024).

2. Agarwal, P. K. A Methodology for Ranking Road Safety Hazardous Locations Using Analytical Hierarchy Process : [web-site] / P. K. Agarwal, P. K. Patil, R. Mehar. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042813045898> (date of access: 08.05.2024).

3. Ranking Road Sections Based on MCDM Model: New Improved Fuzzy SWARA (IMF SWARA) : [web-site] / V. Sabahudin (at al.). – URL: <https://www.mdpi.com/2075-1680/10/2/92> (date of access: 08.05.2024).

4. Капский, Д. В. К вопросу оценки безопасности примыканий на автомобильных дорогах / Д. В. Капский, С. В. Богданович, И. С. Зайцева // Транспорт и транспортные системы. Конструирование, эксплуатация, технологии : сб. научн. статей. – Минск : БНТУ, 2023. – С. 10–108.

5. Wang, H. Traffic Accidents Prediction Model Based on Fuzzy Logic : [web-site] / H. Wang, L. Zheng, X. Meng. – URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-22418-8\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-642-22418-8_14) (date of access: 08.05.2024).

6. Zhao, L. How to Promote Urban Intelligent Transportation: A Fuzzy Cognitive Map Study. Front Neurosci : [web-site] / L. Zhao, Q. Wang, B. G. Hwang. – URL: <https://www.frontiersin.org/journals/neuroscience/articles/10.3389/fnins.2022.919914/pdf> (date of access: 08.05.2024).

7. Капский, Д. В. Повышение качества дорожного движения в очагах аварийности / Д. В. Капский // Наука и техника. – 2015. – № 3. – С. 36–43. – EDN VBQRIL.

8. Капский, Д. В. Методология повышения безопасности движения в городских очагах аварийности: принципы и способы / Д. В. Капский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 3, № 3(57). – С. 59–65. – EDN XRJLEF.

9. Капский, Д. В. Аварийность в дорожном движении. Исследование дорожно-транспортных происшествий с помощью страховой статистики / Д. В. Капский // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2011. – № 1. – С. 48–54.

10. Kapskij, D. Development of the system of road traffic safety improvement in accident seats of urban areas / D. Kapskij // Transport and Telecommunication. – 2009. – Vol. 10, No. 1. – P. 30–37.

11. Капский, Д. В. Организация дорожного движения / Д. В. Капский // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. – 2013. – № 1. – С. 436–440. – EDN RHJBMX.

12. Капский, Д. В. Методика оперативной оценки эффективности мероприятий по повышению безопасности движения / Д. В. Капский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В.

Промышленность. Прикладные науки. – 2011. – № 11. – С. 17–24. – EDN RUUBXU.

13. Влияние планировочных, организационных характеристик и регулирования на безопасность движения пешеходов / Г. М. Кухаренок [и др.] // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2011. – № 2. – С. 46-50. – EDN XIKGOD.

14. Капский, Д. В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении : монография / Д. В. Капский. – Минск : Белорусский национальный технический университет, 2008. – 243 с. – EDN VRTZHK.

15. Врубель, Ю. А. Определение потерь в дорожном движении / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский, Е. Н. Кот. – Минск : Белорусский национальный технический университет, 2006. – 239 с. – EDN SPGLSP.

Представлено 08.05.2024