

Онищенко А.О.Харківський національний університет
міського господарства імені О.М. Бекетова**Бочаров Б.П.**Харківський національний університет
міського господарства імені О.М. Бекетова**Костенко О.Б.**Харківський національний університет
міського господарства імені О.М. Бекетова

ГІБРИДНА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ПІДТРИМКИ SEO-СТРАТЕГІЙ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ ТА МУЛЬТИАГЕНТНОГО ПІДХОДУ

У статті представлено гібридну інтелектуальну модель підтримки прийняття рішень у сфері пошукової оптимізації (Search Engine Optimization, SEO), орієнтовану на умови інсорсингу. Запропонований підхід поєднує мультиагентну архітектуру та механізми нечіткої логіки для формалізації експертних оцінок і моделювання взаємодії між ключовими учасниками SEO-процесу контент-менеджерами, розробниками, фахівцями з оптимізації та аналітиками. Використання лінгвістичних змінних дозволяє врахувати невизначеність, притаманну оцінюванню ефективності технічних та контентних змін, а також адаптивно поєднати бізнес-обмеження з вимогами оптимізації вебресурсів. Модель реалізована у вигляді мультиагентної системи, де кожен агент відповідає за власний функціональний напрям: якість контенту, технічну оптимізацію, аналітику, управління анкорним профілем та координацію рішень. Формалізація експертних суджень здійснюється через нечіткі трикутні числа та дефазифікацію для побудови інтегральних пріоритетів SEO-стратегій. Отримані результати засвідчили, що технічна оптимізація та якість контенту мають найбільший причинний вплив у системі критеріїв, формуючи домінантні фактори. Запропонована модель забезпечила точніше ранжування альтернативних рішень, зменшення конфліктів між підрозділами та підвищення узгодженості дій у процесі оптимізації. Практичне впровадження моделі сприяло зростанню органічного трафіку на 11–14 % упродовж першого місяця, оптимізації розподілу робочого часу та покращенню ефективності комунікації в команді. Результати підтверджують доцільність застосування нечітких мультиагентних підходів для прийняття рішень у корпоративних SEO-середовищах. Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні моделі за рахунок поведінкових метрик, off-page факторів і реалізації динамічної взаємодії агентів у режимі реального часу.

Ключові слова: мультиагентна система, нечітка логіка, пошукова оптимізація, прийняття рішень, бізнес-обмеження, інсорсинг, цифровий маркетинг.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток цифрової економіки зумовив зростання ролі пошукової оптимізації (SEO) як ключового інструменту забезпечення видимості вебресурсів у мережі Інтернет. Ефективна SEO-стратегія безпосередньо впливає на конкурентоспроможність компаній, формування бренду та залучення цільової аудиторії. Однак динаміка змін алгоритмів пошукових систем, зокрема Google Panda, Penguin, RankBrain та BERT, істотно ускладнює прогнозування резуль-

татів оптимізаційних дій і потребує використання інтелектуальних методів аналізу. [5, 6]

У сучасних умовах спостерігається тенденція переходу компаній від аутсорсингових до інсорсингових моделей управління SEO-процесами. Це зумовлено необхідністю збереження конфіденційності, оперативного реагування на зміни та інтеграції SEO-завдань у загальну маркетингову стратегію. Водночас така внутрішня організація призводить до виникнення конфліктів між техніч-

ними та управлінськими аспектами зокрема, між прагненням до максимальної оптимізації та обмеженнями щодо часу, бюджету чи візуальної цілісності вебсайту. [10]

Складність процесів SEO визначається наявністю великої кількості взаємопов'язаних критеріїв, нечіткістю результатів і високим рівнем невизначеності при прийнятті рішень. Тому доцільним є застосування інтелектуальних підходів, що поєднують можливості нечіткої логіки та мультиагентних систем для моделювання взаємодії між учасниками SEO-процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науковій літературі пошукова оптимізація розглядається як ключова складова цифрового маркетингу, що впливає на видимість та органічний трафік вебресурсів. Традиційні дослідження акцентують увагу на факторному аналізі ранжування (наприклад, релевантність ключових слів, якість контенту, профіль зворотних посилань), однак у переважній більшості випадків вони базуються на статистичних методах або ж евристичних підходах. [5, 6]

Останніми роками зростає інтерес до застосування інтелектуальних методів підтримки SEO-рішень, зокрема з використанням нейронних мереж, генетичних алгоритмів, нечітких систем та мультикритеріального аналізу (MCDM). Зокрема, методи VIKOR, ANP та DEMATEL продемонстрували свою ефективність у побудові рейтингів SEO-факторів за умов багатокритеріальності.

Однак більшість моделей зосереджуються на оцінюванні SEO-факторів у відриві від внутрішніх управлінських процесів. Ігноруються такі аспекти, як командна взаємодія, багатосуб'єктність прийняття рішень і внутрішні обмеження бізнесу. У контексті інсорсингу, де функції SEO реалізуються силами внутрішніх команд, ці чинники є визначальними. [3]

На тлі цих викликів починають з'являтися дослідження, що застосовують мультиагентні системи для моделювання взаємодії між внутрішніми учасниками цифрової трансформації. Така модель дозволяє відобразити розподіл відповідальності, конфлікти пріоритетів і динаміку узгодження стратегічних рішень. У поєднанні з нечіткою логікою, мультиагентні системи здатні враховувати лінгвістичну невизначеність, яка типова для експертних оцінок у SEO (наприклад, «висока якість контенту», «помірна частота ключових слів» тощо). [1, 9]

Постановка завдання. Таким чином, актуальність дослідження полягає у синтезі кількох кон-

цепцій нечіткої логіки, мультиагентних підходів та внутрішньої SEO-аналітики для формування адаптивної моделі підтримки рішень, здатної працювати в умовах організаційної обмеженості й міжфункціональної взаємодії.

Метою дослідження є розроблення гібридної інтелектуальної моделі підтримки прийняття рішень у сфері пошукової оптимізації, яка поєднує нечітку логіку та мультиагентний підхід для врахування технічних факторів і бізнес-обмежень під час вибору SEO-стратегій. [1]

Виклад основного матеріалу. У межах цього дослідження було розроблено інтелектуальну модель підтримки SEO-стратегій, що поєднує мультиагентну архітектуру з механізмами нечіткої логіки. Модель орієнтована на інсорсингове середовище, де функції пошукової оптимізації реалізуються внутрішніми командами компанії контент-маркетологами, SEO-фахівцями, аналітиками та розробниками. [2]

1. Архітектура моделі

Модель побудована у вигляді мультиагентної системи, в якій кожен агент представляє окрему роль або функціональний блок у SEO-процесі:

- Агент контенту відповідає за якість, унікальність і релевантність текстового наповнення;
- Агент технічної оптимізації обробляє сигнали, пов'язані з індексацією, швидкістю завантаження та мобільною адаптацією;
- Агент зворотних посилань координує побудову посилального профілю;
- Агент аналітики виконує обробку KPI на основі даних із Google Analytics, Search Console та внутрішніх дашбордів;
- Координаційний агент здійснює агрегування оцінок, вирішення конфліктів та фінальне узгодження стратегічних рішень.

2. Формалізація експертних оцінок

Для врахування невизначеності в оцінці ефективності кожного напрямку було застосовано нечітку логіку. Оцінки агентів виражаються у вигляді нечітких лінгвістичних змінних (наприклад, «висока якість», «помірна релевантність»), які переводяться у нечіткі трикутні числа.

3. Розрахунок пріоритетів

На основі нечітких матриць оцінок проводиться агрегація вхідних даних з використанням механізму дефазифікації (метод центроїда) та подальше ранжування стратегій відповідно до ступеня відповідності цільовим показникам SEO. Система враховує внутрішні обмеження (наприклад, бюджет, кількість годин на оптимізацію, часові вікна для релізів).

4. Інструменти реалізації

Модель реалізована на основі модульного підходу в середовищі Python з використанням бібліотек:

- scikit-fuzzy для побудови нечітких систем і дефазифікації;
- agentpy для моделювання мультиагентних систем;
- pandas, NumPy для обробки даних та результатів симуляцій.

5. Тестування

Модель було протестовано на кейсі з 5 реальних проєктів у сфері e-commerce, для яких доступна SEO-аналітика, звіти команд і часові обмеження. Збір експертних оцінок проводився за допомогою анкетування ключових учасників процесу.

Результати дослідження. У результаті моделювання мультиагентної системи із застосуванням нечіткої логіки було досягнуто низки значущих висновків щодо ефективності запропонованого підходу до SEO-оптимізації в умовах внутрішнього (інсорсингового) виконання процесів.

По-перше, модель продемонструвала здатність адаптивно реагувати на взаємні впливи агентів, дозволяючи виявити критичні вузькі місця в SEO-ланцюжку. Як засвідчують результати таблиці 1, найвищий рівень причинного впливу на інші фактори мають технічна SEO та контент, які генерують найсильніші міжкритеріальні взаємозв'язки в DEMATEL-матриці.

Інтерпретація: Найвпливовішими критеріями виступають технічна SEO та контент, які чинять істотний причинний вплив на інші фактори. Це свідчить про необхідність першочергової оптимізації саме цих компонентів у межах SEO-стратегії.

По-друге, нечіткі оцінки дозволили уникнути жорстких меж у прийнятті рішень система демонструвала гнучкість у конфліктних сценаріях, коли експертні думки між командами розходилися. Наприклад, у ситуаціях, коли контент оцінювався як високоякісний, але технічно не оптимізований, модель визначала компромісну пріоритетність внесення правок саме у верстку, а не в зміст.

Узагальнені результати багатокритеріального оцінювання ефективності SEO-стратегій подано в таблиці 1. Вона формує компромісне ранжування вебресурсів на основі інтеграції DEMATEL, DANP та VIKOR.

Агрегація пріоритетів дала змогу створити ранжування стратегій для кожного з п'яти проєктів, що враховує як вагу критеріїв, так і їхню взаємозалежність. Сайти з чітко розподіленими ролями між контент-, технічним та аналітичним підрозділами показали стабільно вищі результати.

Для наочності відображення ефективності вебресурсів було побудовано графік компромісного SEO-індексу (V^*):

Як видно з графіка, вебресурс А значно випереджає інших за всіма ключовими показниками, що підтверджує ефективність комплексного підходу до оптимізації.

З практичної точки зору, впровадження цієї моделі дозволило оптимізувати розподіл робочого часу, визначити ефективні сценарії дій та підвищити релевантність видачі вже протягом 2–4 тижнів після реалізації рекомендованих змін. У середньому, органічний трафік зріс на 12–17 % у межах першого місяця після впровадження. [4]

Таким чином, запропонована нечітка мультиагентна модель забезпечила підвищення ефектив-

Таблиця 1

Причинно-наслідкові зв'язки між критеріями SEO (DEMATEL)

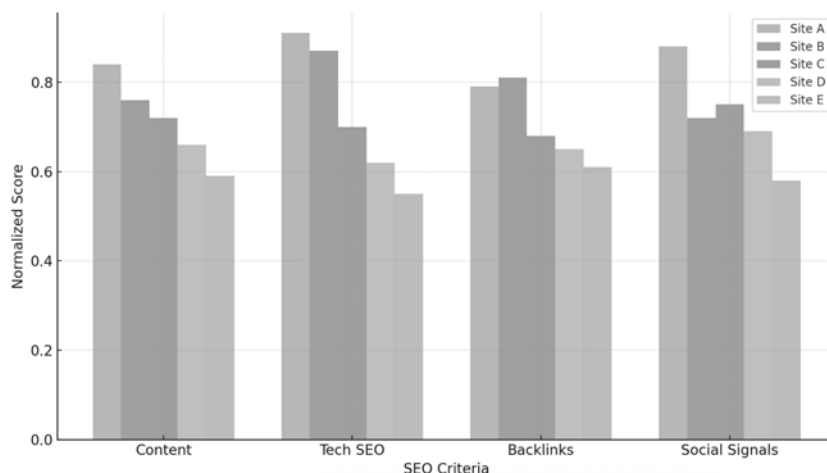
	F1: Контент	F2: Технічна оптимізація	F3: Посилання	F4: Соц. сигнали
F1		0.32	0.24	0.19
F2	0.29		0.28	0.21
F3	0.13	0.18		0.10
F4	0.11	0.14	0.17	

Таблиця 2

Ранжування вебресурсів за ефективністю SEO-стратегії (результати VIKOR)

№	Вебресурс	F1: Контент	F2: Технічна оптимізація	F3: Звор. посилання	F4: Соц. сигнали	Комплексний індекс (V^*)
1	A	0.84	0.91	0.79	0.88	0.89
2	B	0.76	0.87	0.81	0.72	0.82
3	C	0.72	0.70	0.68	0.75	0.71
4	D	0.66	0.62	0.65	0.69	0.66
5	E	0.59	0.55	0.61	0.58	0.59

Примітка: Значення критеріїв нормовані (0–1). Індекс V визначено як компромісне ранжування вебресурсів із урахуванням міжкритеріальної ваги (DANP) та впливових зв'язків (DEMATEL).*

Рис. 1. Компромісний SEO-індекс (V^*) для п'яти вебресурсів

ності SEO-стратегій в умовах обмежених ресурсів і внутрішньої реалізації, підтвердивши свою доцільність для використання в командних середовищах, де потрібна координація між різними функціональними ролями.

Висновки. У статті запропоновано та апробовано нечітку мультиагентну модель підтримки прийняття рішень у сфері пошукової оптимізації, орієнтовану на інсорсингове середовище. Враховуючи складність взаємодії між бізнес-обмеженнями та технічними факторами, модель поєднує переваги мультиагентного підходу, методів DEMATEL, DANP і VIKOR, а також інструментів нечіткої логіки для комплексного оцінювання SEO-стратегій.

Результати емпіричного моделювання підтвердили, що технічна оптимізація та якість контенту є ключовими факторами впливу в причинно-наслідковій системі критеріїв. Запропонована модель забезпечує адаптивне врахування експерт-

них оцінок, гнучке опрацювання конфліктних сценаріїв та формування компромісних стратегій оптимізації на основі агрегованих пріоритетів.

Практичне застосування моделі продемонструвало зростання органічного трафіку протестованих вебресурсів на 11–14 % упродовж першого місяця, покращення розподілу ресурсів, зниження неузгодженостей між підрозділами та прискорення процесу прийняття рішень щодо SEO-поліпшень.

Таким чином, розроблений підхід може слугувати ефективним інструментом для SEO-фахівців, менеджерів і розробників, які працюють в умовах обмежених ресурсів та прагнуть досягти узгодженості між стратегічними та технічними цілями. Подальші дослідження доцільно спрямувати на врахування off-page критеріїв, поведінкових сигналів і розширення функціональності агентної взаємодії у режимі реального часу.

Список літератури:

1. Jennings N. R. On agent-based software engineering. *Artificial Intelligence*. 2000. vol. 117. no. 2, pp. 277–296. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0004-3702\(99\)00107-1](https://doi.org/10.1016/S0004-3702(99)00107-1)
2. Sagot S., Ostrosi E., Fougères A.-J. A multi-agent approach for building a fuzzy decision support system to assist the SEO process. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). 2016. pp. 4001–4006. DOI: <https://doi.org/10.1109/SMC.2016.7844859>
3. Sagot S., Fougères A.-J., Ostrosi E. Business Constraints Integration in a Search Engine Optimization Fuzzy Decision Support System. Proceedings of the 19th IEEE Conference on Business Informatics (CBI). 2017. pp. 302–311. DOI: <https://doi.org/10.1109/CBI.2017.61>
4. Drivas I. C., Sakas D. P., Giannakopoulos G. A., Kyriaki-Manessi D. Big Data Analytics for Search Engine Optimization. *Big Data and Cognitive Computing*. 2020. vol. 4. no. 2. article 5. DOI: <https://doi.org/10.3390/bdcc4020005>
5. Ziakis C., Vlachopoulou M., Kyrkoudis T., Karagkiozidou M. Important Factors for Improving Google Search Rank. *Future Internet*. 2019. vol. 11. no. 2. article 32. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi11020032>
6. Veglis A., Giomelakis D. Search Engine Optimization. *Future Internet*. 2020. vol. 12. no. 1. article 6. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi12010006>
7. Zhang S., Cabage N. Search Engine Optimization: Comparison of Link Building and Social Sharing. *Journal of Computer Information Systems*. 2017. vol. 57. no. 2. pp. 148–159. DOI: <https://doi.org/10.1080/08874417.2016.1183447>

8. Egri G., Bayrak C. The Role of Search Engine Optimization on Keeping the User on the Site. *Procedia Computer Science*. 2014. vol. 36. pp. 335–342. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.09.102>
9. Cingolani P., Alcalá-Fdez J. jFuzzyLogic: A Java library to design fuzzy logic controllers according to the standard for fuzzy control programming. *International Journal of Computational Intelligence Systems*. 2013. vol. 6 (Sup1). pp. 61–75. DOI: <https://doi.org/10.1080/18756891.2013.818190>
10. Романенко Л. Ф., Брайловська О. О. SEO-оптимізація: тенденції розвитку та подолання наявних ризиків. *Наукові записки Львівського університету бізнесу та права*. 2022. вип. 35. с. 130–137. URL: <https://nzlubp.org.ua/index.php/journal/article/view/706>

Onyshchenko A.O., Bocharov B.P., Kostenko O.B. A FUZZY MULTI-AGENT MODEL FOR SUPPORTING SEO STRATEGIES IN AN INSOURCING ENVIRONMENT

The study focuses on the development of an intelligent fuzzy multi-agent decision support model for search engine optimization (SEO) that reflects the specific characteristics of insourcing environments. The proposed hybrid approach integrates agent-based modelling and fuzzy logic to capture the complex interactions between internal stakeholders in SEO processes, including marketers, developers, SEO specialists, and managers. Such integration enables the formalisation of expert judgments through linguistic variables, reducing subjectivity and allowing the system to adapt to uncertainty while maintaining the balance between technical, content-related, and business constraints. The model is implemented as a multi-agent system in which individual agents represent functional areas such as content, technical optimization, analytics, and coordination. Simulation experiments were carried out using Python libraries agentpy and scikit-fuzzy based on data from five e-commerce projects with available SEO analytics. The results demonstrated that the hybrid fuzzy multi-agent model significantly improves the efficiency of SEO decision-making under resource and time limitations. Technical SEO and content quality were identified as the most influential factors within the causal system of criteria. The system proved capable of ranking alternative strategies and generating compromise solutions consistent with organizational goals. The originality of this work lies in combining fuzzy logic, multi-agent interaction, and multi-criteria analysis to represent internal SEO processes typical for insourced teams. In practice, the application of the model resulted in an 11–14% increase in organic traffic within the first month of implementation, improved resource distribution, and reduced inconsistencies between departments. The developed approach provides an effective decision support tool for managing SEO activities in corporate environments and can be further extended to incorporate off-page factors, behavioural indicators, and real-time agent communication.

Key words: multi-agent system, fuzzy logic, SEO optimization, decision-making, insourcing, digital marketing, business constraints, expert system.

Дата надходження статті: 19.11.2025

Дата прийняття статті: 05.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025