

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Чорноморський національний університет
імені Петра Могили
Факультет комп'ютерних наук
Кафедра інтелектуальних інформаційних систем

ДОПУЩЕНО ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри інтелектуальних
інформаційних систем, д-р техн. наук, проф.
_____ Ю. П. Кондратенко
« ____ » _____ 2022 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

КОМБІНОВАНИЙ FUZZY TOPSIS-DEMATEL ДЛЯ
БАГАТОКРИТЕРІЙНОГО ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В
МЕДИЦИНІ

Спеціальність 122 «Комп'ютерні науки»

122 – МКР – 601.21610316

Студент _____ Р. О. Паленко
« ____ » _____ 2022 р.

Консультант _____ Є. В. Сіденко
к.т.н., доцент
« ____ » _____ 2022 р.

Миколаїв – 2022

Чорноморський національний університет ім. Петра Могили
Факультет комп'ютерних наук
Кафедра інтелектуальних інформаційних систем

Освітньо-кваліфікаційний рівень **магістр**

Галузь знань **12 «Інформаційні технології»**

(шифр і назва)

Спеціальність **122 «Комп'ютерні науки»**

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри інтелектуальних
інформаційних систем, д-р техн. наук, проф.

_____ Ю. П. Кондратенко

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську кваліфікаційну роботу

Паленко Роман Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема магістерської кваліфікаційної роботи

Комбінований Fuzzy TOPSIS-DEMATEL для багатокритерійного прийняття
рішень в медицині

Керівник роботи Сіденко Євген Вікторович к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затв. наказом Ректора ЧНУ ім. Петра Могили від «___» _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом роботи «___» лютого 2022 р.

3. Вхідні (початкові) дані до роботи: інформаційні характеристики вакцин,
класичні алгоритми fuzzy TOPSIS та DEMATEL _____

Очікуваний результат роботи: розроблений набір способів комбінацій методів
fuzzy TOPSIS та DEMATEL. Вибір найкращої вакцини

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розглянути):

– проаналізувати схожі публікації, що досліджують методи fuzzy TOPSIS та DEMATEL;

– дослідити методичну базу багатокритерійних задач в умовах невизначеності;

– розробити експертну систему оцінок альтернатив за обраними критеріями;

– розробити способи комбінування методів fuzzy TOPSIS та DEMATEL;

– проаналізувати результати.

5. Перелік графічних матеріалів: презентація.

6. Завдання до спеціальної частини

7. Консультанти:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис
Спеціальна частина з охорони праці	Щербак Ю.Г. - к.т.н., доцент	
Методична частина	Сіденко Є.В. - заступник завідувача кафедри ІС, к.т.н., доцент	

Керівник роботи _____ к.т.н., доцент Сіденко Є. В.
(наук. ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Завдання прийнято до виконання _____ Паленко Р. О. _____
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Дата видачі завдання « _____ » _____ 2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН Виконання магістерської кваліфікаційної роботи

Тема: «Комбінований fuzzy TOPSIS-DEMATEL для багатокритерійного прийняття рішень в медицині»

№	Найменування роботи	Початок	Закінчення	Примітки
1	Визначення керівника і теми МКР. Подання заяви на затвердження теми МКР	01.09.2021	10.10.2021	
2	Отримання завдання на виконання МКР	19.10.2021	22.10.2021	
3	Складання календарного плану на період виконання МКР	23.10.2021	26.10.2021	
4	Огляд літератури за темою дослідження	27.10.2021	10.11.2021	
5	Проходження переддипломної практики, збір та аналіз матеріалів до МКР	22.11.2021	11.12.2021	
6	Аналіз предметної області та розробка технічного завдання. Моделювання результатів	16.12.2021	12.01.2022	
7	Опис фахової частини МКР, дослідження класичних MCDM, розробка експертної системи, дослідження комбінованого Fuzzy TOPSIS-DEMATEL	13.01.2022	25.01.2022	
8	Розробка спеціальної частини з охорони праці та методичної частини	26.01.2022	30.01.2022	
9	Попередній захист МКР на засіданні комісії кафедри	31.01.2022	31.01.2022	
10	Корегування роботи за результатами попереднього захисту	01.02.2022	03.02.2022	
11	Остаточне оформлення пояснювальної записки та слайдів доповіді для захисту	04.02.2022	06.02.2022	
12	Подання МКР рецензенту	09.02.2022	10.02.2022	
13	Рецензування МКР	11.02.2022	12.02.2022	
14	Подання МКР, її електронної копії та інших документів (відгуку, рецензії) до захисту	14.02.2022	15.02.2022	
15	Захист МКР перед екзаменаційною комісією (ЕК)	21.02.2022	22.02.2022	

Розробив студент Паленко Р. О.
(прізвище та ініціали)

_____ *(підпис)*

Керівник роботи к.т.н., доцент Сіденко Є. В.
(наук. ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ *(підпис)*

« 22 » жовтня 2021 р.

АНОТАЦІЯ

до магістерської кваліфікаційної роботи
студента групи 601 ЧНУ ім. Петра Могили

Паленка Романа Олеговича

на тему: **“КОМБІНОВАНИЙ FUZZY TOPSIS-DEMATEL ДЛЯ
БАГАТОКРИТЕРІЙНОГО ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В МЕДИЦИНІ”**

Актуальність даного дослідження полягає у необхідності регулярно здійснювати вибір оптимальних рішень в багатокритерійних задачах, зокрема в сфері медицини. Кількість альтернативних варіантів ліків, способів лікування, медичного обладнання, тощо, збільшується з кожним днем. Крім того з’являються нові критерії для оцінювання відповідних рішень.

Об’єктом дослідження є процеси прийняття рішень в медицині.

Предметом дослідження є методи багатокритерійного прийняття рішень Fuzzy TOPSIS та DEMATEL для вибору вакцини.

Метою роботи є дослідження можливостей комбінування методів Fuzzy TOPSIS та DEMATEL для покращення прийняття рішення при виборі найкращої вакцини від COVID-19.

В результаті виконання роботи було створено систему експертного оцінювання для вибору найкращої вакцини. Було розроблено шість варіантів комбінування методів Fuzzy TOPSIS-DEMATEL. Отримані результати роботи були ретельно проаналізовані.

Кваліфікаційна робота складається з фахового розділу та двох спеціальних частин: охорона праці і методичний розділ.

Пояснювальна записка до фахової частини кваліфікаційної роботи складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку джерел посилання та додатка. Загальний обсяг роботи – 103 сторінок (без додатків), 26 рис., 39 табл., 1 додаток та 49 джерел посилання.

Ключові слова: *fuzzy, вакцина, експертна система, TOPSIS, DEMATEL.*

ABSTRACT

to the master's qualification work by the student of the group 601 of Petro Mohyla
Black Sea National University

Palenko Roman

“ COMBINED FUZZY TOPSIS-DEMATEL FOR MULTI-CRITERIA DECISION-MAKING IN MEDICINE ”

The relevance of this study is the need to regularly select optimal solutions in multi-criteria tasks, in particular in the field of medicine. The number of alternative medicines, treatments, medical equipment, etc. is increasing every day. In addition, new criteria are emerging for evaluating relevant decisions.

The object of research is decision-making processes in medicine.

The subject of the research is Fuzzy TOPSIS and DEMATEL multicriteria decision-making methods for vaccine selection.

The aim of the work is to study the possibilities of combining Fuzzy TOPSIS and DEMATEL methods to improve decision-making when choosing the best vaccine from COVID-19.

As a result of the work, an expert evaluation system was created to select the best vaccine. Six variants of combining Fuzzy TOPSIS-DEMATEL methods have been developed. The obtained results of the work were carefully analyzed.

Qualification work consists of a professional section and two special parts: labor protection and methodological section.

The explanatory note to the professional part of the qualification work consists of an introduction, four sections, conclusions, a list of reference sources and an appendix. Total volume of work - 103 pages (without appendices), 26 figures, 39 tables, 1 appendix and 49 reference sources.

Key words: *fuzzy, vaccine, expert system, TOPSIS, DEMATEL.*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	6
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ СФЕРИ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ	8
1.1 Опис предметної сфери.....	8
1.1.1 Опис процесу діяльності.....	8
1.1.2 Загальна модель експертної системи	8
1.1.3 Загальні підходи до комбінації TOPSIS-DEMATEL	9
1.2 Огляд та аналіз наявних аналогів та публікацій.....	10
1.3 Постановка задачі	13
Висновки до розділу 1	14
2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ, МЕТОДИ, ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ.....	15
2.1 Прийняття рішень та багатокритерійних задачах	15
2.2 Нечіткі множини та нечітка логіка	17
2.3 Класичні алгоритми.....	20
2.3.1 Метод зважених сум (WSM)	21
2.3.2 Зважена модель товару (WPM).....	22
2.3.3 Метод аналізу ієрархій (АНР).....	23
2.3.4 Метод VIKOR	24
2.3.5 Метод PROMETHEE.....	25
2.3.6 Метод ELECTRE	25
2.3.7 Метод ARAS	26
Висновки до розділу 2	27
3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЕСПЕРТНОГО ОЦІНЮВАННЯ ВАКЦИН ВІД COVID-19	28
3.1 Створення інформаційної бази.....	28
3.2 Створення набору експертних оцінок	35
Висновки до розділу 3	39
4 ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНОГО FUZZY TOPSIS-DEMATEL	40
4.1 Дослідження класичних алгоритмів fuzzy TOPSIS та DEMATEL	40

4.1.1	Метод fuzzy DEMATEL.....	40
4.1.2	Метод fuzzy TOPSIS.....	46
4.2	Розробка способів комбінування fuzzy TOPSIS-DEMATEL.....	53
4.1.2	Тільки D-R.....	53
4.2.2	(D-R) та дефазифікований D+R	55
4.2.3	TOPSIS та дефазифікований D+R.....	57
4.2.4	TOPSIS та дефазифікований D-R нормований.....	59
4.2.5	TOPSIS та дефазифікований D-R	61
4.2.6	TOPSIS та дефазифікований D-R і D+R.....	62
4.3	Аналіз результатів роботи.....	63
4.3	Створення програмного застосунку.....	65
	Висновок до розділу 4	66
5	МЕТОДИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	69
6	ОХОРОНА ПРАЦІ	85
	ВИСНОВКИ.....	97
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	98
	ДОДАТОК А Код програмного забезпечення	104

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

ЛПР	– людина, що приймає рішення
РНК	– рибонуклеїнової кислоти
АНР	– Метод аналізу ієрархій
ARAS	– additive ratio assessment
DEMATEL	– DEcision MAking Trial and Evaluation Laboratory
ELECTRE	– ELimination and ChoiceExpressingREality
NIS	– Negative ideal solution
PIS	– Positive ideal solution
PROMETHEE	– Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations
TOPSIS	– Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
VIKOR	– VІekriterijumsko KOmpromisno Rangiranje
WPM	– Зважена модель товару
WSM	– Метод зважених сум

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему:

«КОМБІНОВАНИЙ FUZZY TOPSIS-DEMATEL ДЛЯ БАГАТОКРИТЕРІЙНОГО ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В МЕДИЦИНІ»

Спеціальність 122 «Комп'ютерні науки»

122 – МКР – 601.21610316

Студент _____ Р. О. Паленко

«__» _____ 2022 р.

Консультант _____ Є. В. Сіденко
к.т.н., доцент

«__» _____ 2022 р.

Миколаїв – 2022

ВСТУП

У наш час, новітніх технологій та стрімкого інформаційного потоку, все більше виникає задач вибору кращої альтернативи. За останні два десятиліття споживачі, підприємці, вчені перейшли від філософії «працюємо з тим що є», до «в нас є вибір за 10-15 позицій як це зробити». Звичайно це викликало низку проблем, з якими ми зіштовхуємося щоденно. Збільшення кількості альтернатив робить задачі більш комплексними. А постійне збільшення інформаційного потоку поглиблює наші знання про кожну з альтернатив, тобто збільшує кількість критеріїв. Тому вже майже неможливе прийняти зважене рішення не користуючись тим чи іншим методом підтримки прийняття рішень.

Сфери застосування даних методів необмежені, але в наш час світової пандемії, необхідно звернути увагу на сферу медицини. Кожного року на ринок виходять нові лікувальні засоби, мікстури, таблетки. Лікарям доступні різні шляхи лікування багатьох захворювань. Пацієнт може самостійно обирати яку вакцину собі вколоти. Кожна з цих проблем має безліч альтернатив, що лише збільшується, а з плином часу та проведенням нових досліджень кількість критеріїв, що позитивно чи негативно впливають на альтернативи зростає.

Тому було запропоновано дослідити способи комбінування класичних методів Fuzzy TOPSIS та DEMATEL для вирішення багатокритерійної задачі з пошуку кращої вакцини.

Метою роботи є дослідження можливостей комбінування методів Fuzzy TOPSIS та DEMATEL для покращення прийняття рішення при виборі найкращої вакцини від COVID-19.

Об'єктом дослідження є процеси прийняття рішень в медицині.

Предметом дослідження є методи багатокритерійного прийняття рішень Fuzzy TOPSIS та DEMATEL для вибору вакцини.

Для досягнення зазначеної мети необхідно виконати наступні завдання:

– проаналізувати публікації, що досліджують методи багатокритерійного прийняття рішень, зокрема Fuzzy TOPSIS та DEMATEL;

- дослідити особливості застосування багатокритерійних задач в умовах невизначеності;
- розробити експертну систему оцінювання альтернатив за визначеними критеріями;
- сформулювати способи комбінування методів Fuzzy TOPSIS та DEMATEL;
- проаналізувати отримані результати.

Практична значимість результатів полягає в отриманні подальшого розвитку методів та підходів до вирішення багатокритерійних задач, зокрема у комбінуванні методів Fuzzy TOPSIS та DEMATEL для підвищення ефективності прийняття рішень. Розглянуті методи є популярними та часто вживаними вже багато років, але їх поєднання може призвести до наступного кроку в питаннях знаходження кращої альтернативи.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ СФЕРИ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Опис предметної сфери

1.1.1 Опис процесу діяльності

Методи багатокритерійного прийняття рішень – це спеціальні методи, що дозволяють людині, що приймає рішення (ЛПР) зробити вибір оптимального варіанту. Вони не приймають рішення за людину, але виконують функції підтримки рішень. Надаючи зрозумілі оцінки та характеристики альтернатив для подальшого прийняття рішень

Багатокритерійні задачі оточують нас повсюди, ми стикаємося з ними на роботі та в особистому житті. Це може бути вибір моделі нового авто чи місця відпочинку на вихідних. Головною проблемою, з якою стикається ЛПР – це відсутність домінуючої альтернативи. Наприклад: авто 1 краще за авто 2, за першим, третім та четвертим критерієм, але програє для другого та п'ятого. Як порівняти ці дві альтернативи без певних методів та підходів. А якщо ще додати пріоритетність для кожного з критерію, то задача стає над складною.

Окрім повсякденного життя, багатокритерійні задачі виникають і на підприємствах. Для виконання поставленого завдання дипломної роботи, було обрано задачу вибору кращої вакцини. Це є гарним прикладом багатокритерійної задачі. На відміну від попереднього прикладу, у цієї задачі є критерії за якими не можна попарно порівнювати альтернативи. Наприклад, тип вакцини, тобто технологічний процес, що був використаний для її створення. Оцінка такого критерію є по суті вкладена багатокритерійна задача, адже виходячи з того, що провідні компанії створюють різні типи вакцин – всі вони є конкуренто спроможними.

1.1.2 Загальна модель експертної системи

Для виконання багатокритерійної задачі необхідно надати достовірний датасет для роботи методів прийняття рішень. Ця задача додатково

ускладняється кількістю альтернативних вакцин, що виробляються в світі, та неоднорідність їх дослідження.

Так, наприклад, вакцина компанії Moderna – має безліч публікації, що досліджують її характеристики, побічні впливи. Статистичні організації багатьох країн світу діляться інформацією про хід вакцинації та її результати. В той же час вакцина «Спутник V» - є неоднозначною в цьому питанні. Через політичну упередженість, а також невелику кількість інформації, що надає виробник – у світі вона має погану репутацію. Це призводить до збільшення негативних публікацій не за оцінками її самої, як за домислами того, що недовмлено.

Розроблюючи експертні систему для оцінки вакцин було прийнято рішення сконцентрувати увагу на дослідженні наступних критеріїв:

- 1) тип вакцини;
- 2) технологічна база;
- 3) ефективність вакцини;
- 4) необхідна температура зберігання;
- 5) кількість учасників клінічних дослідів 3 фази;
- 6) кількість країн;
- 7) кількість вакцинованих;
- 8) виявлений побічний вплив.

1.1.3 Загальні підходи до комбінації TOPSIS-DEMATEL

Методи TOPSIS та DEMATEL мають суттєву ідейну різницю. Якщо метод TOPSIS фокусується на пошуку кращої альтернативи, то ідеєю DEMATEL є дослідження критеріїв, їх вплив один на одного, відносна важливість.

Тому, неможливо виконати розрахунки двох методів та порівняти результати, адже вони знаходяться в різних областях значень. Однак, це не є неподоланною перешкодою, для дослідження їх комбінації.

Оскільки обидва методи в ході своєї роботи виконують операції над оцінками критеріїв, то саме це старе точкою поєднання методів.

Тоді ми можемо визначити комбінацію TOPSIS-DEMATEL, через вбудову результатів DEMATEL у розрахунки методу TOPSIS.

1.2 Огляд та аналіз наявних аналогів та публікацій

В останні роки обрані методи підтримки прийняття рішень з'являлися в наукових публікаціях стосовно різних сфер діяльності. Gonabad Branch в своїй статті «FUZZY TOPSIS ALGORITHM FOR MULTI CRITERIA DECISION MAKING WITH APPLICATION OF MARKETING MIX UNDER α -CUT». Автор розглядає класичний алгоритм FUZZY TOPSIS [2].

Його дослідження фокусується на практичній частині, в якій автор застосовує метод для вибору кращого шляху маркетингової кампанії для цегляної фабрики у Іраку. Автор застосував метод у дещо незвичайній формі, його практичне завдання має майже в п'ять разів більше альтернатив за критеріїв. Це вказує на гнучкість алгоритму в цьому питанні.

Проблемою публікації, на мою думку, є синтетичність практичних даних, що робить дослідження менш наглядним. Також автор не запропонував будь-які модифікації до алгоритму, а розглядав класичний алгоритм.

Наступною статтею, що була дослідження під час підготовки стала «МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКИМИ РЕСУРСАМИ НА БАЗЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА TOPSIS» за авторством доктора технічних наук М.Г. Мамедова та кандидата технічних наук З. Г. Джабраилова [3].

Це дуже ґрунтовне дослідження, що має реальні дані. Результатом їх роботи є низка переваг, що надає метод TOPSIS:

- відсутність необхідності у складанні бази нечітких правил;
- математична обґрунтованість та відносна простота розрахунків інтегральних показників, що дозволяють здійснити ранжування альтернативних рішень, проводити подальший аналіз та вибір остаточного варіанту рішення;

- відсутність обмежень на кількість альтернатив та критеріїв, що характеризують об'єкт дослідження;
- облік в алгоритмі прийняття рішень компетентності експертів, що беруть участь у процедурі прийняття рішень;
- облік ієрархічної структурованості критеріїв, що описують альтернативи;
- можливість формування пріоритетності альтернатив за ступенем їхньої близькості до ідеального рішення.

Вважаю, що дане дослідження широко ілюструє переваги методу над суб'єктивними способами прийняття рішень. Воно показує на прикладі, якими важливими та необхідними в наш час є методи багатокритерійного прийняття рішень.

Популярність методу FUZZY TOPSIS виражена через призму публікації Sorin Nadaban «Fuzzy TOPSIS: A General View». У цій статті автори представили загальний огляд розвитку нечітких методів TOPSIS [4].

Вони згадали декілька робіт, у яких представлені деякі застосування нечітких TOPSIS, такі як:

- проблема розташування;
- вибір постачальника;
- стійка та відновлювана енергетика.

Ця стаття є потужним фактором, що вказує на неухильний розвиток методу, та його пристосованість для різних задач.

В нашій країні вже традиційно вважається, що одне з найгірших дорожніх полотен. Ця тема є приводом для анекдотів. Тому дослідження Katarzyna Halicka на тему «Technology Selection Using the TOPSIS Method» є досить важливим для нашої країни [5].

Адже досліджувана задача сконцентрована на виборі кращого покриття для дороги. Автор зазначив, що хоч задача була спрощена шляхом відкидання багатьох критеріїв, але результати біли репрезентативні.

Нажаль не вдалося знайти аналогічних досліджень в нашій країні. Очевидно, що в більшості забудовники навіть не вирішують дану задачу, а обирають тип дорожнього покриття за класичними схемами.

Остання досліджена стаття пов'язана с методом TOPSIS – «Selection of Medical Clinic for Disease Diagnosis by Using TOPSIS Method» за авторством Rana Muhammad Zulqarnain [6].

Цікавою частиною даного дослідження стало використання досліджуваного методу саме у сфері медицини. Автори серйозно підійшли к питанню вибору кращої клініки.

Нажаль, незважаючи на важливість досліджуваної теми в наш час, автори синтетично створили набір вхідних даних для відпрацювання методу. Тобто направлення їх досліджень правильне, але зовсім нерепрезентативне.

Тому для виконання цієї дипломної роботи необхідно використати саме реальні дані та оцінки. Це є необхідним в умовах, коли більшість публікацій та досліджень базуються на синтетичних, а отже нереальних даних.

Досліджуючи публікації про метод DEMATEL відразу прослідковується схильність робіт до фінансової сфери. Це не дивно, особливо враховуючи основні задачі метода – знаходження взаємозв'язків у складних структурах.

Але я хотів би в першу чергу звернути увагу на публікацію Mohammad Ehsanifar на тему «Applying Fuzzy DEMATEL Method to Analyze Supplier Selection Criteria». Його дослідження сконцентовано довкола теми пошуку нових постачальників для компаній [7].

Він зазначив: «У наш час через складність технології аналіз і вирішення проблеми вибору постачальника стає більш складним і динамічним. Залежно від закупівельної ситуації на вибір правильних постачальників впливають різноманітні фактори, тому важливо знати, які критерії слід використовувати, щоб вибрати найкращий підхід, що відповідає найкращій стратегії компанії. 23 критерії, представлені Діксоном, досі охоплюють більшість критеріїв, представлених у літературі, але еволюція промислового середовища змінює

рейтинг цих критеріїв або додає інші критерії, які також вважаються важливими. Крім того, залежно від процесу є критерії, важливіші за інші.» [7].

Автор використав нечіткий метод DEMATEL для визначення найвпливовіших критеріїв та визначення рейтингу найважливіших критеріїв. Результат яскраво зобразив залежності критеріїв.

Але повертаючись до сфери захисту здоров'я, потрібно пам'ятати, що пандемія впливає не тільки на людей безпосередньо, але й на екосистему довкола нас. Тому стаття «Analysis of Supply Chain Disruption Factors Under the Effect of COVID-19 Pandemic via Neutrosophic Fuzzy DEMATEL» опублікована на International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems 2021 року є важливим кроком в розумінні глобальності проблеми [8].

Автори сконцентрували увагу дослідження на аналізі ризиків спричинених природними катастрофами та пандемією. Результатом роботи стала розроблена методологія для менеджерів компаній по роботі під тиском ризиків природних катаклізмів та інших глобальних проблем.

Підводячи підсумки, необхідно зазначити що методи підтримки прийняття рішень є популярними в науковій сфері сучасності та стрімко розвиваються пристосовуючись до нових викликів нашого часу.

1.3 Постановка задачі

Актуальність даного дослідження полягає у необхідності регулярно здійснювати вибір оптимальних рішень в багатокритерійних задачах, зокрема в сфері медицини. Кількість альтернативних варіантів ліків, способів лікування, медичного обладнання, тощо, збільшується з кожним днем. Крім того з'являються нові критерії для оцінювання відповідних рішень.

Об'єктом дослідження є процеси прийняття рішень в медицині.

Предметом дослідження є методи багатокритерійного прийняття рішень Fuzzy TOPSIS та DEMATEL для вибору вакцини.

Метою роботи є дослідження можливостей комбінування методів Fuzzy TOPSIS та DEMATEL для покращення прийняття рішення при виборі найкращої вакцини від COVID-19.

Для досягнення зазначеної мети необхідно виконати наступні завдання:

- проаналізувати публікації, що досліджують методи багатокритерійного прийняття рішень, зокрема Fuzzy TOPSIS та DEMATEL;
- дослідити особливості застосування багатокритерійних задач в умовах невизначеності;
- розробити експертну систему оцінювання альтернатив за визначеними критеріями;
- сформулювати способи комбінування методів Fuzzy TOPSIS та DEMATEL;
- проаналізувати отримані результати.

Практична значимість результатів полягає в отриманні подальшого розвитку методів та підходів до вирішення багатокритерійних задач, зокрема у комбінуванні методів Fuzzy TOPSIS та DEMATEL для підвищення ефективності прийняття рішень. Розглянуті методи є популярними та часто вживаними вже багато років, але їх поєднання може призвести до наступного кроку в питаннях знаходження кращої альтернативи.

Висновки до розділу 1

В даному розділу був проведений докладний опис предметної сфери, побудована структура експертної системи оцінок вакцин для дослідження способів комбінування методів TOPSIS та DEMATEL.

Проаналізовано публікації інших інтелектуальних систем.

Виконана постановка задачі, описані об'єкт, предмет, мета та завдання кваліфікаційної роботи.

2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ, МЕТОДИ, ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ

2.1 Прийняття рішень та багатокритерійних задачах

Кожного дня виникає безліч задач прийняття рішень, вони є природною частиною життя людства. Ми оцінюємо альтернативи, зважуємо критерії та приймаємо рішення. Однак збільшення потоку інформації та ускладнення самих задач – вимагають дослідження самого процесу прийняття рішень, задля покращення якості рішень та життя в цілому [18].

Рішення – це обґрунтований набір дій виконаних особою, що приймає рішення, спрямованих на досягнення поставленої мети або для приведення системи чи об'єкта до задовільного стану. Рішення є проявом волі людини, її складовою розумової діяльності. Характерні ознаки рішення є:

1. Вибір з набору альтернатив. Відсутність альтернативних варіантів означає відсутній вибір, отже рішення не може існувати;
2. Чітка мета. Безцільний вибір не може бути рішенням;
3. Необхідність вольового акту особи, що приймає рішення, бо рішення формується в умовах боротьби мотивів та думок.

Прийняття рішення – це процес знаходження найбільш преференційного рішення серед множини можливих рішень чи ранжування множини рішень. Прийняття рішень здійснюється на підставі знань про об'єкт, процеси, що в ньому відбуваються або відбудуться в майбутньому, а також, за наявності, множини показників, які характеризують ефективність та якість прийнятого рішення. Тобто, для прийняття рішення необхідні адекватна модель об'єкту та модель прийняття та оцінки прийнятого рішення. Під моделлю прийняття рішень мається на увазі формальне подання задачі та процесу прийняття рішень [19].

Однією з проблем у прийнятті рішень стала наявність великого числа критеріїв, які не завжди погоджені між собою. Це зумовлює створення необхідних математичних моделей і застосування математичних методів. Одним із способів формалізації таких задач є використання багатокритерійних

оптимізаційних моделей прийняття рішень. Побудуємо формальну модель багатокритерійної задачі [20].

Нехай буде задано множину допустимих альтернатив X . Їх властивості описуються сукупністю цільових функцій: $f = \{f_i(x)\}$, $i \in I$, $x \in X$, де I – множина індексів, $I = \{1, 2, \dots, M\}$. Будемо вважати, що m перших цільових функцій максимізується, а інші $(M - m)$ мінімізуються. Позначимо через I_1 множину індексів, для яких цільові функції максимізуються, тобто $I_1 = \{1, 2, \dots, m\}$. Аналогічно позначимо множину I_2 , для індексів з мінімізацією цільової функції. Тоді багатокритерійна задача може бути записана таким чином:

$$\begin{aligned} f_i(x) &\rightarrow \max, i \in I_1, \\ f_i(x) &\rightarrow \min, i \in I_2, \\ x &\in X \end{aligned} \tag{2.1}$$

де $f_i(x)$ – цільова функція; x – альтернатива; i – індекс; I_1 – множина індексів для максимізації; I_2 – множина індексів для мінімізації; X – множина допустимих альтернатив.

Розглянемо поняття ефективної альтернативи, на прикладі задачі багатокритерійної оптимізації (2.1) [21]. З огляду на задані цільові функції, альтернативи x_1 і x_2 можливо порівнювати таким чином:

- альтернатива x_1 не гірша за альтернативу x_2 , коли

$$\begin{cases} f_i(x_1) \geq f_i(x_2), i \in I_1, \\ f_i(x_1) \leq f_i(x_2), i \in I_2; \end{cases}$$

- альтернатива x_1 еквівалентна альтернативі x_2 , якщо

$$f_i(x_1) = f_i(x_2), \forall i \in I;$$

- альтернатива x_1 строго переважає альтернативу x_2 , коли

$$\begin{cases} f_i(x_1) \geq f_i(x_2), i \in I_1, \\ f_i(x_1) \leq f_i(x_2), i \in I_2, \end{cases}$$

і хоча б одна нерівність виконується як строга.

Очевидно, що не кожну пару альтернатив можливо порівняти між собою. В такому випадку знаходиться альтернатива x_0 , яка буде визначена як ефективна, якщо на множині допустимих альтернатив X не існує жодної альтернативи, яка б задовольнила такі нерівності:

$$\begin{cases} f_i(x_1) \geq f_i(x_0), i \in I_1, \\ f_i(x_1) \leq f_i(x_0), i \in I_2, \end{cases}$$

причому хоча б одна з них виконується як строга.

Іншими словами, ніяка інша альтернатива не зможе «покращити» значення жодної цільової функції, не погіршивши при цьому значення деякої іншої. Саме чому іноді ефективні альтернативи називають «непокрощуваними» за множиною цілей, або оптимальними за Парето. Серед множини оптимальних за Парето альтернатив необхідно шукати розв'язок задачі багатокритерійної оптимізації. Проте, яку саме альтернативу потрібно вибирати, сказати не можна, необхідні додаткові дослідження [22].

2.2 Нечіткі множини та нечітка логіка

На сьогоднішній день більшість задач багатокритерійного прийняття рішень не зводяться до чітко визначених цільових функцій. Критерії множин альтернатив можуть мати описовий характер або невизначеність виражена у нечітких множинах [23].

Математична теорія нечітких множин (fuzzy sets) та нечітка логіка (fuzzy logic) є узагальненнями класичної теорії множин та класичної формальної логіки. Вперше дані поняття були запропоновані Лотфі Заде, американським вченим, у 1965 році. Головною причиною появи нової теорії стала наявність нечітких та наближених міркувань при описі процесів, систем та об'єктів людиною.

Минуло не одне десятиліття з моменту створення теорії нечітких множин, перш ніж нечіткий підхід до моделювання складних систем отримав визнання у всьому світі. На шляху розвитку нечітких систем прийнято виділяти три основні періоди.

Перший період (кінець 60-х-початок 70 років) характеризується розвитком теоретичного апарату нечітких множин. Над ним працювали такі видатні вчені як Лотфі Заде, Ебрахім Мамдані та Річард Беллман. У другому періоді (70-80-ті роки) з'являються перші практичні результати. Теорія знайшла своє застосування в галузі нечіткого керування складними технічними системами, як парогенератор з нечітким керуванням. В той же час вчені почали приділяти увагу питанням побудови експертних систем, які були заснованих на нечіткій логіці, розробці нечітких контролерів. Нечіткі експертні системи для підтримки прийняття рішень знайшли широке застосування в сферах медицини та економіки.

Нарешті, у третьому періоді, що триває з кінця 80-х років і до нині, з'являються пакети програм для побудови нечітких експертних систем. Це призводить до помітного розширення області застосування нечіткої логіки. Вона знаходить застосування в автомобільній, аерокосмічній та транспортній промисловості, у галузі виробів побутової техніки, у сфері фінансів, аналізу та прийняття управлінських рішень та багатьох інших.

У бізнесі та фінансах нечітка логіка отримала визнання після того, як у 1988 році експертна система на основі нечітких правил для прогнозування фінансових індикаторів єдина передбачила біржовий крах.

Не дивно, що експертні системи отримали таке розповсюдження у світі. Адже вони призначені для вирішення складних задач, але в основі роботи містять структури з використанням знань представлених у вигляді правил. Це робить їх інтуїтивно зрозумілими для людини, та дозволяє долучати до вирішення задачі більшої кількості експертів за менші проміжки часу. Бо не потрібно додатково навчати їх як працювати з системою.

Кожна експертна система складається з наступних елементів:

– база знань – це семантична модель. Її задачами є опис предметної області та надання можливості відповідати на запитання не маючи відповідей у явному вигляді;

- машина логічного виводу – це система, яка моделює механізм роздумів та оперує знаннями та даними з метою отримання нової інформації;
- пояснювальна підсистема – система, яка дозволяє користувачу отримати зрозумілі відповіді на питання: яким чином було отримано то чи інше рішення;
- підсистема взаємодії з користувачем – це система, що забезпечує процес взаємодії з користувачу для запиту у нього необхідної інформації для процесу знаходження рішення, дозволяє користувачу корегувати хід роботи експертної системи.

Вперше експертні системи були представлені ще у 1965 році в межах програми Стенфордського університету під керівництвом Едварда Фейгенбаума. Саме його вважають «батьком» експертних систем.

Для побудови будь-якої експертної системи необхідно визначитися з критеріями оцінювання альтернатив. Через проблему вираження всіх критеріїв альтернатив у числовому вигляді, а також беручи до уваги суб'єктивність та невизначеність оцінки експерта. Були створені лінгвістичні змінні. Вони дозволяють замінити конкретні значення на суб'єктивну оцінку. Додатковою перевагою стало вираження цих оцінок природною мовою. В загальному виді лінгвістичний змінні складаються з назви лінгвістичної змінної, множина її значень, тобто набір лінгвістичних термів, діапазон значень змінної, синтаксичне правило та семантичне правило.

Наочним прикладом нечіткої логіки є відповідь на запитання: «Чи швидко їде автомобіль». Більшість людей розуміє, що йдеться не про абсолютну швидкість, вимірювану в кілометрах на годину, а про особисте сприйняття швидкості. Більшість людей зазначають, що 40 км/год є цілком середньою швидкістю, проте знайдуться ті, що трактуватимуть так швидкість малою. Комп'ютери, на відміну від людей, не здатні проводити таку градацію. Тому кожен лінгвістичний терм має певну функцію належності.

На сьогоднішній день існує безліч функцій належності. Їх розмаїття дозволяє більш точно описати складну систему і, як результат, отримати краще

рішення. До класичних функцій належності відносяться: трикутна, трапецевидна, симетрична Гауса, сигмоїдна, функція Лапласа та квадратична. Їх формули наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Стандартні функції належності

Назва функції належності	Аналітична формула
Трикутна функція	$\mu(x) = \begin{cases} 0, \text{ якщо } x \leq a \text{ або } x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a}, \text{ якщо } a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, \text{ якщо } b \leq x \leq c \end{cases}$ <p>де $a \leq b \leq c$</p>
Трапезоїдна функція	$\mu(x) = \begin{cases} 0, \text{ якщо } x \leq a \text{ або } x \geq d \\ \frac{x-a}{b-a}, \text{ якщо } a \leq x \leq b \\ 1, \text{ якщо } b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, \text{ якщо } c \leq x \leq d \end{cases}$ <p>де $a \leq b \leq c \leq d$</p>
Симетрична Гауса	$\mu(x) = e^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}$
Функція Лапласа	$\mu(x) = e^{-\frac{ x-b }{d}}, \text{ де } d > 0$
Сигмоїдна функція	$\mu(x) = \frac{1}{e^{-a(x-c)} + 1}$
Квадратична функція	$\mu(x) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{x-a}{b}\right)^2, \text{ якщо } \left(\frac{x-a}{b}\right)^2 < 1 \\ 0, \text{ інакше} \end{cases}$

2.3 Класичні алгоритми

Для вирішення багатокритерійних задач існує велика кількість методів. Кожен з них був розроблений для вирішення певної прикладної задачі. З часом деякі зникли зі сторінок історії, інші були модифіковані. Та лише невелика

кількість набула статусу класичних алгоритмів. Вирішуючи задачу комбінації fuzzy TOPSIS-DEMATEL, необхідно дослідити які методи їм передували.

2.3.1 Метод зважених сум (WSM)

Метод зважених сум – це багатокритерійний метод прийняття рішень, метою якого є знаходження найкращої альтернативи серед запропонованих на основі обраних критеріїв. Це один з найбільш відомих та простих методів багатокритерійного прийняття рішень [24].

Загальний вид алгоритму полягає в знаходженні загального критерію шляхом суми зважених критеріїв. Якщо виразити значення всіх критеріїв, як прибутку, то знайти критерій можливо за наступною формулою (2.2).

$$A_i^{WSM} = \sum_{j=1}^n w_j a_{ij}, \text{ для } i = 1, 2, 3 \dots, m. \quad (2.2)$$

де A_i^{WSM} – значення загального критерію для i -тої альтернативи; w_j – ваговий коефіцієнт j -того критерію; a_{ij} – значення i -тої альтернативи для j -того критерію; n – кількість альтернатив; m – кількість критеріїв.

Далі, у випадку задачі максимізації, найкраща альтернатива буде мати найбільше значення.

Свою популярність метод зажив через низку переваг:

- метод є простим та зрозумілим;
- зручні та лаконічні розрахунки;
- використовується для знаходження як найкращого рішення, так і для

ранжування альтернатив.

Проте метод зважених сум не позбавлений недоліків:

- значення результатів розрахунку позбавлені змісту;
- вагові коефіцієнти критеріїв не залежать від значень альтернатив;
- залежність від однорідності критеріїв.

В цілому метода зважених сум є досить сильним інструментом для знаходження найкращого рішення. При правильному використанні він допоможе швидко віднайти відповідь. Проте не треба вимагати від нього вирішення досить комплексних задач.

2.3.2 Зважена модель товару (WPM)

Зважена модель товару – це популярний метод знаходження рішень для багатокритерійної задачі. Він схожий на метод зваженої суми, але його відмінність в тому, що замість додавання, як основної математичної операції, виконується множення. В ході роботи методу, кожна альтернатива рішення буде порівняна з іншою. Таким чином знаходиться найкраще рішення.

Припустимо, що проблема визначена m альтернативами, та n критеріями, при цьому припустимо, що всі критерії є критеріями вигоди. Тоді для порівняння двох альтернатив нам знадобиться формула (2.3).

$$P(A_k A_l) = \prod_{j=1}^n (a_{kj} / a_{lj})^{w_j}, \text{ для } k, l = 1, 2, 3 \dots, m. \quad (2.2)$$

де $P(A_k A_l)$ – співвідношення двох альтернатив; w_j – ваговий коефіцієнт j -того критерію; a_{kj} та a_{lj} – значення k -тої та l -тої альтернативи для j -того критерію; n – кількість альтернатив; m – кількість критеріїв;

Якщо співвідношення двох альтернатив більше або дорівнює 1, тоді альтернатива A_k – є більш бажаною за альтернативу A_l . Найкращою альтернативою є та, що є кращою або хоча б не поступається всім іншим альтернативам [46].

Цей метод часто називають «безрозмірним аналізом», адже його математична структура виключає використання будь-яких одиниць виміру. Тобто його можна використовувати для задач у яких альтернативи представлені критеріями з різними одиницями виміру.

Переваги та недоліки в методу зваженої моделі товару аналогічні з методом зваженої суми. Хоча необхідно зазначити й особливість результатів методу. Адже окрім найкращої альтернативи або ранжування альтернатив, даний метод визначає відносну перевагу альтернатив [47].

2.3.3 Метод аналізу ієрархій (АНР)

Метод АНР – структурована техніка аналізу багатокритерійного рішення, що базується на математичних та психологічних дослідженнях. Автором методу вважається видатний вчений Томас Сааті. Алгоритм представляє точний підхід для кількісної оцінки ваг критеріїв, що характеризують альтернативи. Для оцінки альтернатив використовується досвід обраних експертів. Кожен з них повинен попарно порівняти відносну важливість критеріїв та альтернатив за кожним з критеріїв, за певною шкалою. Саме Томас Сааті ввів у обіг звичну шкалу від 1 до 9, для оцінки альтернатив [25].

Головною властивістю методу є те, що складну задачу розкладають на ієрархію простіших для сприйняття задач, кожна з яких аналізується окремо. Це дозволяє групувати характеристика альтернатив: матеріальні та нематеріальні, точно виміряні та суб'єктивно оцінені.

Метод АНР вирішує цілу низку різноманітних задач з прийняття рішення:

- вибір найкращої альтернативи;
- створення рейтингу чи ранжування альтернатив;
- визначення пріоритетності серед альтернатив;
- управління якістю.

Свою популярність метод аналізу ієрархій отримав за рахунок використання досвіду експертів для вирішення багатокритерійної задачі. На відміну від WSM та WPM у яких експерт міг повипливати лише на оцінку вагів критеріїв, тут експерти оцінюють також безпосередньо самі альтернативи [48].

Це призвело до можливості відсторонитися від точних даних та зосередитися на потребах обраної експертної групи, адже саме вони зацікавлені

в отриманні найкращої альтернативи. Проте необхідність попарно порівнювати альтернативи значно збільшує часові затрати кожного з експертів.

2.3.4 Метод VIKOR

Метод VIKOR – це метод багатокритерійного прийняття рішень, що був розроблений Серафимом Опричовичем для вирішення проблем знаходження рішення в умовах суперечливих та несумірних критеріїв. Він припускає, що компромісне рішення є прийнятним для вирішення конфліктної ситуації. Особа, що приймає рішення, прагне отримати найбільш ідеальне рішення, в той час коли альтернативи оцінюються за всіма наданими критеріями. Алгоритм VIKOR класифікує альтернативи та знаходить компромісне рішення, що є найближчим до ідеального [27].

Метод VIKOR був розроблений в далекому 1979 році, проте довгий час не набував розповсюдження. Все змінилося у 1998 році, коли почали з'являтися перші програмні пакети, які реалізували його. У 2004 році стаття присвячена методу VIKOR стала найбільш цитованою у галузі економіки.

Отримане, в ході роботи алгоритму, компромісне рішення забезпечує максимальну користь більшості та мінімальне шкодування опонента. Це робить результати методу наочними для подальшого прийняття рішення, та переконливими для сторони, що приймає компромісне рішення [28].

Математичні засади VIKOR дозволили легкий перехід до нечітких наборів значень. Це допомогло здобути нові сфери застосування алгоритму, де більшість інформації на оцінок альтернатив представлені в виді нечітких величин.

Відмінність методу VIKOR від більшості інших полягає в тому, що функція агрегації представляє собою відстані від ідеального рішення. Додатковою перевагою є процедура нормалізації. Адже алгоритм використовує лінійну нормалізацію, це означає – нормоване значення не залежить від одиниць критерію.

2.3.5 Метод PROMETHEE

Метод PROMETHEE має широку сферу застосувань для різноманітних сценаріїв задач з багатокритерійного прийняття рішень. Основними сферами застосування стали бізнес, державне управління, транспорт, безпека життєдіяльності та освіта [29].

Алгоритм допомагає особам, яким необхідно прийняти рішення, знайти таку альтернативу, що найкраще відповідає їх цілям та розумінні проблематики задачі. Допомагає не тільки виокремити найкращі альтернативи, але й структурувати хід роздумів.

Основні елементи алгоритму PROMETHEE були вперше представлені професором Жан-Брасом ще у 1982 році. Подальші модифікації та доробки методу призвели до оптимізації алгоритму та збільшення його популярності. Метод має унікальні переваги над іншими алгоритмами прийняття багатокритерійних рішень. Він гарно працює з задачами у яких є елементи важко порівнювати або коли співпраця між експертними групами обмежена і вони мають різні погляди, що сформовані їх спеціалізацією та баченням проблеми.

2.3.6 Метод ELECTRE

Метод ELECTRE є цілою сім'єю алгоритмів багатокритерійного прийняття рішень. Вони виникла в Європі в середині 1960-х років. Автором методів вважається Бернард Рой та його колеги з компанії SEMA. Метод, що створювався для вирішення конкретної прикладної задачі швидко набув популярності в різноманітних сферах прийняття рішень [30].

Основні проблеми, що вирішує метод є: вибір кращої альтернативи, ранжування та сортування альтернатив. Тобто він задовольняє основні вимоги для вирішення багатокритерійних задач з прийняття рішень.

Алгоритм ELECTRE складається з двох основних частин:

- побудова однієї або декількох відносин переваг. Вони мають на меті всебічне порівняння кожної пари альтернатив;

- процедура використання, що розробляє рекомендації для дій на основі результатів першого етапу. Характер рекомендацій залежить від типу проблеми обраної задачі.

Популярність оригінального методу призвела до швидкої модифікації та переосмислення базового алгоритму. Так він перетворився на ELECTRE I, а його наступниками стали ELECTRE II, ELECTRE III, ELECTRE IV, ELECTRE IS та ELECTRE TRI [31].

Сьогодні даний метод характеризують більше як «метод попереднього прийняття рішень». Це сталося через те, що він більше використовується не з метою знаходження найкращої альтернативи, а для відкидання деяких альтернатив, що мають неприйнятні характеристики. А вже після цього використовується будь-який інший метод багатокритерійного прийняття рішень. Це дозволяє працювати над задачами з великою кількістю альтернативних рішень без проблеми отримати над великі розрахунки, що заощаджує багато часу. Дану властивість методу забезпечує існування у кожного критерію параметра «вето» [49].

2.3.7 Метод ARAS

Метод ARAS – це новий метод вирішення багатокритерійних задач в умовах невизначеності. Вперше він був представлений Едмундасом Завадскас. Метод ARAS допомагає особам, які приймають рішення, оцінювати ефективність альтернатив, а також співвідношення кожної альтернативи до ідеальної альтернативи.

Він спрямований на вибір найкращої альтернативи на основі кількох критеріїв, а остаточний рейтинг альтернатив - зроблений шляхом визначення ступеня корисності кожної альтернативи [32].

Стверджується, що відношення суми нормованих та зважених балів критеріїв, що описують розглянуту альтернативу, до суми значень нормованих та зважених критеріїв, що описує оптимальну альтернативу, є ступенем оптимальності, якого досягає альтернатива порівняння.

Відповідно до методу ARAS значення функції корисності, що визначає комплексну відносну ефективність розумної альтернативи, прямо пропорційне відносному впливу значень і ваг основних критеріїв.

Сильною стороною Методу ARAS є те, що він з самого початку був розроблений для роботи з невизначеними даними. Це робить його одним з головних конкурентів класичного методу TOPSIS. Проте різний підхід до агрегації та нормалізації даних не дозволяє чітко виокремити який з них є кращим [50].

Також необхідно зазначити, що незважаючи на популярність методу, його відносна новизна залишає великий простір для модифікацій та оптимізації методу. Тому, можливо, з плином часу він може стати одним з найкращих методів для прийняття рішень у багатокритерійних задачах.

Висновки до розділу 2

Менш ніж за століття, людство зробило величезний крок в питанні вирішення багатокритерійних задач. Нові методи не тільки пристосувалися до постійного збільшення потоку інформації та швидкодії для прийняття рішень, але засвоїли роботу з нечіткими даними та використання експертного досвіду для вирішення задач. Кількість сфер, що використовують різноманітні методи та алгоритми прийняття рішень, постійно збільшуються.

Було проведено дослідження та аналіз найбільш популярних класичних методів прийняття рішень для багатокритерійних задач. Кожен з них вже давно став вважатися класичним, але вони не перестають вдосконалюватися та змінюватися. Саме тому було обрано провести дослідження можливості комбінації методів TOPSIS та DEMATEL. Адже при роботі у сфері медицини, ми не можемо покладатися на компроміс до найкращого рішення. Нам необхідно знати як критерії впливають один на одного – це забезпечить метод DEMATEL. А модифікований TOPSIS використає цей вплив, щоб скорегувати ранжування альтернатив.

3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЕСПЕРТНОГО ОЦІНЮВАННЯ ВАКЦИН ВІД COVID-19

На момент написання кваліфікаційної роботи, в світі вже майже два роки вирує вірус COVID-19. Його стрімке розповсюдження, заразність та ризик смерті застав людство не готовим. Проте швидка мобілізація вчених з усього світу призвела до неможливого – всього за рік були розроблені перші дієві вакцини від даного захворювання. А зараз кількість приватних компаній та держав, що продовжують розробляти нові вакцини та покращувати старі налічується десятками.

Питання вибору найкращої для себе особисто, чи закупівлі для цілої країни стоїть гостро як ніколи. Проте досліджуючи останні публікації було відкрито, що вони роблять оцінки досить поверхнево. Автори не використовують жоден з методів багатокритерійного прийняття рішень, хоча кожна з вакцин має велику кількість складних для оцінки та порівняння критеріїв. Ба навіть більше – автори порівнюють лише дві найбільш популярні вакцини без сильного висновку яка краща, або добирають якусь третю невідому, та на її фоні прославляють перші дві.

Такий підхід є неприйнятним, тому для дослідження обраного методу багатокритерійного прийняття рішення було обрано створити модель експертних оцінок вакцин.

3.1 Створення інформаційної бази

Будь-яка багатокритерійна задача має певні вимоги до даних, що будуть оброблені для знаходження рішення. Набір даних повинен містити набір альтернатив, серед яких буде обиратися найкраща або вони будуть впорядковані, та набір критеріїв за якими буде можливе порівняння альтернатив.

В якості альтернатив необхідно обрати вакцини які будуть досліджуватися. Незважаючи, що зараз зареєстровано більше двох десятків різних вакцин, ми не будемо досліджувати кожен з них. Навіть, без допомоги методу ELECTRE, ми

можемо відкинути більшість з них, за параметром розповсюдженості та відкритості.

Користуючись відкритими ресурсами, що збирають статистичні данні про вакцини, було обрано вісім найбільш розповсюджених, популярних та відкритих вакцин. Перелік їх назв та компаній виробників наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Перелік обраних вакцин

Назва вакцини	Компанія виробник
BNT162b2	Pfizer/BioNTech
mRNA1273	Moderna
Gam-COVID-vac	НІЦЕБ ім. Н.Ф. Гамалії
Ad26.COV2.S	Johnson & Johnson
ChAdOx1-S	Astra Zeneca
BBIBP-CoV	Sinopharm
CoronaVac	Sinovac Biotech
NVX-CoV2373	Novavax

Були обрані як найбільш популярні вакцини від Pfizer та Moderna, так і менш відомі вакцини створені в Америці та Азії. Також, незважаючи на скандальність та світову недовіру до вакцини «Спутник V», вона також буда додана до списку, адже посідає не останні місце за кількістю проведених щеплень [8].

Тепер коли набір альтернатив сформований, необхідно створити набір критеріїв. Звичайно, як будь-який медичний препарат, кожна з вакцин має сотні параметрів, що характеризують їх. Проте більшість з них є зрозумілою лише для вузького кола вчених, що розроблюють їх. Тому було обрано сконцентрувати увагу на характеристиках, що є найбільш часто зазначені у статтях які описують вакцини та порівнюють їх.

Першими такими, суто медичними, критеріями стали «тип вакцини» та «технологічна платформа». Ці параметри дозволяють експертам відразу оцінити загальну ідею створення вакцини. А також легко порівняти їх між собою.

Так Pfizer та Moderna за типом є РНК-вакцинами [24], тобто на основі рибонуклеїнової кислоти. Її діюча частина кодує білок, який характерний для патогенна. Також в таких вакцинах присутня ліпідна оболонка, що захищає РНК від руйнування і забезпечує проникнення у клітину. При потраплянні до клітини, в ній запускаються механізми синтезу білків, що діють як антиген. Завдяки цьому в організмі формується імунітет, який надалі зможе знищувати інфекційний патоген, не даючи розвинути захворінню.

Вакцина «Спутник V» та деякі інші належать до типу векторно рекомбінаторних вакцин. У них використовується модифікований вірус, що має вмонтовану «інструкцію» для продукції специфічного білка вірусу [9]. Імунна система людини розпізнає такий білок як ворожий і виробляє антитіла та Т-клітини до нього. Так організм навчають захищатися від вірусу.

Іншим підходом для створення вакцині став Інактивований підхід. Такі вакцини містять в своєму складі знешкоджений вірус, який не може розмножуватися і спричинити захворювання організму. Проте на нього реагує імунна система, що починає виділення антитіл та Т-клітин. Це є один із провідних типів вакцин у світі. Наразі успішно використовуються інактивовані вакцини від грипу, кашлюка, сказу, енцефаліту та поліомієліту [10].

Таблиця 3.2

Типи та Технологічні платформи вакцин

Назва вакцини	Тип вакцини	Технологічна платформа
BNT162b2	РНК-вакцина	Ліпідні наночастні з мРНК
mRNA1273	РНК-вакцина	Ліпідні наночастні з мРНК
Gam-COVID-vac	Векторна рекомбінаторна вакцина	Аденовірусні вектори Ad26 і Ad5, містящі домішку гена S-білка вірусу SARS-CoV-2

Продовж. Табл. 3.2

Назва вакцини	Тип вакцини	Технологічна платформа
Ad26.COVS.S	Векторна рекомбінаторна вакцина	Аденовірусні вектор Ad26, містять домішку гена S-білка вірусу SARS-CoV-2
ChAdOx1-S	Векторна рекомбінаторна вакцина	Аденовірусні вектор ChAdOx1 nCoV-19, містять домішку гена S-білка вірусу SARS-CoV-2
BBIBP-CorV	Інативована вакцина	Інативований вірус SARS-CoV-2
CoronaVac	Інативована вакцина	Інативований вірус SARS-CoV-2
NVX-CoV2373	Субодинична білкова вакцина	Рекомбінаторний S-білок вірусу SARS-CoV-2, наночатки з ад'ювантом

Таблиця 3.2 показує, що не існує переваги одного типу вакцин над іншими, і приклад того, що основні світові вакцини рівномірно розподілені за типами та технологічними платформами – вказую на здатність до конкуренції кожного з підходів до вирішення проблеми [11].

Наступний критерій для оцінки вакцини є «кількість введень», тобто кількість ін'єкцій необхідних для закріплення дії вакцини. Це важливий показник з низки причин.

По-перше, багато людей похилого віку, які знаходяться у зоні підвищеного ризику смерті від вірусу, потребують меншої кількості ін'єкцій, адже це пришвидшує розвиток імунітету до захворювання.

По-друге, кожна ін'єкція – це відвідування лікарні, тобто місці підвищеного ризику заразитися вірусом.

По-третє, необхідність зберігання вакцин. Звичайно, як будь-яка органічна продукція у вакцин є строк придатності за який їх необхідно використати. Але це не головний чинник. Деякі з вакцин потребують над низьких температур зберігання. Тому «температура зберігання» також є критерієм оцінки вакцини. Бо не кожна лікарня має змогу зберігати вакцини при -70 градусів за Цельсієм. Нижче наведена таблиця з відповідністю кількості ін'єкцій та температури зберігання.

Таблиця 3.3

Кількість ін'єкцій та температура зберігання вакцин

Назва вакцини	Кількість ін'єкцій	температура зберігання
BNT162b2	2	-70°
mRNA1273	2	-20°
Gam-COVID-vac	2	-18°
Ad26.COVS.S	1	-20°
ChAdOx1-S	2	$2^{\circ}-8^{\circ}$
BBIBP-CorV	2	$2^{\circ}-8^{\circ}$
CoronaVac	2	$2^{\circ}-8^{\circ}$
NVX-CoV2373	2	$2^{\circ}-8^{\circ}$

Одним з най важливіших критеріїв безумовно є ефективність вакцини. Який сенс обирати ліки, які не мають жодного ефекту. Для оцінки ефективності використовують результати третьої фази клінічних дослідів, коли велика кількість людей отримує ін'єкцію вакцини або плацебо, та не знає що отримав. Дослідження кількості захворівших в кожній з груп формує відсоток ефективності вакцини(Таблиця 3.4) [12].

Ще одним важливим критерієм для оцінки якості вакцини є наявність та тяжкість побічних ефектів [16]. Напевно, це найскладніший для оцінки та дослідження критерій. Деякі компанії, що випускають вакцини самі надають перелік таких ефектів, інші пишуть про лише незначні, тимчасові ефекти, а дослідження журналістів та незалежних експертів вказують на важкі форми.

Тому в супровідних матеріалах були надані окремі частини знайдених та опрацьованих статей визнаних науковців та посилання на них. Ознайомившись з ними експерти зможуть оцінити кожену вакцину [13].

Таблиця 3.4

Дослідження ефективності вакцин під час 3 фази клінічних дослідів

Назва вакцини	Ефективність	Кількість учасників	Кількість хворих в групі вакцинованих/плацебо
BNT162b2	95%	43548	8/162
mRNA1273	94%	30420	11/185
Gam-COVID- vac	92%	19886	16/62
Ad26.COV2.S	66%	43783	66/193
ChAdOx1-S	70,4%	11636	30/101
BBIBP-CorV	79%	27530	21/95
CoronaVac	50,7%	12396	85/168
NVX- CoV2373	89,7%	15187	10/96

Наступні критерії менше відносяться до медичних показників вакцин, але є не менш важливими. Це – кількість вакцинованих, та країни застосування. Такі статистичні показники безумовно необхідні для оцінки альтернатив.

Таблиця 3.5

Кількість вакцинованих та кількість країн

Назва вакцини	Кількість вакцинованих	Кількість країн
BNT162b2	1 074 300 930	146
mRNA1273	354 742 103	81
Gam-COVID-vac	1 845 067	59
Ad26.COV2.S	37 811 275	83
ChAdOx1-S	102 155 886	180

Продовж. табл. 3.5

Назва вакцини	Кількість вакцинованих	Кількість країн
BBIBP-CorV	21 257 414	87
CoronaVac	56 824 615	47
NVX-CoV2373	Немає даних	31

Звичайно неможливо надати в таблиці 3.5 перелік кожної країни де застосована та чи інша вакцина, але навіть кількісні показники вказують на сферу охоплення світу тією чи іншою вакциною [14]. У матеріалах, що були надані експерти, наведені повні переліки країн. Таким чином можна оцінити, Gam-COVID-vac за кількістю країн як міцного середняка, але придивившись до списку цих країн все стее менш привабливо. Серед 59 країн лише декілька мають сильну економіку, в той час як більшість є країнами з низьким показником рівня життя та ВВП [15].

Критерій «Кількість вакцинованих» є дуже важливим, з причини своєї наочності. Це не абстрактний параметр який важко уявити. Він досить просто може бути представлений у графічному виді (рис 3.1).

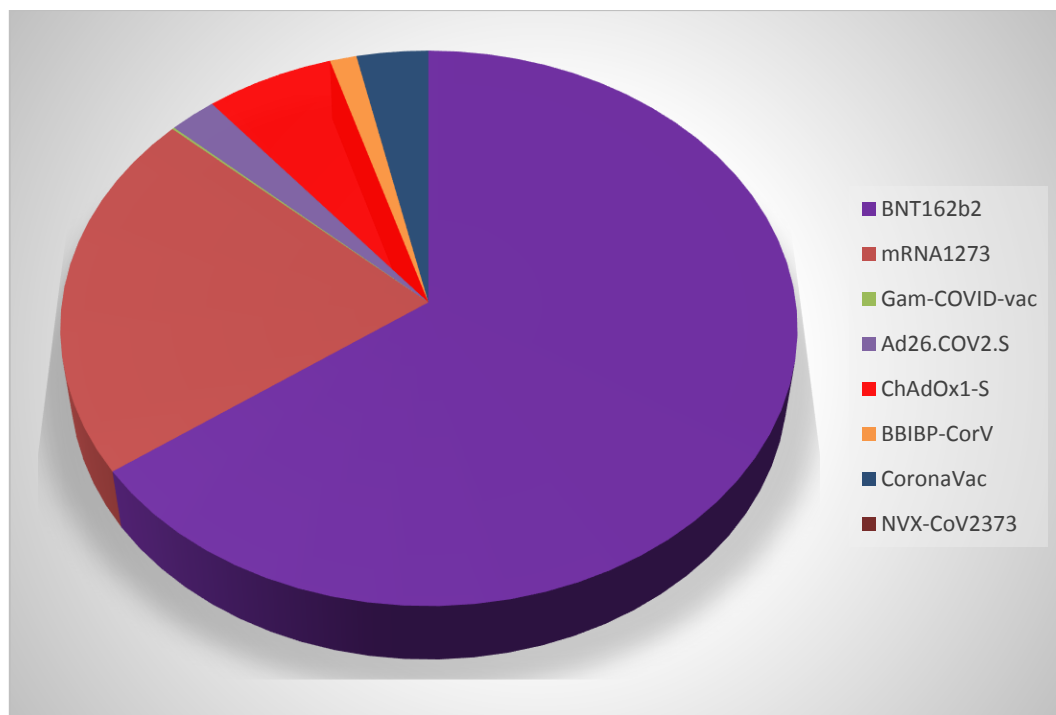


Рис. 3.1. Кругова діаграма кількості вакцинованих

Діаграма наочно показує перевагу двох вакцин над усіма іншими. Якщо додатково взяти до уваги, що обрано 8 найбільш вживаних вакцин, то стає зрозуміло наскільки їх частка від загальної частини вакцинованих.

3.2 Створення набору експертних оцінок

Створення будь-якої системи експертних оцінок починається з підбору лінгвістичних термів якими експерти будуть оцінювати альтернативи та критерії. Нажаль через комбінацію двох різних методів вирішення багатокритерійних задач, ми не можемо використати один універсальний набір термів, адже лінгвістичні терми для методів DEMATEL та TOPSIS мають не тільки різні області значень, ай інформаційне навантаження.

Для попарного порівняння важливості критеріїв, що буде оброблено методом fuzzy DEMATEL, були обрані лінгвістичні терми наведені в таблиця 3.6. Оскільки вибір вакцин є глобальним питанням, то для створення можливості оцінки зарубіжними експертами були наведені назви як українською, так и англійською мовами [34].

Таблиця 3.6

Набір лінгвістичних термів для попарного порівняння критеріїв

Назва терму	Term Name	Лінгвістичні значення
Дуже сильний вплив	Very high influence (VH)	(0.75,1,1)
Великий вплив	High influence (H)	(0.5,0.75,1)
Низький вплив	Low Influence (L)	(0.25,0.5,0.75)
Дуже низький вплив	Very low Influence (VL)	(0,0.25,0.5)
Відсутність впливу	No Influence (NO)	(0,0,0.25)

Таким чином експертам було запропоновано попарно оцінити шість обраних критеріїв. Оскільки в ході виконання дипломної роботи, не вдалося залучити провідних експертів для оцінки альтернатив. І довелося користуватися послугами лікарів місцевих поліклінік та лікарень, було обрано не

використовувати всі критерії, адже для оцінки деяких з них необхідна вузькоспеціалізована компетенція. Тому перелік критеріїв, що необхідно оцінити експертам має такий вигляд:

1. Ефективність вакцини;
2. Необхідна температура зберігання;
3. Кількість учасників клінічних дослідів 3 фази;
4. Кількість країн;
5. Кількість вакцинованих;
6. Виявлений побічний вплив.

Кожен з експертів заповнив таблицю порівнянь для методу DEMATEL. Нижче наведена заповнена таблиця першого експерта (рис. 3.2).

	Ефективність вакцини;	Необхідна температура зберігання;	Кількість учасників клінічних дослідів 3 фази;	Кількість країн;	Кількість вакцинованих;	Виявлений побічний вплив.
Ефективність вакцини;	0	L	NO	H	NO	NO
Необхідна температура зберігання;	L	0	L	VL	L	L
Кількість учасників клінічних дослідів 3 фази;	NO	L	0	H	NO	NO
Кількість країн;	VL	H	VL	0	VL	VL
Кількість вакцинованих;	NO	L	NO	H	0	NO
Виявлений побічний вплив.	NO	L	NO	H	NO	0

Рис. 3.2. Оцінки критеріїв першим експертом

Аналогічно кожен наступний експерт оцінив всі критерії.

Для оцінки альтернатив за кожним критерієм для методу TOPSIS були обрані такі лінгвістичні терми (таблиця 3.7).

Таблиця 3.7

Набір лінгвістичних термів для попарного порівняння альтернатив

Назва терму	Term Name	Лінгвістичні значення
Дуже погано	Very poor (vp)	(1,1,3)
Погано	Poor (p)	(1,3,5)
Нормально	Fair (f)	(3,5,7)
Добре	Good (g)	(5,7,9)
Дуже добре	Very good (vg)	(7,9,9)

Кожен експерт отримав бланк з альтернативами та критеріями за якими їх необхідно оцінити. Нижче наведено рисунок, що зображує шаблон бланку оцінок (рис. 3.3).

	Ефективність	Температура зберігання	Кількість учасників клінічних дослідів 3 фази	Кількість країн	Кількість Вакцинованих	Побочний вплив
BNT162b2						
mRNA1273						
Gam-COVID-vac						
Ad26.COV2.S						
ChAdOx1-S						
BBIBP-CorV						
CoronaVac						
NVX-CoV2373						

Рис. 3.3. Шаблон оцінок альтернатив

Також, для кожного експерта була створена табличка для оцінок критеріїв. Звичайно, основне оцінювання критеріїв буде виконуватися за методом DEMATEL, але для створення базового розрахунку, необхідно виконати розрахунки за класичним методом TOPSIS. Тоді можна буде порівнювати досліджені результати з ним, як з базисом (рис. 3.4).

	Оцінка
тип вакцини	
Технологічна платформа	
Ефективність	
Температура зберігання	
Кількість учасників клінічних дослідів 3 фази	
Кількість країн	
Кількість Вакцинованих	
Побочний вплив	

Рис. 3.4. Шаблон оцінок критеріїв

Таким чином всі експерти проведуть оцінювання альтернатив та критеріїв і в результаті ми отримаємо наступну експертну систему (рис. 3.5).

	Критерії					BNT162b2					mRNA1273				
	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3	Експерт 4	Експерт 5	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3	Експерт 4	Експерт 5	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3	Експерт 4	Експерт 5
Ефективність	vg	vg	vg	g	vg	vg	vg	vg	vg	vg	vg	vg	vg	vg	vg
Температура зберігання	f	f	p	f	g	vp	vp	p	vp	f	p	f	vg	f	g
Кількість учасників клінічних дослідів 3 фази	vg	vg	g	f	f	vg	g	g	g	vg	vg	vg	g	vg	g
Кількість країн	g	g	f	p	f	vg	vg	g	vg	vg	g	g	f	vg	f
Кількість Вакцинованих	vg	vg	f	vg	f	vg	vg	vg	vg	vg	vg	g	vg	g	g
Побочний вплив	vg	vg	vg	g	vg	vp	f	g	f	p	vp	f	p	g	p
	Ad26.COV2.S					ChAdOx1-S					BBIBP-CorV				
	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3	Експерт 4	Експерт 5	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3	Експерт 4	Експерт 5	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3	Експерт 4	Експерт 5
Ефективність	g	g	vp	f	p	g	f	p	p	f	g	g	f	f	g
Температура зберігання	p	g	vg	g	g	vg	vg	f	g	vg	vg	vg	f	vg	vg
Кількість учасників клінічних дослідів 3 фази	vg	g	g	g	vg	f	p	p	vp	vp	g	g	g	vg	g
Кількість країн	g	g	f	vg	f	vg	vg	g	vg	vg	p	p	f	p	f
Кількість Вакцинованих	p	p	p	p	vp	g	g	f	vg	g	p	p	g	vp	p
Побочний вплив	vg	vg	f	vg	g	vg	vg	f	vg	g	g	g	vp	vg	vp
	Gam-COVID-vac					NVX-CoV2373					CoronaVac				
	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3	Експерт 4	Експерт 5	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3	Експерт 4	Експерт 5	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3	Експерт 4	Експерт 5
Ефективність	vg	g	vg	vg	vg	vg	vg	vg	vg	g	g	vp	vp	p	vp
Температура зберігання	p	g	vg	vg	g	vg	vg	f	vg	vg	vg	vg	f	vg	vg
Кількість учасників клінічних дослідів 3 фази	g	g	f	f	p	f	f	f	g	p	f	f	p	f	p
Кількість країн	p	p	p	p	p	p	p	p	vp	vp	p	vp	p	vp	p
Кількість Вакцинованих	vp	vp	vp	p	p	vp	vp	vp	p	vp	p	p	f	vp	f
Побочний вплив	vg	g	f	f	g	g	vp	f	p	f	g	g	f	vg	f

Рис. 3.5. Всі експертні оцінки

Даний датасет є повним для виконання пошуку кращого рішення за більшістю методів багатокритерійного прийняття рішень.

Висновки до розділу 3

В даному розділі був проведений докладний опис моделі експертних оцінок для вибору найкращої вакцини. Були досліджені фактори, що впливають на якість вакцин. Створено датасет з експертними оцінками, що підготовлений для розрахунку за методами TOPSIS та DEMATEL.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНОГО FUZZY TOPSIS-DEMATEL

Методи fuzzy TOPSIS та DEMATEL мають набір спільних ра різних ознак. Так вони обидва для вирішення багатокритерійної задачі з пошуку найкращого рішення використовують вхідні дані в форматі набору експертних оцінок. Мають схожу структуру лінгвістичних термів, хоч і числове представлення у них різне. Проте першою, та найменшою різницею між методами є спосіб оцінки експертами. Експерти, працюючи з методом fuzzy DEMATEL оцінюють лише критерії і роблять це попарно, а не відносно загальної картини.

Отже якщо метод fuzzy DEMATEL працює лише з критеріями, то як поєднати його з методом fuzzy TOPSIS. І в чому перевага роботи з комбінованим TOPSIS- DEMATEL

Головною перевагою є додаткове дослідження причино-наслідкових зав'язків у формуванні критеріїв. Адже метод fuzzy TOPSIS, сфокусований на винайдені найкращого рішення, не надає додаткової інформації про критерії. В той час як fuzzy DEMATEL результатом розрахунків представляє два набори даних, що розбивають критерії на причини та наслідки, а також оцінюють ступені їх важливості. Саме ця додаткова інформація, що може бути вбудована в розрахунки fuzzy TOPSIS, може покращити пошук найкращого рішення.

4.1 Дослідження класичних алгоритмів fuzzy TOPSIS та DEMATEL

Для проведення дослідження варіантів комбінації TOPSIS-DEMATEL, необхідно розібратися з класичними варіантами роботи даних методів, та створити моделі злиття методів.

4.1.1 Метод fuzzy DEMATEL

Метод DEMATEL (Лабораторія випробувань та оцінки рішень), розроблений програмою науки та людських справ Інституту меморіалу Батле в Женеві між 1972 та 1976 роками, використовувався для дослідження та вирішення складних та взаємопов'язаних проблемних груп. DEMATEL є одним

із багатокритеріальних інструментів прийняття рішень і має можливість перетворити якісні конструкції на кількісний аналіз [35].

Метод DEMATEL широко застосовувався для вилучення проблемної структури складної проблематики. Метою DEMATEL є перетворення співвідношення між критеріями, причинно-наслідковими вимірами із складної системи в зрозумілу структурну модель цієї системи. Він може чітко бачити причинно-наслідкові зв'язки критеріїв при вимірюванні проблеми.

Кінцевим продуктом процесу DEMATEL є візуальне зображення індивідуальної розумової карти, за допомогою якої респондент організовує власні дії у світі. Він може чітко бачити причинно-наслідковий зв'язок критеріїв при вимірюванні проблеми. Він зображує основну концепцію контекстного відношення між елементами системи, в якій числівник відображає силу впливу [37].

Fuzzy DEMATEL використовується у багатьох дослідженнях, враховуючи той факт, що людське судження про переваги часто незрозуміле і важко оцінити за точними числовими значеннями [1].

Далі розглянемо та проаналізуємо метод fuzzy DEMATEL.

Крок 1: Визначення мети прийняття рішення.

Прийняття рішення - це процес визначення цілей рішення, збору відповідної інформації, генерації найширшого можливого набору альтернатив, оцінки альтернатив щодо переваг та недоліків, вибору оптимальної альтернативи та контролю результатів для забезпечення досягнення цілей рішення.

Крок 2: Розробка критеріїв оцінки та нечіткої лінгвістичної шкали.

На цьому кроці визначаються критерії які будуть дослідженні. Лінгвістичні змінні набувають значень, визначених у його наборі термінів - наборі мовних термінів. У дослідженні розглядається наступні лінгвістичні змінні: відсутність впливу, дуже низький вплив, низький вплив, великий вплив і дуже сильний вплив, більше інформації у таблиці 3.6.

Крок 3: Отримання та усереднення оцінок.

На цьому кроці експерти роблять набори попарних порівнянь з точки зору впливу та напрямку в межах необхідних критеріїв, що є матрицею $n \times n \hat{Z}$ при $\tilde{a}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ позначається як ступінь впливу критерію i на критерій j для експертів. Для вимірювання зв'язку між критеріями $\{C_i \mid i = 1, 2, \dots, n\}$, групі експертів з питань прийняття рішень було запропоновано провести набори парних порівнянь з точки зору лінгвістичних термінів. Отже, p нечітких матриць $\hat{Z}^1, \hat{Z}^2, \dots, \hat{Z}^p$, кожна відповідає експерту. середня матриця, позначена як \hat{Z} :

$$\hat{Z} = \left(\frac{\hat{Z}_1 \oplus \hat{Z}_2 \oplus \dots \oplus \hat{Z}_p}{p} \right) \quad (4.1)$$

де \hat{Z} – матриця середніх значень; \hat{Z}_1 – матриця оцінок певного експерта; p – кількість експертів.

Нечітка матриця \hat{Z} , називається нечіткою матрицею прямого відношення. Для простоти зображемо \hat{Z} як:

$$\tilde{Z} = \begin{matrix} & \begin{matrix} c_1 & c_2 & \dots & c_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & \tilde{Z}_{12} & \dots & \tilde{Z}_{1n} \\ \tilde{Z}_{21} & 0 & 0 & \tilde{Z}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{Z}_{n1} & \tilde{Z}_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4.2)$$

Експертам було запропоновано вказати вплив кожного зв'язку між критеріями за допомогою опитувальника. Обчислюючи середнє арифметичне відгуку експертів для узагальнення думок експертів, ми отримуємо нечітку матрицю прямих зв'язків \hat{Z} (рис. 4.1).

	efficiency	temperature	num. of studies	countries	vaccinated	side effects
Fuzzy matrix of direct rela...						
efficiency	[0 0 0]	[0,55 0,8 0,95]	[0,3 0,55 0,7]	[0,2 0,45 0,7]	[0,55 0,8 0,95]	[0,5 0,75 0,95]
temperature	[0,4 0,65 0,8]	[0 0 0]	[0,25 0,45 0,7]	[0,35 0,55 0,8]	[0,4 0,6 0,75]	[0,5 0,75 0,9]
num. of studies	[0,25 0,5 0,7]	[0,6 0,85 0,95]	[0 0 0]	[0,4 0,6 0,8]	[0,5 0,75 0,95]	[0,55 0,8 0,95]
countries	[0,45 0,65 0,75]	[0,35 0,6 0,75]	[0,2 0,4 0,65]	[0 0 0]	[0,15 0,35 0,6]	[0,6 0,85 0,95]
vaccinated	[0,55 0,8 0,9]	[0,65 0,9 0,95]	[0,45 0,7 0,9]	[0,65 0,9 1]	[0 0 0]	[0,5 0,75 1]
side effects	[0,2 0,35 0,55]	[0,75 1 1]	[0,4 0,65 0,8]	[0,35 0,6 0,85]	[0,4 0,65 0,85]	[0 0 0]

Рис. 4.1. Узагальнена матриця оцінок

Крок 4: Отримати нормалізовану нечітку матрицю прямого відношення

Після створення матриці прямого відношення як попереднього кроку, ми можемо продовжити нормалізацію матриці прямого напрямку. Нормалізовану матрицю прямого відношення можна отримати за формулами (4.3).

$$\tilde{a}_i = \sum \hat{Z}_{ij} = (\sum l_{ij}, \sum m_{ij}, \sum u_{ij}) \text{ and } r = \max_{1 \leq i \leq n} \sum u_{ij} \quad (4.3)$$

де \tilde{a}_i – вектор суми; \hat{Z}_{ij} – елемент матриці оцінок; l_{ij}, m_{ij}, u_{ij} – математичне представлення трикутного числа; r – максимальне значення.

efficiency	[0 0 0]	[0,1158 0,1684 0,2]	[0,0632 0,1158 0,1474]	[0,0421 0,0947 0,1...	[0,1158 0,1684 0,2]	[0,1053 0,1579 0,2]
temperature	[0,0842 0,1368 0,16...	[0 0 0]	[0,0526 0,0947 0,1474]	[0,0737 0,1158 0,1...	[0,0842 0,1263 0,1579]	[0,1053 0,1579 0,1895]
num. of studies	[0,0526 0,1053 0,14...	[0,1263 0,1789 0,2]	[0 0 0]	[0,0842 0,1263 0,1...	[0,1053 0,1579 0,2]	[0,1158 0,1684 0,2]
countries	[0,0947 0,1368 0,15...	[0,0737 0,1263 0,1...	[0,0421 0,0842 0,1368]	[0 0 0]	[0,0316 0,0737 0,1263]	[0,1263 0,1789 0,2]
vaccinated	[0,1158 0,1684 0,18...	[0,1368 0,1895 0,2]	[0,0947 0,1474 0,1895]	[0,1368 0,1895 0,2...	[0 0 0]	[0,1053 0,1579 0,2105]
side effects	[0,0421 0,0737 0,11...	[0,1579 0,2105 0,2...	[0,0842 0,1368 0,1684]	[0,0737 0,1263 0,1...	[0,0842 0,1368 0,1789]	[0 0 0]

Рис. 4.2. Нормована матриця оцінок

Нормована матриця нечітких прямих відношень X отримується діленням матриці нечітких прямих зв'язків на r .

Крок 5: Отримання нечіткої матриці повних відношень

Як тільки буде отримана нормалізована матриця прямого відношення X , матриця загальних відношень T може бути отримана за допомогою наступних формул:

$$[l_{ij}'''] = X_l \times (1 - X_l)^{-1} \quad (4.4)$$

$$[m_{ij}'''] = X_m \times (1 - X_m)^{-1} \quad (4.5)$$

$$[u_{ij}'''] = X_u \times (1 - X_u)^{-1} \quad (4.6)$$

де $l_{ij}''', m_{ij}''', u_{ij}'''$ – елементи трикутного числа; X – нормована матриця нечітких прямих відношень.

Fuzzy matrix of complete ...							
efficiency	[-0,0349 -0,0882 -0,...	[0,0722 0,0706 0,0...	[0,0355 0,0454 0,0261]	[0,0047 0,0088 0,0...	[0,0892 0,1003 0,0845]	[0,0683 0,0683 0,0611]	
temperature	[0,0603 0,0781 0,06...	[-0,05 -0,1118 -0,1...	[0,0274 0,0289 0,0377]	[0,0464 0,047 0,05...	[0,0577 0,0582 0,0396]	[0,0721 0,0797 0,0594]	
num. of studies	[0,017 0,0245 0,026]	[0,0813 0,0799 0,0...	[-0,0332 -0,0861 -0,1...	[0,0498 0,0444 0,0...	[0,0761 0,0852 0,0819]	[0,0752 0,076 0,0568]	
countries	[0,0773 0,0851 0,06...	[0,0331 0,0366 0,0...	[0,0186 0,0211 0,0327]	[-0,0266 -0,0748 -...	[-0,0007 -0,0031 0,0066]	[0,1004 0,1116 0,0845]	
vaccinated	[0,0819 0,0894 0,07...	[0,0848 0,0776 0,0...	[0,0656 0,0724 0,0678]	[0,1061 0,113 0,07...	[-0,0481 -0,1111 -0,1716]	[0,0504 0,0427 0,0547]	
side effects	[0,0076 -0,0099 -0,...	[0,1254 0,1317 0,0...	[0,0622 0,0776 0,0619]	[0,0417 0,0517 0,0...	[0,0548 0,0669 0,0663]	[-0,049 -0,1121 -0,1702]	

Рис. 4.3. Матриця прямого відношення

Крок 6: Складання причинно-наслідкової діаграми

Сума рядків і сума стовпців нечіткої матриці загальних відношень позначаються як вектор D і вектор R . Вектор горизонтальної осі ($D + R$) з назвою "Визначеність" створюється додаванням D до R , що представляє, наскільки важливим є критерій [39].

Подібним чином, вертикальна вісь ($D-R$) - з назвою "Відношення" отримується шляхом віднімання D від R , що може розділити критерії на групу причин та групу наслідків

Повна матриця відносин включає прямі та непрямі ефекти. Як правило, якщо значення ($D-R$) позитивне, критерій належить до групи причин. Якщо значення ($D-R$) - від'ємне, критерій належить до групи ефектів. Діаграму можна отримати, відобразивши значення $((D + R), (D-R))$. Отже, причинно-наслідкові діаграми можуть візуалізувати ускладнені причинно-наслідкові зв'язки критеріїв у видиму структурну модель, надаючи цінне розуміння для вирішення проблем. Далі, за допомогою причинно-наслідкової діаграми ми можемо приймати правильні рішення, визнаючи різницю між критеріями причини та наслідку.

The sum of the influence...	R	D	D+R	D-R
efficiency	[0,2349 0,2051 0,1081]	[0,2092 0,1791 0,0822]	[0,4441 0,3842 0,1904]	[0,1011 -0,026 -0,1527]
temperature	[0,214 0,1801 0,0953]	[0,3469 0,2845 0,1336]	[0,5609 0,4646 0,2289]	[0,2516 0,1045 -0,0803]
num. of studies	[0,2661 0,2239 0,1159]	[0,176 0,1592 0,0804]	[0,4421 0,3832 0,1963]	[0,0601 -0,0647 -0,1857]
countries	[0,2022 0,1764 0,0842]	[0,222 0,1901 0,1022]	[0,4243 0,3665 0,1864]	[0,1378 0,0137 -0,1001]
vaccinated	[0,3407 0,2839 0,1471]	[0,2291 0,1963 0,1073]	[0,5699 0,4802 0,2544]	[0,082 -0,0875 -0,2335]
side effects	[0,2428 0,206 0,1014]	[0,3175 0,266 0,1464]	[0,5602 0,472 0,2478]	[0,2161 0,0601 -0,0964]

Рис. 4.4. Нечіткі результати розрахунків

Метод найкращої нечіткої продуктивності (BNP) використовується для значень (D-R) і (D + R). Значення BNP для трикутного нечіткого числа $a = (l, m, u)$ можна обчислити як:

$$BNP = l + \frac{(u-l)+(m-l)}{3} \quad (4.7)$$

де BNP – чітке представлення трикутного числа; l, m, u – елементи трикутного числа.

The sum of the influence...	def(D+R)	def(D-R)
efficiency	0.325724838411...	-0.0796675900...
temperature	0.339538319482...	-0.0634533702...
num. of studies	0.340535549399...	-0.0258910433...
countries	0.418134810710...	0.01717451523...
vaccinated	0.426666666666...	0.05990766389...
side effects	0.434829178208...	0.09192982456...

Рис. 4.5. Продиференційовані результати розрахунків

Нарешті, діаграма взаємозв'язків малюється шляхом побудови значень координат кожного критерію в графік розсіювання з горизонтальною віссю (D+R) і вертикальною віссю (D-R).

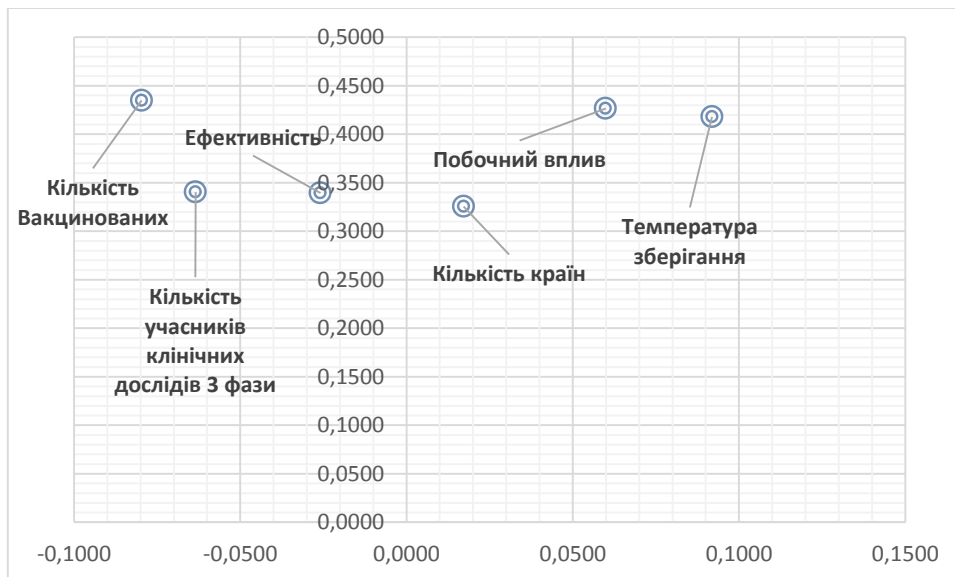


Рис. 4.6. Діаграма взаємозв'язків

Результати діаграми взаємозв'язків, досить цікава. Виходячи з оцінок критеріїв нашими експертами – кількість країн, побічний вплив і температура зберігання є критеріями причин, а ефективність, кількість вакцинованих та учасників 3 фази клінічних дослідів – наслідками. В той же час найбільший вплив мають: побічний вплив, температура зберігання та ефективність. Ці результати повинні допомогти покращити розрахунки методу fuzzy TOPSIS [40].

4.1.2 Метод fuzzy TOPSIS

Метод fuzzy TOPSIS – Техніка упорядкування переваги за подібністю до ідеального рішення, відноситься до методів багатокритерійного прийняття рішення. Він був розроблений Чай-Лай Хвангом та Юаном у 1981 році. Метод базується на ідеї, що краща альтернатива повинна мати найменшу геометричну відстань від позитивного ідеального рішення (PIS) і найбільшу відстань від ідеального негативного рішення (NIS).

TOPSIS – метод компенсаційного агрегування. Припущенням методу TOPSIS є ідея, що критерії є величинами монотонного збільшення або зменшення. Зазвичай в ході роботи методу вимагається нормалізація значень [41].

Метода TOPSIS дозволяє знаходити компроміси між критеріями у випадку неможливості виокремити один найкращий результат. Це забезпечує більш реалістичну модель прийняття рішень, ніж у методах заснованих на жорстких обмеженнях [42].

Крок 1: Оцінка критеріїв та альтернатив

Для оцінки альтернатив та критеріїв методом TOPSIS використовуються наперед передбачені лінгвістичні терми. Зазвичай, значення таких термів знаходиться в межах від 1 до 9. Інтервали між термами обираються, щоб мати однорідну щільність оцінок [43].

Результати оцінок критеріїв та альтернатив у обраній лінгвістичній формі наведено на рисунку 4.7.

	Критерії					BNT162b2					mRNA1273				
	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3	Експерт 4	Експерт 5	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3	Експерт 4	Експерт 5	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3	Експерт 4	Експерт 5
Ефективність	vg	vg	vg	g	vg	vg	vg	vg	vg	vg	vg	vg	vg	vg	vg
Температура зберігання	f	f	p	f	g	vp	vp	p	vp	f	p	f	vg	f	g
Кількість учасників клінічних дослідів 3 фази	vg	vg	g	f	f	vg	g	g	g	vg	vg	vg	g	vg	g
Кількість країн	g	g	f	p	f	vg	vg	g	vg	vg	g	g	f	vg	f
Кількість Вакцинованих	vg	vg	f	vg	f	vg	vg	vg	vg	vg	vg	g	vg	g	g
Побочний вплив	vg	vg	vg	g	vg	vp	f	g	f	p	vp	f	p	g	p
	Ad26.COV2.S					ChAdOx1-S					BBIBP-CorV				
	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3	Експерт 4	Експерт 5	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3	Експерт 4	Експерт 5	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3	Експерт 4	Експерт 5
Ефективність	g	g	vp	f	p	g	f	p	p	f	g	g	f	f	g
Температура зберігання	p	g	vg	g	g	vg	vg	f	g	vg	vg	vg	f	vg	vg
Кількість учасників клінічних дослідів 3 фази	vg	g	g	g	vg	f	p	p	vp	vp	g	g	g	vg	g
Кількість країн	g	g	f	vg	f	vg	vg	g	vg	vg	p	p	f	p	f
Кількість Вакцинованих	p	p	p	p	vp	g	g	f	vg	g	p	p	g	vp	p
Побочний вплив	vg	vg	f	vg	g	vg	vg	f	vg	g	g	g	vp	vg	vp
	Gam-COVID-vac					NVX-CoV2373					CoronaVac				
	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3	Експерт 4	Експерт 5	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3	Експерт 4	Експерт 5	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3	Експерт 4	Експерт 5
Ефективність	vg	g	vg	vg	vg	vg	vg	vg	vg	g	g	vp	vp	p	vp
Температура зберігання	p	g	vg	vg	g	vg	vg	f	vg	vg	vg	vg	f	vg	vg
Кількість учасників клінічних дослідів 3 фази	g	g	f	f	p	f	f	f	g	p	f	f	p	f	p
Кількість країн	p	p	p	p	p	p	p	p	vp	vp	p	vp	p	vp	p
Кількість Вакцинованих	vp	vp	vp	p	p	vp	vp	vp	p	vp	p	p	f	vp	f
Побочний вплив	vg	g	f	f	g	g	vp	f	p	f	g	g	f	vg	f

Рис. 4.7. Результати оцінки критеріїв та альтернатив

Користуючись значеннями лінгвістичних термів, результати оцінки критеріїв та альтернатив представлених у мовній формі будуть перетворені на числове оцінювання в формі трикутних чисел (рис. 4.8).

	Критерії				
	ex1	ex2	ex3	ex4	ex5
Ефективність	7 9 9	7 9 9	7 9 9	5 7 9	7 9 9
Температура зберігання	3 5 7	3 5 7	1 3 5	3 5 7	5 7 9
Кількість учасників клінічних дослідів 3 фази	7 9 9	7 9 9	5 7 9	3 5 7	3 5 7
Кількість країн	5 7 9	5 7 9	3 5 7	1 3 5	3 5 7
Кількість Вакцинованих	7 9 9	7 9 9	3 5 7	7 9 9	3 5 7
Побочний вплив	7 9 9	7 9 9	7 9 9	5 7 9	7 9 9

Рис. 4.8. Оцінки критеріїв представлені трикутними числами

Крок 2: Усереднення оцінок критеріїв та альтернатив

Для виконання усереднення оцінок необхідно скористатися наступною формулою:

$$AVc_i = \frac{c_i^1 \oplus c_i^2 \oplus \dots \oplus c_i^n}{n} \quad (4.8)$$

де AVc_i – середнє значення i -того критерію; n – кількість експертів;
 i – номер критерію.

Критерії	BNT162b2			mRNA1273				
Середнє	Середнє			Середнє				
6,6	8,6	9	7	9	9	7	9	9
3	5	7	1,4	2,2	4,2	3,8	5,8	7,4
5	7	8,2	5,8	7,8	9	6,2	8,2	9
3,4	5,4	7,4	6,6	8,6	9	4,6	6,6	8,2
5,4	7,4	8,2	7	9	9	5,8	7,8	9
6,6	8,6	9	2,6	4,2	6,2	2,2	3,8	5,8
Gam-COVID- vac	Ad26.COVS.S			ChAdOx1-S				
Середнє	Середнє			Середнє				
6,6	8,6	9	3	4,6	6,6	2,6	4,6	6,6
5	7	8,2	4,6	6,6	8,2	5,8	7,8	8,6
3,4	5,4	7,4	5,8	7,8	9	1,4	2,6	4,6
1	3	5	4,6	6,6	8,2	6,6	8,6	9
1	1,8	3,8	1	2,6	4,6	5	7	8,6
4,6	6,6	8,2	5,8	7,8	8,6	5,8	7,8	8,6
BBIBP-CorV	CoronaVac			NVX-CoV2373				
Середнє	Середнє			Середнє				
4,2	6,2	8,2	1,8	2,6	4,6	6,6	8,6	9
6,2	8,2	8,6	6,2	8,2	8,6	6,2	8,2	8,6
5,4	7,4	9	2,2	4,2	6,2	3	5	7
1,8	3,8	5,8	1	2,2	4,2	1	2,2	4,2
1,8	3,4	5,4	1,8	3,4	5,4	1	1,4	3,4
3,8	5	6,6	4,6	6,6	8,2	2,6	4,2	6,2

Рис. 4.9. Середні оцінки критеріїв та альтернатив

Крок 3: Нормалізація значень

Виконання нормалізації значень дуже важливо для якісної роботи методу TOPSIS. Тому необхідно провести нормалізацію середніх значень, отриманих на попередньому кроці (рис. 4.10).

BNT162b2 Нормоване			mRNA1273 Нормоване			Gam-COVID-vac Нормоване			Ad26.CO2.5 Нормоване		
0,77777778	1	1	0,7777778	1	1	0,7333333	0,9555556	1	0,3333333	0,5111111	0,7333333
0,1627907	0,255814	0,488372	0,44186	0,674419	0,860465	0,581395	0,813953	0,953488	0,534884	0,767442	0,953488
0,64444444	0,866667	1	0,688889	0,911111	1	0,377778	0,6	0,822222	0,644444	0,866667	1
0,73333333	0,9555556	1	0,5111111	0,7333333	0,9111111	0,1111111	0,3333333	0,5555556	0,5111111	0,7333333	0,9111111
0,77777778	1	1	0,644444	0,866667	1	0,1111111	0,2	0,422222	0,1111111	0,288889	0,5111111
0,30232558	0,488372	0,72093	0,255814	0,44186	0,674419	0,534884	0,767442	0,953488	0,674419	0,906977	1

ChAdOx1-S Нормоване			BBIBP-CoV Нормоване			CoronaVac Нормоване			NVX-CoV2373 Нормоване		
0,288889	0,5111111	0,7333333	0,466667	0,688889	0,9111111	0,2	0,288889	0,5111111	0,7333333	0,9555556	1
0,674419	0,906977	1	0,72093	0,953488	1	0,72093	0,953488	1	0,72093	0,953488	1
0,1555556	0,288889	0,5111111	0,6	0,822222	1	0,244444	0,466667	0,688889	0,3333333	0,5555556	0,777778
0,7333333	0,9555556	1	0,2	0,422222	0,644444	0,1111111	0,244444	0,466667	0,1111111	0,244444	0,466667
0,5555556	0,777778	0,9555556	0,2	0,377778	0,6	0,2	0,377778	0,6	0,1111111	0,1555556	0,377778
0,674419	0,906977	1	0,44186	0,581395	0,767442	0,534884	0,767442	0,953488	0,302326	0,488372	0,72093

Рис. 4.10. Нормовані значення оцінок альтернатив

Крок 4: Формування матриці зважених альтернатив

Для створення матриці зважених альтернатив, необхідно виконати перемноження нормованих значень альтернатив, на середні значення оцінок критеріїв (рис. 4.11).

BNT162b2 Зважене			mRNA1273 Зважене			Gam-COVID-vac Зважене			Ad26.CO2.5 Зважене		
5,1333333	8,6	9	5,1333333	8,6	9	4,84	8,217778	9	2,2	4,3955556	6,6
0,488372	1,27907	3,418605	1,325581	3,372093	6,023256	1,744186	4,069767	6,674419	1,604651	3,837209	6,674419
3,222222	6,066667	8,2	3,444444	6,377778	8,2	1,888889	4,2	6,742222	3,222222	6,066667	8,2
2,4933333	5,16	7,4	1,737778	3,96	6,742222	0,377778	1,8	4,111111	1,737778	3,96	6,742222
4,2	7,4	8,2	3,48	6,413333	8,2	0,6	1,48	3,462222	0,6	2,137778	4,191111
1,995349	4,2	6,488372	1,688372	3,8	6,069767	3,530233	6,6	8,581395	4,451163	7,8	9

ChAdOx1-S Зважене			BBIBP-CoV Зважене			CoronaVac Зважене			NVX-CoV2373 Зважене		
1,906667	4,3955556	6,6	3,08	5,924444	8,2	1,32	2,484444	4,6	4,84	8,217778	9
2,023256	4,534884	7	2,162791	4,767442	7	2,162791	4,767442	7	2,162791	4,767442	7
0,777778	2,022222	4,191111	3	5,755556	8,2	1,222222	3,266667	5,648889	1,666667	3,888889	6,377778
2,4933333	5,16	7,4	0,68	2,28	4,768889	0,377778	1,32	3,453333	0,377778	1,32	3,453333
3	5,755556	7,835556	1,08	2,795556	4,92	1,08	2,795556	4,92	0,6	1,151111	3,097778
4,451163	7,8	9	2,916279	5	6,906977	3,530233	6,6	8,581395	1,995349	4,2	6,488372

Рис. 4.11. Матриця зважених альтернатив

Формування матриці зважених альтернатив є найбільш важливим кроком у нашому дослідженні, тому що саме для формування оцінок альтернатив використовуються розраховані, за методом TOPSIS, значення показників

критеріїв. Звідси, необхідність модифікації цього параметра використовуючи дані, що були отримані в ході розрахунків методу DEMATEL [44].

Крок 5: Розрахунки FPIS та FNIS

На цьому кроці необхідно розрахувати геометричну відстань до позитивно та негативно ідеального рішення. Та спершу отримаймо ці ідеальні значення використовуючи наступні формули 4.9 та 4.10:

$$\tilde{a}_i^+ = \max(\tilde{a}_{ij}) \tag{4.9}$$

де \tilde{a}_i^+ – ідеальне позитивне значення і-того для критерію; j – номер альтернативи; i – номер критерію.

$$\tilde{a}_i^- = \min(\tilde{a}_{ij}) \tag{4.10}$$

де \tilde{a}_i^- – ідеальне негативне значення і-того для критерію; j – номер альтернативи; i – номер критерію.

Результати розрахунків наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Розрахунки FPIS та FNIS

A+			A-		
9	9	9	1,3	1,3	1,3
7	7	7	0,5	0,5	0,5
8,2	8,2	8,2	0,8	0,8	0,8
7,4	7,4	7,4	0,4	0,4	0,4
8,2	8,2	8,2	0,6	0,6	0,6
9	9	9	1,7	1,7	1,7

З цієї таблиці видно, що позитивне ідеальне рішення вимагає найкращих показників для ефективності та побічних ефектів. В той час як негативний ідеал

прямує для мінімальних значень: температури зберігання, кількості вакцинованих, та кількості країн.

Крок 6: Розрахунки відстані кожної альтернативи до ідеальних рішень

Для розрахунку відстані кожної альтернативи, використовується формула геометричної відстані(4.11, 4.12) [45]:

$$d^+ = d(\tilde{a}_{ij}, a_i^+) = \sqrt{1/3[(a_{ij}^l - a_i^+)^2 + (a_{ij}^m - a_i^+)^2 + (a_{ij}^u - a_i^+)^2]} \quad (4.11)$$

де d^+ – відстань альтернативи від ідеального позитивного значення; j – номер альтернативи; i – номер критерію; l,m,u – умовні позначення трикутного числа.

$$d^- = d(\tilde{a}_{ij}, a_i^-) = \sqrt{1/3[(a_{ij}^l - a_i^-)^2 + (a_{ij}^m - a_i^-)^2 + (a_{ij}^u - a_i^-)^2]} \quad (4.12)$$

де d^- – відстань альтернативи від ідеального негативного значення; j – номер альтернативи; i – номер критерію; l,m,u – умовні позначення трикутного числа.

Результати розрахунків наведені нижче (рис. 4.12, 4.13).

DA+								
	BNT162b 2	mRNA12 73	Gam- COVID- vac	Ad26.CO V2.S	ChAdOx1- S	BBIBP- CorV	CoronaV ac	NVX- CoV2373
Ефективність	2,24433	2,24433	2,44387	4,93967	5,07531	3,87924	6,34547	2,44387
Температура зберігання	5,41469	3,92915	3,47926	3,61566	3,20649	3,07587	3,07587	3,07587
Кількість учасників клінічних дослідів 3 фази	3,12673	2,94028	4,39527	3,12673	6,03671	3,31739	5,14896	4,64007
Кількість країн	3,11411	3,84391	5,52233	3,84391	3,11411	5,10867	5,82678	5,82678
Кількість Вакцинованих	2,35514	2,91379	6,46439	6,07129	3,32406	5,4973	5,4973	6,67032
Побочний вплив	5,11251	5,44935	3,45705	2,71612	2,71612	4,37388	3,45705	5,11251

Рис. 4.12. Відстані до ідеально позитивної альтернативи

DA-								
	BNT162b 2	mRNA12 73	Gam- COVID- vac	Ad26.CO V2.S	ChAdOx1- S	BBIBP- CorV	CoronaV ac	NVX- CoV2373
Ефективність	6,49416	6,49416	6,29688	3,56426	3,54409	4,88647	2,0095	6,29688
Температура зберігання	1,75228	3,63555	4,19009	4,11209	4,5141	4,60128	4,60128	4,60128
Кількість учасників клінічних дослідів 3 фази	5,44784	5,58452	4,02164	5,44784	2,09758	5,31683	3,16859	3,73404
Кількість країн	5,05493	4,28906	2,30655	4,28906	5,05493	2,76837	1,85713	1,85713
Кількість Вакцинованих	6,24393	5,76915	1,72885	2,25543	5,31329	2,81148	2,81148	1,47678
Побочний вплив	3,13276	2,80806	5,00101	5,72844	5,72844	3,63815	5,00101	3,13276

Рис. 4.13. Відстані до ідеально негативної альтернативи

Крок 7: Розрахувати коефіцієнти близькості для кожної альтернативи

Для того, щоб віднайти найкращу альтернативу, необхідно розрахувати коефіцієнти близькості для кожної альтернативи (4.13):

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (4.13)$$

де CC_i – коефіцієнти близькості для i -тої альтернативи; d_i^+ та d_i^- – відстані i -тої альтернативи до ідеальних рішень.

У таблиці 4.2 наведені результати роботи методу fuzzy TOPSIS.

Таблиця 4.2

Результати методу TOPSIS

Назва Вакцини	CCi	Ранг Вакцини
BNT162b2	0,56828	2
mRNA1273	0,57274	1
Gam-COVID-vac	0,47752	6
Ad26.COV2.S	0,5109	4
ChAdOx1-S	0,52795	3
BBIBP-CorV	0,48752	5
CoronaVac	0,39854	8
NVX-CoV2373	0,43175	7

В результаті роботи методу fuzzy TOPSIS, ми віднайшли, що вакцина від компанії Moderna є найкращою, на другому місці незначним відставанням стоїть Pfizer. Взагалі, якщо не враховувати найгіршу альтернативу(CoronaVac), всі альтернативи були розподілені на пари альтернатив з близькими значеннями.

4.2 Розробка способів комбінування fuzzy TOPSIS-DEMATEL

Як вже було зазначено вище – комбінування методів TOPSIS та DEMATEL, буде виконуватися на четвертому кроці методу TOPSIS, шляхом модифікації таблиці оцінок критеріїв. Для цього були використані вихідні данні розрахунків алгоритму DEMATEL, а саме D+R та D-R. Їх нечітке та дефазифіковане представлення.

4.1.2 Тільки D-R

Вихід D-R методу DEMATEL розбиває критерії на групи причин та ефектів, тобто наслідків. Чисельно ці дані представлені в виді таблиці трикутних чисел. При чому значення нижче 0 відповідають за наслідки, а більше – причини. Відстань від 0 дозволяє характеризувати критерії за параметром – сильнішого впливу, чи більшої залежності.

Для нашої задачі вихід D-R має наступний вигляд (таблиця 4.3):

Таблиця 4.3

Значення D-R

Ефективність	-0,1527	-0,026	0,1011
Температура зберігання	-0,0803	0,1045	0,2516
Кількість учасників клінічних дослідів 3 фази	-0,1857	-0,0647	0,0601
Кількість країн	-0,1001	0,0137	0,1378
Кількість Вакцинованих	-0,2335	-0,0875	0,082
Побічний вплив	-0,0964	0,0601	0,2161

Оскільки значення D-R лежить в діапазоні від -1 до 1 – необхідно провести ряд перетворень.

По-перше, позбавимося від відємних значень. Для цього до кожного елементу матриці додаємо мінімальне значення по модулю (таблиця 4.4).

Таблиця 4.4

Оновлене значення D-R

Ефективність	0,0808	0,2075	0,3346
Температура зберігання	0,1532	0,338	0,4851
Кількість учасників клінічних дослідів 3 фази	0,0478	0,1688	0,2936
Кількість країн	0,1334	0,2472	0,3713
Кількість Вакцинованих	0	0,146	0,3155
Побічний вплив	0,1371	0,2936	0,4496

По-друге, необхідно привести значення до області значень що використовує fuzzy TOPSIS, а саме до проміжку - [1;9]. Для необхідно виконати дві дії:

- виконати нормування значень;
- помножити значення на 8, та додати 1. Це забезпечить трансформацію даних до необхідного діапазону.

Таблиця 4.5

Фінальне значення D-R

Ефективність	2,3325	4,4220	6,5180
Температура зберігання	3,5265	6,5741	9,0000
Кількість учасників клінічних дослідів 3 фази	1,7883	3,7838	5,8419
Кількість країн	3,2000	5,0767	7,1233
Кількість Вакцинованих	1,0000	3,4078	6,2031
Побічний вплив	3,2610	5,8419	8,4146

Тепер, після всіх маніпуляцій, підставимо ці значення у четвертий крок методу TOPSIS. Виконавши всі наступні розрахунки, було отримано результати:

Таблиця 4.6

Результати для D-R

Назва Вакцини	CCi	Ранг Вакцини
BNT162b2	0,47029	4
mRNA1273	0,493941	2
Gam-COVID-vac	0,442745	6
Ad26.COV2.S	0,47974	3
ChAdOx1-S	0,498804	1
BBIBP-CorV	0,456341	5
CoronaVac	0,401464	8
NVX-CoV2373	0,412071	7

Видно, що відбулися певні зміни. Тепер вакцина ChAdOx1-S посідає місце найкращої, а BNT162b2, тобто Pfizer, взагалі впало до четвертого місця.

4.2.2 (D-R) та дефазифікований D+R

Іншою частиною інформації, що ми отримуємо в результаті методу DEMATEL є дефазифікований D+R. Він вказує на важливість кожного з критеріїв. Його областю значень є – від 0 до 1. Це є непоганим коефіцієнтом, яким ми можемо модифікувати розраховані вище значення D-R.

Такий підхід дозволяє використати всю інформацію, що надає метод DEMATEL.

Таблиця 4.7

Дефазифіковані значення D+R

	Def R+D
Ефективність	0,3395
Температура зберігання	0,4181
Кількість учасників клінічних дослідів 3 фази	0,3405
Кількість країн	0,3257
Кількість Вакцинованих	0,4348
Побічний вплив	0,4267

Для цього помножимо значення D-R (таблиця 4.5) на значення D+R (таблиця 4.7).

Таблиця 4.8

Дефазифіковані значення D+R

Ефективність	0,792	1,501	2,213
Температура зберігання	1,475	2,749	3,763
Кількість учасників клінічних дослідів 3 фази	0,609	1,289	1,989
Кількість країн	1,042	1,654	2,32
Кількість Вакцинованих	0,435	1,482	2,697
Побічний вплив	1,391	2,493	3,59

Тепер, після всіх маніпуляцій, підставимо ці значення у четвертий крок методу TOPSIS. Виконавши всі наступні розрахунки, було отримано такі результати:

Таблиця 4.9

Результати для $D-R*\text{def}(D+R)$

Назва Вакцини	CCi	Ранг Вакцини
BNT162b2	0,458813	4
mRNA1273	0,487676	2
Gam-COVID-vac	0,443377	6
Ad26.COV2.S	0,477932	3
ChAdOx1-S	0,503935	1
BBIBP-CorV	0,456269	5
CoronaVac	0,412748	7
NVX-CoV2373	0,41183	8

Порівнюючи з результатами попереднього підходу – ранжування альтернатив зовсім не змінилося. Однак, завдяки впливу $D+R$, коефіцієнти близькості дещо відрізняються.

4.2.3 TOPSIS та дефазифікований $D+R$

Наступний спосіб включає використання розрахунків оцінки критеріїв, що надає метод TOPSIS. Але вони будуть модифіковані виходом дефазифікованого $D+R$. Він покращить дані, ставши коефіцієнтом важливості кожного критерію.

Для цього проведемо аналогічні перетворення оцінок критеріїв (таблиця 4.8) TOPSIS, за допомогою $D+R$, як зробили це з $D-R$ (таблиця 4.10).

Таблиця 4.10

Оцінки критеріїв за TOPSIS

Ефективність	6,6	8,6	9
Температура зберігання	3	5	7
Кількість учасників клінічних дослідів 3 фази	5	7	8,2
Кількість країн	3,4	5,4	7,4
Кількість Вакцинованих	5,4	7,4	8,2
Побічний вплив	6,6	8,6	9

Таблиця 4.11

Значення для $T^*def(D+R)$

Ефективність	2,241	2,92	3,056
Температура зберігання	1,254	2,091	2,927
Кількість учасників клінічних дослідів 3 фази	1,703	2,384	2,792
Кількість країн	1,107	1,759	2,41
Кількість Вакцинованих	2,348	3,218	3,566
Побічний вплив	2,816	3,669	3,84

Тепер, підставимо ці значення у четвертий крок методу TOPSIS. Виконавши всі наступні розрахунки, було отримано такі результати – таблиця 4.12.

В результаті ми отримали ранжування альтернатив, що повністю відповідає класичному методу TOPSIS, але зі зміною значень коефіцієнтів близькості.

Таблиця 4.12

Результати для $T^*def(D+R)$

Назва Вакцини	CCi	Ранг Вакцини
BNT162b2	0,557985	2
mRNA1273	0,565337	1
Gam-COVID-vac	0,47416	6
Ad26.COV2.S	0,507984	4
ChAdOx1-S	0,53874	3
BBIBP-CorV	0,484422	5
CoronaVac	0,411015	8
NVX-CoV2373	0,42582	7

4.2.4 TOPSIS та дефазифікований D-R нормований

Дефазифікований вихід D-R також можливо використовувати вже в якості коефіцієнта, а не базового значення. Але спочатку його все ж необхідно нормувати, та виконати операції для позбавлення від від'ємних значень. Всі перетворення наведені в таблиці 4.13.

Таблиця 4.13

Перетворення для $def(D-R)$

	Def D-R	Переведення у додатню область значень	Нормування Def D-R
Ефективність	-0,0259	0,0638	0,3512
Температура зберігання	0,0919	0,1816	1,0000
Кількість учасників клінічних дослідів 3 фази	-0,0635	0,0262	0,1444
Кількість країн	0,0172	0,1068	0,5883
Кількість Вакцинованих	-0,0797	0,0100	0,0551
Побічний вплив	0,0599	0,1496	0,8237

Далі використаємо нормовані дефазифіковані значення D-R як множник до набору середніх оцінок TOPSIS і отримаємо наступний набір даних.

Таблиця 4.14

Значення для $T^*def(D-R)$

Ефективність	2,3179	3,0203	3,1608
Температура зберігання	3,0000	5,0000	7,0000
Кількість учасників клінічних дослідів 3 фази	0,7218	1,0105	1,1837
Кількість країн	2,0004	3,1771	4,3538
Кількість Вакцинованих	0,2974	0,4075	0,4515
Побічний вплив	5,4362	7,0835	7,4130

Тепер, підставимо ці значення у четвертий крок методу TOPSIS. Виконавши всі наступні розрахунки, було отримано такі результати:

Таблиця 4.15

Результати для $T^*def(D-R)$

Назва Вакцини	CCi	Ранг Вакцини
BNT162b2	0,4552	8
mRNA1273	0,4963	5
Gam-COVID-vac	0,5235	3
Ad26.COV2.S	0,5597	2
ChAdOx1-S	0,5814	1
BBIBP-CorV	0,5008	4
CoronaVac	0,4685	6
NVX-CoV2373	0,4683	7

Ранжування геть відмінне від будь-якого попереднього способу. Хоч, на вигляд, здається що все нормально і такий результат можливий, але ранжування

альтернатив тут ближче до хаотичного, ніж підпорядкованого певній закономірності.

4.2.5 TOPSIS та дефазифікований D-R

Іншим підходом для використання дефазифікованого D-R, може стати в якості множника-дodatка. Природа області значень D-R може розглядатися як параметр штрафу та нагороди для певного критерію.

Для цього підходу замість множення середніх оцінок критеріїв TOPSIS на D-R, ми додамо нову складову. І значення будуть формуватися за наступним підходом: $T+T*\text{deff}(D-R)$, де T це значення середніх оцінок критеріїв TOPSIS.

Таблиця 4.16

Значення для $T+T*\text{def}(D-R)$

Ефективність	6,429	8,377	8,767
Температура зберігання	3,276	5,46	7,644
Кількість учасників клінічних дослідів 3 фази	4,683	6,556	7,68
Кількість країн	3,458	5,493	7,527
Кількість Вакцинованих	4,97	6,81	7,547
Побічний вплив	6,995	9,115	9,539

Тепер, підставимо ці значення у четвертий крок методу TOPSIS. Виконавши всі наступні розрахунки, було отримано такі результати:

Таблиця 4.17

Результати для $T+T*\text{def}(D-R)$

Назва Вакцини	CCi	Ранг Вакцини
BNT162b2	0,5585	2
mRNA1273	0,5661	1
Gam-COVID-vac	0,4816	6

Ad26.COV2.S	0,5152	4
ChAdOx1-S	0,5327	3
BBIBP-CorV	0,4887	5
CoronaVac	0,4047	8
NVX-CoV2373	0,4350	7

Ми знову повернулися до стандартного, для нашої задачі, виду ранжування альтернатив.

4.2.6 TOPSIS та дефазифікований D-R і D+R

Останній досліджений підхід стане модифікацією попереднього. Але в ньому будуть враховуватися дані D+R. Тобто це буде варіант комбінування TOPSIS-DEMATEL, що використовує всі можливі джерела інформації для формування оцінки критеріїв.

Для цього підходу попередні до попередніх даних необхідно долучити глобальний коефіцієнт виражений дефазифікованими значеннями D+R.

Таблиця 4.18

Значення для $(T+T*\text{def}(D-R)) * \text{def}(D+R)$

Ефективність	2,183	2,844	2,977
Температура зберігання	1,37	2,283	3,196
Кількість учасників клінічних дослідів 3 фази	1,595	2,232	2,615
Кількість країн	1,126	1,789	2,452
Кількість Вакцинованих	2,161	2,961	3,282
Побічний вплив	2,985	3,889	4,07

Тепер, підставимо ці значення у четвертий крок методу TOPSIS. Виконавши всі наступні розрахунки, було отримано такі результати.

Таблиця 4.19

Результати для $(T+T*\text{def}(D-R)) * \text{def}(D+R)$

Назва Вакцини	CCi	Ранг Вакцини
BNT162b2	0,547345	2
mRNA1273	0,558276	1
Gam-COVID-vac	0,479159	6
Ad26.COV2.S	0,513072	4
ChAdOx1-S	0,543151	3
BBIBP-CorV	0,486225	5
CoronaVac	0,417789	8
NVX-CoV2373	0,429925	7

Ранжування критеріїв збереглися, проте помітні зміни в коефіцієнтах близькості для кожної альтернативи.

4.3 Аналіз результатів роботи

В ході дослідження способів комбінування методів TOPSIS-DEMATEL, було виявлено ідейну відмінність цих методів. Та незважаючи на це, вдалося розробити шість способів поєднання методів:

1. Значення D-R;
2. D-R та дефазифікований D+R;
3. TOPSIS та дефазифікований D+R;
4. TOPSIS та дефазифікований D-R нормований;
5. TOPSIS та дефазифікований D-R;
6. TOPSIS та дефазифікований D-R і D+R.

Таблиця 4.20

СПОСІБ	Порівняння ранжувань						
	0	1	2	3	4	5	6
BNT162B2	2	4	4	2	8	2	2
MRNA1273	1	2	2	1	5	1	1
GAM-COVID-VAC	6	6	6	6	3	6	6
AD26.COVS.S	4	3	3	4	2	4	4
CHADOX1-S	3	1	1	3	1	3	3
BBIBP-CORV	5	5	5	5	4	5	5
CORONAVAC	8	8	7	8	6	8	8
NVX-COV2373	7	7	8	7	7	7	7

Кожен з цих підходів надав цікаві, іноді несподівані результати. Тому для повної оцінки кожного зі способів проведемо порівняння отриманих ранжувань альтернатив (таблиця 4.18).

Перший рядок таблиці - «Спосіб» нумерує колонки способами, які були досліджені. Колонка з номером «0», це значення базового методу TOPSIS.

Відразу треба виділити в окрему групу способи 1 та 2. Їх оцінка критеріїв базується лише на методі DEMATEL, тому очевидно що ранжування дещо зміниться. Проте цікаво, що чотири найгірші альтернативи, в цілому зберегли своє положення, в той час як один з лідерів втратив декілька позицій. Якщо подивитися на оцінки самих альтернатив та діаграму взаємозв'язків – стає зрозуміло, що це сталося в наслідок зміни пріоритетності критеріїв. Температура зберігання та побічні ефекти стали набагато впливовіші.

Наступна група підходів 3,4,5 та 6 має спільну рису – базове значення оцінок критеріїв береться з методу TOPSIS. Через це таблиці ранжування виглядають однотонно. Окрім четвертого підходу. Як вже було зазначено раніше такі кардинальні зміни при оцінці альтернатив – більше схожі на помилку. Тому будемо вважати такий підхід неприйнятним.

Для подальшого дослідження підходів 3, 5 та 6 – необхідно навести порівняльну таблицю коефіцієнтів близькості (таблиця 4.21):

Таблиця 4.21

Порівняння коефіцієнтів близькості для підходів 3, 5 та 6

	0	3	5	6
BNT162B2	0,5683	0,557985	0,5585	0,547345
MRNA1273	0,5727	0,565337	0,5661	0,558276
GAM-COVID-VAC	0,4775	0,47416	0,4816	0,479159
AD26.COVS.S	0,5109	0,507984	0,5152	0,513072
CHADOX1-S	0,5279	0,53874	0,5327	0,543151
BBIBP-CORV	0,4875	0,484422	0,4887	0,486225
CORONAVAC	0,3985	0,411015	0,4047	0,417789
NVX-COV2373	0,4317	0,42582	0,4350	0,429925

Видно, що в цілому коефіцієнти зробили крок в сторону «середнього значення». Як і в класичному методі TOPSIS, проглядаються пари альтернатив, які є мають близькі значення.

Виконавши попарні порівняння відстаней між близькими альтернативами, було виявлено, що спосіб 6 - TOPSIS та дефазифікований D-R і D+R. Який використовує всі наявні джерела інформації збільшую різницю між суміжними альтернативами. Це є позитивною модифікацією класичного методу TOPSIS, адже знижує можливість виникнення ситуації при якій дві альтернативи матимуть дуже близькі показники.

4.3 Створення програмного застосунку

Для виконання розрахунків з дослідження методів багатокритерійного прийняття рішень необхідне певне програмне забезпечення, що спростить та пришвидшить розрахунки. Для методу TOPSIS були використані розрахункові можливості Microsoft Excel. Ця програма легко виконує необхідні підрахунки, а також є зручною для експериментів з пошуку комбінування методів.

Інша річ з методом DEMATEL, він працює з оцінками як з матрицею і частина розрахунків вимагає виконання складних матричних перетворень, які важко реалізувати засобами Microsoft Excel. Тому було прийнято рішення

розробити програмний застосунок для виконання методу fuzzy DEMATEL. Мовою програмування була обрана Java – за легкість у створенні та роботі з користувачьким інтерфейсом (рис. 4.14).

На рисунку 4.14 зображене головне вікно програми. В верхній частині розташована керуюча частина. Користувач може задати кількість критеріїв та експертів, що їх оцінюють. Кнопка «Створити таблиці» генерує таблиці оцінок, які далі можна редагувати в лівій стороні вікна. Кнопка «Почати розрахунок» виконує всі розрахунки за алгоритмом DEMATEL. Вони покроково виводяться в правій частині вікна.

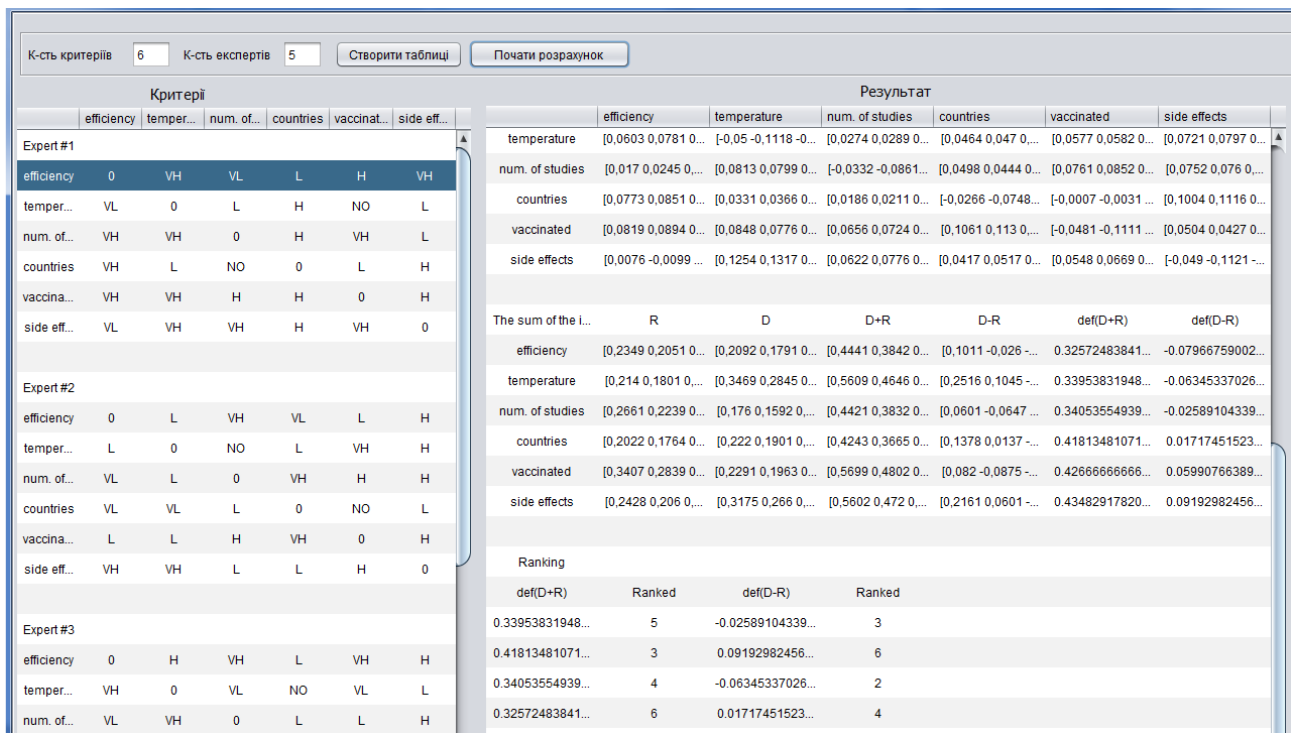


Рис. 4.14. Інтерфейс програмного застосунку

Цей застосунок значно полегшив розрахунки під час виконання кваліфікаційної роботи.

Висновок до розділу 4

Дослідження методів TOPSIS та DEMATEL, проявило ряд недоліків, які мають виникнути при спробі їх поєднання. Але це і дало змогу виокремити точку

сходження методів і провести розробку способів їх поєднання. З представлених шести способів, лише один є не життєздатним. Інші же розподілилися на 2 групи: оцінка однієї базується на розрахунках fuzzy DEMATEL, іншої на fuzzy TOPSIS. Один із наведених способів проявив себе з кращої сторони та зміг покращити результати для нашої задачі.

Звичайно всі наведені способи потребуються проведення додаткових досліджень в першу чергу на інших наборах експертних оцінок. Це дозволить виявити найбільш перспективний з них для подальшого удосконалення.

ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи було проведено дослідження методів багакритерійного прийняття рішень. Було розглянуто ряд класичних методів, виконана їх оцінка та порівняння з обраними.

Була створена система експертного оцінювання найбільш популярних вакцин. Створена інформаційна база для експертів. Обрано критерії та систему оцінювання. Створено та підготовлено датасет з оцінками для методів TOPSIS та DEMATEL.

Дослідження методів TOPSIS та DEMATEL, проявило ряд недоліків, які мають виникнути при спробі їх поєднання. Але це і дало змогу виокремити точку сходження методів і провести розробку способів їх поєднання. З представлених шести способів, лише один є нежиттєздатним. Інші розподілилися на 2 групи: оцінка однієї базується на розрахунках fuzzy DEMATEL, іншої на fuzzy TOPSIS. Один із наведених способів проявив себе з кращої сторони та зміг покращити результати для нашої задачі.

Звичайно всі наведені способи потребуються проведення додаткових досліджень в першу чергу на інших наборах експертних оцінок. Це дозволить виявити найбільш перспективний з них для подальшого удосконалення.

Способи комбінування TOPSIS-DEMATEL вимагають подальшого дослідження. Було запропоновано дослідити в майбутньому можливість створення чисельного коефіцієнта, який би міг корегувати вплив розрахунків DEMATEL, на базові значення методу TOPSIS.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Mohammad (Arash) Ehsanifar Applying Fuzzy DEMATEL Method to Analyze Supplier Selection Criteria (Case Study: WagonPars Company) Applying Fuzzy DEMATEL Method to Analyze Supplier Selection Criteria (Case Study: WagonPars Company) URL: https://www.researchgate.net/publication/281108409_Applying_Fuzzy_DEMATEL_Method_to_Analyze_Supplier_Selection_Criteria_Case_Study_WagonPars_Company;
2. Zarifa Gasim Jabrayilova «многокритериальная оптимизация задач управления человеческими ресурсами на базе модифицированного метода topsis» URL: https://www.researchgate.net/publication/318340184_MNOGO-KRITERIALNAA_OPTIMIZACIA_ZADAC_UPRAVLENIA_CELOVECESKIMI_RESURSAMI_NA_BAZE_MODIFICIROVANNOGO_METODA_TOPSIS
3. Катаржина Халицкая «Technology Selection Using the TOPSIS Method» URL: <https://foresight-journal.hse.ru/data/2020/03/20/1567702093/6-%D0%A5%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D1%86%D0%BA%D0%B0%D1%8F-85-96.pdf>
4. Rana Muhammad Zulqarnain та інші «Selection of Medical Clinic for Disease Diagnosis by Using TOPSIS Method» URL: https://www.researchgate.net/profile/Zeeshan-Zafar-2/publication/340102846_Selection_of_Medical_Clinic_for_Disease_Diagnosis_by_Using_TOPSIS_Method/links/5e78fa0e4585158bd5019d87/Selection-of-Medical-Clinic-for-Disease-Diagnosis-by-Using-TOPSIS-Method.pdf
5. Mohammad (Arash) Ehsanifar «Applying Fuzzy DEMATEL Method to Analyze Supplier Selection Criteria» URL: https://www.researchgate.net/publication/281108409_Applying_Fuzzy_DEMATEL_Method_to_Analyze_Supplier_Selection_Criteria_Case_Study_WagonPars_Company

6. «Analysis of Supply Chain Disruption Factors Under the Effect of COVID-19 Pandemic via Neutrosophic Fuzzy DEMATEL» URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-85577-2_41
7. Безопасность, эффективность и другая важная информация о вакцинах против COVID-19 URL: <https://www.mskcc.org/ru/coronavirus/what-you-should-know-about-covid-19-vaccines>
8. Вакцины від коронавірусу (COVID-19) URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/reference/coronavirus/vaccination/vaccines/>
9. Гид по вакцинам против COVID-19: каковы преимущества и недостатки каждой из них URL: <https://hromadske.ua/ru/posts/gid-po-vakcinam-protiv-covid-19-kakovy-preimushhestva-i-nedostatki-kazhdoj-iz-nih>
10. Порівняння вакцин проти COVID-19: переваги і недоліки URL: <https://www.radiosvoboda.org/a/koronavirus-vakcyny-porivniannia/30958662.html>
11. Kharchenko E.P. Vaccines against Covid-19: Comparison, Limitations, the Decrease of Pandemic and the Perspective of Viral Respiratory. Epidemiology and Vaccinal Prevention. 2021;20(1):4-19. (In Russ.) URL: <https://doi.org/10.31631/2073-3046-2021-20-1-4-19>
12. Онищенко Г. Г., Сизикова Т. Е., Лебедев В. Н., & Борисевич С. В. (2021). СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВАКЦИН ПРОТИВ COVID-19, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ МАССОВОЙ ИММУНИЗАЦИИ. БИОпрепараты. Профилактика, диагностика, лечение, 21 (3), 158-166.
13. COVID-19 vaccines: comparison of biological, pharmacological characteristics and adverse effects of Pfizer/BioNTech and Moderna Vaccines. Meo, S A; Bukhari, I A; Akram, J; Meo, A S; Klonoff, D C. Eur Rev Med Pharmacol Sci ; 25(3): 1663-1669, 2021 02.
14. COVID-19 Vaccine Tracker: веб-сайт. URL: <https://covid19.trackvaccines.org/>
15. Evidence Assessment: Sinopharm/BBIBP COVID-19 vaccine. Prepared by the SAGE Working Group on COVID-19 vaccines URL: <https://cdn.who.int/media/docs/default->

source/immunization/sage/2021/april/2_sage29apr2021_critical-evidence_sinopharm.pdf

16. Моделі й методи прийняття рішень: навч. посіб. / С.А. Ус, Л.С. Коряшкіна; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д. : НГУ, 2014. – 300 с.

17. Нечеткая логика — математические основы URL: <https://loginom.ru/blog/fuzzy-logic>

18. Expert system URL: https://wiki.loginom.ru/articles/expert-system.html?_ga=2.51003041.905695750.1643279133-766230587.1643279133

19. Опорний конспект лекцій з дисципліни «Теорія прийняття рішень» URL: <http://dSPACE.wunu.edu.ua/retrieve/52501/>

20. Круглов, В. В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. — 201с.

21. Triantaphyllou E. (2000) Multi-Criteria Decision Making Methods. In: Multi-criteria Decision Making Methods: A Comparative Study. Applied Optimization, vol 44. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3157-6_2

22. Triantaphyllou, E. (2000). Multi-Criteria Decision Making: A Comparative Study. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers (now Springer). p. 320. ISBN 0-7923-6607-7.

23. Weighted product model URL: https://uk.wikisla.ru/wiki/Weighted_product_model

24. Триантафіллу, Е. (2000). Багатокритеріальне прийняття рішень: порівняльне дослідження. Дордрехт, Нідерланди: Kluwer Academic Publishers (нині Springer). стор. 320. ISBN 0-7923-6607-7.

25. Сааті, Томас Л.; Пеніваті, Кіртті (2008). Прийняття групових рішень: виявлення та узгодження відмінностей. Пітсбург, Пенсільванія: Публікації RWS. ISBN 978-1-888603-08-8.

26. Бхушан, Навнеет; Канвал Рай (січень 2004). Прийняття стратегічних рішень: Застосування процесу аналітичної ієрархії. Лондон: Спрінгер-Верлаг. ISBN 978-1-85233-756-8.

27. Серафим Опрічовіч., (1990) "Програмний пакет VIKOR для викриттєвого компромісного рангірування", SYM-OP-IS

28. COMPARISON OF TOPSIS AND VIKOR MULTI CRITERIA DECISION ANALYSIS TECHNIQUES URL: https://www.researchgate.net/publication/330025284_COMPARISON_OF_TOPSIS_AND_VIKOR_MULTI_CRITERIA_DECISION_ANALYSIS_TECHNIQUES

29. Метод организации предварительного ранжирования для оценки обогащения URL: <http://ru.knowledgr.com/18724532/%D0%9F%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%BF%D0%BE%D1%87%D1%82%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B9%D0%9E%D1%80%D0%B3%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%A0%D0%B0%D0%BD%D0%B6%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F%D0%94%D0%BB%D1%8F%D0%9E%D1%86%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%B8%D0%9E%D0%B1%D0%BE%D0%B3%D0%B0%D1%89%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F>

30. Шаян, А. ; Савадого, О. (2006). "Безкомпенсаційне компрометоване рішення для вибору матеріалу біполярних пластин для полімерної електролітної мембранної паливної комірки (PEMFC) за допомогою ELECTRE IV". Electrochimica Acta. 51 (25): 5307.

31. Горяев, А. А. ДНК- и РНК-вакцины: современное состояние, требования к качеству и особенности проведения доклинических исследований : [арх. 14 лютого 2020] / А. А. Горяев, М. В. Савкина ; ФГБУ «Научный центр экспертизы средств медицинского применения» МЗ РФ. — БИОпрепараты. Профилактика, диагностика, лечение. — 2019. — № 2. — С. 72–80. Горяев, А. А. ДНК- и РНК-вакцины: современное состояние, требования к качеству и 2022 р.

особенности проведения доклинических исследований : [арх. 14 лютого 2020] / А. А. Горяев, М. В. Савкина ; ФГБУ «Научный центр экспертизы средств медицинского применения» МЗ РФ. — БИОпрепараты. Профилактика, диагностика, лечение. — 2019. — № 2. — С. 72–80.

32. Blackburn L. RNA vaccines: an introduction : [арх. 13 грудня 2020] : [англ.] / Laura Blackburn ; University of Cambridge. — PHG Foundation, 2018. — October. — 4 с.

33. Як працюють різні типи вакцин проти COVID-19 URL: <https://phcent.com.ua/iak-pratsiuiut-rizni-typu-vaktsyn-proty-covid-19/>

34. Fuzzy TOPSIS: A General View URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187705091631273X>

35. Abdullah L. Fuzzy multi criteria decision making and its applications: A brief review of category. *Procedia - Social and Behavioral*

36. *Sciences* 2013; 97: 131–136.

37. Aruldoss M, Lakshmi TM, Venkatesan VP. A survey on multi criteria decision making methods and its applications. *American Journal of*

38. *Information Systems* 2013; 1(1): 31–43.

39. Bustince H. Handling multicriteria fuzzy decision-making problems based on intuitionistic fuzzy sets. *HIFS* 1995; 1: 42–47.

40. Chen CT. Extension of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems* 2000; 114: 1–9.

41. Chen SM, Lee LW. Fuzzy multiple attributes group decision-making based on the interval type-2 TOPSIS method. *Expert Systems with*

42. *Applications* 2010; 37(4): 2790–2798.

43. Elomda BM, Hefny HA, Hassan HA. An extension of fuzzy decision maps for multi-criteria decision-making. *Egyptian Informatics*

44. *Journal* 2013; 14: 147–155.

45. Figueira J, Greco S, Ehrgott M. *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. New York: Springer; 2004.

46. Hwang CL, Yoon KP. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications, A State-of-the-Art Survey. Berlin: Springer-Verlang; 1981.
47. Park JH, Park IY, Kwun YC, Tan X. Extension of the TOPSIS method for decision making problems under interval-valued intuitionistic fuzzy environment. Applied Mathematical Modelling 2011; 35: 2544–2556.