

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЗАПОБІГАННЯ ЗЛОЧИННОСТІ НА
ОСНОВІ МЕТОДУ FUZZY TOPSIS**О.Я. Ковальчук¹, Л.В. Бабала¹, Р.І. Іваницький²¹Західноукраїнський національний університет

11, Львівська вул., м. Тернопіль, 46009, Україна

²Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка

2, М. Кривоноса вул., м. Тернопіль, 46027, Україна

Emails: olhakov@gmail.com, ludaduma7@gmail.com, romikiv@ukr.net

У статті представлено модель прийняття рішень на основі методу нечіткого TOPSIS для оцінювання ефективності впровадження інтелектуальних технологій запобігання злочинності в комплексну інформаційну систему правоохоронних органів України. Здійснено класифікацію інтелектуальних технологій запобігання злочинності та виділено три основні категорії: інтегровані технології операційного контролю, технології відеоаналізу та технології датчиків IoT. Визначено ключові елементи інтелектуальних технологій, які включають системи відеоспостереження з аналізом відео, розпізнавання облич та номерних знаків, інтелектуальні датчики руху та тривоги, інтеграцію з системами екстреного реагування, аналітику даних для виявлення кримінальних патернів. Запропоновано сім критеріїв оцінювання: ефективність запобігання злочинності, відповідність політиці запобігання злочинності, конкурентоспроможність, розвиток сектора послуг, економічна життєздатність, застосовність у галузі та ефективність управління. Визначено сім альтернативних технологічних рішень та розроблено математичний апарат для реалізації нечіткого TOPSIS з використанням трикутних нечітких чисел. Побудовано трирівневу ієрархічну структуру моделі оцінювання, яка дозволяє здійснювати обґрунтований вибір технологічних рішень з урахуванням множини критеріїв та невизначеності експертних оцінок. Практична значущість роботи полягає у можливості використання розробленої моделі для оптимізації архітектури комплексної інформаційної системи правоохоронних органів шляхом аналізу продуктивності різних конфігурацій. Наукова новизна роботи полягає в розробці моделі прийняття рішень, яка, на відміну від існуючих підходів, враховує невизначеність експертних оцінок та дозволяє здійснювати багатокритеріальний аналіз альтернативних технологічних рішень. Запропоновано класифікацію інтелектуальних технологій запобігання злочинності та визначено їх ключові елементи, що створює теоретичне підґрунтя для подальших досліджень у цій сфері. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на практичну апробацію розробленої моделі, вдосконалення системи критеріїв оцінювання та розширення множини альтернативних технологічних рішень.

Ключові слова: інтелектуальні технології, запобігання злочинності, fuzzy TOPSIS, прийняття рішень, штучний інтелект, IoT-пристрої, відеоаналітика.

Вступ. Традиційні підходи до боротьби зі злочинністю, які зосереджені переважно на реагуванні та управлінні після скоєння злочину, поступово втрачають свою ефективність [1]. Стрімкий розвиток інформаційних технологій (ІТ) та впровадження IoT-пристроїв у міську інфраструктуру, поряд із використанням інноваційних технологій правопорушниками для скоєння злочинів, вимагають більш збалансованого підходу до забезпечення суспільної безпеки [2]. Пріоритетними у боротьбі зі злочинністю стали превентивні заходи безпеки та використання передових технологій запобігання злочинності для прогнозування злочинів, реагування у реальному часі та управління після скоєння злочину, що суттєво підвищує рівень суспільної безпеки [3].

Однак, разом із впровадженням інноваційних рішень виникає необхідність у новому підході до оцінювання ефективності імплементації таких інновацій, особливо за умов сучасної технологічної війни. Традиційні методи оцінки не здатні повною мірою охопити багатовимірність та складність сучасних інтелектуальних систем прийняття рішень щодо прогнозування злочинності [4]. Одним із дієвих інструментів може стати модель на основі методу fuzzy TOPSIS, який забезпечує можливість враховувати невизначеність та багатокритеріальність при оцінюванні ефективності систем запобігання злочинності [5]. Такий підхід забезпечує більш точну та об'єктивну оцінку, що є критично важливим для прийняття обґрунтованих рішень щодо впровадження інтелектуальних систем у сфері запобігання злочинності.

Представлена стаття є продовженням серії робіт щодо проблем розробки інноваційної методології застосування сучасних ІТ для підвищення ефективності прийняття рішень щодо запобігання, прогнозування та розслідування кримінальних злочинів в Україні [5–11].

Огляд літератури. Питання впровадження інноваційних ІТ для підвищення ефективності боротьби зі злочинністю останнім часом були предметом наукових розвідок окремих авторів. В. Чой (W. Choi) та інші розробили модель прийняття рішень на основі техніки впорядкування переваг за подібністю до ідеального рішення для впровадження інтелектуальних послуг запобігання злочинності через екологічний дизайн у муніципальних центрах управління Сеулу, Південна Корея [3]. Дж. Янг (J. Yang) та співавтори представили нову методологію оцінювання факторів, що впливають на прийняття рішень вуличними злочинцями, використовуючи технологію відстеження погляду у віртуальному середовищі гри Grand Theft Auto 5 та запропонували новий спосіб збору кількісних даних для дослідження вуличних пограбувань [12]. Р. Мінарді (R. Minardi) та інші розробили модульну систему запобігання злочинності для якісного оцінювання кримінальних ризиків для італійського міста Сіракузи. Система включає онтологію кримінального ризику, модуль отримання контекстних даних з OpenStreetMap та інтерфейс геоінформаційної системи (ГІС) [13]. М.-с. Парк (М. Парк) та Н. Лі (Х. Лі) проаналізували систему безпеки нових розумних міст шляхом проведення аналізу інтелектуальної служби попередження злочинності вільної економічної зони Інчхон у Південній Кореї [14]. М. Р. Базиліо (П. Базиліо) та В. Перейра (В. Перейра) досліджували методи багатокритеріального прийняття рішень для запобігання та контролю злочинності з урахуванням обмеженості ресурсів [15].

Однак розвідки з цієї тематики є фрагментарними та таргетовані на конкретні регіони, які мають суттєво різний рівень розвитку ІТ-інфраструктури, що ускладнює впровадження універсальних рішень та порівняння результатів досліджень. Більшість із них проводились для високотехнологічних міст розвинених країн світу. Для України комплексні дослідження з питань впровадження інтелектуальних систем прийняття рішень щодо запобігання злочинності на сьогодні не проводились.

Мета роботи. Метою даної роботи є представити інтелектуальну систему прийняття рішень щодо запобігання злочинності і запропонувати новий підхід до оцінювання ефективності впровадження таких інновацій для підвищення ефективності запобігання, прогнозування та розслідування кримінальних злочинів в Україні.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішуються такі завдання:

- класифікувати інтелектуальні технології запобігання злочинності;
- визначити елементи інтелектуальних технологій запобігання злочинності;
- представити модель прийняття рішень на основі техніки впорядкування переваг за подібністю до ідеального рішення TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) для впровадження цих технологій у комплексну інтелектуальну систему правоохоронних органів.

Інтелектуальні технології запобігання злочинності. Технологія запобігання злочинам – це технологія, яка надає інформаційну підтримку правоохоронним органам з попередження правопорушень. Вона стрімко розвивається з початком 4-ї промислової революції. Системи відеоспостереження, які є ключовою технологією запобігання правопорушенням і основним засобом розкриття злочинів, забезпечують моніторинг через інтегровані технологічні інструменти в поліцейських відділеннях та центрах протидії злочинності. Незважаючи на стрімке зростання кількості систем відеоспостереження, правоохоронні органи не мають ресурсних можливостей для постійного інтерактивного моніторингу безпекової ситуації. Це призводить до несвоєчасного реагування на злочин. Для подолання обмежень традиційного контролю технічно розвинені країни світу впроваджують системи запобігання злочинам на основі інтелектуальних технологій, таких як штучний інтелект (ШІ), Інтернет речей (IoT) та великі дані [3].

Базовими технологіями у системі інтелектуального запобігання злочинам є аналіз відеозаписів на основі ШІ, платформи для аналітики даних про правопорушення та зондування даних на основі IoT. Для аналізу відеозаписів переважно використовують технології розпізнавання поведінки правопорушників або відстеження підозрюваних у відеоматеріалах. Вони включають інтелектуальне відеоспостереження (наприклад, насильство), автоматичне відстеження підозрюваних, систему розпізнавання облич, ідентифікацію номерних знаків та геоінформаційні системи (ГІС) безпеки відеоспостереження [16–18]. Платформи для аналітики даних про правопорушення переважно використовують технології просторового та часового прогнозування злочинів, технології підтримки прийняття рішень щодо запобігання злочинності та технології інтеграції/підключення до пов'язаних систем. Вони включають платформи соціальної безпеки; системи прогнозування злочинів на основі закономірностей/тенденцій даних про злочинність, поліцейську діяльність у гарячих точках/картографування злочинності/географічне профілювання; інформацію про відео в режимі реального часу, пов'язану з патрульними автомобілями; технології підтримки прийняття рішень із запобігання злочинам на основі ГІС та інтегровані операційні системи розумного міста [19]. Для IoT зазвичай обирають такі технології, як датчики руху для запобігання вторгненню та датчики освітлення для запобігання нічним злочинам. Зокрема це датчики руху в об'єктах контролю доступу; датчики розпізнавання аномальних звуків; датчики відкриття/закриття входних дверей/вікон; технології регулювання освітлення на основі виявлення пішоходів; розумні вуличні ліхтарі на основі датчиків IoT та інтегроване поліцейське обладнання [20].

В Україні лише розпочинається впровадження інтелектуальних технологій для запобігання кримінальним правопорушенням. Платформа CrimeDataLab забезпечує аналіз офіційної статистики протидії злочинності. У її склад входить інтелектуальний асистент CrimeScale, призначений для аналізу кримінальної статисти [21]. В окремих містах впроваджується концепція «Безпечного міста» на основі комплексу інноваційних технологічних рішень. Зокрема платформа INNI забезпечує інтеграцію різних систем відеоспостереження з відповідними інфраструктурними та безпековими системами. Відеоаналітика INNI контролює безпеку на вулицях і дорогах міста, може ідентифікувати порушення правил дорожнього руху, керувати світлофорами та освітленням. Ця платформа забезпечує оперативне реагування правоохоронних органів на правопорушення та здатна ідентифікувати злочинців.

Інтелектуальні технології запобігання злочинності використовують сучасні технологічні рішення для зменшення рівня злочинності та підвищення безпеки у громадських місцях. Ці технології поєднують фізичні, соціальні та технологічні аспекти для створення середовища, яке запобігає злочинним діям.

До таких технологій належать:

- системи відеоспостереження з аналізом відео – використання ІІІ для автоматичного виявлення підозрілих ситуацій або аномальної поведінки;
- розпізнавання облич та номерних знаків – для ідентифікації осіб та транспортних засобів у реальному часі;
- інтелектуальні датчики руху та тривоги – автоматичне виявлення руху у контрольованих зонах та миттєве сповіщення про загрози;
- інтеграція з системами екстреного реагування – поєднання з місцевими правоохоронними органами або службами порятунку для швидкого реагування на інциденти;
- аналітика даних для виявлення кримінальних патернів – використання великих даних для виявлення закономірностей у злочинних діях і попередження майбутніх правопорушень.

На рис. 1 представлено три категорії інтелектуальних технологій запобігання злочинності, які можуть стати основою для розробки комплексної інтелектуальної системи прийняття рішень щодо запобігання злочинності в Україні.

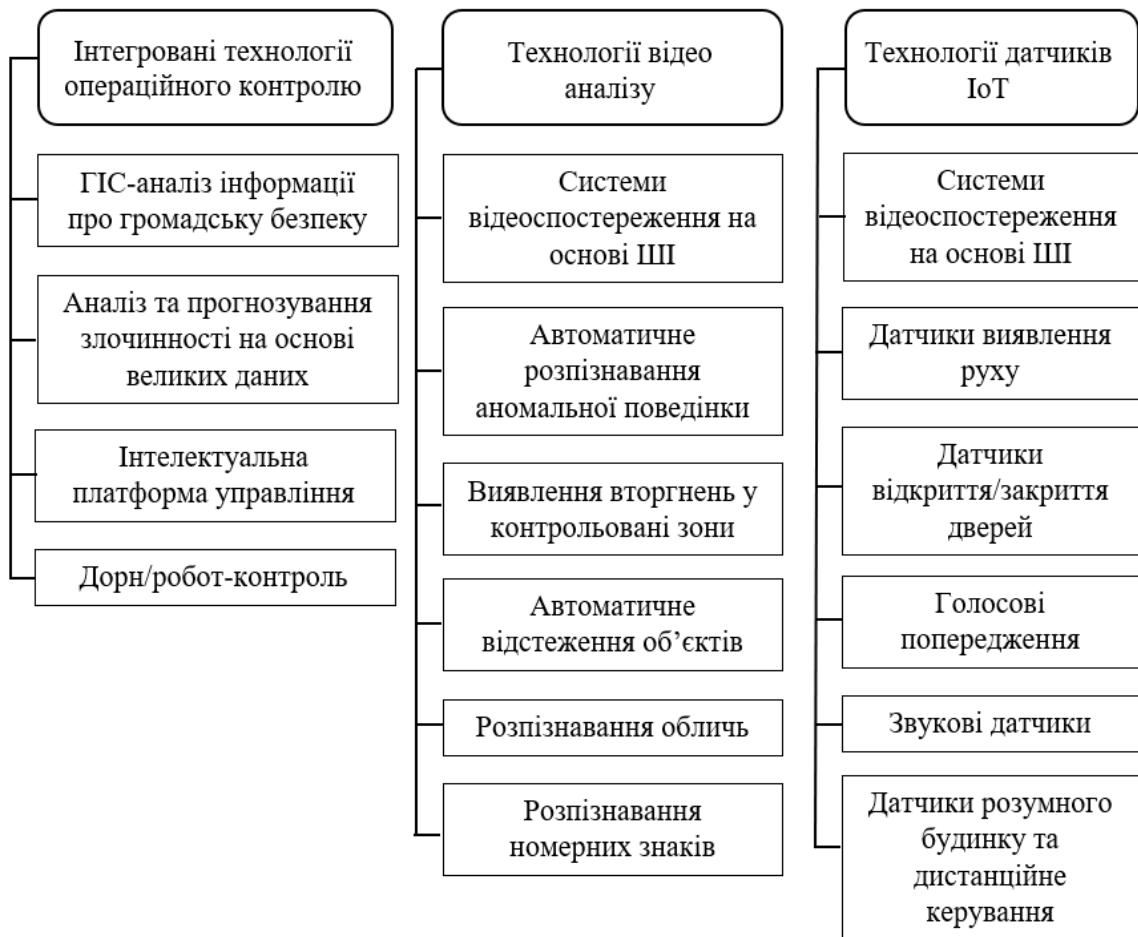


Рис. 1. Інтелектуальні технології запобігання злочинності

1. Інтегровані технології операційного контролю – це системи, що об'єднують моніторинг та управління для цілей запобігання злочинності:
 - ГІС-аналіз інформації про громадську безпеку. Забезпечують підтримку прийняття рішень щодо встановлення нових камер відеоспостереження на основі аналізу місць злочинів. Система використовує геопросторові дані для визначення оптимальних локацій для встановлення камер спостереження на основі даних про кримінальну активність;

- аналіз та прогнозування злочинності на основі великих даних. Технологія використовує аналітику великих даних для реагування на різні типи злочинів та їх прогнозування. Система обробляє великі масиви даних для виявлення закономірностей та передбачення потенційних кримінальних інцидентів;
 - інтелектуальна платформа управління забезпечує інтегрований контроль систем відеоспостереження, мобільних додатків та карт злочинності;
 - дрон/робот-контроль забезпечує підтримку безпілотного патрулювання.
2. Технології відеоаналізу використовують ШІ для автоматичного розпізнавання підозрілої поведінки, відстеження осіб, ідентифікації номерних знаків та миттєвого сповіщення правоохоронців про потенційні загрози у режимі реального часу:
- системи відеоспостереження з удосконаленими функціями для аналізу відео за допомогою ШІ;
 - автоматичне розпізнавання аномальної поведінки (наприклад, напад, скупчення людей) на основі аналізу шаблонів глибокого навчання.
 - Виявлення вторгнень у контрольовані зони забезпечує сповіщення про порушників у контрольованих зонах через відеоаналіз;
 - автоматичне відстеження об'єктів через системи відеоспостереження (наприклад, підозрюваних або зниклих осіб);
 - розпізнавання обличчя для виявлення зниклих чи підозрюваних у злочинах осіб;
 - розпізнавання номерних знаків – контроль за незаконним паркуванням, несплаченими податками та викраденими транспортними засобами.
3. Технології датчиків IoT:
- датчики виявлення руху – контроль доступу та виявлення руху у контрольованих зонах;
 - датчики відкриття/закриття дверей – контроль доступу та виявлення відкриття/закриття дверей у контрольованих зонах;
 - звукові датчики – виявлення криків та голосів, що кличуть на допомогу в екстрених ситуаціях;
 - голосові попередження – автоматичні голосові сповіщення на основі сенсорних даних про аномальні ситуації (наприклад, пожежа);
 - домашні датчики та дистанційне керування – виявлення вторгнень у житло та контроль дистанційного керування.

Оцінювання моделі прийняття рішень щодо запобігання злочинності. Ефективність різних технологічних компонентів інтелектуальної системи прийняття рішень щодо запобігання злочинності (алгоритмів обробки даних з камер відеоспостереження, датчиків IoT та інших джерел інформації) оцінюють ще на етапі проектування такої системи. Такий підхід може забезпечити вибір найбільш ефективних рішень для конкретних умов застосування та можливість оптимізації архітектури системи шляхом аналізу продуктивності різних конфігурацій.

У роботі запропоновано модель прийняття рішень на основі техніки впорядкування переваг за подібністю до ідеального рішення (TOPSIS) для впровадження інтелектуальних технологій у комплексну інформаційну систему правоохоронних органів України [7]. З цією метою визначено відповідні критерії. Для оцінки ефективності впровадження розглянутих вище інтелектуальних технологій запобігання злочинності у комплексну інформаційну систему правоохоронних органів визначено відповідні альтернативи, які відображають різні методи або підходи до вибору відповідних технологій. Аналіз та порівняння цих альтернатив може стати основою для оцінювання індивідуальних переваг і недоліків з точки зору ефективності запобігання злочинності та забезпечення суспільної безпеки. Метою є створити комплексну рамку для оцінювання ефективності впровадження інтелектуальних технологій запобігання злочинності та прийняття обґрунтованих

рішень щодо дієвих практик використання інноваційних рішень для забезпечення громадської безпеки.

Критерії оцінювання елементів інтелектуальних технологій запобігання злочинності. У роботі представлено підхід до визначення критеріїв, заснований на ґрунтовному аналізі літератури та найкращих міжнародних практик. На основі консолідації знань з опублікованих досліджень запропоновано комплексний набір критеріїв, який відображає ключові аспекти ефективності впровадження інтелектуальних технологій у діяльність правоохоронних органів для попередження та розкриття кримінальних злочинів [18, 22].

1. Ефективність запобігання злочинності – оцінювання впливу на запобігання злочинності у результаті застосування технології: оцінка результативності технології щодо зменшення рівня злочинності у конкретних регіонах або громадах.

2. Відповідність політиці запобігання злочинності – оцінювання відповідності технології державним та територіальним політикам у сфері запобігання злочинності.

3. Конкурентоспроможність – оцінювання конкурентоспроможності технології на ринку з огляду на наявні послуги та технології, їхню ефективність і доцільність.

4. Розвиток сектора послуг – оцінювання технологічних тенденцій і потенціалу ринку в галузі послуг, що забезпечують безпеку, з урахуванням можливостей для зростання і розширення ринку.

5. Економічна життєздатність – оцінювання ефективності інвестицій, економічної життєздатності та потенціалу комерціалізації технології: аналіз вартості впровадження, витрат на підтримку та прибутковість у довгостроковій перспективі.

6. Застосовність у галузі – оцінювання застосовності технології у конкретній галузі з урахуванням управління ризиками (наприклад, захист персональних даних, адміністративні затримки, співпраця з службами екстреної допомоги тощо).

7. Ефективність управління – оцінювання ефективності управління та стійкості операцій і діяльності технології у довгостроковій перспективі, включно з аналізом екологічної, економічної та соціальної стійкості для забезпечення сталого розвитку.

Визначення альтернатив (вибір технологічних елементів запобігання злочинності). У роботі проведено аналіз сучасних інтелектуальних технологій, які можуть підвищити ефективність запобігання злочинності, покращити безпеку громадян і сприяти оперативному реагуванню правоохоронних органів, забезпечити ефективний контроль за криміногенною ситуацією, зменшити ризики злочинності та покращити координацію правоохоронних органів України.

1. Інтелектуальна система відеоспостереження на базі ШІ:

- використання високоякісних камер відеоспостереження з удосконаленими можливостями для аналізу злочинної діяльності;
- покращена чіткість зображення та підтримка нічного бачення для ефективного моніторингу.

2. Аналіз за допомогою ШІ для забезпечення громадської безпеки:

- виявлення порушень (незаконне паркування, викидання сміття, куріння у заборонених місцях тощо);
- ідентифікація підозрілої або девіантної поведінки (нетверезі особи, неповнолітні правопорушники тощо).

3. Аналіз ШІ для запобігання злочинності:

- автоматичне відстеження підозрюваних через систему відеоспостереження;
- розпізнавання обличчя для пошуку зниклих осіб та ідентифікації правопорушників;
- виявлення потенційних загроз (акти насильства або підозрілі дії) для попередження злочинів у реальному часі.

4. Автоматичне розпізнавання аномальної поведінки:

- постійний моніторинг відеопотоку з камер спостереження;

- виділення людей та їх дій у кадрі;
 - поточної поведінки з базою нормальних шаблонів;
 - виявлення відхилень та класифікація типу аномальної поведінки (скупчення людей, агресивні рухи тощо).
 - генерування сповіщень для операторів системи безпеки.
5. Система моніторингу злочинності:
- інтерактивні карти злочинності для аналізу ризикованих зон;
 - автоматизований аналіз відео з камер спостереження;
 - інтеграція з екстреними службами для швидкого реагування.
6. Мобільний додаток для запобігання злочинності:
- підвищення безпеки людей, що повертаються додому вночі;
 - функції екстреного сповіщення та виклику допомоги.
7. Роботизовані та дроніві системи безпеки:
- автоматичне патрулювання в районах із підвищеним рівнем злочинності;
 - відеоспостереження та передача даних у реальному часі до поліцейських відділків та центрів управління;
 - миттєве реагування на підозрілі ситуації та інтеграція зі службами безпеки.

Ієрархічна структура моделі оцінювання інтелектуальної системи прийняття рішень щодо запобігання злочинності. Для встановлення ієрархії серед ключових атрибутів спроектовано ієрархію між атрибутами, що стосуються прийняття рішень – критеріями та альтернативами. Першим рівнем запропонованої ієрархічної структури є вибір технологічних елементів запобігання злочинності. Другий рівень складають сім критеріїв оцінювання альтернатив. Третій рівень формують альтернативи – семи вибраних моделей для аналізу та запобігання злочинності (рис. 2).

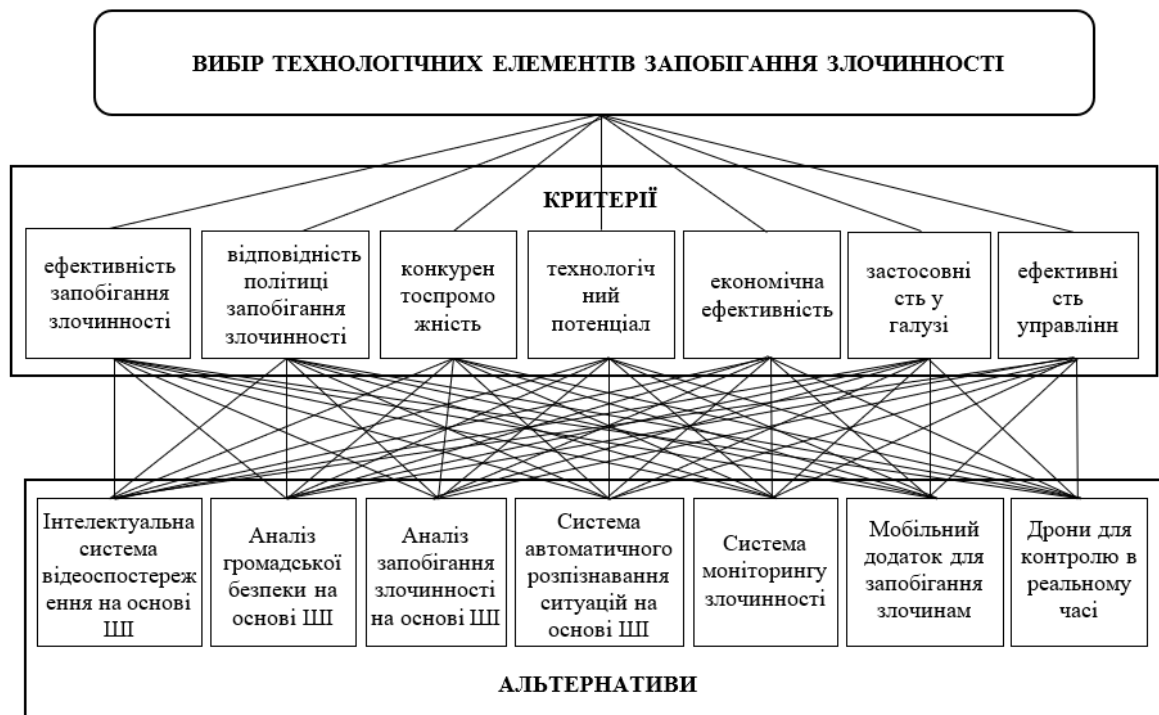


Рис. 2. Ієрархічна структура моделі оцінювання інтелектуальної системи прийняття рішень щодо запобігання злочинності

Математична модель прийняття рішень щодо впровадження інтелектуальних технологій запобігання злочинності. Це дослідження спрямоване на підтримку прийняття рішень щодо впровадження інтелектуальних систем для запобігання

злочинності у правоохоронних органах України. Відповідно, важливо вибрати методологію дослідження, підкріплену науковими доказами та логікою. У цьому контексті нечітке багатокритеріальне прийняття рішень (fuzzy MCDM – multi-criteria decision-making) широко використовується в академічній спільноті для надання об'єктивних пріоритетних альтернатив критеріям оцінки залежно від мети дослідження. TOPSIS може забезпечити раціональну логіку для прийняття рішень, оцінювання найкращих та найгірших альтернатив. Цей метод надає можливість вимірювати ефективність усіх альтернатив з багатокритеріальної перспективи [22]. Метод базується на знаходженні найкращого рішення шляхом визначення відстаней між різними альтернативами та ідеальними точками у багатовимірному просторі. Він дієвий у ситуаціях, де неможливо точно виміряти критерії або де існує значна невизначеність. Основна ідея методу полягає в тому, щоб знайти альтернативу, яка одночасно максимально наближену до позитивного ідеального розв'язку та максимально віддалену від негативного ідеального розв'язку. Це досягається через складний математичний апарат нечіткої логіки, який перетворює оцінки, представлені у лінгвістичній формі, на числові значення.

У роботі використано теорію нечітких множин [23] для вирішення проблеми невизначеності при прийнятті рішень на основі TOPSIS. Ця теорія вводить нечітку логіку та нечітку множину для подолання неточності та неоднозначності суб'єктивного судження в оцінці. Як передова методологія, нечіткий TOPSIS може математично виражати неоднозначні явища, включаючи нечітку кількісну інформацію, суб'єктивні та нечіткі судження, визначати раціональні альтернативи для прийняття рішень.

Для оцінювання інтелектуальних систем для запобігання злочинності на основі нечіткого TOPSIS спочатку було обрано та досліджено критерії оцінювання, а потім ваги отриманих критеріїв оцінки застосовуються для оцінки альтернатив. Для критеріїв оцінки використано 7-бальну шкалу Лікерта. Передбачається, що опитування буде проведено серед експертів, які володіють технічними знаннями. Шкала Лікерта – це біполярний метод шкалювання, який послідовно вимірює позитивні та негативні відповіді на запитання анкети. Для більш об'єктивної кількісної оцінки даних у роботі застосовано М – трикутне нечітке число (TFN – Triangular Fuzzy Number), наближене за допомогою лінійної функції належності. М використано для обчислення ваг. $M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ – функція належності для нижньої, середньої та верхньої меж для одного чіткого значення (рис. 3).

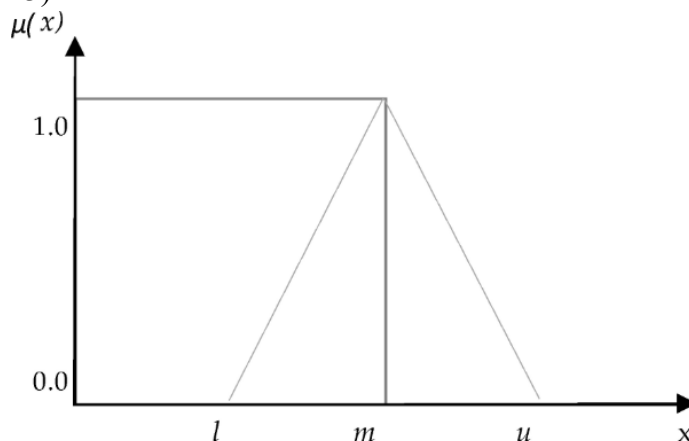


Рис. 3. Трикутне нечітке число

TFN представлене як трикутник із трьох точок (l, m, u). l = нижня межа, m = середня межа, u = верхня межа). Їх площа є величиною TFN. Для обчислення TFN у роботі використано нечітку шкалу, представлену у таблиці 1 [24].

Таблиця 1.

Нечітка шкала оцінювання критеріїв	
Оцінка у лінгвістичній формі	TFN
Надзвичайно низька	(0 0 0,1)
Дуже низька	(0, 0,1 0,3)
Низька	(0,1 0,3 0,5)
Середня	(0,3 0,5 0,7)
Висока	(0,5 0,7 0,9)
Дуже висока	(0,7 0,9 1)
Надзвичайно висока	(0,9 1 1)

У роботі запропоновано використати рівняння (1)–(4) для визначення TFN $S_i = (l_i, m_i, u_i)$ для i -го атрибута. Для кінцевого розрахунку нормалізованого власного вектора мінімального значення для дефазифікації TFN S_i за критеріями оцінки [25, 26].

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{ij} \times \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{ij} \right]^{-1} \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^m M_{ij} = \left(\sum_{j=1}^m l_{ij}, \sum_{j=1}^m m_{ij}, \sum_{j=1}^m u_{ij} \right) \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{ij} = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m l_{ij}, \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m m_{ij}, \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m u_{ij} \right). \quad (3)$$

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{ij} \right]^{-1} = \left[\frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m l_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m m_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m u_{ij}} \right]. \quad (4)$$

Рівняння (1) є сумою оцінок, визначених до фазифікації для кожного з елементів. Рівняння (2) є трикутною фазифікацією на основі значень l , m та u за нечіткою шкалою. Рівняння (3) є сумою критеріїв оцінки для кожного значення l , m та u . Рівняння (4) є кінцевим значенням TFN, яке є оберненим значенням до суми l , m та u .

У роботі запропоновано обчислювати фазифікацію альтернатив за критеріями за рівнянням (5), а нечітку вагу – за рівнянням (6) [27].

$$a_{ij} = \min_k (a_{ij}^k), b_{ij} = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^k b_{ij}^k, c_{ij} = \max_k (c_{ij}^k) \quad (5)$$

$$w_{j1} = \min_k (w_{j1}^k), w_{j2} = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^k (w_{j2}^k), w_{j3} = \max_k \sum_{k=1}^k (w_{j3}^k) \quad (6)$$

Далі обчислюються матриці рішень $\tilde{V} = (v_{ij})$ та $v_{ij} = r_{ij} \times w_j$ за допомогою нормалізованої матриці рішень $\tilde{R} = [r_{ij}]$ (формули (7) та (8)). Ваги критеріїв оцінки (TFN) з розраховуються за формулою (4) [27].

$$(\tilde{r}_{ij}) = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^*}, \frac{c_{ij}}{c_j^*} \frac{c_{ij}}{c_j^*} \right), c_j^* = \max_i (c_{ij}) \text{ (критерії вигоди)} \quad (7)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^*}, \frac{c_{ij}}{c_j^*} \frac{c_{ij}}{c_j^*} \right), c_j^* = \max_i (c_{ij}) \text{ (критерії вартості)} \quad (8)$$

Після цього обчислюються нечітке позитивне ідеальне рішення (FPIS) за формулою (9) та нечітке негативне ідеальне рішення (FNIS) за формулою (10).

$$A^* = (v_1^*, v_2^*, \dots, v_n^*), \quad (9)$$

де $(\tilde{v}_j^*) = \max_i (v_{ij3})$.

$$A^- = (\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_n^-), \quad (10)$$

$\tilde{v}_j^- = \min_i (v_{ij1})$.

Для обчислення відстаней до FPIS та FNIS для кожної з альтернатив, у цьому дослідженні використано метод розрахунку відстані між двома TFN, запропонований у [24]. При $\tilde{x} = (a_1, b_1, c_1)$, $\tilde{y} = (a_2, b_2, c_2)$ відстань між двома TFN обчислюється за формулою (11). Остаточна відстань до FPIS та FNIS для кожної з альтернатив обчислюється за формулою (12).

$$d(\tilde{x}, \tilde{y}) = \sqrt{\frac{1}{3} \left[(a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2 + (c_1 - c_2)^2 \right]}, \quad (11)$$

$$d_i^* = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^*), d_i^- = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-). \quad (12)$$

Коефіцієнт близькості для кожної з альтернатив CC_i обчислюється за формулою (13).

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^*} \quad (13)$$

Після цього визначаються ранги альтернатив від найвищого CC_i до найнижчого.

Висновки. Дана робота присвячена розробці моделі прийняття рішень на основі методу нечіткого TOPSIS для оцінювання ефективності впровадження інтелектуальних технологій запобігання злочинності у комплексну інформаційну систему правоохоронних органів України. Здійснено класифікацію інтелектуальних технологій запобігання злочинності та виділено три основні категорії: інтегровані технології операційного контролю, технології відеоаналізу та технології датчиків IoT. Визначено ключові елементи інтелектуальних технологій запобігання злочинності, зокрема системи відеоспостереження з аналізом відео, розпізнавання облич та номерних знаків, інтелектуальні датчики руху та тривоги, інтеграція з системами екстреного реагування, аналітика даних для виявлення кримінальних патернів. Розроблено модель прийняття рішень на основі методу нечіткого TOPSIS для оцінювання ефективності впровадження інтелектуальних технологій в комплексну інформаційну систему правоохоронних органів. Запропоновано математичний апарат для реалізації нечіткого TOPSIS, що базується на використанні трикутних нечітких чисел та забезпечує можливість враховувати невизначеність при оцінюванні альтернатив за визначеними критеріями. Розроблена ієрархічна структура моделі оцінювання може бути використана для прийняття обґрунтованих рішень щодо впровадження інтелектуальних технологій запобігання злочинності в діяльність правоохоронних органів України.

Список літератури

1. Berezka K., Kovalchuk O., Banakh S., Zlyvko S., Hrechaniuk R. A Binary Logistic Regression Model for Support Decision Making in Criminal Justice. *Folia Oeconomica Stetinensia*. 2022. Vol. 22(1). P. 1–17. DOI: <https://sciendo.com/article/10.2478/fo-2022-0001>.
2. Cai Y., Li D., Wang Y. Intelligent crime prevention and control big data analysis system based on imaging and capsule network model. *Neural Process. Lett.* 2020. Vol. 53. P. 2485–2499.

3. Choi W., Na J., Lee S. Evaluating Intelligent CPTED Systems to Support Crime Prevention Decision-Making in Municipal Control Centers. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14(15):6581. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14156581>.
4. Joshi C., Curtis-Ham S., D'Ath C., Searle D. Considerations for Developing Predictive Spatial Models of Crime and New Methods for Measuring Their Accuracy. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021. Vol. 10(9):597. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi10090597>.
5. Guzman E., Andres B., Poler R. A Decision-Making Tool for Algorithm Selection Based on a Fuzzy TOPSIS Approach to Solve Replenishment, Production and Distribution Planning Problems. *Mathematics*. 2022. Vol. 10(9):1544. DOI: <https://doi.org/10.3390/math10091544>.
6. Kovalchuk O., Shevchuk R., Babala L., Kasianchuk M. Support vector machine to criminal recidivism prediction. *Intl Journal of Electronics and Telecommunication*. 2024. Vol. 70(3). P. 691–697. DOI: <https://doi.org/10.24425/ijet.2024.149598>.
7. Kovalchuk O., Kasianchuk M., Karpinski M., Shevchuk R. Decision-Making Supporting Models Concerning the Internal Security of the State. *International Journal of Electronics and Telecommunications*. 2023. Vol. 69. No. 2. P. 301–307. DOI: <https://doi.org/10.24425/ijet.2023.144365>.
8. Kovalchuk O., Karpinski M., Banakh S., Kasianchuk M., Shevchuk R., Zagorodna N. Prediction Machine Learning Models on Propensity Convicts to Criminal Recidivism, *Information*. 2023. Vol. 14(3). P. 161. DOI: <https://doi.org/10.3390/info14030161>.
9. Ковальчук О. Я. Метод головних компонент для моделювання ризиків кримінальної злочинності. Вісник Хмельницького національного університету. 2023. № 5. С. 154–158.
10. Kovalchuk O. Modeling the risks of the confession process of the accused of criminal offenses based on survival concept. *Scientific Journal of TNTU*. 2022. Vol. 108(4), pp. 27–37. DOI: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2022.04.
11. Kovalchuk O. Correspondence analysis for detecting risk factors for criminal recidivism. *Scientific Journal of TNTU*. 2023. Vol. 111. No 3. P. 35–47. URL: <https://visnyk.tntu.edu.ua/index.php?art=736>.
12. Yang J., Kim D., Jung S. Using Eye-Tracking Technology to Measure Environmental Factors Affecting Street Robbery Decision-Making in Virtual Environments. *Sustainability*. 2020. Vol. 12(18):7419. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12187419>.
13. Minardi R., Villani M.L., De Nicola A. Semantic Reasoning for Geolocalized Assessment of Crime Risk in Smart Cities. *Smart Cities*. 2023. Vol. 6(1):179–195. DOI: <https://doi.org/10.3390/smartcities6010010>.
14. Park M-s., Lee H. Smart City Crime Prevention Services: The Incheon Free Economic Zone Case. *Sustainability*. 2020. Vol. 12(14):5658. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12145658>.
15. Basilio M. P., Pereira V. Operational research applied in the field of public security: The ordering of policing strategies such as the ELECTRE IV. *J. Model. Manag.* 2020. Vol. 15. P. 1227–1276.
16. Khan P. Byun Y. Park, N. A data verification system for CCTV surveillance cameras using blockchain technology in smart cities. *Electronics*. 2020. Vol. 9:484.
17. You J. D. Study on construction safe smart city from crime. *Korean Assoc. Police Sci. Rev.* 2017. Vol. 19. P. 199–222.
18. Socha R., Kogut B. Urban video surveillance as a tool to improve security in public spaces. *Sustainability*. 2020. Vol. 12:6210.
19. Cai Y., Li D., Wang Y. Intelligent crime prevention and control big data analysis system based on imaging and capsule network model. *Neural Process. Lett.* 2020. Vol. 53. P. 2485–2499.

20. Park M., Lee H. Smart city crime prevention services: The Incheon free economic zone case. *Sustainability*. 2020. Vol. 12:5658.
21. Карчевський М. В. (2022). Протидія злочинності в Україні у форматі data science. *Вісник Луганського державного університету внутрішніх справ імені Е.О. Дідоренка*. № 2(98). С. 202–227. DOI: <https://doi.org/10.33766/2524-0323.98.202-227>.
22. Kim G., Park C.S., Yoon K.P. Identifying investment opportunities for advanced manufacturing systems with comparative integrated performance measurement. *Int. J. Prod. Econ.* 1997. № 50. С. 23–33.
23. Zadeh L. Fuzzy sets. *Inf. Control*. 1965. Vol. 8. P. 338–353.
24. Chen C. Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets Syst.* 2000. Vol. 114. P. 1–9.
25. Choi W., Kim T., Na J., Youn J. Assessment of Dynamic Object Information Utilization Service in a Control Center for Each Urban Scale via Fuzzy AHP. *Systems*. 2023. Vol. 11:368.
26. Choi W., Jang B., Jung I., Sung H., Jang Y. Evaluation of Preferences for a Thermal-Camera-Based Abnormal Situation Detection Service via the Integrated Fuzzy AHP/TOPSIS Model. *Appl. Sci.* 2023. Vol. 13:11591.
27. Sorin N., Simona D., Ioan D. Fuzzy TOPSIS: A General View. *Procedia Comput. Sci.* 2016. Vol. 91. P. 823–831.

MATHEMATICAL DECISION-MAKING MODEL FOR IMPLEMENTING CRIME PREVENTION INTELLIGENT TECHNOLOGIES BASED ON FUZZY TOPSIS METHOD

O.Ya. Kovalchuk¹, L.V. Babala¹, R.I. Ivanytskyi²

¹West Ukrainian National University

11, Lvivska Str., Ternopil, 46009, Ukraine

²Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University

2 M. Kryvonosa. Str., 46009 Ternopil, Ukraine

Emails: olhakov@gmail.com, ludaduma7@gmail.com, romikiv@ukr.net

The article presents a decision-making model based on the fuzzy TOPSIS method for evaluating the effectiveness of implementing intelligent crime prevention technologies in the integrated information system of Ukrainian law enforcement agencies. Intelligence crime prevention technologies have been classified into three main categories: integrated operational control technologies, video analysis technologies, and IoT sensor technologies. Key elements of intelligent technologies have been identified, including video surveillance systems with video analysis, face and license plate recognition, intelligent motion sensors and alarms, integration with emergency response systems, and data analytics for criminal pattern detection. Seven evaluation criteria are proposed: crime prevention effectiveness, compliance with crime prevention policy, competitiveness, service sector development, economic viability, industry applicability, and management effectiveness. Six alternative technological solutions have been identified, and a mathematical apparatus has been developed for implementing fuzzy TOPSIS using triangular fuzzy numbers. A three-level hierarchical structure of the evaluation model has been constructed, enabling the justified selection of technological solutions considering multiple criteria and uncertainty in expert assessments. The practical significance of the work lies in the possibility of using the developed model to optimize the architecture of the integrated law enforcement information system by analyzing the performance of various configurations. The scientific novelty of the work lies in developing a decision-making model that, unlike existing approaches, accounts for uncertainty in expert assessments and enables multi-criteria analysis of alternative technological solutions. A classification of intelligent crime prevention technologies has been proposed, and their key elements have been identified, creating a theoretical foundation for further research in this field. Future research may focus on practical testing of the developed model, improving the evaluation criteria system, and expanding the set of alternative technological solutions.

Keywords: intelligent technologies, crime prevention, fuzzy TOPSIS, decision making, artificial intelligence, IoT devices, video analytics