

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**КРИШТАЛЬ ВАСИЛЬ МИКОЛАЙОВИЧ**



УДК 004.942:614.8

**ЕВОЛЮЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ  
ПРИ КОМПЛЕКТУВАННІ АВАРІЙНО-РЯТУВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ**

05.13.06 – Інформаційні технології

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Черкаси – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Черкаському інституті пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Снитюк Віталій Євгенович,**  
Київський національний університет  
імені Тараса Шевченка,  
декан факультету інформаційних технологій

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Аль-Амморі Алі Нурддинович,**  
Національний транспортний університет,  
завідувач кафедри інформаційно-аналітичної діяльності  
та інформаційної безпеки;

доктор технічних наук, доцент  
**Мусієнко Андрій Петрович,**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»,  
професор кафедри автоматизації проектування  
енергетичних процесів і систем.

Захист дисертації відбудеться 30 вересня 2021 року о 12.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 73.052.04 у Черкаському державному технологічному університеті за адресою: бул. Шевченка 460, 18006, м. Черкаси.

Із дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Черкаського державного технологічного університету за адресою: бул. Шевченка 460, 18006, м. Черкаси.

Автореферат розісланий 28 серпня 2021 року.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Ю.Ю. Бондаренко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Економічний розвиток в Україні в останні десятиліття визначався зростанням виробництва в металургійній, хімічній та енергетичній галузях. Така спрямованість є передумовою екологічних, техногенних катастроф, ймовірність відповідних загроз з кожним роком зростає, оскільки технологічне обладнання значною мірою виробило свій ресурс. Одночасно спостерігається певний кадровий і ресурсний дефіцит, обумовлений причинами різного характеру. Впливають і обставини, пов'язані з певними агресивними зовнішніми впливами.

На перший рівень виходять завдання забезпечення безпеки проживання населення, надання йому своєчасної та якісної допомоги у критичних умовах. Для цього необхідно здійснювати реформування аварійно-рятувальних служб та підвищувати ефективність їх діяльності, здійснювати технічне переоснащення. Комплектування аварійно-рятувальних підрозділів сучасною технікою та забезпечення її роботоздатного стану є першочерговою задачею. На сьогодні здійснюється виробництво значної кількості найменувань засобів для проведення аварійних та рятувальних робіт. У той же час носій таких засобів – пожежний чи спеціальний автомобіль має обмежений корисний простір.

Системному підходу до вирішення складних проблем у загальному, аналізу проблеми комплектування, зокрема, та процесам прийняття відповідних рішень присвячені роботи відомих українських та закордонних вчених: Згуровського М.З., Зайченка Ю.П., Панкратової Н.Д., Тимченка А.А., Яковенка Ю.Ф. Оскільки проблема комплектування є слабо структурованою, то для її вирішення необхідно застосовувати технології інтелектуальної обробки даних, значний внесок у розвиток яких внесли вчені Доріго М., Голланд Дж., Сааті Дж., Рехенберг І., Швєфель Х.-П. та інші.

Водночас, проблема комплектування аварійно-рятувальної техніки має певні особливості, які не дозволяють безпосередньо застосувати відомі моделі та методи. Зокрема, фактори, які впливають на ефективність процесу комплектування мають як кількісну, так і якісну природу. Багатокритеріальність задачі комплектування аварійно-рятувальної техніки, її важкоформалізованість та слабка структурованість свідчать про необхідність розробки еволюційних технологій підтримки прийняття рішень при комплектуванні.

Таким чином, завдання розробки моделей і методів підтримки прийняття рішень щодо комплектування аварійно-рятувальної техніки на основі еволюційної парадигми є важливим і актуальним.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація виконана в рамках науково-дослідної теми Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Метод розв'язання задачі комплектування аварійно-рятувальної техніки з використанням принципу домінування і генетичного алгоритму», номер державної реєстрації 01112U008406.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційного дослідження є підвищення ефективності процесів прийняття рішень при надзвичайних ситуаціях шляхом розробки моделей та еволюційних методів комплектування аварійно-

рятувальної техніки в умовах невизначеності. Для досягнення цієї мети в дисертаційній роботі необхідно розв'язати такі завдання:

- виконати аналіз принципів, моделей, методів та інструментальних засобів підтримки прийняття рішень при ліквідації наслідків пожеж і надзвичайних ситуацій та комплектуванні аварійно-рятувальної техніки;
- виконати формалізовану постановку задачі комплектування аварійно-рятувальної техніки та розробити інформаційно-аналітичні моделі її життєвого циклу;
- побудувати комплекс моделей, які супроводжуватимуть одержаний розв'язок задачі комплектування по етапах його життєвого циклу;
- розробити метод розв'язання задачі комплектування аварійно-рятувальної техніки при нечітких експертних перевагах;
- розробити еволюційні методи визначення оптимального варіанту комплектування аварійно-рятувальної техніки;
- розробити структуру системи підтримки прийняття рішень при комплектуванні аварійно-рятувальної техніки та виконати експериментальну верифікацію розроблених моделей та методів.

**Об'єктом дослідження** є процеси інформаційно-аналітичного супроводу процесів прийняття рішень при ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, аварій та катастроф.

**Предмет дослідження** – моделі, еволюційні методи та інструментальні засоби комплектування аварійно-рятувальної техніки в умовах невизначеності.

**Методи дослідження.** У дисертаційній роботі використані елементи системного підходу та системного аналізу як науково-практичних методологій вирішення складних проблем та дослідження складних систем, відповідно.

Для порівняльного аналізу технологій комплектування застосовувались елементи теорії дискретної оптимізації; формалізація задач дослідження та побудова моделей здійснювалась з урахуванням основних положень теорії багатокритеріальної оптимізації, теорії нечітких систем та нечіткої логіки; пошук оптимального комплексу аварійно-рятувальної техніки здійснювався на основі технологій штучного інтелекту та еволюційного моделювання.

При розробці структури та визначенні елементної бази системи підтримки прийняття рішень використані методи прийняття рішень, елементи теорії баз даних та технології побудови прикладних експертних систем

**Наукова новизна одержаних результатів.** У дисертаційному дослідженні розв'язано наукове завдання розробки моделей, методів та інструментальних засобів комплектування аварійно-рятувальної техніки на основі еволюційної парадигми, що дозволило одержати теоретичні та практичні результати, які характеризують новизну дослідження і особистий внесок автора, зокрема:

***вперше:***

- розроблено модель пошуку оптимального варіанту комплектування аварійно-рятувальної техніки, у якій враховано ретроспективні дані про частоту та ефективність застосування комплектних елементів, що дозволило встановити значущість елементів та об'єктивізувати процеси формування комплектів аварійно-рятувальної техніки;

**удосконалено:**

- метод комплектування аварійно-рятувальної техніки, у якому враховуються нечіткі експертні висновки, що дозволяє визначити оптимізований варіант комплектації та ступінь його оптимальності;

- еволюційні методи визначення оптимального варіанту комплектування аварійно-рятувальної техніки на основі принципу домінування та застосування штрафної функції, що дозволило уникнути вилучення перспективних варіантів із множини потенційних розв'язків задачі комплектування та зменшити час обчислень.

**Практичне значення одержаних результатів.** Отримані автором теоретичні результати доведені до конкретних інженерних методик, алгоритмів і програм, а саме, розроблено систему підтримки прийняття рішень при формуванні комплектів аварійно-рятувального обладнання.

Основні положення, одержані в дисертації, спрямовані на подальший розвиток технологій оптимізації процесів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій. Розроблені моделі та методи складають методологічну базу процесів прийняття рішень щодо комплектування аварійно-рятувальної техніки.

Результати дисертаційного дослідження впроваджені або використані в Головному управлінні ДСНС України в Київській області, Інституті державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, ТОВ «Промислова компанія Пожмашина», а також використовуються у навчальному процесі Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України при вивченні курсів «Організація експлуатації пожежної техніки», «Інженерна та аварійно-рятувальна техніка», «Автоматизовані системи управління та зв'язок».

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні результати, що виносяться до захисту, одержані автором самостійно. У друкованих працях, підготовлених і опублікованих у співавторстві, йому належить: у роботі [1] – еволюційний метод для визначення оптимального комплекту аварійно-рятувальної техніки та основні аспекти формування потенційних розв'язків на основі принципу протекціонізму; в [2, 3] – моделі та метод визначення оптимального варіанту комплектування на основі нечіткої багатокритеріальної оптимізації з використанням методу аналізу ієрархій та побудови функцій належності на основі попарних порівнянь пріоритетності критеріїв; у [4] – системна модель вибору оптимального комплекту аварійно-рятувальної техніки; у [5] – критерій актуальності аварійно-рятувального обладнання; у роботі [6] наведено аспекти формування цільової функції; в [12] – визначено елементи еволюційних технологій визначення оптимального комплекту аварійно-рятувальної техніки.

**Апробація результатів дисертації.** Основні ідеї, принципи, положення та результати досліджень доповідались та обговорювались на наукових конференціях:

- X, XIII Міжнародних науково-практичних конференціях «Математичне та імітаційне моделювання систем» (м. Чернігів, 2015, 2018 рр.);
- III, IV Міжнародних науково-практичних конференціях «Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)» (м. Київ-Черкаси, 2015, 2017 рр.);
- VII Українсько-польській науково-практичній конференції «Електроніка та інформаційні технології (ЕЛІТ-2015)» (м. Львів-Чинадієво, 2015 р.);

- II Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології та взаємодії (IT&I – 2015)» (м. Київ, 2015 р.);
- IV Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні управляючі системи та технології (ІУСТ–2015)» (м. Одеса, 2015 р.).

**Публікації за темою дисертації.** За результатами дисертаційної роботи опубліковано 12 наукових праць, з яких 4 статті у фахових виданнях України, 1 стаття у закордонному виданні, 7 тез доповідей у матеріалах міжнародних конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 137 найменувань, та 3 додатків на 16 сторінках. Загальний обсяг дисертації 138 сторінок, у тому числі 110 сторінок основного тексту. Робота містить 6 рисунків та 3 таблиці.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми роботи, розкрито суть і стан проблеми, зв'язок роботи з науковими темами, сформульовано мету й завдання дослідження, наукову новизну роботи та практичне значення одержаних результатів, зазначено особистий внесок здобувача та кількість публікацій за темою дисертації.

У **першому розділі** реалізовано елементи системного підходу до вирішення завдання комплектування аварійно-рятувальної техніки (АРТ). Встановлено, що комплектування АРТ можна віднести до задач багатокритеріальної оптимізації, які розв'язуються в умовах фінансового та ресурсного дефіциту. Головними наслідками, до яких приведе її розв'язання, є:

- забезпечення ефективного і повного проведення комплексу аварійно-рятувальних робіт на обмеженій території, який полягає у забезпеченні безпеки людей, ліквідації наслідків аварій та мінімізації матеріальних збитків;
- забезпечення прийнятних компонувальних рішень, оскільки перелік обладнання для виконання аварійно-рятувальних робіт є достатньо великим і значна кількість елементів є взаємно-замінними.

Традиційно досягнення таких цілей пов'язано з вибором певного варіанту з допустимих або закупівлею директивно зазначеного обладнання. На сьогоднішній день відсутній системний підхід до визначення оптимального комплектування; рішення приймаються, виходячи з досвіду та інтуїції відповідальних осіб. Очевидно, що вирішувати таке завдання необхідно, базуючись на інформації про територію, на якій буде застосовуватися АРТ. Управління процесом здійснення комплектування повинно виконуватись, виходячи з вивчення таких аспектів:

- кількості підприємств, що є потенційними джерелами екологічної та техногенної загрози;
- типу можливих катастроф, їх масштабів і способів ліквідації;
- кількості населення та його структури;
- наявності та розміру фінансових ресурсів, які можна витратити на придбання обладнання.

Проаналізовано ідеї, принципи, моделі, методи та інструментальні засоби, які використовуються чи могли б використовуватись для формування оптимальних комплектів аварійно-рятувального обладнання (АРО). Показано, що дана задача має багато спільного з відомими задачами упаковки в контейнери, задачі про ранець та іншими. Головною відмінністю є те, що задача комплектування АРТ є важкоформалізованою та слабо структурованою, в ній присутні як кількісні, так і якісні показники та критерії, а також обмеження на габаритні розміри як носія, так і елементів обладнання.

Вказано на те, що дана дисертація є логічним продовженням циклу робіт із інформаційно-аналітичного супроводу процесів прийняття рішень при надзвичайних ситуаціях, аваріях, катастрофах та пожежах, які виконувались в Черкаському інституті пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України. Особливістю результатів, які одержані, є регіональна орієнтованість АРТ. Саме комплектування такої техніки, виходячи із особливостей клімату, рельєфу, природного та техногенного навантаження, а також соціального зрізу населення мають стати визначальними факторами вибору тих чи інших елементів обладнання.

Показано, що одним з перших кроків розв'язання задачі комплектування АРТ є технологічне передбачення можливих техногенних та екологічних катастроф у регіоні та їх наслідків, що можливо здійснювати як в умовах наявності ретроспективних даних, так і на базі моделювання майбутніх процесів з використанням нормативної інформації (унікальне моделювання). Статистичні дані складуть основу прогнозування різнотипових аварійних ситуацій, які викликані повторюваними природними факторами та результатами людської діяльності. Передбачення масштабів надзвичайних ситуацій та наявності певної кількості пожежних автомобілів дозволить здійснити визначення необхідної кількості елементів АРО.

Формалізація згаданих вище задач та їх відображення в категорії моделей дозволить здійснити структурну та параметричну ідентифікацію потрібних залежностей, а також забезпечити можливість пошуку області компромісу. Оскільки їх розв'язання відбувається в умовах, що динамічно змінюються, то раціональним є застосування методів еволюційного моделювання для розв'язання вказаних задач оптимізації.

Наведено постановку задачі дослідження, побудовано та визначено особливості структурно-логічної схеми дослідження, згідно якої представлені одержані результати.

У **другому розділі** побудовано інформаційно-аналітичні моделі комплектування аварійно-рятувальної техніки. Встановлено, що задача комплектування потребує системного підходу до її розв'язання, що пов'язано з такими особливостями:

- комплектування однієї окремої одиниці здійснюється, виходячи з комплектування підрозділів, що обслуговують певну територію, на якій проживає певна кількість населення, яка має свої особливості природного та штучного середовища та на якій прогноуються наслідки тієї чи іншої аварії або катастрофи;

– задача комплектування є багатокритеріальною, що визначається необхідністю забезпечення максимальної функціональності обладнання, мінімізації його габаритних розмірів, максимізації потужності та мінімізації вартості;

– необхідною умовою розв’язання такої складної задачі є розв’язання задачі комплектування одного пожежного автомобіля аварійно-рятувальними засобами;

– необхідно передбачити облік якісних особливостей процесу прийняття рішень, що дозволить отримувати прийнятні рішення на базі теорії нечітких множин.

Виконано формалізовану постановку задачі комплектування АРТ. Нехай множина  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  визначає номенклатуру АРТ. Кожен елемент множини  $X$  належить до одного з класів множини  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$ , де  $k \ll n$ . Припустимо, що до комплекту має належати обладнання з кожного з  $\{C_1, C_2, \dots, C_m\}$  класів,  $m < k$ , тобто  $\{X_{i_1}^1, X_{i_2}^1, \dots, X_{i_j}^1\} \subset C_1, \dots, \{X_{i_1}^m, X_{i_2}^m, \dots, X_{i_m}^m\} \subset C_m$ . Кожному елементу множини  $X$  поставимо у відповідність сукупність значень

$$X_q \rightarrow \langle F_{1_q}, F_{2_q}, F_{3_q}, F_{4_q}, F_{5_q}, a_q, b_q, c_q \rangle, \quad (1)$$

де  $F_{1_q}$  – значення функціональності  $q$ -го елемента;  $F_{2_q}$  – значення його продуктивності (потужності);  $F_{3_q}$  – надійність елемента,  $F_{4_q}$  – ціна елемента,  $F_{5_q}$  – його актуальність (значущість);  $a_q, b_q, c_q$  – його габаритні розміри,  $q = \overline{1, n}$ .

Без обмеження загальності будемо припускати, що всі елементи мають форму прямокутного паралелепіпеда і вони повинні бути розміщені в прямокутному контейнері. Крім того, в контейнері має бути по одному елементу з кожного класу.

Тоді задача комплектування АРТ зводиться до задачі багатокритеріальної оптимізації:

$$F_1(x) \rightarrow \max, F_2(x) \rightarrow \max, F_3(x) \rightarrow \max, F_4(x) \rightarrow \min, F_5(x) \rightarrow \max, \quad (2)$$

де  $x = (x_{i_1}^1, x_{i_2}^2, \dots, x_{i_m}^m), x_{i_j}^j \in C_j$  при обмеженнях:

$$F_1(x_{i_j}^j) \geq F_{1\min}^j, F_2(x_{i_j}^j) \geq F_{2\min}^j, F_3(x_{i_j}^j) \geq F_{3\min}^j, F_4(x_{i_j}^j) \leq F_{4\max}^j, F_5(x_{i_j}^j) \geq F_{5\min}^j, F_i(\cdot) > 0, i = \overline{1, 5},$$

$$0 < a_q(x_{i_j}^j) < \max\{a, b, c\}, 0 < b_q(x_{i_j}^j) < \max\{a, b, c\}, 0 < c_q(x_{i_j}^j) < \max\{a, b, c\}, \quad (3)$$

де  $a_q(x_{i_j}^j), b_q(x_{i_j}^j), c_q(x_{i_j}^j)$  – габаритні розміри елемента АРТ,  $a, b, c$  – габаритні розміри контейнера.

Припустимо, що один комплект АРТ  $K_i$  містить елементи множини  $X$ , тобто  $K_i \subset X$ . При цьому можуть існувати такі комплекти, кількість елементів у яких не збігається, тобто  $\exists i, j, i \neq j: |K_i| \neq |K_j|$ . Таким чином, одержуємо ще один варіант постановки задачі (2)-(3), в якому кількість елементів обладнання у різних комплектах може бути різною.

І ще одна вимога, яка не є обов’язковою, але виконання якої є переважним: в один комплект АРТ не входить два і більше елементів з одного класу, тобто не існує таких  $j, q, p: (X_{jq} \in K_i) \& (X_{jp} \in K_i)$ .



Не обмежуючи загальність, припустимо, що контейнер один і він має форму прямокутного паралелепіпеда з габаритами  $a, b, c$ . Використовуючи елементи методу послідовного аналізу варіантів з розгляду виключаються ті можливі рішення, які не задовольняють одній або декільком умовам.

Очевидними є такі обмеження:

$$1. \sum_i (a_i \cdot b_i \cdot c_i) \leq a \cdot b \cdot c, \text{ тобто сумарний об'єм елементів комплексу не повинен}$$

перевищувати загальний об'єм контейнера.

2  $\forall i \max\{a_i, b_i, c_i\} < \max\{a, b, c\}$ , що вказує на те, що якщо один елемент має принаймні один габаритний розмір, що перевищує найбільший габарит контейнера, то такий комплект виключається.

Потрібно знайти комплект АРТ, який є розв'язком задачі (2)-(3).

Визначимо деякі поняття, які зустрічаються в (1)-(3). Так, під надійністю  $F_3(X_j)$  будемо розуміти:

– середній час напрацювання на відмову, якщо він відомий;

– значення  $\frac{N_0}{T}$ , де  $N_0$  – кількість відмов,  $T$  – одиниця часу, якщо є статистичні

дані;

– експертні припущення, виражені в кількісній формі, якщо апріорна інформація відсутня.

Функціональність визначимо таким чином. Нехай  $N_f$  – максимальна кількість функцій, що виконується типовим елементом АРТ відповідного класу. Тоді  $\frac{N_f(X_j)}{N_f}$ , де  $N_f(X_j)$  – кількість функцій, виконуваних елементом  $X_j$  АРТ, і

визначає функціональність  $X_j$ . Під потужністю, як відомо, вважають кількість роботи, виконаної за одиницю часу. Оскільки деякі елементи АРТ призначені для виконання декількох функцій, то необхідно це врахувати і визначити для кожного елемента АРТ інтегральні характеристики. Ціна елемента обладнання є відомою, а актуальність (значущість) елемента визначається його використанням та необхідністю використання при аваріях та катастрофах. Для розв'язання задачі (2)-(3) дані про деякі фактори потрібно нормувати.

Задача визначення найкращої комплектації є задачею багатокритеріальної оптимізації і для її раціоналізації необхідно одержати певний інтегральний критерій, який дозволить встановити відношення переваги на множині альтернатив та вибрати найкращу із них. Для попереднього наближеного визначення оптимального комплексу обладнання АРТ розглядається адитивна згортка критеріальних функцій:

$$F_k(X_p) = \sum_{j=1}^5 \alpha_j^k \cdot F_j(X_p), k = \overline{1, m}, p = \overline{1, n}. \quad (4)$$

Детальніше пошук оптимального варіанту комплектування АРТ подамо таким чином: знайти

$$Arg \max_p F(K_p) = Arg \max_p \sum_{j=1}^m u_j \sum_{l=1}^n \left( \sum_{i=1}^5 \alpha_i^j \cdot F_i(X_l) \right) \cdot \chi[(X_l \in C_j) \& (X_l \in K_p)], \quad (5)$$

де  $F$  – інтегральна цільова функція,  $K_p$  – комплект АРТ,  $p = \overline{1, K}$ ,  $K$  – максимально можлива кількість комплектів АРТ,  $u_j, j = \overline{1, m}$  – ваговий коефіцієнт  $j$ -го класу обладнання,  $\alpha_i^j, i = \overline{1, 5}$  – ваговий коефіцієнт  $i$ -ї критеріальної функції для  $j$ -го типу обладнання,  $X_l, l = \overline{1, n}$  – елементи АРТ,  $C_j, j = \overline{1, m}$  – класи обладнання АРТ,  $\chi(*)$  – функція-індикатор.

Відомо, що використання класичних методів для розв'язання такого типу задач, які базуються на інтегро-диференціальному численні, є проблематичним. Тому еволюційні технології, в основі яких лежить випадковий, але направлений пошук є чи не єдиним способом розв'язати поставлену задачу.

Визначено, що моделі будови, функціонування та розвитку становлять інформаційно-аналітичний базис формування показників ефективності та інтегрального критерію ефективності комплекту АРТ. Моделі будови є такими:

$$M_\sigma = \langle S_1(a_1, b_1, c_1), S_2(a_2, b_2, c_2), \dots, S_n(a_n, b_n, c_n) \rangle, \quad (6)$$

де  $S_i$  –  $i$ -й можливий елемент комплектації, який може бути використаний для аварійно-рятувальних робіт, кількість таких елементів  $n$ ,  $(a_i, b_i, c_i)$  – габаритні розміри обладнання. Очевидно, що модель (6) буде доповнена ще однією моделлю:

$$M_\sigma^* = \langle S_{i_1}(a_{i_1}, b_{i_1}, c_{i_1}), S_{i_2}(a_{i_2}, b_{i_2}, c_{i_2}), \dots, S_{i_m}(a_{i_m}, b_{i_m}, c_{i_m}) \rangle, \quad (7)$$

де  $m$  – кількість елементів аварійно-рятувальної техніки в одному комплекті, яка може змінюватись.

При формуванні моделі будови важливо вказувати габаритні розміри обладнання, які будуть використані при формуванні комплектації. Модель будови є базисом, який призначений для формування множини елементів і структури при комплектуванні АРТ.

Модель функціонування визначається кортежем:

$$M_f = \langle G_1, G_2, \dots, G_n \rangle, \quad (8)$$

де  $G_i, i = \overline{1, n}$  – перетворення, яке реалізується  $i$ -м елементом, причому  $Y_i = G_i(I_i, R_i, P_i)$ ,  $Y_i$  – деяка характеристика, яка визначається перетворенням  $G_i$  і вказує на його результат,  $I_i$  – апріорна інформація про типи аварійних ситуацій, їх масштаби і можливі наслідки,  $R_i$  – матеріальні та енергетичні ресурси, що необхідні для функціонування елемента  $X_i$  і отримання значення  $Y_i$ ,  $P_i$  – особливості процесу перетворення  $\langle I_i, R_i \rangle \rightarrow Y_i, i = \overline{1, n}$ .

Третя модель дозволяє прогнозувати можливі аварійні ситуації та гарантувати можливість заміни обладнання у найкоротші терміни без втрати його ефективності. Така модель є моделлю розвитку:

$$M_d = \langle (S_1^1, S_2^1, \dots, S_{k_1}^1), (S_1^2, S_2^2, \dots, S_{k_2}^2), \dots, (S_1^{k_p}, S_2^{k_p}, \dots, S_{k_p}^{k_p}) \rangle, \quad (9)$$

де  $k_p$  – кількість типів обладнання, що виконує однакові функції. В межах кожного набору  $(S_1^i, S_2^i, \dots, S_{k_i}^i)$ ,  $i = \overline{1, k_p}$  елементи є впорядкованими за ефективністю. У межах кожної сукупності елементи можуть бути впорядковані за рівнем функціональності, потужності, надійності та актуальності і за вартістю. Можливо також варіанти упорядкування за значенням габаритних розмірів.

Комплект аварійно-рятувальної техніки у загальному випадку має виконувати всі релевантні функції з множини  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ . Нехай  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$  – існуюча номенклатура (множина) елементів аварійно-рятувальної техніки. Якщо для  $\forall i \in \{1, 2, \dots, n\} \exists! j \in \{1, 2, \dots, m\}$  таке, що  $s_j$  – елемент техніки, призначений для виконання функції  $f_i$ , то задача комплектування має єдиний розв'язок  $R = \{s_{1j_1}, s_{2j_2}, \dots, s_{nj_n}\}$  за функціональністю, де  $s_{ij_i}$  –  $j$ -й елемент техніки, призначений для виконання  $i$ -ї функції. Звичайно, такий розв'язок має місце за умови, що  $R \in \Omega$ , де  $\Omega$  – область обмежень на комплект техніки. Якщо  $R \notin \Omega$ , то тривіального розв'язку задача комплектування аварійно-рятувальної техніки не має. Зробивши такий висновок, у багатьох випадках припускають, що існує одна або декілька функцій, від яких можна відмовитись, попередньо зробивши висновок про те, що виконання таких функцій здійснює найменший вплив на загальну ефективність комплекту техніки. Введемо поняття неповного комплекту. Неповним комплектом аварійно-рятувальної техніки є такий набір її елементів, що існує хоча б одна із функцій, яка не виконується жодним елементом з комплекту.

З урахуванням зроблених вище припущень задача комплектування аварійно-рятувальної техніки полягатиме у пошуку

$$\max_{r^* \in \Omega} (\max_{r^* \in S} E(r^*) - \min_{\substack{i_j \in \{1, n\}, i_j \neq i_k \\ r^* \in S, r^* \notin \Omega}} \{E(f_{i_1}), E(f_{i_1} \cup f_{i_2}), E(f_{i_1} \cup f_{i_2} \cup \dots \cup f_{i_{n-1}})\}), \quad (10)$$

де  $E(r^*)$  – критерій ефективності комплекту техніки  $r^*$ ,  $E(f)$  – показник ефективності виконання комплектом техніки функції  $f$ . Задача (10) є оптимізаційною задачею з використанням штрафної функції і полягає у знаходженні такого неповного комплекту, який задовольняє обмеженням і має найменші втрати ефективності через невиконання певних функцій.

У **третьому розділі** розроблено еволюційні методи визначення оптимального комплекту АРТ шляхом оптимізації цільової функції, а також шляхом порівняльного аналізу та визначення колективного порядку на множині альтернатив.

Для визначення оптимального комплекту АРТ необхідно встановити пріоритети критеріальних функцій. Для цього виберемо  $m$  експертів, які, використовуючи шкалу, запропоновану Т. Сааті, здійснюють їх порівняння. Отримаємо матриці

$$G_i = \begin{pmatrix} 1 & g_{12}^i & g_{13}^i & g_{14}^i \\ 1/g_{12}^i & 1 & g_{23}^i & g_{24}^i \\ 1/g_{13}^i & 1/g_{23}^i & 1 & g_{34}^i \\ 1/g_{14}^i & 1/g_{24}^i & 1/g_{34}^i & 1 \end{pmatrix}, i = \overline{1, m}. \quad (11)$$

Припустимо, що компетентність  $w_i$  кожного з експертів відома. Очевидно, що висновки експерта при розв'язанні задачі порівняння альтернатив часто бувають неузгоджені. Для здійснення можливості урахування цього чинника для кожної матриці  $G_i, i = \overline{1, m}$ , знайдемо індекс узгодженості, що дорівнює абсолютній величині відхилення розмірності матриці  $G_i$  і її максимального власного числа, тобто  $\delta_i = |4 - q_i|, i = \overline{1, m}$ . Менше значення  $\delta_i$  відповідає кращій узгодженості порівнянь експерта. Якщо  $\delta_i$  досить велике, то матрицю, що відповідає висновкам такого експерта, необхідно виключити з розгляду або здійснити певні уточнюючі процедури.

На наступному кроці здійснюємо додавання елементів матриць  $G_i, i = \overline{1, m}$ , що знаходяться над головною діагоналлю з відповідними ваговими коефіцієнтами. Інші елементи результуючої матриці  $G$  знайдемо як обернені величини до вже обчислених елементів. За даними матриці  $G$  визначимо пріоритети критеріальних функцій за формулою

$$p_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^4 g_{ij}\right)^{\frac{1}{4}}}{\sum_{i=1}^4 \left(\prod_{j=1}^4 g_{ij}\right)^{\frac{1}{4}}}, i = \overline{1, 4}. \quad (12)$$

Таким чином, встановлено важливість критеріальних функцій при визначенні того чи іншого варіанту комплектування АРТ.

На наступному кроці необхідно оцінити варіанти комплектування АРТ за кожним з критеріїв  $F_i, i = \overline{1, 4}$ . (Зауважимо, що тут не враховується актуальність обладнання). Припустимо, що після проведення попереднього аналізу та перевірки виконання обмежень залишилось  $p$  можливих варіантів. Аналогічно попередньому кроку необхідно отримати  $p$  матриць  $Q_i$ , елементи кожної з яких містять значення парних порівнянь варіантів комплектування за критеріями  $F_i, i = \overline{1, 4}$ . Отримати матриці можна двома способами. У першому з них елементи матриці визначають традиційно, виходячи з висновків експертів для всіх пар варіантів. Оскільки число таких варіантів навіть в найбільш малорозмірних завданнях досить велике, тому матриця попарних порівнянь буде погано узгодженою та її аналіз і застосування в подальших розрахунках стає проблематичним. Раціональним представляється використовувати інший спосіб отримання матриць  $Q_i, i = \overline{1, 4}$ . Для цього необхідно визначити лише значення попарних порівнянь для одного варіанта комплектування АРТ, наприклад, для першого. Всі інші елементи матриць розраховуються за формулою:  $q_{kl} = \frac{q_{ll}}{q_{lk}}, k, l = \overline{1, p}$ . Отримаємо такі матриці:

$$Q_i = \begin{pmatrix} 1 & q_{12}^i & q_{13}^i & \dots & q_{1p}^i \\ 1/q_{12}^i & 1 & q_{13}^i/q_{12}^i & \dots & q_{1p}^i/q_{12}^i \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/q_{1p}^i & q_{12}^i/q_{1p}^i & q_{13}^i/q_{1p}^i & \dots & 1 \end{pmatrix}, i = \overline{1,4}. \quad (13)$$

Матриці  $Q_i, i = \overline{1,4}$  є добре узгодженими. Далі обчислюємо ступені належності кожного з варіантів комплектування відповідним нечітким множинам (що визначаються критеріальними функціями):

$$\mu(K_j) = \frac{1}{wk_{1j} + wk_{2j} + \dots + wk_{pj}}, j = \overline{1,p}, \quad (14)$$

де  $wk_{ij}$  – елементи матриць  $Q_i, i = \overline{1,4}$ . Таким чином, отримуємо нечіткі множини:

$$\tilde{F}_i = \left\{ \frac{\mu_{\tilde{F}_i}(K_1)}{K_1}; \frac{\mu_{\tilde{F}_i}(K_2)}{K_2}; \dots; \frac{\mu_{\tilde{F}_i}(K_p)}{K_p} \right\}, \quad (15)$$

або

$$\tilde{F}_i = \left\{ \frac{1/(1 + \sum_{j=1}^p \frac{1}{q_{1j}^i})}{K_1}; \frac{1/(1 + q_{12}^i + \sum_{j=3}^p \frac{q_{12}^i}{q_{1j}^i})}{K_2}; \dots; \frac{1/(1 + q_{1p}^i + \sum_{j=2}^{p-1} \frac{q_{1p}^i}{q_{1j}^i})}{K_p} \right\}, i = \overline{1,4}. \quad (16)$$

Значення, що знаходяться в чисельнику, вказують на те, наскільки функціональні, потужні, надійні і прийнятні за ціною варіанти комплектування (у знаменнику).

Враховуючи, що найкращим є той варіант, який одночасно кращий за усіма критеріями, нечітке рішення  $\tilde{F}$  знаходимо як перетин критеріїв  $\tilde{F}_i$ :

$$\tilde{F} = \tilde{F}_1 \text{ I } \tilde{F}_2 \text{ I } \tilde{F}_3 \text{ I } \tilde{F}_4 = \left\{ \frac{\min_{i=1,4} \mu_{\tilde{F}_i}(K_1)}{K_1}; \frac{\min_{i=1,4} \mu_{\tilde{F}_i}(K_2)}{K_2}; \dots; \frac{\min_{i=1,4} \mu_{\tilde{F}_i}(K_p)}{K_p} \right\}. \quad (17)$$

Найкращим варіантом є той, який є розв'язком задачі пошуку

$$\arg \max_{j=1,p} \min_{i=1,4} \mu_{\tilde{F}_i}(K_j). \quad (18)$$

Якщо враховувати важливість критеріальних функцій, то підхід до визначення оптимального варіанту комплектування залишається незмінним, а вираз (16) перепишемо так:

$$\tilde{F}_i = \left\{ \frac{(1/(1 + \sum_{j=1}^p \frac{1}{q_{1j}^i}))^{p_i}}{K_1}; \frac{(1/(1 + q_{12}^i + \sum_{j=3}^p \frac{q_{12}^i}{q_{1j}^i}))^{p_i}}{K_2}; \dots; \frac{(1/(1 + q_{1p}^i + \sum_{j=2}^{p-1} \frac{q_{1p}^i}{q_{1j}^i}))^{p_i}}{K_p} \right\}, i = \overline{1,4}. \quad (19)$$

Розв'язок задачі (18) визначає оптимальний варіант комплектування та дозволяє враховувати міру оптимальності його вибору, виходячи із значення відповідної функції належності.

Розглянутий метод комплектування АРТ є тільки одним можливим елементом технологій прийняття рішень, що базується на використанні теорії нечітких множин, яка є однією зі складових парадигми «Soft Computing». І хоча не всі її положення мають строгі доведення, їх застосування є доцільним при вирішенні завдань,

пов'язаних з необхідністю врахування суб'єктивних висновків. Такою задачею і є комплектування АРТ. Розглядаючи її як задачу багатокритеріальної оптимізації, важливо звертати увагу на значущість критеріальних функцій, оскільки їх врахування прямо впливає на вибір розв'язку – варіанту комплектування.

До важливих аспектів, які необхідно враховувати при розв'язанні задачі, відноситься наявність змінної кількості елементів у кожному варіанті комплектації. Така обставина вимагає формального визначення критеріальних функцій, оскільки для різного типу обладнання поняття і одиниці вимірювання функціональності і потужності є різними. Експертам повинна бути доступна інформація про порівняльні характеристики елементів АРТ одного класу, а також передбачена можливість приведення різнорідних показників до однієї шкали.

Запропонований метод, крім переваг, має і певні недоліки. Так, він орієнтований на певну кількість варіантів комплектування, яке не може змінитися в процесі аналізу і отримані результати не можуть бути використані для оцінки нового варіанту комплектування. Подолати обмеження методу передбачається з використанням й інших складових «Soft Computing», а саме нейронних мереж, еволюційного моделювання, нейро-нечітких мереж, а також їх композиції. Це дозволить здійснювати оцінювання того чи іншого варіанту комплектування АРТ на основі вже побудованої моделі. Крім того, можливо здійснити розробку процедури усунення протиріч в оцінках експертів, що буде спрямоване на певну об'єктивізацію суб'єктивних висновків.

Розроблено еволюційний метод визначення оптимального варіанту комплектування АРТ на основі використання елементів генетичного алгоритму, який має такі кроки.

Крок 1. Виконати препроцесінг даних, визначити основні параметри алгоритму.

Крок 2. Задавши структуру потенційного розв'язку, сформувати генеральну популяцію.

Крок 3. Визначити розмір  $N$  вибіркової сукупності та згенерувати її елементи, що мають таку структуру:

$$K_j = \langle \text{random}\{1, 2, \dots, n_1\}, \text{random}\{1, 2, \dots, n_2\}, \dots, \text{random}\{1, 2, \dots, n_m\} \rangle, j = \overline{1, N}.$$

Крок 4. Для кожного потенційного розв'язку-комплекту АРТ  $K_j, j = \overline{1, N}$  знайти значення інтегральної цільової функції (fitness-function)  $F_j$  і обчислити різницю

$V_j = a \cdot b \cdot c - \sum_{k=1}^m v_k$ , що вказує на об'єм вільного місця після заповнення контейнера,  $v_k, k = \overline{1, m}$  – об'єм, займаний  $k$ -м елементом.

Крок 5. Вибрати два розв'язки  $K_i$  і  $K_j$  з ймовірностями, пропорційними значенням їх цільових функцій. Рекомбінацію реалізувати одним із таких способів.

Крок 5.1. Розіграти випадкове число  $\beta \in \{1, 2, \dots, \prod_{l=1}^m n_l - 1\}$ , у відповідній точці розірвати хромосоми-рішення  $K_i$  і  $K_j$  та обміняти їх частинами. Отримаємо два розв'язки-нащадки  $K_i^*$  і  $K_j^*$ .

Крок 5.2. Розіграти  $m$  випадкових чисел  $\beta_l \in \{1, 2, \dots, n_l\}$ ,  $l = \overline{1, m}$  і розірвати хромосоми-розв'язки  $K_i$  і  $K_j$  у відповідних  $m$  точках і обміняти фрагменти – елементи АРТ частинами, отримавши розв'язки  $K_i^*$  і  $K_j^*$ .

Крок 6. Помістити розв'язки  $K_i^*$  і  $K_j^*$  у проміжну вибірку, попередньо з ймовірністю  $P_m \approx 0,005$  здійснивши над  $K_i$  і  $K_j$  мутацію одним із наступних способів.

Крок 6.1. Розіграти випадкове число  $\gamma \in \{1, 2, \dots, \prod_{l=1}^m n_l\}$  та інвертувати відповідний біт.

Крок 6.2. Розіграти випадкові числа  $\gamma_l \in \{1, 2, \dots, n_l\}$ ,  $l = \overline{1, m}$  та інвертувати відповідні біти.

Крок 7. Виконавши кроки 5 і 6  $H$  разів, повністю сформувати проміжну вибірку. Серед елементів початкової вибірки і проміжної вибірки визначити кращі  $H$  розв'язків, виходячи з значень цільової функції, і сформувати з них вибірку наступного покоління.

Крок 8. Якщо не виконано критерій зупинки, то перейти на крок 4, інакше – закінчення алгоритму.

Реалізація алгоритму має деякі особливості. Представимо їх у вигляді зауважень.

Зауваження 1. У запропонованому методі реалізований принцип домінування, відповідно до якого більш пріоритетним є розв'язок, що має більшу ефективність, незважаючи на габаритні розміри комплекту АРТ.

Зауваження 2. Значення  $V_j$  можуть використовуватися як значення цільової функції, тобто цільова функція подана як різниця

$$F^* = F_j - \eta / V_j, \quad (20)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт, який вказує на вагу функції штрафу у порівнянні з ефективністю комплекту АРТ.

Зауваження 3. Обчислення коефіцієнта  $\eta$  пов'язане з аналізом додаткових факторів предметної області і залежно від них значення  $\eta$  може бути різним.

Зауваження 4. Реалізація рекомбінації різними способами має свої особливості. Якщо більшість варіантів комплектування АРТ, виходячи зі значень цільової функції, близькі один до іншого, то доцільно використовувати спосіб, реалізований на кроці 5.2, оскільки це дозволить посилити різноманітність варіантів, що розглядаються за менший час і визначити оптимальний розв'язок. Якщо ж варіанти комплектування АРТ мають деяким чином виражені оптимальні підмножини, то тоді раціонально зупинитися на кроці 5.1, що дозволить уникнути руйнувань близьких і оптимальних варіантів і зменшити час обчислень, оскільки цей фактор для генетичних алгоритмів важливий.

Зауваження 5. Кроки методу можна модифікувати, підсиливши його обчислювальні характеристики. Зокрема, перспективним видається пошук оптимального варіанту з протекцією. Реалізувати його можна таким чином. Здійснюємо одноточкову рекомбінацію (крок 5.1). Порівнюємо  $F(K_i)$  і  $F(K_j)$  з  $F(K_i^*)$  і  $F(K_j^*)$ .

Якщо

$$\max_{p,q \in \{i,j\}} |F(K_p) - F(K_q^*)| < \delta, \quad (21)$$

де  $\delta$  – досить мале задане число, то елемент класу, якому відповідає точка рекомбінації, не здійснює значного впливу на інтегральну цільову функцію і від його подальшої участі у процедурі рекомбінації можна відмовитися.

Здійснимо об'єктивізацію процесів прийняття рішень експертами щодо пріоритетності комплектів АРТ. Пропонуємо метод побудови критерію актуальності елемента обладнання (ЕО). Припустимо, що є відомими дані про надзвичайні ситуації (НС) за таким форматом:

$$\langle ID, D, CN, TN, TE, PG, RG, MZ, RZ, NC, RGN, RZN \rangle, \quad (22)$$

де  $ID$  – ідентифікатор НС,  $D$  – дата, коли трапилась НС;  $CN$  – клас НС;  $TN$  – тип НС (наприклад, пожежа в лісі, дорожньо-транспортна пригода, пожежа в будівлі, повінь тощо);

$TE$  – використаний ЕО;

$PG$  – кількість потенційних жертв (не використовувався жоден, або певний ЕО);

$RG$  – кількість реальних жертв (деякі ЕО могли використовуватись);

$MZ$  – обсяг потенційних збитків;

$RZ$  – обсяг реальних збитків;

$NC$  – необхідний ЕО (ЕО, який був потрібен для ліквідації НС, але його в наявності не було);

$RGN$  – кількість реальних жертв, якщо б застосовувався необхідний ЕО ( $RGN \leq RG \leq PG$ );

$RZN$  – обсяг збитків, якщо б застосовувався необхідний ЕО.

Зауважимо, що у випадку відсутності декількох ЕО, записи для кожного необхідного ЕО за вищенаведеним форматом вносяться в базу окремо. Розглянемо задачу визначення актуальності обладнання по відношенню до кількості людських жертв. Зауважимо, що кількість реальних жертв співпадає з кількістю потенційних жертв у випадку відсутності всіх потрібних ЕО. Кількість реальних жертв – це кількість потенційних жертв мінус кількість врятованих з використанням наявних ЕО. Таким чином, кількість врятованих визначається такою залежністю:

$$PG - RG = f(EO_1, EO_2, \dots, EO_N), \quad (23)$$

де  $N$  – кількість наявних ЕО. Для кожної надзвичайної ситуації можна побудувати таблицю, що містить об'єктивно-суб'єктивні дані та має таку структуру (табл. 1). За даними табл. 1 ( $S$  – сума додатних елементів стовпчика) можна знайти загальну кількість врятованих і загиблих, кількість людей, яких вдалось врятувати завдяки використанню певного ЕО, та кількість людей, яких можна було б врятувати завдяки певному ЕО, яке на момент НС було відсутнім.

Таблиця 1. Структура даних про використання елементів обладнання

	Врятовано ( $PG - RG$ )	Не врятовано ( $RG$ )	
	Завдяки використанню елементів обладнання	Могли б врятувати, використовуючи елементи обладнання	Не могли врятувати у будь-якому випадку



№	$EO_1$	$EO_2$	...	$EO_N$	$EO_1$	$EO_2$	...	$EO_N$	
1	$a_{11}$	$a_{12}$	...	$a_{1N}$	$b_{11}$	$b_{12}$	...	$b_{1N}$	$c_1$
2	$a_{21}$	$a_{22}$	...	$a_{2N}$	$b_{21}$	$b_{22}$	...	$b_{2N}$	$c_2$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$K$	$a_{K1}$	$a_{K2}$	...	$a_{KN}$	$b_{K1}$	$b_{K2}$	...	$b_{KN}$	$c_K$
$S$	$A_1$	$A_2$	...	$A_N$	$B_1$	$B_2$		$B_N$	$C$

Визначимо показники:

$\eta_{11}$  – загальна кількість НС, у яких  $EO_1$  застосовувався, оскільки це було потрібним;  
 $\eta_{21}$  – загальна кількість НС, у яких  $EO_1$  не застосовувався, оскільки не було необхідності, але він був у комплекті;

$\eta_{31}$  – загальна кількість НС, у яких  $EO_1$  не застосовувався, оскільки його не було у комплекті, але необхідність у його використанні була;

$\eta_{41}$  – загальна кількість НС, у яких  $EO_1$  не застосовувався, оскільки його не було у комплекті і не було необхідності у використанні.

У табл. 1.

$$a_{ij} = \begin{cases} 0, & j - \text{й } EO \text{ не був потрібен,} \\ -1, & j - \text{й } EO \text{ був відсутній,} \\ a, & a \in N, \end{cases}$$

$$b_{ij} = \begin{cases} 0, & j - \text{й } EO \text{ не був потрібен,} \\ b, & b \in N. \end{cases}$$

Тоді

$$\begin{aligned} \eta_{1l} &= \sum_{i=1}^K \chi\{a_{il} \neq 0 \& a_{il} \neq -1\}; \\ \eta_{2l} &= \sum_{i=1}^K \chi\{a_{il} = 0\}; \\ \eta_{3l} &= \sum_{i=1}^K \chi\{a_{il} = -1 \& b_{ij} \neq 0\}; \\ \eta_{4l} &= \sum_{i=1}^K \chi\{b_{ij} = 0 \& a_{il} = -1\}, l = \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (24)$$

Визначимо коефіцієнт актуальності  $EO_1$ :

$$\lambda_l = \frac{\alpha}{N} (\eta_{1l} + \eta_{3l}) - \frac{\beta}{N} (\eta_{2l} + \eta_{4l}), l = \overline{1, N}. \quad (25)$$

Зауважимо, що

$$\lambda_l \in (-\beta, \alpha), l = \overline{1, N}. \quad (26)$$

Значення  $\lambda_{il}$  може бути і від'ємним, що вказує на неактуальність обладнання. Другий доданок у виразі (25) визначає функцію штрафу для  $EO_1$  і опосередковано вказує на жертви (збитки) від того, що замість  $EO_1$  в комплекті обладнання міг бути інший  $EO_1$ , потрібний для ліквідації наслідків даної НС. Встановлення значення коефіцієнтів  $\alpha$  і  $\beta$  можливе експертним шляхом із урахуванням даних табл. 1.

Позначимо

$$Q = \sum_{j=1}^N a_{ij} \chi\{a_{ij} \neq -1\}, \quad (27)$$

$$W = \sum_{j=1}^N b_{ij} \chi\{b_{ij} \neq a_{ij} \& b_{ij} > 0\}. \quad (29)$$

Тоді коефіцієнт актуальності комплекту АРТ для  $i$ -ої НС визначається так:

$$\eta_i = \frac{Q}{W + Q + c_i}, \forall i \in \overline{1, K}.$$

Значення коефіцієнта актуальності обладнання належить відрізка  $[0,1]$ . Випадок, коли  $\eta_i = 0$ , означає, що в результаті НС всі потенційні жертви стали реальними. Якщо ж  $\eta_i = 1$ , то всі потенційні жертви були врятовані. Загальний коефіцієнт актуальності  $j$ -го комплекту АРТ для всіх аварій розраховується як середнє значення коефіцієнта актуальності комплекту АРТ для усіх НС.

У **четвертому розділі** виконано експериментальну верифікацію одержаних результатів, розроблено структуру та запропоновано елементний базис системи підтримки прийняття рішень. Визначено особливості практичної реалізації запропонованих методів комплектування аварійно-рятувальної техніки. При визначенні оптимального комплекту аварійно-рятувального обладнання використовуються дані стандартних карток обліку пожежі чи карток обліку надзвичайної ситуації та база даних, фрагмент якої наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Дані про аварійно-рятувальне обладнання

№	Назва	Id	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	A	B	C
1	Різак_K	CU5030	0,6	549	0,8	120	0,6	45	20	40
13	Комбінструмент	GT5111	0,6	206	0,7	266	0,44	50	42	52
15	Домкрат_S	RA4311	0,7	100	0,9	312	0,65	31	7	20
19	Насосна станція	SPU161	0,6	940	0,9	1200	0,7	80	70	90

Проведено ряд експериментів для визначення оптимального комплекту АРТ. Результати знаходяться у табл. 3.

Таблиця 3. Значення цільової функції

Метод	K1 (300 ітер.)	Відхилення, %	K2 ( $\varepsilon = 0,01$ )	Відхилення, %
ОПР	3,67	-	3,67	-
M1	3,91	6,5	3,91	6,5
M2	3,98	8,4	4,01	9,3
M3	4,03	9,8	4,07	10,9

У першому експерименті особа, що приймає рішення (ОПР), визначала найкращий, на її погляд, комплект. Для нього розраховувалось значення цільової функції (ЦФ). За розробленим методом (M1) із залученням шести експертів формувалось колективне ранжування комплектів обладнання і для найкращого комплекту значення ЦФ виявилось на 6,5% більшим. У другому експерименті використовувались два розроблених методи (M2 і M3) та два критерії зупинки алгоритмів: K1 – по кількості виконаних ітерацій, K2 – за близькістю значень цільової функції на сусідніх ітераціях. Значення ЦФ було кращим у порівнянні із вибором ОПР від 8,4% до 11%.

Зауважимо, що метод М1 раціонально застосовувати, коли комплекти, які потрібно оцінити, вже є сформованими і їх кількість є порівняно малою. Методи М2 і М3 раціонально застосовувати, коли комплекти не є сформованими, а кількість можливих варіантів є значною.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано важливе наукове завдання розробки моделей, методів та інструментальних засобів підтримки прийняття рішень щодо комплектування аварійно-рятувальної техніки на основі еволюційної парадигми, зокрема:

1. Проведено аналіз принципів, моделей, методів та інструментальних засобів підтримки прийняття рішень при ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій та комплектуванні аварійно-рятувальної техніки. Встановлено, що відповідні рішення на сьогодні реалізуються на основі досвіду, інтуїції та директивних документів відповідальних осіб. Вони є зміщеними, неефективними і у багатьох випадках не відповідають внутрішнім потребам аварійно-рятувальних підрозділів та зовнішнього середовища. Комплектування аварійно-рятувальної техніки частково є подібним розв'язанню задачі про упаковку, але має багатокритеріальний суб'єктивований характер.
2. Виконано формалізовану постановку задачі комплектування аварійно-рятувальної техніки з урахуванням двох аспектів: внутрісистемного та впливу зовнішнього середовища. Розроблено інформаційно-аналітичні моделі її життєвого циклу, в основі яких лежать відображення рівнів системної моделі: цілей, задач, методів та засобів;
3. Побудовано комплекс моделей, які супроводжують одержаний розв'язок задачі комплектування аварійно-рятувальної техніки по етапах його життєвого циклу, та складаються із моделей будови, функціонування і розвитку;
4. Удосконалено метод розв'язання задачі комплектування аварійно-рятувальної техніки при нечітких експертних перевагах, перевагою якого є відсутність необхідності розв'язувати оптимізаційні задачі у класичній постановці та об'єктивізація результату через врахування висновків множини експертів та побудову колективного ранжування;
5. Розроблено та удосконалено еволюційні методи для визначення оптимального варіанту комплектування аварійно-рятувальної техніки шляхом оптимізації цільової функції, в основі яких лежить використання елементів генетичного алгоритму та еволюційних стратегій.
6. Розроблено метод для визначення значущості (актуальності) елементів аварійно-рятувального обладнання, який дозволяє врахувати вплив зовнішнього середовища на процес комплектування та базується на врахуванні кількості надзвичайних ситуацій, де даний елемент використовувався чи був відсутній, а також на їх наслідках.
7. Побудована структура системи підтримки прийняття рішень та проведено верифікацію отриманих результатів. Встановлено, що їх використання дозволяє покращити значення цільової функції на 6,5-11% у порівнянні із висновками осіб, що приймають рішення, на основі досвіду та експертного аналізу.



*проблеми, перспективи*).: матеріали IV міжн. наук.-практ. конф. (м. Київ-Черкаси, 2017 р.). Київ. 2017. С. 251.

12. Кришталь В.М., Снитюк В.Є. Оптимізація процесу комплектування аварійно-рятувальної техніки. *Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2018*: матеріали 13-ї міжнар. наук.-практ. конф. (м. Чернігів, 2018 р.). Чернігів. 2018. С. 180-181.

## АНОТАЦІЯ

**Кришталь В.М. Еволюційні технології підтримки прийняття рішень при комплектуванні аварійно-рятувальної техніки.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 «Інформаційні технології». – Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, 2021.

У дисертації вирішено актуальне наукове завдання розробки моделей, методів та інструментальних засобів комплектування аварійно-рятувальної техніки на основі еволюційної парадигми.

Розроблено модель пошуку оптимального варіанту комплектування аварійно-рятувальної техніки, у якій, враховано ретроспективні дані про частоту та ефективність застосування комплектних елементів; удосконалено метод комплектування аварійно-рятувальної техніки на базі нечітких експертних висновків; удосконалено еволюційні методи визначення оптимального варіанту комплектування аварійно-рятувальної техніки на основі принципу домінування та застосування штрафної функції.

Основні положення, одержані в дисертації, спрямовані на подальший розвиток технологій оптимізації процесів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій. Розроблені моделі та методи складають методологічну базу процесів прийняття рішень щодо комплектування аварійно-рятувальної техніки.

Ключові слова: аварії та катастрофи, аварійно-рятувальна техніка, прийняття рішень, інформаційно-аналітичний супровід, еволюційні моделі та методи.

## АННОТАЦИЯ

**Крышталь В.Н. Эволюционные технологии поддержки принятия решений при комплектовании аварийно-спасательной техники.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 «Информационные технологии». – Черкасский государственный технологический университет, Черкассы, 2021.

В диссертации решена актуальная научная задача разработки моделей, методов и инструментальных средств комплектования аварийно-спасательной техники на основе эволюционной парадигмы.

Разработана модель поиска оптимального варианта комплектования аварийно-спасательной техники, в которой, учтены ретроспективные данные о частоте и эффективности применения комплектных элементов; усовершенствован метод комплектования аварийно-спасательной техники на базе нечетких экспертных заключений; усовершенствованы эволюционные методы определения оптимального

варианта комплектования аварийно-спасательной техники на основе принципа доминирования и применения штрафной функции.

Основные положения, полученные в диссертации, направлены на дальнейшее развитие технологий оптимизации процессов ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. Разработанные модели и методы составляют методологическую базу процессов принятия решений по комплектованию аварийно-спасательной техники.

Ключевые слова: аварии и катастрофы, аварийно-спасательная техника, принятия решений, информационно-аналитическое сопровождение, эволюционные модели и методы.

## ABSTRACT

**Kryshstal V.M. Evolutionary technologies of support decision making in the acquisition of rescue equipment. – On the rights of the manuscript.**

Dissertation for obtaining the scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.13.06 "Information technology". - Cherkasy State Technological University, Cherkasy, 2021.

In the dissertation the actual scientific task of development of models, methods and tools of acquisition of emergency rescue equipment on the basis of an evolutionary paradigm is solved.

The search model for an optimum variant of a complete set of emergency rescue equipment in which, retrospective data on frequency and efficiency of application of complete elements is developed; the method of completing emergency rescue equipment on the basis of fuzzy expert opinions has been improved; evolutionary methods for determining the optimal variant of completing rescue equipment based on the principle of dominance and application of the penalty function have been improved.

It is established that the acquisition of rescue equipment can be attributed to the problems of multicriteria optimization, which are solved in the conditions of financial and resource deficit. The main consequences of its solution are:

- ensuring the effective and complete implementation of a set of emergency rescue operations in a limited area, which is to ensure the safety of people, eliminate the consequences of accidents and minimize material damage;
- ensuring acceptable layout solutions, as the list of equipment for emergency rescue work is quite large and a significant number of elements are interchangeable.

The ideas, principles, models, methods and tools that are used or could be used to form the optimal sets of rescue equipment are analyzed. It is shown that this problem has much in common with the known problems of packaging in containers, the problem of the backpack and others. The main difference is that the task of completing rescue equipment is difficult to formalize and poorly structured, it has both quantitative and qualitative indicators and criteria, as well as restrictions on the overall dimensions of both the carrier and equipment elements.

Since it is impossible to guarantee the existence of an optimal (acceptable) solution to the problem of completing emergency equipment, the use of penalty functions is proposed and their structural and parametric identification is carried out. The use of such functions allows you to some deterioration of the objective function and offer a variant of

rescue equipment, which may not be the best solution to our problem, but satisfies the limitations.

It is proposed to determine the priority of equipment elements of a certain class using the analytic hierarchy process based on the prioritization of criteria and procedures for determining the competence of experts. Since the task of acquisition is multi-criteria, it is proposed to include the criterion of relevance in the criteria for determining the optimal set. Models of equipment relevance indicators are constructed, as well as the relevance factor of the equipment element is determined and a model is developed to determine the relevance factor of the set of emergency rescue equipment for a certain emergency situation. It is proposed to calculate the total urgency of the equipment set for all emergencies as the average value of the urgency of the kit for each emergency, provided they are equivalent, or as a weighted value otherwise. Numerical modeling based on the developed algorithm allowed to draw conclusions about the relevance and, consequently, the priority of equipment elements, as well as to assess the degree of provision of emergency rescue units with emergency rescue equipment in various emergencies.

The main provisions obtained in the dissertation are aimed at further development of technologies for optimizing the processes of emergency response. The developed models and methods form the methodological basis of decision-making processes for the acquisition of rescue equipment.

Key words: accidents and catastrophes, emergency rescue equipment, decision making, information and analytical support, evolutionary models and methods.