

Державна служба України з надзвичайних ситуацій
Черкаський інститут пожежної безпеки
імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України

Кришталь В. М., Куліца О. С., Григор'ян М. Б.

РОЗВИТОК ТЕХНОЛОГІЇ
ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ
ПРИ КОМПЛЕКТУВАННІ
АВАРІЙНО-РЯТУВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

МОНОГРАФІЯ

Черкаси - 2022

УДК 004.942:614.8
К 82

*Рекомендовано до друку вченою радою
Черкаського інституту пожежної безпеки
імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України
(протокол № 3 від «25» листопада 2022 року)*

Рецензенти:

Володимир Рудницький – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії Черкаського державного технологічного університету;

Артем Биченко – кандидат технічних наук, доцент, начальник кафедри техніки та засобів цивільного захисту Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України.

Кришталь В. М., Куліца О. С., Григор'ян М. Б. Розвиток технології прийняття рішень при комплектуванні аварійно-рятувальної техніки : монографія. Черкаси : Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022. 106 с.

Монографія присвячена розв'язанню наукової проблеми розвитку технології прийняття рішень при комплектуванні аварійно-рятувальної техніки. У роботі виконано аналіз принципів, моделей, методів та інструментальних засобів підтримки прийняття рішень при ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій та комплектуванні аварійно-рятувальної техніки; здійснено формалізовану постановку задачі комплектування аварійно-рятувальної техніки та розроблено інформаційно-аналітичні моделі її життєвого циклу; побудовано комплекс моделей, які супроводжуватимуть одержаний розв'язок задачі комплектування по етапах його життєвого циклу; розроблено метод розв'язання задачі комплектування аварійно-рятувальної техніки при нечітких експертних перевагах, еволюційні методи визначення оптимального варіанту комплектування аварійно-рятувальної техніки та структуру системи підтримки прийняття рішень при комплектуванні аварійно-рятувальної техніки та виконати експериментальну верифікацію розроблених моделей та методів.

©ЧІПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	5
ВСТУП	7
Перелік скорочень	10
1. Аспекти оптимальності вирішення проблеми комплектування аварійно-рятувальної техніки.....	11
2. Аналітичний огляд технологій комплектування виробів у контейнери	16
3. Особливості комплектування аварійно- рятувальної техніки	20
4. Формалізація задачі комплектування аварійно-рятувальної техніки.....	27
5. Інформаційно-аналітичні моделі життєвого циклу аварійно-рятувальної техніки.....	43
6. Особливості побудови інтегральної цільової функції	58
7. Препроцесінг даних та основні напрямки оптимізації цільової функції.....	64
8. Метод розв'язання задачі комплектування аварійно-рятувальної техніки при нечітких експертних перевагах.....	66

9. Еволюційний метод визначення оптимального варіанту комплектування аварійно-рятувальної техніки на основі використання елементів генетичного алгоритму.....	72
10. Еволюційний метод визначення оптимального варіанту комплектування аварійно-рятувальної техніки на основі використання елементів еволюційної стратегії	77
11. Метод побудови критерію актуальності аварійно-рятувального обладнання.....	82
ВИСНОВОК.....	90
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	92

ПЕРЕДМОВА

Монографія присвячена дослідженню технологій підтримки прийняття рішень у процесі комплектування аварійно-рятувальної техніки.

Орієнтованість економіки України на виробництво в металургійній, хімічній та енергетичній галузях є передумовою екологічних, техногенних катастроф, ймовірність таких загроз з кожним роком зростає, оскільки відповідне 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 працездатного 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.

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, труднощі у її формалізації та слабка структурованість свідчать про актуальність розробки еволюційних технологій підтримки прийняття рішень при комплектуванні.

Завдання розробки моделей, методів та інструментальних засобів підтримки прийняття рішень щодо комплектування аварійно-рятувальної техніки на основі еволюційної парадигми є важливою і актуальною.

Ключові слова: надзвичайні ситуації, аварійно-рятувальна техніка, комплектування, прийняття рішень, моделі, еволюційні методи.

ВСТУП

Економічний розвиток України в останні десятиліття визначався зростанням виробництва в металургійній, хімічній та енергетичній галузях. Така спрямованість є передумовою екологічних, техногенних катастроф, ймовірність таких загроз з кожним роком зростає, оскільки відповідне 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 працездатного стану є першочерговою задачею. На сьогодні здійснюється виробництво різноманітних 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 загалом, аналізу проблеми комплектування зокрема, та процесам прийняття відповідних рішень присвячені роботи відомих українських та закордонних вчених: М. Згуровського, Ю. Зайченка, Н. Панкратової, А. Тимченка, Ю. Яковенка. Оскільки проблема комплектування є

слабко структурованою, то для її вирішення необхідно застосовувати технології інтелектуальної обробки даних, значний внесок у розвиток яких зробили вчені М. Доріго, Дж. Голланд, Дж. Сааті, І. Рехенберг, Х.-П. Швевель та ін.

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 складна формалізованість та слабка структурованість свідчать про актуальність розробки еволюційних технологій підтримки прийняття рішень при комплектуванні.

Таким чином, задача розробки моделей і методів підтримки прийняття рішень щодо комплектування аварійно-рятувальної техніки на основі еволюційної парадигми є важливою і актуальною.

Метою 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 необхідно розв'язати такі задачі:

- виконати аналіз принципів, моделей, методів та інструментальних засобів підтримки прийняття рішень при ліквідації наслідків 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.

Перелік скорочень:

АРТ – аварійно-рятувальна техніка;

КАРТ – комплектування аварійно-рятувальної
техніки;

АРО – аварійно-рятувальне обладнання;

ОПР – особа, яка приймає рішення;

ЕО – елементи обладнання;

НС – надзвичайна ситуація.

1. Аспекти оптимальності вирішення проблеми комплектування аварійно-рятувальної техніки

Промисловий ріст, техногенна навантаженість навколишнього середовища, зміна клімату, ріст ризиків екологічних катастроф, соціальної напруженості в суспільстві, супутні загрози та інші фактори об'єктивної й суб'єктивної природи зумовлюють підвищену увагу до рівня оснащення та функціонування аварійно-рятувальних підрозділів.

Однією з головних задач є комплектування техніки засобами для рятування людей, гасіння пожеж, мінімізації збитків від техногенних та екологічних катастроф. Оскільки на сучасному етапі основним технічним засобом, на якому розміщується АРТ, є пожежний автомобіль, то оптимізоване його комплектування є актуальним науковим завданням.

Концептуальні особливості його розв'язання були досліджені в [89]. Визначення ефективності компонувальних рішень запропоновано здійснювати за рядом критеріїв [99].

Таким чином, 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 наявність 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.

Реформування служб порятунку в Україні й необхідність підвищення ефективності їх діяльності є причиною технічного переоснащення підрозділів Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС України). Комплектація АРТ – одне з першочергових його завдань. На сьогоднішній день виробляється значна кількість найменувань засобів, призначених для проведення різного роду аварійних та рятувальних робіт. У той же час носій таких засобів – пожежний автомобіль має обмежений корисний простір.

Розглянемо проблему комплектування АРТ та аспекти її можливого вирішення. Як відомо, проблема – це невідповідність реального і бажаного стану чогонебудь. У нашому випадку проблема вважалась би вирішеною, якщо АРТ була б оптимальним чином укомплектована. Але що означає оптимальність комплектації? Нижче спробуємо дати відповідь на це питання.

Сучасний світ живе в умовах неперервних природних катаклізмів. Це цунамі й урагани, землетруси, посухи, повені та пожежі. До таких природних явищ додаються техногенні, екологічні катастрофи, зумовлені зростанням промислового виробництва, а також загрози, які

надходять від окремих суб'єктів, або викликані іншими, можливо випадковими чинниками. У розвинених країнах світу створені спеціальні служби, що надають допомогу людям, постраждалим у вищевказаних надзвичайних ситуаціях. В Україні такі функції покладені на підрозділи ДСНС України. Універсалізм функцій, що виконуються її співробітниками, є причиною існування проблеми забезпечення та комплектування таких підрозділів технічними засобами. У більшості випадків їх носієм є пожежний або спеціальний автомобіль, і в цьому випадку маємо протиріччя між необхідністю забезпечення універсальності АРТ і обмеженістю його носія. Необхідно розв'язувати завдання оптимального комплектування АРТ.

Орієнтація на закордонні форми та організацію аварійно-рятувальних робіт, а також необхідність переходу від уніфікованих форм надання допомоги при пожежах, катастрофах або аваріях до деякої міри їх універсалізації є визначальними причинами розробки технологій інтеграції раніше окремо існуючих служб (101, 102, 103, 104). На доцільність створення служби 112 як аналога американської 911 звернув увагу і президент України у своєму дорученні прем'єр-міністру. Одним із важливих завдань, які супроводжують процес такої інтеграції, є комплектування аварійно-рятувальної техніки (КАРТ). Актуальність його розв'язання обумовлена різноманіттям функцій сучасної АРТ, а її широка номенклатура вказує на необхідність вибору прийняттого варіанту КАРТ як розв'язку задачі оптимізації.

Задача КАРТ в останнє десятиліття набула особливої актуальності, що пояснюється рядом причин. До них належать, зокрема, постійне реформування і зміна

підпорядкованості аварійно-рятувальних підрозділів, збільшення асортименту аварійно-рятувальної продукції, відміна заборони на імпорт кращих закордонних зразків техніки, відсутність достатньої кількості фінансових ресурсів для закупівлі потрібних носіїв та елементів АРТ.

З іншої сторони можна стверджувати, що динаміка сучасного світу, який відзначений ростом техногенної навантаженості, має стійку тенденцію до збільшення аварій та катастроф. У переважній більшості випадків носієм АРТ є пожежні автомобілі як універсальні, так і спеціальні. Їх особливістю є обмеженість просторової конструкції для розміщення обладнання. Оскільки таким обладнанням є засоби для порятунку людей при пожежах чи аваріях, техніка для гасіння пожеж, а також засоби для мінімізації наслідків техногенних або екологічних катастроф, то природно виникає проблема їх розміщення на носії. Оптимізації ефективності АРТ та мінімізації протиріч між її габаритами, функціональністю та номенклатурою становить актуальне наукове завдання.

Аспекти, що супроводжують розв'язання задачі КАРТ, досліджені в [103]. Показано, що традиційним методом визначення оптимального комплекту техніки є прийняття рішень відповідальною особою на основі досвіду, інтуїції та фінансових ресурсів. Системний підхід до комплектування АРТ у переважній більшості випадків відсутній. Тому, кожне із рішень є частковим, воно не може бути узагальненим та поширеним на інші аварійно-рятувальні підрозділи. Системності розв'язанню такої задачі надає врахування тих факторів, які визначаються природним і штучним середовищем, територією та населенням, що на ній проживає, можливістю виникнення певного типу екологічної катастрофи чи техногенної аварії. При комплектуванні кожного

окремого носія аварійно-рятувальної техніки необхідно враховувати вже існуючі варіанти комплектування окремих одиниць техніки у підрозділах.

Особливістю задачі комплектування аварійно-рятувальної техніки є її багатокритеріальність, оскільки процес розв'язання визначається мінімізацією вартості комплекту, максимізацією потужності обладнання, його функціональності, надійності та дотриманням обмежень на габаритні розміри техніки. Розв'язанням задачі формування комплекту на одному шасі загальна задача КАРТ не вирішується, оскільки у багатьох випадках необхідно комплектувати весь підрозділ або розв'язувати таку задачу з урахуванням комплектацій підрозділу. Оскільки розв'язання вказаної задачі базується на необхідності числення факторів, які мають суб'єктивний характер, то раціональним є використання технологій теорії нечітких множин.

Ще одним фактором, який впливає на результат розв'язання задачі комплектування є передбачення можливих наслідків тих чи інших катастроф або аварій на підпорядкованій території. Для цього потрібно використовувати елементи та методи технологічного передбачення. Очевидно, що потрібно брати за основу ретроспективні дані, які можуть бути і відсутніми через різні причини, головною з яких є унікальність надзвичайної ситуації. У такому випадку в основу процесів прийняття рішень необхідно покласти результати моделювання і прогнозування майбутніх процесів. Важливу роль у цьому процесі відіграють структурна та параметрична ідентифікація невідомих залежностей та експертні висновки, що дозволить використати технології еволюційного моделювання та теорію нечітких множин.

2. Аналітичний огляд технологій комплектування виробів у контейнери

Проблема комплектування аварійно-рятувальної техніки є наслідком протиріччя між ресурсною обмеженістю, обмеженістю носія та необхідністю забезпечення універсальності й максимальної потужності та надійності аварійно-рятувального обладнання. Зауважимо, що потенційні результати вирішення цієї проблеми мають базуватись на представленні процесу комплектування АРТ як задачі багатокритеріальної оптимізації, що має багато спільного із задачами тривимірної упаковки, задачі про рюкзак, задачі розкрою, задачі комплектування замовлень тощо. Для їх розв'язання традиційно використовуються метод динамічного програмування [8], метод гілок і меж [5], метод повного перебору [40], генетичні алгоритми [16], алгоритми мурашиної колонії [6], «жадібні» алгоритми [88], а також алгоритм Ретліффа-Розенталя, евристичні методи маршрутизації, такі як S-подібний метод, метод з поверненнями, серединний метод, метод із відвідуванням найбільшого інтервалу, метод послідовного аналізу варіантів [59], інтегральний та комбінований методи.

При розв'язанні більшості таких і їм подібних задач перевага надається евристичним методам. Водночас, жорсткі обмеження та критерії, частина з яких має чіткий кількісний характер, а інша частина – якісний, що властиві задачі комплектування АРТ, визначають особливості її розв'язання.

Відомими є також задачі комплектування і раціонального використання працівників, комплектування структурних підрозділів, комплектування штатів та приладів. Розв'язуються задачі комплектування

військових частин і бібліотечних фондів, комп'ютерних систем, інвестиційних портфелів. Як вже було згадано, крім задачі комплектування розглядають і задачу упаковки, в якій потрібно розмістити деякі об'єкти в контейнери. Одним із останніх результатів була знайдена оптимальна упаковка одиничних сфер в восьми та двадцяти чотири вимірних просторах українським математиком Мариною В'язовською. На практиці найчастіше необхідно розв'язувати задачу упаковки прямокутних паралелепіпедів різного об'єму в контейнери, які також є прямокутними паралелепіпедами.

Проблема комплектування є актуальною для багатьох предметних областей, починаючи від формування бібліотек у школах і закінчуючи упаковкою об'єктів у контейнери. Багато із подібних проблем і задач мають локальні розв'язки й існують технології їх одержання. Є відмінності у цільових функціях, обмеженнях та застосовуваних методах оптимізації.

Певні особливості мають місце і при розв'язанні задачі комплектування АРТ. Один із підходів до пошуку її розв'язку наведено в [105]. У той же час у залежності від інфраструктурних особливостей така задача може мати не одну постановку і підхід до її розв'язання.

У запропонованих раніше моделях та методах комплектування АРТ не використовувались знання про особливості навколишнього середовища, статистичні дані про надзвичайні ситуації та їх наслідки. Очевидно, що такі дані є визначальними при комплектуванні носіїв АРТ, серед яких є як спеціальні автомобілі, так і пожежні машини.

Як уже було вказано раніше, далі будемо розглядати пожежні автомобілі, оскільки вони, як носії аварійно-

рятувального обладнання, кількісно переважають. Для інших автомобілів запропоновані результати також можна використовувати, обмеживши лише номенклатуру та тип обладнання.

Визначимо основні об'єкти, які відіграють визначальну роль при комплектуванні АРТ. Першим таким об'єктом є навколишнє середовище, в якому планується експлуатація пожежного автомобіля з відповідним комплектом АРО. Таким середовищем може бути село, місто, район чи область. Зауважимо, що чим більш спеціалізованим є автомобіль, тим ширшим є середовище його використання. Відповідний регіон визначається соціально-економічними характеристиками, головними з яких є кількість населення, величина валового внутрішнього продукту, середня заробітна плата, відсоток безробітних, кількість працюючих підприємств, характеристик виробництва та кількісні характеристики житлового фонду.

Для вибору варіанту оптимального комплектування АРО залучаються один чи декілька експертів, які пропонують рішення, одержані в умовах певної невизначеності. Центральними ідеями є застосування технологій одержання колективного порядку на множині альтернатив та використання експертних висновків з метою їх узагальнення та екстраполяції на майбутні можливі ситуації.

Виконуючи постановку задачі, автори [92, 103] вказували на особливості, серед яких слід відзначити її спільні та відмінні риси у порівнянні із задачею упаковки в контейнери [4, 12, 23], яка полягає в розміщенні об'єктів певної форми таким чином, щоб число використаних контейнерів було найменшим або загальний об'єм об'єктів був найбільшим. Існує багато

варіантів цієї задачі, що відрізняються критеріями упаковки, зокрема, – це двовимірна упаковка, лінійна упаковка, упаковка по вазі, упаковка по вартості та інші, які можуть застосовуватися в різних областях.

Зокрема, упаковка в контейнери, на відміну від задачі комплектування АРТ, найчастіше є однокритеріальною задачею із жорстко заданими елементами її розв'язання. Основним критерієм є мінімальна вага або максимальна кількість чи об'єм. Розв'язки задачі комплектування АРТ можуть бути функціонально різними, мати різні габаритні розміри, різну потужність та надійність. Крім того, існують обмеження на габаритні розміри, оскільки обладнання необхідно упакувати в контейнер, який у найпростішому випадку має форму прямокутного паралелепіпеда. У загальному випадку АРО класифікують за основною функцією, яку воно виконує. Особливістю розв'язання задачі є те, що обладнання найчастіше є мультифункціональним і в одному комплекті може бути різна кількість його елементів. Крім того, число комбінацій таких елементів є значним, що унеможливує здійснення його оцінювання одним експертом.

Очевидно, що задачі комплектування та упаковки є постійно актуальними, різноманітність форми і змісту об'єктів сучасного світу диктує необхідність їх розв'язання в умовах постійно змінних постановок. Важливо зауважити, що в задачі комплектування АРТ домінуюча роль належить цільовій функції, яка, як правило, визначається певним призначенням об'єктів.

3. Особливості комплектування аварійно-рятувальної техніки

Комплектування АРТ має кілька цілей, а саме:

- на обмеженій території забезпечити ефективне і повне проведення комплексу аварійно-рятувальних робіт, який полягає у забезпеченні безпеки людей, ліквідації наслідків аварій та мінімізації матеріальних збитків;

- забезпечити прийнятні компонувальні рішення, 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 експертів. 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.

Оскільки промислові аварії можуть відбуватись у різних масштабах, то виникає проблема вибору: на який

варіант розвитку подій орієнтуватися – з максимально можливими негативними наслідками або середньоочікуваними.

У залежності від її вирішення визначається варіант комплектування, необхідною умовою чого є ідентифікація залежності між масштабами аварій та вибором варіанта комплектування. І масштаб аварії, і варіант комплектування підлягають формальному опису, а завдання, яке розглядається, формалізації. Далі розглянемо елементи технології, які дозволяють об'єктивізувати процес прийняття рішень при комплектуванні АРТ.

Актуальність завдання комплектації АРТ визначається динамікою зростання кількості ситуацій, в яких необхідним є її використання, а також збільшенням техногенного навантаження навколишнього середовища [36]. Волюнтаристський підхід до його розв'язання призводить до того, що при виконанні аварійно-рятувальних робіт часто відсутній необхідний інструментарій взагалі, або неможливо виконати завдання в повному обсязі.

Розглянута у даному дослідженні задача є логічним продовженням низки завдань забезпечення пожежної безпеки, що розглядаються раніше, зокрема – і на конференціях KDS-2006 і KDS-2007 та розв'язуваних з використанням технологій Soft Computing [47, 48], зокрема:

- визначення найкоротшого маршруту проходження пожежного розрахунку до місця пожежі з оптимізованим простором пошуку [35];

- розрахунок шляху і часу поширення вогню до особливо небезпечного об'єкта [126];

- оптимізація системи пожежної сигналізації в залежності від передбачуваного масштабу наслідків пожежі та типу приміщення [80];

- постпрогнозування концентрації небезпечної хімічної речовини після аварійного викиду [79];

- оцінювання рівня безпеки проживання в багатоповерхових будинках залежно від поверху і наявності засобів евакуації та захисту [125].

Сучасний стан в розглянутій області характеризується значно розширеним асортиментом протипожежної та рятувальної продукції, зняттям обмежень на імпорт зарубіжних зразків, але існуванням певного дефіциту фінансових ресурсів. Не можна також не звернути увагу на необхідність забезпечення широкої функціональності та максимальної потужності обладнання. Ще однією важливою особливістю є те, що в більшості випадків носієм АРТ є пожежний автомобіль, на якому знаходиться відповідний контейнер.

Аналізуючи задачу дослідження, можна припустити, що цільова функція задачі про упаковку перетворюється в обмеження на габаритні розміри елементів. Цільовими функціями є функціональність, потужність, надійність, вартість, інші характеристики елементів АРТ [123]. Тому першочерговим завданням є формування інтегрального критерію та подання потенційних розв'язків задачі.

Складовими елементами (факторами) такої задачі є варіанти комплектування як потенційні рішення (розв'язки); зовнішні фактори, обумовлені динамікою навколишнього середовища, і фактори, що визначають розвиток нештатних ситуацій. При цьому потрібна ретроспективна інформація, що містить статистичні дані про минулі аварії та катастрофи. Але, найчастіше, такої інформації не існує, оскільки майже кожному промислову

аварію відрізняють особливості, які не мали аналогів раніше. Саме тому, одним із способів обійти цю проблему є визначення критеріїв включення окремих елементних рішень у комплектацію техніки.

Зауважимо, що при їх установці мають враховуватись кількість аварій, на яких були використані однотипні елементні рішення; потужність і досягнутий позитивний ефект, виражений в одиницях обсягу виконаної роботи; негативний ефект, отриманий в результаті невикористання елементного рішення і виражений в одиницях отриманих збитків; можливість установки елементного рішення на аварійно-рятувальну техніку зазначеного типу.

Розробка таких критеріїв дозволить оптимізувати процес комплектування АРТ, враховуючи економічні, технологічні, технічні та інші фактори.

Особливостями таких задач і відповідних методів розв'язання є чітко визначені параметри об'єктів і одно- або двокритеріальність. На відміну від них, завдання комплектування АРТ є багатокритеріальною задачею з нечітко заданими перевагами на множині цільових функцій. Крім того, вона є певним аналогом задачі упаковки в контейнери, тобто тривимірною. При цьому кількість контейнерів вважається заданою, а кількість елементів АРТ – змінною.

Актуальність задачі КАРТ визначається динамікою росту ситуацій, в яких необхідним є її використання, а також збільшенням техногенного навантаження навколишнього середовища. На практиці розв'язання задачі КАРТ здійснюється відповідальною особою, виходячи з власного досвіду, наслідком чого при виконанні аварійно-рятувальних робіт часто виявляється

відсутність необхідного інструменту взагалі, або неможливість виконання завдання в повному обсязі.

Сучасний стан в розглянутій області характеризується значно розширеним асортиментом протипожежної та рятувальної продукції, зняттям обмежень на імпорт закордонних зразків, але існуванням певного дефіциту фінансових ресурсів. Не можна також не звернути увагу на необхідність забезпечення широкої функціональності та максимальної потужності обладнання.

Окремі аспекти розв'язання завдання КАРТ вже розглядалися в роботах автора та колег. Так, зокрема, в роботі [96] здійснено постановку задачі КАРТ як задачі багатокритеріальної оптимізації, як критеріальні функції вказані функціональність, надійність, продуктивність і ціна. В статті [90] розглянуті проблеми побудови інтегральної цільової функції і виконаний аналіз традиційних методів розв'язання подібних задач, одним із основних методів розв'язання задачі вказано еволюційне моделювання. Враховуючи суб'єктивний характер пріоритетів критеріальних функцій, у статті [97] для їх об'єктивізації запропоновано використовувати елементи теорії нечітких множин, що дозволило визначити пріоритети того чи іншого варіанту комплектування і відповідно, здійснити вибір.

Очевидно, що складові інтегральної функції в задачі КАРТ є, в деякому сенсі, антагоністичними і крім того, цільова функція в такому ж сенсі антагоністична обмеженням на габарити. Серед недоліків раніше розглянутих методів розв'язання задачі КАРТ значиться і їх прив'язка до фіксованого числа розглянутих варіантів, яка свідчить про обмеженість методу, оскільки кількість елементів АРТ різних класів є великою, а отже, число їх

комбінацій досить значним, що не дозволить виконати оцінку кожного варіанту комплектування кожним експертом.

Для кращого розуміння сучасного стану та перспектив розвитку та модифікації парку аварійно-рятувальної техніки можна будувати інформаційно-аналітичні моделі будови, функціонування та розвитку.

Вибір того чи іншого елемента аварійно-рятувальної техніки та формування її комплекту пов'язаний з необхідністю об'єктивізації процесу прийняття рішення. Для цього необхідно визначити, на яких підставах здійснюється вибір, які критерії покладені в його основу. Набір таких критеріїв найчастіше є евристикою, вони можуть мати як кількісний, так і якісний характер. І оскільки потужність множини таких критеріїв має бути значною, то необхідно здійснити редукцію відповідної множини без істотних втрат інформативності критеріїв.

Визначення критеріальної бази дозволяє робити висновки про якість виконання певної функції елементом обладнання і такі критерії є показниками ефективності. На наступному кроці необхідно здійснити їх інтеграцію та побудувати інтегральний критерій ефективності, значення якого дозволять зробити обґрунтований вибір обладнання. Такий критерій має відображати як внутрішні показники елементів аварійно-рятувальної техніки, так і їх взаємодію з навколишнім середовищем, яка буде визначати значущість чи актуальність таких елементів.

Побудова інтегрального критерію є необхідною умовою визначення оптимального комплекту обладнання. Як правило, інтегральний критерій є поліекстремальною негладкою функцією, і її оптимізація може бути здійсненою з використанням технологій не

класичної інтегро-диференціальної парадигми, а методів еволюційного моделювання.

Крім того, пропонується ще одна технологія для визначення оптимального комплекту обладнання, яка базується на інтеграції експертних висновків.

У цьому випадку інтегральна функція, яка могла б бути використаною для оцінювання того чи іншого комплекту обладнання, відсутня. Достатньо мати ранжування комплектів обладнання, виконане експертами, і здійснити перехід від індивідуальних переваг до колективного ранжування, що дозволить визначити оптимальний комплект.

Результати, які одержані з використанням двох методів, можуть бути порівняними і особа, що приймає рішення, здійснить обґрунтований вибір. В експертизі елементів обладнання аварійно-рятувальної техніки може брати участь значна кількість експертів, крім того потужність елементної бази є такою, що не дозволяє об'єктивізувати процес її оцінювання. Саме тому потрібно розробити систему підтримки прийняття рішень, використання якої дозволить автоматизувати рутинні обчислювальні процедури та процес формування висновків за результатами розрахунків. Важливою складовою такої системи є база знань, що міститиме дані про аварійно-рятувальне обладнання, та продукційні правила, які і складатимуть основу формування висновків.

Важливою складовою дослідження є перевірка адекватності та доведення ефективності одержаних результатів. Для цього необхідно провести експериментальну верифікацію та за результатами моделювання зробити відповідні висновки.

4. Формалізація задачі комплектування аварійно-рятувальної техніки

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 прогнозуються 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.

Аналізуючи дані задачі КАРТ та розглядаючи можливі підходи до її розв'язання, приходимо до висновку, що задача КАРТ при певних умовах могла б бути зведеною до задачі дискретного сепарабельного програмування [58]:
знайти

$$\max F(x) = \sum_{i=1}^N F_i(x_i), \quad (2.1)$$

при обмеженнях:

$$g_p(x) = \sum_{i=1}^N g_p(x_i) \leq g_p^*, \quad p = \overline{1, q}, \quad (2.2)$$

$$g_p(x) = \sum_{i=1}^N g_p(x_i) \geq g_p^*, \quad p = \overline{q+1, Q}, \quad (2.3)$$

де $F_i(x_i)$, $g_p(x_i)$ – функції дискретного аргументу, задані таблично.

Відомо, що задачі такого роду відносять до NP-повних. У цільову функцію тут входить сума часткових критеріальних функцій без вагових коефіцієнтів. Очевидно, що в такій постановці задачі можуть бути зроблені припущення, що спрощують процес її розв’язання. Відсутність вагових коефіцієнтів та додавання різнорозмірних функцій при необхідності врахування суб’єктивних експертних висновків ускладнює використання технологій розв’язання задачі (2.1)-(2.3) при розв’язанні задачі КАРТ [99].

Для розв’язання задачі КАРТ раціональним є використання ідей розв’язання задач багатокритеріальної оптимізації [60, 136], методу послідовного аналізу варіантів [58, 110] та еволюційного моделювання [16, 29].

Розглянемо формалізовану постановку задачі КАРТ, елементи якої містяться в [36]. 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 $\{X_{i_1}^1, X_{i_2}^1, \dots, X_{i_{j_1}}^1\} \subset C_1, \dots, \{X_{i_1}^m, X_{i_2}^m, \dots, X_{i_{j_m}}^m\} \subset C_m$. Кожному елементу множини X поставимо у відповідність сукупність значень

$$X_q \rightarrow \langle F_{1_q}, F_{2_q}, F_{3_q}, F_{4_q}, a_q, b_q, c_q \rangle, \quad (2.4)$$

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; 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 повинно бути по одному елементу з кожного класу.

Тоді задача КАРТ зводиться до задачі багатокритеріальної оптимізації:

$$F_1(x) \rightarrow \max, F_2(x) \rightarrow \max, F_3(x) \rightarrow \max, F_4(x) \rightarrow \min, \quad (2.5)$$

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

$$F_1(x_{i_j}^j) \geq F_{1\min}^j, F_2(x_{i_j}^j) \geq F_{2\min}^j, F_3(x_{i_j}^j) \geq F_{3\min}^j, F_4(x_{i_j}^j) \leq F_{4\max}^j, F_i(\cdot) > 0, i = \overline{1, 4}, \quad (2.6)$$

$$0 < a_q(x_{i_j}^j) < \max\{a, b, c\}, 0 < b_q(x_{i_j}^j) < \max\{a, b, c\}, 0 < c_q(x_{i_j}^j) < \max\{a, b, c\}, \quad (2.7)$$

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 збігаються, тобто $\exists i, j, i \neq j: |K_i| \neq |K_j|$. Таким чином, одержуємо ще один варіант постановки задачі (2.5)-(2.7), 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 [58, 59], виключимо з розгляду ті можливі рішення, які не задовольняють одній або декільком умовам.

Очевидними є такі обмеження:

1. $\sum (a_i \cdot b_i \cdot c_i) \leq a \cdot b \cdot c$, тобто сумарний об'єм елементів комплекту 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.

Вище вказано, що критеріями, що визначають вибір того чи іншого комплекту АРТ, є F_1 – функціональність, F_2 – потужність, F_3 – надійність, F_4 – ціна. Маємо задачу багатокритеріальної оптимізації: знайти комплект АРТ, який є розв'язком задачі (2.5)-(2.7).

Її розв'язанню передуює визначення вагових коефіцієнтів критеріальних функцій. Таку процедуру можливо здійснити з використанням елементів методу аналізу ієрархій Т. Сааті та схеми Беллмана-Заде [48, 118]. Для цього вибирають m експертів, які, використовуючи шкалу Т. Сааті, здійснюють порівняння критеріальних функцій та формують відповідну матрицю.

На наступному кроці оцінюють варіанти комплектування АРТ за кожним із критеріїв F_i , $i = \overline{1, 4}$. Аналогічно попередньому кроку одержують п'ять

матриць Q_i , елементи кожної з яких містять значення парних порівнянь варіантів комплектування за критеріями $F_i, i = \overline{1,5}$. Їх аналіз дозволяє встановити пріоритети різних комплектів АРТ.

До важливих аспектів, які необхідно враховувати при розв'язанні задачі, відносяться наявність змінної кількості елементів у кожному варіанті комплектування. Така обставина вимагає формального визначення критеріальних функцій, оскільки для різного типу обладнання поняття і одиниці вимірювання функціональності та потужності відрізняються.

Для $\forall C_l$ необхідно знайти

$$\text{Argmax}_i \sum_{j=1}^4 \alpha_j^l F_j (X_i^l), l = \overline{1, m}, \quad (2.8)$$

де α_j^l – коефіцієнти, що визначають значущість F_j .

Перш, ніж вказати на аспекти розв'язання задачі (2.8), визначимо деякі поняття. 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 наступним чином. Нехай N_f – максимальна кількість функцій, що виконується 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, розуміють 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.

Комплектуючи такий автомобіль, необхідно розв'язувати задачу багатокритеріальної оптимізації, оскільки набір засобів повинен бути максимально функціональним, продуктивним і надійним, а також мати мінімально можливі габарити і вартість. Дві останні характеристики і продуктивність є відомими точними величинами. Надійність – ймовірнісна паспортна характеристика, але може бути невідомою і тоді прогнозується, виходячи з досвіду використання. Складніше за все враховувати функціональність обладнання, оскільки ця характеристика, швидше за все, суб'єктивна.

Пропонується визначати функціональність з використанням нечітких продукційних правил. Очевидно, що функціональність має сенс розглядати для мультифункціонального одностипного обладнання. Тоді якість виконання тієї чи іншої функції експерт оцінює за допомогою функції належності. Продукційні правила матимуть вигляд:

$$\text{Якщо } x_1 \in A_1 \& x_2 \in A_2 \& \dots \& x_n \in A_n, \text{ то } y \in B, \quad (2.9)$$

де x_i – значення функцій, A_i – нечіткі множини з відповідними функціями належності, $i = \overline{1, n}$, y – значення рівня функціональності, $y \in (0, 1)$, B – відповідна нечітка множина.

Правила такого типу формуються експертом і їх кількість дорівнює кількості обладнання, досвід роботи з яким має експерт. Кількість правил значно збільшується, якщо в оцінці обладнання беруть участь кілька експертів.

Якщо параметри всіх функцій належності відомі, то такі правила дозволяють визначити рівень функціональності нового обладнання.

При абсолютної впевненості експертів у своїх висновках сукупність правил часто стає суперечливою. Тому, з метою зменшення, а часто і усунення суперечливості, експертам необхідно здійснювати структурну ідентифікацію функцій належності, а параметричну ідентифікацію виконувати за допомогою нейро-нечітких мереж, типу ANFIS або TSK [10, 13, 39, 73]. Отримані значення рівня функціональності для всіх видів однотипного обладнання дозволяють розв'язувати задачу багатокритеріальної оптимізації як в чіткій її постановці, так і в нечіткій. У другому випадку використовується схема Беллмана-Заде, за допомогою якої визначаються і пріоритети оціночних критеріїв.

Зменшити невизначеність процесу прийняття рішень відповідальною особою можна, застосувавши формальні методи опису як аварії або катастрофи, так і варіанту комплектування АРТ, його ефективності та технічних параметрів. На макрорівні задача комплектування полягає у ідентифікації залежності

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_n, Z_1, Z_2, \dots, Z_m), \quad (2.10)$$

де Y – варіант комплектування, $X_i, i \in \{1, 2, \dots, n\}$ – фактори, які визначаються внутрішніми особливостями розвитку нештатних ситуацій, $Z_i, i \in \{1, 2, \dots, m\}$ – фактори впливу зовнішнього середовища. Здійснення ідентифікації вищенаведеної залежності дозволило б у залежності від значень незалежних факторів встановити оптимальний варіант комплектування. Очевидно, що такий процес наштовхується на певні складнощі, зокрема, статистичні

дані, на основі яких можна здійснити ідентифікацію (2.10) є відсутніми, оскільки техногенні та природні аварії або катастрофи носять найчастіше унікальний одиничний характер; визначений в результаті ідентифікації (2.10) варіант може бути неприйнятним через додаткові обмеження фінансового чи технічного характеру; кількість незалежних факторів та їх фізичний зміст відрізнятимуться у залежності від нештатної ситуації.

У роботах [103, 113] наголошується на необхідності формування критеріїв включення окремих елементних рішень у комплектацію техніки, проте способу одержання таких критеріїв не вказується. У той же час певні дані про результати ліквідації наслідків аварій та катастроф є відомими, що дозволяє встановити ефективність тих чи інших компонувальних рішень з урахуванням позитивного ефекту, вираженого у певних одиницях, зокрема, в одиницях обсягу виконаної роботи. Такі дані також вказують на неправильні, неефективні рішення або не одержаний позитивний ефект через відсутність тієї чи іншої техніки, показаний в одиницях матеріальних збитків.

Найчастіше елементи АРТ мають багатоцільове призначення і можуть виконувати декілька функцій. 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.

На наступному етапі здійснимо нормування значень критеріальних функцій, використовуючи перетворення

$$F_j^{*i} = \frac{F_j^i - F_{j\min}}{F_{j\max} - F_{j\min}}, \quad j = \overline{1,5}, \quad i = \overline{1,|C_q|}, \quad q = \overline{1,m}, \quad (2.11)$$

де $F_{j_{\max}}$, $F_{j_{\min}}$ – максимальне і мінімальне значення j -ої критеріальної функції i -го елемента q -го класу обладнання. Нормування дозволить розглядати безрозмірні величини, порівнювати їх і будувати інтегральну критеріальну функцію елемента класу.

Така функція може бути як лінійною, так і нелінійною. У першому випадку вона є такою:

$$F_k(X_p) = \sum_{j=1}^5 \alpha_j^k \cdot F_j(X_p), \quad k = \overline{1, m}, p = \overline{1, n}. \quad (2.12)$$

Для визначення коефіцієнтів α_j^k достатньо мати таблицю з кортежами

$$T = \langle Id, Class, F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F \rangle, \quad (2.13)$$

де Id – ідентифікатор елемента АРТ, $Class$ – номер класу, $F_j, j = \overline{1, 5}$ – значення критеріальних функцій (відомих, розрахованих або частково визначених експертним шляхом), F – значення інтегральної цільової функції, вказане експертами. Якщо кількість рядів у таблиці T більше п'яти, то застосовуючи метод найменших квадратів і припускаючи виконання умов його використання, можна визначити невідомі коефіцієнти критеріальної функції елемента АРТ. Оскільки кількість таких елементів значно більше п'яти, то надалі отриману критеріальну функцію можна використовувати для оцінки їх ефективності.

Якщо передбачувана критеріальна функція нелінійна, то її ідентифікація ускладнюється. Гіпотеза про нелінійність критеріальної функції швидше за все підтвердиться, якщо адекватність лінійної моделі не буде встановлена. Відомо, що найчастіше для ідентифікації

нелінійних залежностей використовується метод Брандона [135], метод групового урахування аргументів [72, 82], нейронні мережі [77, 115, 134] та інші. Реалізація кожного із зазначених методів має свої особливості. При виконанні відповідних умов їх результати досить точні. Далі будемо припускати, що для кожного елемента АРТ відомо значення цільової функції $F(X_p)$, $p = \overline{1, n}$.

Відомо, що оптимальні часткові розв'язки підзадач, складені разом, не є оптимальним розв'язком задачі в цілому. Тому, розв'язки задач (2.5)-(2.7) є всього лише інформативним чинником і можуть бути використані при попередньому обговоренні і пошуку опорного розв'язку більш загальної задачі пошуку оптимального варіанту комплектування АРТ.

Визначаючи інтегральну критеріальну функцію комплекту АРТ, необхідно враховувати значущість U того чи іншого класу обладнання. Знайти відповідні коефіцієнти u_k , $k = \overline{1, m}$ можна як залежності від кількості аварій та катастроф (N), при яких використовується відповідне обладнання, кількості загиблих (R), травмованих (P), величини відповідного матеріального збитку (M). Для цього необхідно використовувати технологію, аналогічну вищенаведеній для визначення вагових коефіцієнтів критеріальних функцій елементів. Відповідна таблиця буде мати такі кортежі:

$$T_i = \langle Id_i, N_i, R_i, P_i, M_i, V_i \rangle, \quad i = \overline{1, m}. \quad (2.14)$$

Інтегральна критеріальна функція для комплекту АРТ буде такою:

$$F(K_p) = \sum_{j=1}^m u_j \sum_{l=1}^n \left(\sum_{i=1}^5 \alpha_i^j \cdot F_i(X_l) \right) \cdot \chi[(X_l \in C_j) \& (X_l \in K_p)], \quad p = \overline{1, K}. \quad (2.15)$$

Другу задачу, що полягає в пошуку оптимального варіанту комплектування АРТ, формально подамо таким чином: знайти

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

(2.16)

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.

Розглянемо аспекти розв'язання задачі (2.16). Вони можуть бути розділеними на два класи. До першого належать аспекти формування пріоритетів цільових функцій та комплектів АРТ, до другого – технології одержання оптимального (квазіоптимального) розв'язку задачі (2.16). Для розв'язання задачі комплектування АРТ розроблено метод, результати застосування якого є одним із можливих елементів технології прийняття рішень, що базується на використанні теорії нечітких множин, як однією із складових парадигми Soft Computing [3, 48]. Не для всіх її положень існують строгі математичні доведення, не для всіх методів гарантована збіжність, їх застосування є доцільним при розв'язанні задач, пов'язаних із необхідністю врахування суб'єктивних суджень. Розв'язуючи задачу про визначення оптимального варіанту комплектування АРТ, експерти повинні володіти інформацією про порівняльні характеристики елементів АРТ одного класу, а також мати можливість приведення

різномірних показників до однієї шкали. У випадку, якщо компетентність експертів є невідомою для особи, яка приймає рішення, рекомендовано скористатись методом, що базується на використанні аксіоми незміщеності, запропонованим в [15, 124, 127].

Як показано, метод має і недоліки. Зокрема, він орієнтований на визначену кількість варіантів комплектування, яка не може змінитись в процесі аналізу, і одержані результати не можуть використовуватись для оцінювання нового варіанту комплектування. Адже при додаванні інших варіантів комплектів АРТ необхідно буде здійснювати перерахунок усіх матриць попарних порівнянь за окремими критеріальними функціями. Крім того, суб'єктивізм методу, навіть певним чином об'єктивізований, не гарантує вибору оптимального комплекту АРТ.

Розглянуто перспективи застосування інших методів, що базуються також на складових «Soft Computing» – штучних нейронних мережах, методах еволюційного моделювання, технологіях, що базуються на нових обчислювальних парадигмах. Це дозволить здійснювати оцінювання варіантів комплектування не при попарному порівнянні, а виходячи з уже побудованої моделі типу (2.16).

Аспекти іншого напрямку Soft Computing, а саме еволюційного моделювання для розв'язання задачі комплектування вже розглядалися раніше в [36, 105, 121]. Оскільки функція (2.16) є поліекстремальною, негладкою, обчислюваною алгоритмічно, то її оптимізація не може бути здійсненою з використанням класичних методів, що базуються на інтегро-диференціальному численні.

Іншою парадигмою розв'язання подібних задач є стохастична оптимізація. Послідовний пошук оптимального розв'язку у випадковому напрямку та розмірність задачі не гарантують знаходження

глобального оптимуму. Тому еволюційні технології, в основі яких лежить випадковий, але направлений пошук, є чи не єдиним способом розв'язати поставлену задачу.

Двома основними еволюційними методами, якими можна розв'язати задачу (2.16), є генетичні алгоритми та еволюційні стратегії. У класичному викладі перший метод призначений для розв'язання задач дискретної оптимізації з використанням генотипів (бінарних розв'язків), другий – базується на використанні дійсних представлень потенційних розв'язків. Характерним для цих двох методів є паралельний пошук оптимуму. Генетичний алгоритм більшою мірою залежить від розрядності комп'ютерної сітки та точності потенційного розв'язку (2.16). Відмінністю між генетичним алгоритмом та еволюційною стратегією є ще те, що при використанні генетичного алгоритму нові розв'язки утворюються як залежні від двох батьківських розв'язків, а в еволюційних стратегіях – батьківський розв'язок один.

Недоліком як генетичного алгоритму, так і еволюційної стратегії є значна кількість кроків у невірному напрямку при пошуку оптимального розв'язку. Хоч і той, і той методи збігаються за ймовірністю до глобального оптимуму при певних параметрах. Для того, щоб оптимізувати процес пошуку оптимального розв'язку задачі (2.16), доцільним є використання методу EvoMax, запропонованого у роботі [128]. Його особливістю є направленість випадкового пошуку за рахунок визначення перспективних розв'язків та міри їх перспективності і реалізації технології, при якій потенційно кращі розв'язки шляхом мутації генерують нащадків, причому в оптимізованій для такого пошуку області.

Використання еволюційного моделювання пов'язано із двома супутніми задачами: конструюванням потен-

ційного розв'язку та формуванням цільової функції. Особливістю задачі є те, що потенційний розв'язок може мати змінну структуру, що пов'язано із змінною кількістю елементів аварійно-рятувальної техніки в комплекті. Саме такі елементи і будуть «генами»-складовими потенційного розв'язку.

При формуванні інтегральної цільової функції, за якою можна оцінити ефективність комплекту техніки, враховуємо наведені вище складові. Зокрема, це ціна, надійність, потужність та функціональність. Зауважимо, що їх значення мають як об'єктивну сутність (ціна, потужність), так і об'єктивно-невизначену (надійність) та суб'єктивно-невизначену (функціональність) сутності. Позначимо габаритні розміри контейнера, в якому знаходиться комплект техніки $\{a, b, c\}$, габаритні розміри елементів обладнання $\{a_i, b_i, c_i\}, i = \overline{1, n}$, де n – кількість його видів.

Визначимо комплект часткових задач, які необхідно розв'язувати при формуванні комплекту аварійно-рятувальної техніки:

$$F_1 = \sum_i w_i(x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_{p_i}}) \rightarrow \max, \quad (2.17)$$

$$F_2 = \sum_i (a_i + b_i + c_i) \rightarrow \min, \quad (2.18)$$

$$F_3 = \sum_i P_i(x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_{p_i}}) \rightarrow \max, \quad (2.19)$$

$$F_4 = \sum_i Z_i(x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_{p_i}}) \rightarrow \min. \quad (2.20)$$

У виразі (2.17) w_i - вагові коефіцієнти, які вказують на важливість виконання i -ї функції, $\sum w_i = 1, i = \overline{1, k}$, а сума береться по тих i , які є перестановками (j_1, j_2, \dots, j_l) у зростаючому порядку, мінімальне значення j_1 встановлюється дослідником, максимальне значення співпадає з

k. Вираз (2.18) визначає мінімалізм габаритних розмірів комплекту обладнання, а третя цільова функція (2.19) вказує на необхідність забезпечення якнайширшої функціональності обладнання. Ціновий критерій (2.20) у сучасних реаліях має домінуючий характер, його складові є вартістю елементів обладнання.

Усі змінні виразів (2.17)-(2.20) є обмеженими величинами, що певною мірою визначає пошук можливого ефективного розв'язку.

Далі будуть наведені аргументи на користь використання інтегрального критерію ефективності комплекту техніки як адитивної згортки часткових критеріїв

$$F = v_1F_1 + v_2F_2 + v_3F_3 + v_4F_4, \quad (2.21)$$

де v_i – вагові коефіцієнти цільових функцій, $i = \overline{1,4}$.

Як уже вказано вище, визначено, що головними критеріями, які враховують при комплектуванні АРТ, є ціна, функціональність, потужність, надійність. Один з підходів до визначення оптимального комплекту АРТ полягає у зведенні багатокритеріальної задачі (2.17)-(2.20) з обмеженнями на габаритні розміри комплектів до однокритеріальної [57, 61, 67, 76, 106, 109].

Реалізація методів, які відповідають такому підходу, є проблематичною.

Далі буде представлено відповідну технологію з використанням еволюційних методів. Можливо також розв'язувати задачу комплектування АРТ з використанням експертного оцінювання. Для цього кожен з m експертів визначає n можливих варіантів комплектів АРТ. У найгіршому випадку кількість можливих варіантів nm . Далі усі експерти голосують за усі варіанти. Ті з n варіантів, які набрали найбільшу кількість голосів, визна-

ються потенційними розв'язками. Далі кожен експерт ранжує одержані варіанти. Існує багато методів побудови колективного ранжування на основі індивідуальних. Результиуючі ранжування, одержані різними методами, можуть відрізнитись. Вибір остаточного ранжування вимагає додаткового обґрунтування.

Інші підходи базуються на використанні нейронних та нейронечітких мереж.

5. Інформаційно-аналітичні моделі життєвого циклу аварійно-рятувальної техніки

Розглянемо задачу комплектування аварійно-рятувальної техніки (АРТ) з системних позицій. Їх складовими є системний підхід та системний аналіз. Відомо, що системний підхід – науково-практична методологія вирішення складних проблем, визначальними аспектами якої є систематизація, формалізація та цілеорієнтація [130, 131]. У свою чергу, системний аналіз – науково-практична методологія, дослідження складних систем, яка складається з таких етапів як формулювання цілі системи, встановлення її елементної бази, визначення структурних особливостей, формування множини внутрішніх параметрів системи та множини зовнішніх функцій визначення стану системи та показників її ефективності, ідентифікація критерію ефективності системи [75, 78]. Сам процес комплектування будемо розглядати як дуальний системному проектуванню – процесу одержання проекту системи в базисі системних властивостей, системних ресурсів та структур життєвого циклу [130]. В основу дослідження покладемо системну модель (СМ), яку подамо як кортеж елементів із відповідними відображеннями [131]. Всі чотири системні складові відобразимо конструктивно.

Важливо передбачати проблеми при комплектуванні аварійно-рятувальної техніки. Очевидно, що цей процес триває у часі і на кожному часовому проміжку потрібно прагнути до одержання оптимального розв'язку – найкращого можливого комплекту.

Насамперед зазначимо, що навколишнє середовище Ω містить три складові по відношенню до нашої задачі (рис. 1)

$$\Omega = \langle P, AS, NS \rangle, \quad (2.22)$$

де P – людська популяція, AS – штучні системи (створені людиною), NS – природні системи.

Процеси існування та функціонування вказаних складових не завжди є незалежними, у багатьох випадках вони перетинаються. Коли відбуваються пожежі, аварії, катастрофи, нещасні випадки тощо, то потерпають люди, завдається шкода штучним і природним системам у різних кількостях та пропорціях. Зокрема, при хімічних аваріях вражаються природні системи і люди, при пожежах – люди і штучні системи, при нещасних випадках – люди, при аваріях та катастрофах іншої природи – можливі й інші варіанти. Зауважимо, що в усіх вказаних випадках бувають виключення. Важливим є те, що їх наслідки є негативними для людини прямо чи опосередковано.

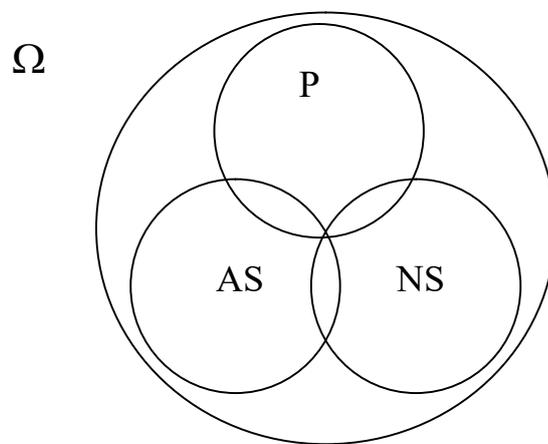


Рисунок 1. Складові середовища

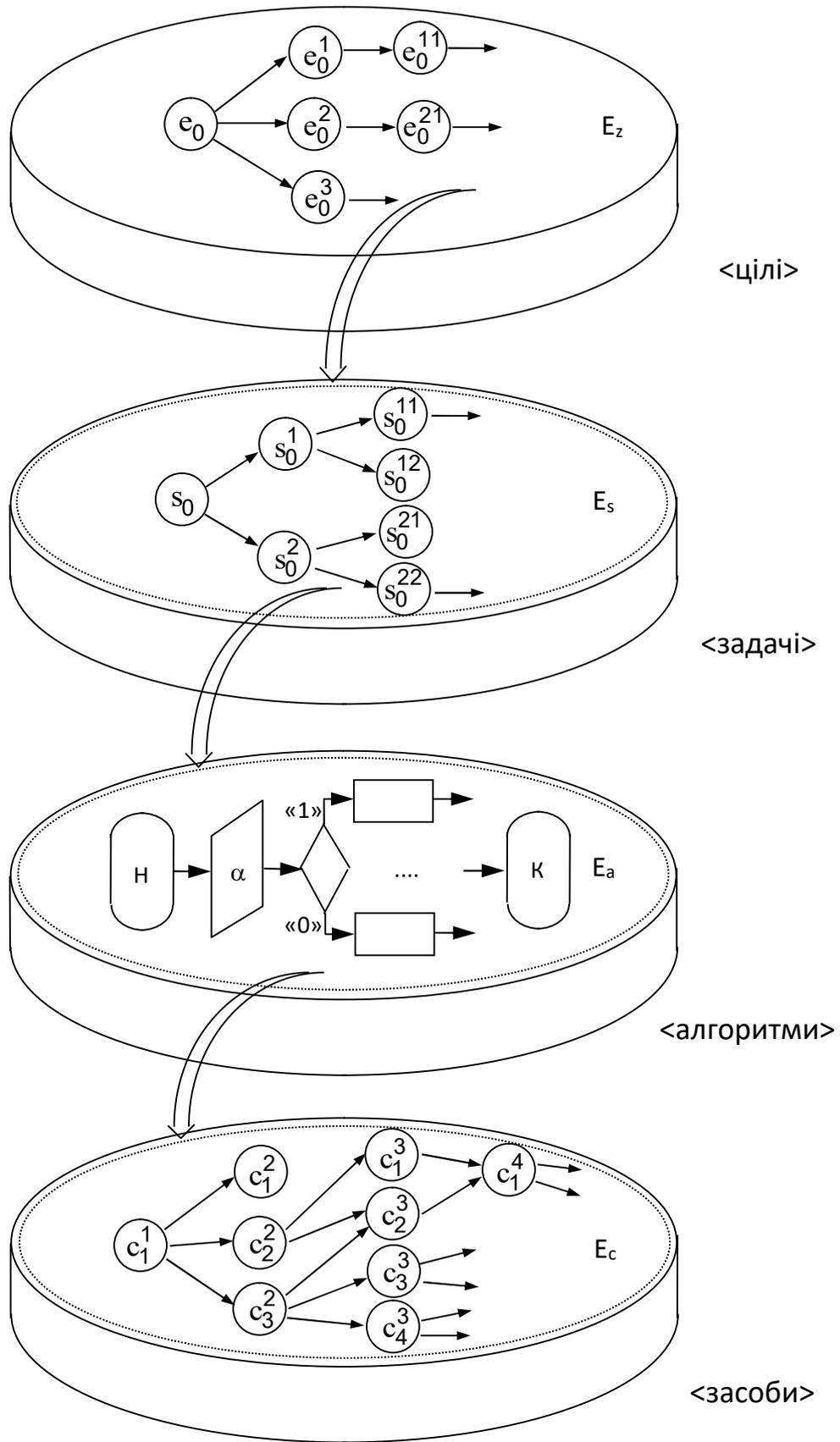


Рисунок 2. Багаторівнева системна модель

Розглянемо деяку область, яка визначає територіально встановлену адміністративну одиницю, найчастіше, область чи місто. Побудуємо в області СМ процесу комплектування АРТ.

Оскільки ціль є бажаним результатом, то у нашому випадку це рятування людей (G_{11}), зменшення матеріальних збитків (G_{12}), запобігання техногенним та екологічним катастрофам (G_{13}), тобто

$$G = \langle G_0, G_{11}, G_{12}, G_{13}, \dots, G_{1n}, G_{111}, \dots \rangle, \quad (2.25)$$

де G_0 – головна ціль, яка полягає у мінімізації негативних наслідків аварій, катастроф, пожеж тощо, G_{ij} , G_{ijk}, \dots – підцілі головної цілі, які утворюють ієрархічну графоподібну структуру. Досягнення хоча б однієї цілі із G , або сукупності цілей, або усіх цілей G як елементарних структур «І-Або» графа залежить від розв'язання сукупності задач

$$V = \langle V_1, V_2, \dots, V_m, V_{11}, \dots \rangle, \quad (2.26)$$

де V_i, V_{ij} – вербальні формулювання задач.

Відомо, що розв'язати можна задачі, які мають формалізовану постановку, тобто необхідно побудувати відображення множини $V \rightarrow M$. Склад множини M раніше обґрунтований в [93, 96] і включає в себе на макрорівні F_1 – ціна комплекту обладнання, F_2 – його функціональність, F_3 – потужність, F_4 – надійність.

Тоді відповідними задачами є такі:

$$F_1 \rightarrow \min, F_2 \rightarrow \max, F_3 \rightarrow \max, F_4 \rightarrow \max \quad (2.27)$$

при обмеженнях на габаритні розміри обладнання. До задач і моделей нижчих рівнів ієрархії належать ідентифікація як структурна, так і параметрична. Її особливості розглянуті в [107, 115]. Задачі, як і відповідні моделі, теж мають ієрархічну графоподібну структуру.

Для того, щоб одержати корисні дані, знання, інформацію, потрібно розв'язати задачі із множини V . Оскільки задачам відповідають певні моделі із непорожньої множини (банку), для їх обробки необхідно застосовувати методи (W), які ще називають способами розв'язання задач. Очевидно, що певний клас моделей і задач може бути розв'язаний з використанням класу методів. Таким чином, існує відображення

$$Q: M \rightarrow W, \quad (2.28)$$

яке не є взаємно однозначним і породжує необхідність оптимізації, яка полягає у виборі найкращого методу (встановленні найточнішого результату за певних ресурсних обмежень). Одним із способів його реалізації є використання підходу із застосуванням ансамблю методів.

Так, зокрема, до множини M належать парна та непарна множинна лінійна регресія, нелінійна регресія, нейромережі, поліном Колмогорова-Габора та інші. Множина методів включає в себе метод найменших квадратів, метод Брандона, метод групового урахування аргументів, нейромережні методи навчання (стохастичні, прямі, на основі back propagation) тощо. Переважна більшість методів, згаданих вище, є надто трудомісткими, особливо у випадку великої потужності множини початкових даних.

Оскільки розв'язання задач (2.27) потребує значних обчислювальних затрат важливим є етап відображення множини методів (T) на множину алгоритмів (U) як формальних конструкцій для практичної комп'ютерної реалізації. Подібно до того, як методи допускають свою параметричну оптимізацію, так і алгоритм, що відповідає одному методу може бути побудованим великою кількістю способів. Якщо сукупність параметричних варіантів одного методу є N , то потужність множини відповідних алгоритмів M , причому $M \gg N$.

Залишається проблема виконання (реалізації) алгоритму. Для задачі комплектування АРТ, незважаючи на рівень розвитку техніки та обчислювальних технологій, через комбінаторну складність ця проблема актуальна. Тому, вибір інструментальних засобів (Z) є важливим етапом її розв'язання і реалізується через відображення $U \rightarrow Z$.

Таким чином, визначені усі складові системної моделі. Її побудова на макрорівні полягає в реалізації сукупності відображень

$$G \rightarrow V \rightarrow M \rightarrow T \rightarrow U \rightarrow Z \dots \rightarrow M \rightarrow T \dots \quad (2.29)$$

Ланцюжок відображень відповідає реалізації ітераційного процесу, оскільки вимоги до того чи іншого методу можуть не відповідати цілям чи задачам комплектування АРТ. Не виключеною є ситуація, коли ефективність інструментальних засобів не дозволяє одержати розв'язок задачі за існуючих вихідних даних, або ресурсів, або вимог до процесу розв'язання. Системна модель (2.23)-(2.24) дає можливість системного бачення особливостей розв'язання задачі комплектування АРТ. Вона є інтегруючою ланкою номенклатури аварійно-

рятувальних засобів, фінансових ресурсів, організаційно-технічних та адміністративних заходів.

Рівні реалізації системного підходу до задачі комплектування аварійно-рятувальної техніки. Необхідність розв'язання задачі комплектування АРТ обумовлює проведення систематизованого дослідження її ретроспективних особливостей. Зокрема, Google видає близько 460000 посилань за ключовими словосполученнями «Аварійно-рятувальна техніка» та «Комплектування аварійно-рятувальної техніки» українською мовою. Аналіз посилань за змістом вказує на дослідження теми комплектування АРТ в Черкаському інституті пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України. Всі інші посилання дозволяють познайомитись із різними зразками АРТ, номенклатура яких є дуже широкою і саму тому й існує задача формування комплекту АРТ. Оскільки таку задачу, окрім фахівців із вказаного Інституту, як свідчить Google, ніхто не розв'язував, то ми звернули увагу на задачі, які є релевантними за певними аспектами нашої задачі. Зокрема, на запит «Задача упаковки» одержано 22500000 посилань. Різновидів такої задачі є декілька десятків. Це двомірна упаковка, лінійна упаковка, упаковка за вагою, вартістю [28, 33, 38, 81, 111, 120, 137] тощо. Особливістю таких задач є їх однокритеріальність [30]. Аналіз і систематизація технологій розв'язання задачі комплектування АРТ та подібних свідчить про або недослідженість відповідної проблеми або про неврахування її багатокритеріальності. Такий висновок дозволяє виконати формалізацію задачі комплектування АРТ [20]. Будуючи моделі, необхідно враховувати цільове призначення як кожного окремого елемента АРТ, так і їх комплектів.

Етапи системного аналізу системи та процесу комплектування АРТ.

Вихідним етапом системного аналізу є формування цілі системи, у нашому випадку така ціль функціонування комплексу АРТ визначена вище як сукупність бажаних результатів. На наступному етапі здійснюємо визначення та впорядкування елементної бази, формуючи кортежі таблиці бази даних

$$\langle N, ID, Name, TS1, TS2, \dots, TS_{n_N}, f_1, f_2, \dots, f_{n_N}, s1, s2, s3, Pr \rangle, \quad (2.30)$$

де N – порядковий номер запису в таблиці бази даних, ID – ідентифікатор або скорочена назва елемента обладнання, $Name$ – повна назва обладнання, $TS1 - TS_{n_N}$ – технічні характеристики обладнання, $f_1 - f_{n_N}$ – функції, які виконує обладнання, $s1, s2, s3$ – його габаритні розміри, Pr – ціна. Дані, які знаходяться в таблиці (2.30) є вихідною інформацією для розв'язання задач (2.27). Знання технічних характеристик та функціональних особливостей елементів обладнання потрібне також для врахування структурних особливостей при формуванні оптимального комплексу техніки. Зокрема, якщо для двох елементів обладнання i -го та j -го $f_k^i = f_k^j \forall k \in \overline{1, n}$, то до комплексу обладнання включимо той елемент, значення технічних характеристик якого є не гіршими, а хоча б одна є кращою, тобто

$$\forall k \ TSk^i \geq TSk^j \ i \ \exists l : TSl^i > TSl^j. \quad (2.31)$$

Можливі й інші ситуації:

– якщо кількість функцій i -го елемента є більшою, ніж у j -го, то при всіх інших рівних умовах виберемо j -й елемент;

– якщо кількість функцій i -го елемента є більшою, ніж у j -го, але значення хоча б однієї технічної характеристики є кращим при негірших значеннях усіх інших, то вибір елемента здійснюється або з використанням технологій зведення багатокритеріальної задачі до однокритеріальної або до формування колективної системи переваг із використанням системного аналізу [78, 130].

Переважаючим аспектом вибору є різноаспектність елементів обладнання, тобто, в ідеальному випадку не повинно існувати в одному комплекті двох елементів i -го та j -го таких, що $\exists k \in \overline{1, l}: f_k^i = f_k^j$. Водночас, бажаною є ситуація, коли $Uf_i = \Phi$, де Φ – простір усіх можливих функцій, які має виконувати комплект АРТ. Вказані особливості і визначатимуть структуру потенційного оптимального комплекту АРТ. Зауважимо, що значення ціни комплекту АРТ залишається визначальним.

Таким чином, початкова задача може бути зведеною до такої: знайти комплект АРТ, що

$$|Uf_i| \rightarrow \max \vee |\Phi \setminus Uf_i| \rightarrow \min, \quad (2.32)$$

де $|\Theta|$ – потужність множини (кількість елементів) Θ , \min чи \max знаходять по можливих комплектах обладнання з урахуванням обмежень на їх габаритні розміри. Задача (2.32) може бути уточнена з урахуванням значень технічних характеристик

$$(|Uf_i| \rightarrow \max \& \sum_k TS_k \rightarrow \max) \vee (|\Phi \setminus Uf_i| \rightarrow \min \& \sum_k TS_k \rightarrow \max),$$

або, що те ж саме:

$$(|Uf_i| \rightarrow \max \vee |\Phi \setminus Uf_i| \rightarrow \min) \& \sum_k TS_k \rightarrow \max. \quad (2.33)$$

Розглянемо більш детально систему функцій, які виконує елемент обладнання АРТ. Нехай f_k^j є головною функцією в множині усіх можливих функцій $\{f_1^j, f_2^j, \dots, f_k^j, \dots, f_n^j\}$ j -го елемента комплекту обладнання. Крім виконання головної функції j -й елемент може виконувати ряд допоміжних функцій, тому впорядкуємо множину функцій таким чином:

$$\{f_0^j, f_1^j, \dots, f_g^j, f_{g+1}^j, \dots, f_{n-1}^j\}, \quad (2.34)$$

де f_0^j – головна функція обладнання, f_i^j – побічні функції, $i = \overline{1, g}$, f_i^j – функції, які j -й елемент АРТ не виконує, $i = \overline{g+1, n-1}$. Для визначення ефективності j -го елемента АРТ використаємо показники ефективності виконання j -м елементом своїх функцій $\{y_0(f_0^j), y_1(f_1^j), \dots, y_g(f_g^j)\}$. Інтегральна оцінка ефективності є кількісною характеристикою показників ефективності,

$$E^j = E^j(y_0(f_0^j), y_1(f_1^j), \dots, y_g(f_g^j)) \quad (2.35)$$

і може бути ідентифікованою з використанням експертних висновків аналітично. Наприклад, як адитивна згортка,

$$E^j = \sum_{i=0}^g \beta_i \cdot y_i(f_i^j), \quad \forall j = \overline{1, m}, \quad (2.36)$$

де m – кількість елементів АРТ, β_i – ваговий коефіцієнт i -го показника ефективності. Зауважимо, що раніше встановлені чотири критерії оцінювання комплекту АРТ: ціна, функціональність, потужність та надійність. Такі ж критерії можуть розглядатись і для окремого елемента

обладнання. Очевидно також, що існує залежність між функціональністю (F_2) та ефективністю елемента обладнання, тобто

$$F_2(e^j) = Q(E^j), \quad (2.37)$$

де e^j – елемент обладнання. Ідентифікація Q потребує додаткових досліджень. Зауважимо, що F_1, F_3, F_4 у випадку елемента обладнання є відомими. Ціна визначається постачальником або виробником, надійність відома за статистичними даними, потужність – паспортна характеристика елемента обладнання.

Раціонально при визначенні функціональності елемента обладнання враховувати актуальність усіх його функцій. Чим частіше виникала надзвичайна ситуація, де потрібно було реалізувати певну функцію, тим функціональнішим є обладнання з такою функцією. Така актуалізація приводить до побудови залежності, що визначає функціональність елемента АРТ

$$F_2(e^j) = Q(E^j) = Q\left(\sum_{i=0}^g \beta_i \cdot y_i(f_i^j)\right), \quad \forall j = \overline{1, m}, \quad (2.38)$$

де $\beta_i = \gamma_i \cdot \delta_i$, причому γ_i – ваговий коефіцієнт i -ї функції, що визначається виробником обладнання, δ_i – ваговий коефіцієнт, який вказує на актуальність реалізації i -ї функції, $i = \overline{0, g}$. Загальний критерій ефективності комплекту АРТ формується з урахуванням наведених вище особливостей.

Розв'язуючи задачу комплектування АРТ, залишається врахувати характеристики, які супроводжують процес системного проектування. До системних ресурсів у цьому випадку можна віднести

фінансові ресурси, а також носія аварійно-рятувального обладнання – спеціальні автомобілі.

Системні властивості комплекту АРТ включають в себе:

- відкритість – здатність до включення в комплект нових елементів або виключення,
- масштабованість – можливість використання комплекту АРТ на автомобілях різних типів,
- системність – здатність до виконання найширшої множини функцій,
- інтегральність – властивість спільної роботи різнотипних елементів обладнання при виконанні однієї задачі тощо.

Потрібно відзначити необхідність виконання вимоги про програмовану експлуатацію пропонованого комплекту АРТ, яка передбачатиме не лише ефективну його роботу сьогодні, але і в майбутньому, що можливо буде пов'язано із необхідністю заміни використовуваних елементів на нові та перспективніші.

В основі ефективного розв'язання задачі (2.33) лежать такі передумови:

1. Формування комплексу моделей, які дозволять здійснити ідентифікацію критеріальних функцій.
2. Розробка інтегрального критерію, отримання значень якого дозволить встановити уподобання на безліч варіантів.

Розглянемо задачу формування комплексу моделей, які складають інформаційно-аналітичний базис дослідження. Відомо, що при створенні складних систем традиційно [131] використовують моделі будови, функціонування і розвитку.

Розв'язання задачі комплектування аварійно-рятувальної техніки базується на використанні моделі будови такого виду:

$$M_{\sigma} = \langle S_1(a_1, b_1, c_1), S_2(a_2, b_2, c_2), \dots, S_n(a_n, b_n, c_n) \rangle, \quad (2.39)$$

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 (2.39) буде доповнена ще однією моделлю:

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

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

$$M_f = \langle G_1, G_2, \dots, G_n \rangle, \quad (2.40)$$

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 – апіорна 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 [56]:

$$M_d = \langle (S_1^1, S_2^1, \dots, S_{k_1}^1), (S_1^2, S_2^2, \dots, S_{k_2}^2), \dots, (S_1^{k_p}, S_2^{k_p}, \dots, S_{k_p}^{k_p}) \rangle, \quad (2.41)$$

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 і за вартістю. Можливі також варіанти упорядкування за значенням габаритів.

Моделі (2.39)-(2.41) становлять інформаційно-аналітичний базис формування показників ефективності та інтегрального критерію ефективності комплекту аварійно-рятувальної техніки. Їх побудова дозволяє визначити перелік функцій обладнання, ефективність їх виконання для конкретного комплекту, встановити кількісні й якісні співвідношення між показниками ефективності та побудувати інтегральний критерій ефективності на основі детермінованих, об'єктивно невизначених та суб'єктивно-невизначених показників із застосуванням технологій Soft Computing. До таких показників належать: ціна елементного рішення, його функціональність, потужність та надійність. Встановлення кількісних оцінок таких показників є слабо структурованою задачею.

Системність у розв'язанні будь-якої задачі є необхідною умовою одержання ефективного її розв'язку та оптимізації усіх етапів життєвого циклу. Наведені системні особливості задачі комплектування АРТ

дозволять одержати оптимальні (прийнятні) варіанти комплектування АРТ, що, у свою чергу, буде націлено на підвищення ефективності процесів рятування людей, мінімізацію матеріальних збитків, наслідків природних та техногенних катастроф.

Потрібно також звертати увагу на технології формування інтегральної цільової функції, методів формування результату групового вибору за індивідуальними перевагами, оскільки такі задачі є параметричними та значною мірою суб'єктивізованими.

6. Особливості побудови інтегральної цільової функції

Розв'язання задачі комплектування аварійно-рятувальної техніки є однією із необхідних складових інтелектуалізації технологій гарантування безпечного середовища проживання людини. На практиці комплектування аварійно-рятувальної техніки здійснюється, виходячи із наявних коштів, досвіду, інтуїції особи, яка приймає рішення, і меншою мірою, виходячи із спектру завдань, які необхідно вирішувати аварійно-рятувальному підрозділу. Відсутність системно-аналітичного підходу до вибору та комплектування техніки призводить до того, що не враховуються особливості території, на якій функціонує аварійно-рятувальний підрозділ, залишаються поза увагою результати частотного аналізу виникнення нештатних ситуацій та помилок особового складу через відсутність або поломки обладнання.

Комплектування аварійно-рятувальної техніки визначається такими аспектами:

- обсягами фінансів, які можуть бути витраченими на придбання техніки;
- прогнозованими значеннями можливих обсягів негативних наслідків аварій та катастроф;
- кількості населення, техногенної навантаженості території, що визначається підприємствами – потенційними осередками загроз;
- соціальним зрізом населення, що проживає на цій території.

Перед особою, яка приймає рішення, постають задачі визначення вищезазначених параметрів. Оскільки такі величини мають об'єктивно- та суб'єктивно

невизначений характер, то раціональним є використання методів теорії ймовірностей та теорії нечітких множин. Прийняття рішень базується на гіпотезі про найбільш можливий варіант розвитку катастроф або аварій: із мінімально можливими, середніми або максимально можливими негативними наслідками. У залежності від цього і визначається варіант комплектування аварійно-рятувальної техніки, який, очевидно, залежить від масштабів прогнозованої аварії.

Завдання комплектування АРТ має особливості, до яких відносяться багатокритеріальність, різномірність значень критеріальних функцій, слабкоструктурованість.

Одним із методів, який дозволяє звести задачу багатокритеріальної оптимізації до однокритеріальної та найчастіше зустрічається на практиці, є адитивна згортка. Оскільки складові критеріальні функції можуть бути складними поліекстремальними та негладкими залежностями, то раціональним є підхід, згідно з яким оптимізація таких функцій здійснюється з використанням еволюційних алгоритмів. З іншої сторони, крім об'єктивних критеріїв оцінювання комплектів АРТ, є і суб'єктивні критерії, адекватне застосування яких базується на використанні методів теорії нечітких множин, побудові функцій належності тощо. В [1] таким чином були визначені пріоритети критеріальних функцій та оптимальність того чи іншого варіанта комплектування АРТ, що дозволило зробити обґрунтований вибір.

Розглянемо аспекти формування інтегрального критерію (цільової функції), виходячи з відомих методів розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації [42].

Зауважимо, що функції (2.5) можуть як задаватись таблично, так і мати вигляд аналітичних залежностей.

1. Метод головного критерію. Припустимо, що головним критерієм є вартість елемента АРТ. Тоді задача (2.5)-(2.7) перетворюється до такого виду:

$$F_4(x) \rightarrow \min, x = (x_{i_1}^1, x_{i_2}^2, \dots, x_{i_m}^m), x_{i_j}^m \in C_j, \quad (2.42)$$

$$x \in D, D = \{x / F_{i_{\min}} < F_i(x), i = \overline{1,3}\} \quad (2.43)$$

і виконано (2.7). У задачі (2.42)-(2.43) $F_{j_{\min}}, i = \overline{1,3}$, – мінімально можливе значення i -го критерію. Таким чином, отримуємо задачу однокритеріальної оптимізації. Її розв'язання у випадку, коли відомі значення F_1, F_2, F_3, F_4 для всіх елементів, зводиться до пошуку

$$x_1^* = \min_{x \in D} F_4(x), \quad (2.44)$$

де D – область, в якій виконуються обмеження (2.6) і (2.7). Якщо $x_1^* \in D$, то розв'язок знайдено, якщо ні – здійснюємо пошук

$$x_2^* = \min_{\substack{x \in D \\ x \neq x_1^*}} F_4(x) \text{ і т.д.} \quad (2.45)$$

Якщо $\exists x_i^* : x_i^* = \min_{x \in D} F_4(x), x_i^* \in D$, то задача має розв'язок, у противному випадку – розв'язку немає.

2. Метод лінійної згортки. Необхідними умовами реалізації методу є:

- нормалізація значень критеріальних функцій;
- визначення вагових коефіцієнтів критеріїв.

Тоді інтегральний критерій буде таким:

$$F(x) = \alpha_1 F_1(x) + \alpha_2 F_2(x) + \alpha_3 F_3(x) - \alpha_4 F_4(x) \rightarrow \max, \quad (2.46)$$

де $\alpha_i > 0, i = \overline{1,4}, \sum_{i=1}^4 \alpha_i = 1$. Якщо відомі значення критеріальних функцій і інтегрального критерію на множині контрольних точок (елементах АРТ), то коефіцієнти $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ можуть бути розраховані, наприклад, за методом найменших квадратів. Однак, це не завжди можливо, тим більш, що швидше за все в масиві початкових даних матиме місце мультиколінеарність факторів і результат буде зміщеним. В інших випадках необхідно використовувати техніки обробки експертних оцінок.

3. Метод ідеальної точки. Ідеальною називається така точка $(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)$, що $x_i^* = \max_{x \in D} F_i(x), i = \overline{1,4}$. Розв'язавши задачу однокритеріальної оптимізації, ідеальна точка буде знайдена. Тоді подальше розв'язання полягає в пошуку точки

$$x^* = \mathit{Arg} \min_{x \in D} \left(\sum_{i=1}^4 (F_i(x) - x_i^*)^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.47)$$

Значення критеріальних функцій повинні бути нормовані і якщо критеріальні функції мають вагові коефіцієнти, то задачу (2.47) перепишемо у вигляді:

$$x^* = \mathit{Arg} \min_{x \in D} \left(\sum_{i=1}^4 \alpha_i (F_i(x) - x_i^*)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.48)$$

де $\alpha_i > 0, i = \overline{1,4}, \sum_{i=1}^4 \alpha_i = 1$.

Існують й інші методи розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації, такі як вибір за кількістю домінуючих критеріїв, метод послідовних

поступок, послідовного введення обмежень тощо, але всі вони вимагають залучення додаткової інформації, якої може і не бути. Тому для розв'язання нашої задачі ми зупинилися на вищенаведених трьох методах.

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} – j -й елемент техніки, призначений для виконання i -ї функції. Звичайно, такий розв'язок має місце за умови, що $R \in \Omega$, де Ω – 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

$$\max_{r^* \in \Omega} (\max_{r^* \in S} E(r^*)) - \min_{\substack{i_j \in \{1, n\}, i_j \neq i_k \\ r^* \in S, r^* \notin \Omega}} \{E(f_{i_1}), E(f_{i_1} \cup f_{i_2}), E(f_{i_1} \cup f_{i_2} \cup \dots \cup f_{i_{n-1}})\}, \quad (2.49)$$

де $E(r^*)$ – критерій ефективності комплексу техніки r^* , $E(f)$ – показник ефективності виконання комплектом техніки функції f . Задача (2.49) є оптимізаційною задачею з використанням штрафної функції і полягає у знаходженні такого неповного комплексу, який задовольняє обмеження і має найменші втрати ефективності через невиконання певних функцій.

Задача має модифіковані постановки, оскільки існує варіант вибору такого комплексу, щоб він виконував максимальну кількість функцій і є варіант вибору комплексу з максимальною загальною ефективністю без урахування кількості виконуваних функцій. Очевидно, що формування цільових функцій у цих випадках матиме певні відмінності.

Розв'язання задачі (2.49) має певні особливості. Оскільки цільова функція має поліекстремальний характер, є негладкою, то для пошуку її оптимуму доцільно використати еволюційне моделювання. Нетривіальним є також зведення задачі оптимізації показників ефективності до загальної однокритеріальної задачі оптимізації інтегрального критерію ефективності комплексу техніки.

7. Препроцесінг даних та основні напрямки оптимізації цільової функції

Оскільки розв'язок задачі може бути отриманий тільки методом повного перебору, а кількість можливих варіантів комплектування достатньо велика, то необхідно вилучити можливі варіанти розв'язку задачі, які строго домінуються хоча б одним із інших варіантів [85]. Зауважимо, що така операція може бути виконана на початку реалізації пошуку розв'язку задачі, якщо потужність множини варіантів порівняно невелика. Якщо це не так, то перевірка на домінування здійснюється у процесі розв'язання задачі для кожного елемента окремо.

На першому кроці необхідно здійснити попередню перевірку, чи не існує такого елемента АРТ, що

$$(a_q > \max\{a, b, c\}) \vee (b_q > \max\{a, b, c\}) \vee (c_q > \max\{a, b, c\}) \quad (3.1)$$

та чи не існує такого набору елементів АРТ, що

$$\left(\sum_{q=1}^3 a_q > \max\{a, b, c\}\right) \vee \left(\sum_{q=1}^3 b_q > \max\{a, b, c\}\right) \vee \left(\sum_{q=1}^3 c_q > \max\{a, b, c\}\right). \quad (3.2)$$

Якщо елементи або набори елементів, що задовольняють (3.1) або (3.2), відповідно, існують, то їх необхідно вилучити а ргіогі, або в процесі розв'язання задачі. Аналогічно, використовуючи схему послідовного аналізу варіантів, видаляємо варіанти, загальна функціональність або потужність яких менше мінімально можливої, а також ті, вартість яких перевищує допустиму величину.

Оскільки необхідно знайти оптимум функції, заданої таблично, при зазначених обмеженнях і про властивості

якої нічого не відомо, то нам представляється раціональним застосування еволюційного моделювання [2, 34, 41, 51, 52]. Вибір методу еволюційного моделювання є прерогативою дослідника.

Припустимо, що ми використовуємо генетичний алгоритм [32]. Відомо, що його реалізацію супроводжують дві проблеми: формування цільової функції та представлення потенційних розв'язків у вигляді бінарних хромосом. У нашій задачі цільова функція вже отримана. Для формування хромосом – розв'язків запропонуємо такий підхід. Оскільки розв'язок є набором з m елементів, то і довжина хромосоми буде m . Кожна її позиція відповідає одному елементу АРТ. Всі елементи хромосоми належать одному класу.

Кожен елемент має 5 фрагментів. Перший відповідає значенню функціональності, другий – потужності, а третій – вартості, четвертий – ціні, п'ятий – актуальності елемента обладнання. Таким чином, хромосома – розв'язок матиме $5m$ фрагментів. На початковому етапі всі значення характеристик елементів були нормовані, їх значення знаходяться на відрізку $[0,1]$. Далі застосовуються всі відомі процедури генетичного алгоритму. Зауважимо, що отриманий розв'язок може не відповідати ні одному потенційному варіанту. Тоді необхідно знайти найближчий до нього розв'язок за критерієм мінімуму середньоквадратичної відстані. Застосування генетичного алгоритму є переважним у тому випадку, коли відомі значення часткових критеріальних функцій. Для розв'язання задачі також раціональним є застосування еволюційних стратегій [13].

8. Метод розв'язання задачі комплектування АРТ при нечітких експертних перевагах

У подальшому викладі будемо використовувати школу порівнянь, запропоновану проф. Т. Сааті [42]. Так, значення елементів матриці попарних порівнянь сутностей А і В будуть такими:

- 1, якщо сутність А і сутність В має рівну важливість;
- 3, якщо сутність А помірно перевершує сутність В;
- 5, якщо сутність А має істотну перевагу над сутністю В;
- 7, якщо сутність А значно перевершує сутність В;
- 9, якщо сутність А має дуже сильну перевагу над сутністю В;

2,4,6,8 – відповідають проміжним твердженнями про важливість.

Якщо при порівнянні А і В маємо одне з вищевказаних чисел, то при порівнянні В з А отримаємо обернену величину.

Визначимо пріоритети критеріальних функцій. Для цього виберемо m експертів, які, використовуючи шкалу, запропоновану Т. Сааті [42], здійснюють їх порівняння. Отримаємо матриці

$$G_i = \begin{pmatrix} 1 & g_{12}^i & g_{13}^i & g_{14}^i \\ 1/g_{12}^i & 1 & g_{23}^i & g_{24}^i \\ 1/g_{13}^i & 1/g_{23}^i & 1 & g_{34}^i \\ 1/g_{14}^i & 1/g_{24}^i & 1/g_{34}^i & 1 \end{pmatrix}, i = \overline{1, m}. \quad (3.3)$$

Припустимо, що компетентність w_i кожного з експертів відома (якщо це не так, то компетентність

можна визначити, використовуючи метод, запропонований в [6]) і $\sum_{i=1}^m w_i = 1$.

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 δ_i відповідає кращій узгодженості порівнянь експерта. Якщо δ_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. Маючи матрицю G , визначимо пріоритети критеріальних функцій [5] за формулою

$$p_i = \frac{(\prod_{j=1}^4 g_{ij})^{\frac{1}{4}}}{\sum_{i=1}^4 (\prod_{j=1}^4 g_{ij})^{\frac{1}{4}}}, i = \overline{1, 4}. \quad (3.4)$$

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

На наступному кроці необхідно оцінити варіанти комплектування АРТ по кожному з критеріїв $F_i, i = \overline{1, 4}$. Припустимо, що після проведення попереднього аналізу

та перевірки виконання обмежень залишилося p можливих варіантів. Аналогічно попередньому кроку необхідно отримати чотири матриці 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 $Q_i, i = \overline{1,4}$ [7,8]. Для цього необхідно визначити лише значення попарних порівнянь для одного варіанта комплектування АРТ, наприклад, для першого. Всі інші елементи матриць розраховуються за формулою: $q_{kl} = \frac{q_{1l}}{q_{1k}}, k, l = \overline{1, p}$. Отримаємо такі матриці:

$$Q_i = \begin{pmatrix} 1 & q_{12}^i & q_{13}^i & \dots & q_{1p}^i \\ 1/q_{12}^i & 1 & q_{13}^i/q_{12}^i & \dots & q_{1p}^i/q_{12}^i \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/q_{1p}^i & q_{12}^i/q_{1p}^i & q_{13}^i/q_{1p}^i & \dots & 1 \end{pmatrix}, i = \overline{1,4}. \quad (3.5)$$

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):

$$\mu(K_j) = \frac{1}{wk_{1j} + wk_{2j} + \dots + wk_{pj}}, j = \overline{1, p}, \quad (3.6)$$

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

$$\tilde{F}_i = \left\{ \frac{\mu_{\tilde{F}_i}(K_1)}{K_1}; \frac{\mu_{\tilde{F}_i}(K_2)}{K_2}; \dots; \frac{\mu_{\tilde{F}_i}(K_p)}{K_p} \right\}, \quad (3.7)$$

або

$$\tilde{F}_i = \left\{ \frac{1 / (1 + \sum_{j=1}^p \frac{1}{q_{1j}^i})}{K_1}; \frac{1 / (1 + q_{12}^i + \sum_{j=3}^p \frac{q_{12}^i}{q_{1j}^i})}{K_2}; \dots; \frac{1 / (1 + q_{1p}^i + \sum_{j=2}^{p-1} \frac{q_{1p}^i}{q_{1j}^i})}{K_p} \right\}, i = \overline{1,4}. \quad (3.8)$$

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 :

$$\tilde{F} = \tilde{F}_1 \cap \tilde{F}_2 \cap \tilde{F}_3 \cap \tilde{F}_4 = \left\{ \frac{\min_{i=1,4} \mu_{\tilde{F}_i}(K_1)}{K_1}; \frac{\min_{i=1,4} \mu_{\tilde{F}_i}(K_2)}{K_2}; \dots; \frac{\min_{i=1,4} \mu_{\tilde{F}_i}(K_p)}{K_p} \right\}. \quad (3.9)$$

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

$$\arg \max_{j=1,p} \min_{i=1,4} \mu_{\tilde{F}_i}(K_j). \quad (3.10)$$

Якщо враховувати важливість критеріальних функцій, то підхід до визначення оптимального варіанту комплектування залишається незмінним, а вираз (3.7) переписеться таким чином:

$$\bar{F}_i = \left\{ \frac{(1/(1 + \sum_{j=1}^p \frac{1}{q_{1j}^i}))^{p_i}}{K_1}; \frac{(1/(1 + q_{12}^i + \sum_{j=3}^p \frac{q_{12}^i}{q_{1j}^i}))^{p_i}}{K_2}; \dots; \frac{(1/(1 + q_{1p}^i + \sum_{j=2}^{p-1} \frac{q_{1p}^i}{q_{1j}^i}))^{p_i}}{K_p} \right\}, i = \overline{1,4}. \quad (3.11)$$

Рішення задачі (3.10) 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» [47, 48]. 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, яка 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 [42].

Сучасні технології оптимізації складних поліекстремальних залежностей відрзняються своєю різноаспектністю та суб'єктивністю. Незважаючи на всю різноманітність моделей та методів оптимізації, вчені не зупиняються у пошуку нового найкращого найуніверсальнішого методу оптимізації [45, 46]. В основі таких моделей та методів лежать парадигматичні основи та ідеї, які інспіровані живою природою [43] і подібно тому, як у природі відбуваються адаптивні процеси, науковці прагнуть наслідувати їх кроки та розв'язувати практичні задачі оптимізації [68].

9. Еволюційний метод визначення оптимального варіанту комплектування АРТ на основі використання елементів генетичного алгоритму

Задача вибору оптимального або прийняттого варіанту комплектування АРТ має комбінаторний характер. Для її розв'язання використовуємо ідеї та елементи генетичного алгоритму [77, 83, 90, 102, 119]. Основним його елементом є хромосома – потенційний розв'язок задачі. Як було зазначено раніше [37, 98], хромосома буде складатися з m фрагментів, кожен з яких буде розділений на чотири ділянки. Припустимо, що все обладнання АРТ має унікальні габаритні розміри і виходячи з розмірів, можливе здійснення його ідентифікації. Тоді кожен з m фрагментів відповідає обладнанню певного класу, а його складові – довжині, ширині і висоті відповідного прямокутного паралелепіпеда. Довжину хромосоми-розв'язку визначимо таким чином. Відомо, що $|X| = n$, а $|C_j| = n_j$, $j = \overline{1, m}$. Тоді для кодування елемента АРТ класу C_j необхідно $l_j = \lceil \log_2 n_j \rceil + 1$ позицій. Тоді довжина хромосоми-розв'язку $L = \sum_{j=1}^m l_j = \sum_{j=1}^m \lceil \log_2 n_j \rceil + m$. Оскільки деякі бінарні представлення не матимуть реальних аналогів, то виникає інформаційна надлишковість і, як наслідок, необхідність реалізації відповідної перевірки. Очевидно, що як допоміжні операції необхідно передбачити перетворення

$$Z \rightarrow B, B \rightarrow Z \rightarrow \{a_i, b_i, c_i\}, \quad (3.12)$$

де Z – множина цілих чисел, B – множина бінарних представлень, a_i, b_i, c_i – габаритні розміри обладнання.

Хромосоми-розв'язки будуть такими:

12	3	-----	14
----	---	-------	----

, або

01100	0011	-----	01110
-------	------	-------	-------

Метод розв'язання задачі КАРТ, що базується на використанні генетичного алгоритму, має такі кроки:

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

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

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

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

Крок 4. Для кожного потенційного розв'язку-комплекту АРТ $K_j, j = \overline{1, H}$ 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 поміняти 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 рішення 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 сформувані проміжну вибірку. Серед елементів початкової вибірки і проміжної вибірки визначити кращі H розв'язків, виходячи з значень цільової функції, і сформувані з них вибірку наступного покоління.

Крок 8. Якщо не виконано критерій зупинки, то перейти на крок 4, інакше – кінець 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 комплексу АРТ.

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

$$F^* = F_j - \eta / V_j, \quad (3.13)$$

де η – коефіцієнт, який вказує на вагу функції штрафу у порівнянні з ефективністю комплексу АРТ.

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

Зауваження 4. Реалізація рекомбінації різними способами має свої особливості. Якщо більшість варіантів КАРТ, 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 КАРТ 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

$$\max_{p,q \in \{i,j\}} |F(K_p) - F(K_q^*)| < \delta, \quad (3.14)$$

де δ – 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.

Наведений розв'язок задачі (2.5)-(2.7) є лише одним із можливих, для його одержання використано принцип домінування та генетичний алгоритм. Адекватність

розв'язку впливає із поліекстремального характеру цільової функції та табличного характеру вихідних даних. 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 [117].

10. Еволюційний метод визначення оптимального варіанту комплектування аварійно-рятувальної техніки на основі використання елементів еволюційної стратегії

Еволюційна стратегія є відомим методом глобальної оптимізації [64, 72]. Використаємо її ідеї та основні елементи для пошуку оптимального варіанту комплектування АРТ. Відповідний метод на макрорівні має такі кроки.

Крок 1. Формування ініціальної популяції можливих розв'язків задачі комплектування АРТ.

Крок 2. Ініціалізація значень параметрів алгоритму, середньоквадратичних відхилень та встановлення обмежень.

Крок 3. Обчислення значень цільової функції та генерування потенційних розв'язків-нащадків.

Крок 4. Обчислення значень цільової функції для розв'язків-нащадків та упорядкування розв'язків-батьків і розв'язків-нащадків, вибір серед них найкращих та формування батьківської популяції потенційних розв'язків наступного покоління.

Крок 5. Перевірка критерію зупинки.

Розглянемо кожен із кроків детально. Для формування ініціальної популяції потенційних розв'язків задачі комплектування АРТ необхідно з'ясувати, скільки елементів обладнання міститься у кожному класі. Припустимо, що кількість класів є m . Тоді j -й клас обладнання містить m_j елементів обладнання (варіантів), $j=1, m, m_j \in N$. Потенційний розв'язок матиме таку структуру:

$$X_j = \{random(1..m_1), random(1..m_2), \dots, random(1..m_m)\}, j = \overline{1, 20}. \quad (3.15)$$

Вище зроблено припущення, що множина потенційних розв'язків P_0 має потужність 20, тобто $|P_0|=20$. Зауважимо, що кожен компонент вектора X_j є натуральним числом. Зауважимо, що без обмеження загальності, що експерт вважає два можливих елементи i -й та $(i+1)$ -й із одного класу обладнання емпірично ближчими ніж, наприклад, i -й та $(i+2)$ -й.

На другому кроці алгоритму потрібно знайти номер середнього можливого елемента обладнання кожного класу. Одержимо вектор середніх

$$\overline{X}_j = \left(\left[\frac{1+2+\dots+m_1}{m_1} \right], \left[\frac{1+2+\dots+m_2}{m_2} \right], \left[\frac{1+2+\dots+m_m}{m_m} \right] \right). \quad (3.16)$$

Позначимо $[x]$ – цілу частину числа x , тобто найбільше ціле число, яке не перевищує x . Далі знаходимо середньоквадратичне відхилення для кожного елемента вектора X_j (позначимо $\overline{X}_{ji} = \frac{1+2+\dots+m_i}{m_i}$ – i -й елемент вектора \overline{X}_j).

$$\sigma_j = \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m_1} (i - \overline{X}_{j1})^2}{m_1}}, \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m_2} (i - \overline{X}_{j2})^2}{m_2}}, \dots, \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m_m} (i - \overline{X}_{jm})^2}{m_m}} \right), \quad j = \overline{1,20}. \quad (3.17)$$

На третьому кроці знаходимо значення цільової функції $F_j = F(X_j) \forall j = \overline{1,20}$. Далі, згідно з класичним генетичним алгоритмом потрібно генерувати розв'язки-нащадки, забезпечивши виконання правила 1:7, тобто в одного батьківського розв'язку має бути не менше 7 розв'язків-нащадків. У нашому методі припустимо, що

кількість розв'язків-нащадків одного батьківського розв'язку дорівнює 7.

Розглянемо два способи генерування розв'язків-нащадків потенційного розв'язку X_j . У першому варіанті розіграємо рівномірно розподілене число з множини $\{1, 2, \dots, m\}$. Нехай це число q . Тоді у розв'язка-нащадка всі компоненти крім q -ї, залишаться без змін. На місці q -ї компоненти буде розміщено розігране натуральне число із відрізка $[\overline{X_{jq}} - 3\sigma_{jq}; \overline{X_{jq}} + 3\sigma_{jq}]$. Такі дії повторюються сім разів і батьківський розв'язок X_j породжує множину розв'язків-нащадків $X_j \rightarrow (X_j^1, X_j^2, \dots, X_j^7)$. Такі операції повторюються для кожного з 20-ти потенційних батьківських розв'язків. Батьківські потенційні розв'язки і потенційні розв'язки-нащадки записуються у проміжну популяцію R .

У другому варіанті модифікації будуть піддаватись усі компоненти батьківського розв'язку. Це означає, що для батьківського розв'язку X_j для кожної його компоненти будуть розіграні рівномірно розподілені числа з відрізків $[\overline{X_{jq}} - 3\sigma_{jq}; \overline{X_{jq}} + 3\sigma_{jq}]$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, 20}$ і цими числами буде виконана заміна відповідних компонент батьківського розв'язку. Такі операції будуть виконані для кожного з семи розв'язків-нащадків 20-ти батьківських розв'язків. Батьківські потенційні розв'язки і потенційні розв'язки-нащадки заносяться у проміжну популяцію R .

На четвертому кроці знаходимо значення цільової функції для потенційних розв'язків-нащадків

$$F_{ij} = F(X_j^i), i = \overline{1, 7}, j = \overline{1, 20}. \quad (3.18)$$

Впорядковуємо батьківські розв'язки та розв'язки-нащадки за спаданням значень цільової функції.

Вибираємо із них 20 кращих та формуємо популяцію наступної епохи P_1 .

Далі потрібно перевірити, чи виконується умова зупинки. Такою умовою може бути досягнення певної кількості ітерацій чи відсутність помітної динаміки у значеннях цільової функції на сусідніх епохах (мінімальних, середніх чи максимальних). Якщо умова зупинки не виконується, то необхідно перейти на крок 3, в іншому випадку – закінчення алгоритму.

Задача КАРТ є слабо структурованою і важкоформалізованою, а в умовах фінансового та ресурсного дефіциту – безумовно актуальною. Наведені формалізація та розв'язання задачі є лише одними з можливих. Їх адекватність впливає з поліекстремального характеру цільової функції і табличного характеру вихідних даних. Відомо, що використання класичних методів, які базуються на інтегро-диференціальному численні є проблематичним, а то і неможливим. Тому еволюційні технології, в основі яких лежить випадковий, але спрямований пошук, є чи не єдиним способом розв'язати поставлену задачу. Зауважимо, що в задачі КАРТ значну увагу приділено побудові цільової функції і запропонована структура, яка є відкритою до внесення змін і доповнень. У перспективі необхідно розв'язати задачу візуального моделювання процесу пакування АРТ, оскільки отримані результати вказують тільки на можливість існування оптимального варіанту комплектування АРТ, але не дають відповідь на питання про те, яким чином можна здійснити його упаковку в контейнер.

Застосування методів еволюційного моделювання дозволило розв'язати багато практичних задач, які не можна було розв'язати іншими методами. У той же час конструктивна реалізація генетичного алгоритму та й

інших еволюційних методів нашою метою є проблема визначення компромісу між цільовими функціями і обмеженнями [14]. Запропонований метод дозволяє уникнути зазначених вище проблем, шляхом введення та застосування принципу домінування та основних елементів генетичного алгоритму [86].

Результати проведених експериментів свідчать про значну перевагу розробленого методу в порівнянні з відомими методами головного критерію, ідеальної точки та інших, результати яких носять в порівнянні з розробленим методом, швидше попередній характер.

11. Метод побудови критерію актуальності аварійно-рятувального обладнання

Відомо, що можливі небезпеки (R) для регіонів класифікують таким чином [87, 94]:

- небезпеки соціального характеру (R_1);
- небезпеки техногенного характеру (R_2);
- пожежі (R_3);
- небезпеки природного характеру (R_4);
- інші небезпеки (R_5).

Кожен клас небезпек, у свою чергу, ділиться на ситуації, аварії чи катастрофи. Тому, кожну надзвичайну ситуацію будемо позначати R_{ij} , де i – клас ситуації, $i = \overline{1,5}$, j – номер ситуації в класі, $j = \overline{1, J_i}$.

Припустимо, що всього може бути одержано N комплектів обладнання. Кожен комплект K_i обладнання має однакову кількість елементів (ЕО), $i = \overline{1, M}$, причому кожен елемент належить до певного класу АРО. Позначимо класи АРО $C_j, j = \overline{1, M}$ і вважатимемо, що $\forall i, j \ i \neq j: C_i \cap C_j = \emptyset$. Такі припущення носять спрощуючий характер, але не обмежують загальності, оскільки їх можна послабити.

Розглянемо першу задачу. Припустимо, що в кожному комплекті обладнання є M ЕО, потужність класів відома і становить $|C_j| = m_j, \forall j \in \{1, 2, \dots, M\}$. Тоді загальна кількість комплектів становитиме

$$L = \prod_{j=1}^M m_j.$$

Як правило, число L є великим і здійснити вибір оптимального комплекту за багатьма критеріями – процедура надто трудомістка. Тому, необхідно скоротити їх кількість, застосовуючи кроки, аналогічні крокам

методу послідовного аналізу варіантів [59, 110]. На першому кроці вилучимо ті комплекти, в яких хоча б один елемент має хоча б один габарит, який є більшим найбільшого габариту контейнера, тобто, якщо

$$\exists e_j : \max\{a_j, b_j, c_j\} > \max\{a, b, c\}, \quad (3.19)$$

то комплект вилучаємо з розгляду. У виразі (3.19) e_j – j -й ЕО в комплекті, a_j, b_j, c_j – його ширина, висота і глибина, a, b, c – ширина, висота і глибина контейнера, відповідно. На другому кроці вилучаємо ті комплекти, сумарні найменші габарити яких є більшими найбільшого габариту контейнера, тобто, якщо

$$\sum_{j=1}^M \min\{a_j, b_j, c_j\} > \max\{a, b, c\}. \quad (3.20)$$

І третя умова: якщо існує такий комплект обладнання E_j , що

$$F_1^j > F_{1max})V(F_2^j < F_{2max})V(F_3^j < F_{3max})VV(F_4^j < F_{4max})V(F_5^j < F_{5max}),$$

де F_{1max} – максимально можливе значення ціни, F_{imin} – мінімально можливі значення інших критеріїв (надійність, потужність, функціональність, невраховані фактори), $j = \overline{1, L}$, $i = \overline{2, 5}$, то комплект теж вилучаємо. У результаті виконання таких дій кількість можливих комплектів значно скоротиться.

Впорядкуємо елементи кожного класу всередині класу. Припустимо, що клас C_j має m_j елементів, елемент класу позначимо $E_{jk}, k = \overline{1, m_j}, j = \overline{1, M}$. Експертним шляхом, використовуючи метод аналізу ієрархій [31, 116], визначимо пріоритети w_i критеріїв $F_i, i = \overline{1, 5}$. Далі розрахуємо пріоритети v_{jki} кожного

елемента класу e_{jk} за кожним із критеріїв $F_i, i = \overline{1,5}$. Зауважимо, що значення пріоритетів потрібно нормувати, тоді одержимо, що $\sum_{i=1}^5 w_{ji} = 1$ і $\forall i \in \{1,2, \dots, 5\}$ $\sum_{k=1}^{m_i} v_{jki} = 1, j = \overline{1, m}$. Загальні значення пріоритетів елементів e_{jk} класу C_j знаходимо так:

$$\gamma_k = \sum_{i=1}^5 w_{ji} \cdot v_{jki}, k = \overline{1, m_j}. \quad (3.21)$$

Після нормування $\gamma'_k \in (0,1)$ і $\sum_{k=1}^{m_j} \gamma'_k = 1$. Знаючи пріоритети ЕО кожного класу, їх можна впорядкувати за спаданням пріоритетів. Якщо наведену вище процедуру виконував один експерт, то комплект обладнання, який складається з перших елементів у своїх впорядкованих класах, буде шуканим. Якщо з певних причин він виявиться неприйнятним, то необхідно вилучити найгірший елемент з найкращих та замінити його на наступний за рангом у цьому класі. У випадку негативних результатів цю процедуру необхідно повторити.

Якщо в оцінюванні та впорядкуванні альтернатив бере участь декілька експертів, то побудовані ними індивідуальні порядки на множині ЕО та значення пріоритетів будуть відрізнятись. Одним із варіантів розв'язання задачі є апріорне визначення компетентності експертів. У залежності від рівня знань особи, яка приймає рішення (ОПР), та інформації про самих експертів, розрізняють процедури встановлення компетентності експертів в детермінованих умовах та умовах невизначеності на основі аксіоми незміщеності [124]. При кількості експертів l , їх компетентностях $\mu_i \in (0,1), i = \overline{1, l}, \sum_{i=1}^l \mu_i = 1$, визначених індивідуальних пріоритетах ЕО $\gamma'_{ki} \in (0,1), \sum_{k=1}^{m_j} \gamma'_{ki} = 1 \forall i \in \{1,2, \dots, l\}$ колективні пріоритети ЕО розраховуємо так:

$$Y_k^{rs} = \frac{\sum_{i=1}^l \mu_i \cdot Y_{ki}^r}{\sum_{k=1}^{m_j} \sum_{i=1}^l \mu_i \cdot Y_{ki}^r}, \quad (3.22)$$

Можливий також варіант, коли експерт не може кількісно оцінити або пріоритети критеріїв, або пріоритети ЕО за кожним критерієм, але може впорядкувати ЕО. Тоді, якщо експерт один, задача зводиться до попередньої – достатньо взяти кращі елементи в класах. Якщо ж експертів багато і їх індивідуальні порядки розрізняються, то можна застосувати алгоритм визначення медіани Кука-Сейфорда для метрики неспівпадання рангів [66, 100], та у випадку рівної компетентності експертів одержати колективний порядок. Якщо є експерти різнокомпетентні, то необхідним є застосування додаткових евристичних процедур.

Здійснимо об'єктивізацію процесів прийняття рішень експертами щодо пріоритетності комплектів АРТ. Припустимо, що є відомими дані про надзвичайні ситуації (НС) за таким форматом:

< ID, D, CN, TN, TE, PG, RG, MZ, RZ, NC, RGN, RZN >,

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 [44, 101, 112, 122]. Таким чином, кількість врятованих визначається такою залежністю:

$$PG - RG = f(EO_1, EO_2, \dots, EO_N), \quad (3.23)$$

де **N** – кількість наявних ЕО. Для кожної надзвичайної ситуації можна побудувати таблицю, що містить об'єктивно-суб'єктивні дані та має таку структуру (табл. 3.1).

За даними табл. 3.1 (**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 3.1. 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:

η_{11} – загальна кількість НС, у яких EO_1 застосовувався, оскільки це було потрібним;

η_{21} – загальна кількість НС, у яких EO_1 не застосовувався, оскільки не було необхідності, але він був у комплекті;

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

η_{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.

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

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

Тоді

$$\begin{aligned} \eta_{1l} &= \sum_{i=1}^K \chi\{a_{il} \neq 0 \& a_{il} \neq -1\}; \\ \eta_{2l} &= \sum_{i=1}^K \chi\{a_{il} = 0\}; \\ \eta_{3l} &= \sum_{i=1}^K \chi\{a_{il} = -1 \& b_{ij} \neq 0\}; \\ \eta_{4l} &= \sum_{i=1}^K \chi\{b_{ij} = 0 \& a_{il} = -1\}, l = \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (3.24)$$

Визначимо коефіцієнт актуальності EO_l :

$$\lambda_l = \frac{\alpha}{N} (\eta_{1l} + \eta_{3l}) - \frac{\beta}{N} (\eta_{2l} + \eta_{4l}), l = \overline{1, N}. \quad (3.25)$$

Зауважимо, що

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

Значення λ_{il} може бути і від'ємним, що вказує на неактуальність обладнання. Другий доданок у виразі (3.25) визначає функцію штрафу для EO_l і опосередковано вказує на жертви (збитки) від того, що замість EO_l в комплекті обладнання міг бути інший EO_l , потрібний для ліквідації наслідків даної НС. Встановлення значення коефіцієнтів α і β можливе експертним шляхом із урахуванням даних табл. 1.

Позначимо

$$\begin{aligned} Q &= \sum_{j=1}^N a_{ij} \chi\{a_{ij} \neq -1\}, \\ W &= \sum_{j=1}^N b_{ij} \chi\{b_{ij} \neq a_{ij} \& b_{ij} > 0\}. \end{aligned}$$

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 відрізку $[0,1]$. 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.

ВИСНОВОК

У монографії 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.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Achtert E. On exploring complex relationships of correlation clusters / E. Achtert, C. Bohm, H.P. Kriegel, P. Kröger, A. Zimek // In proc. 19th international conference on Scientific and Statistical Database Management. – 2007. – P.7.
2. Back T. Evolutionary computation. / T. Back, D.B. Fogel, Z. Michalewicz. – IOP Publishing, Bristol and Philadelphia, 2000. – Vol. 1: Basic algorithms and operators. – 339 p.
3. Bansod N.A. Soft Computing – A Fuzzy Logic Approach. In Bharati Vidyapeeth College of Engineering (ed.) / N. A. Bansod, M. Kulkarni, S.H. Patil // Soft Computing, Allied Publishers. – 2005. – P. 73.
4. Blum C. Metaheuristics in combinatorial optimization: overview and conceptual comparison / C. Blum, A. Roli // ACM Computing Surveys.– 2003. – Vol. 35, No. 3. – P. 268-308.
5. Dakin R.J. A tree-search algorithm for mixed integer programming prob-blems / R.J. Dakin // The Computer Journal. – 1965. – Vol. 8. – P. 250-255.
6. Dorigo M. Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents / M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Colorni // IEEE Trans. Syst., Man. and Cybern. – 1996. – Vol. 26, № 2. – P. 29-41.
7. Echegoyen C. On the Taxonomy of Optimization Problems Under Estimation of Distribution Algorithms / C. Echegoyen, A. Mendiburu, R. Santana, J. A. Lozano // Evolutionary Computation. – 2012. – Vol. 21 (3). – Pp. 471–495.
8. Eddy S.R. What is dynamic programming? / S.R. Eddy // – Nature Biotechnology. – 2004. – Vol. 22. – P. 909-910.
9. Everitt B. Cluster analysis / B. Everitt.– Chichester, West Sussex, U.K: Wiley, 2011.
10. Fuzzy Logic: A Framework for the New Millennium / V. Dimitrov, V. Korotkich ed. // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002. – 395 p.
11. Fuzzy Models and Algorithms for Pattern Recognition

- and Image Processing / J. C. Bezdek, J. Keller, R. Krishnapuram [et al]. – Springer Science+Business Media, Inc. – 2005. – 776 p.
12. Gallo G. Quadratic knapsack problems / G. Gallo, P.L.Hammer, B. Simeone // Mathematical Programming Studies. – 2009. – Vol. 12. – P. 132-149.
 13. Gerla G. Comments on some theories of fuzzy computation / G. Gerla // In-ternational Journal of General Systems. – 2016. – Vol. 45 (4). – Pp. 372–392.
 14. Harti R. E. A global convergence proof for class of genetic algorithms / R. E. Harti. – Wien: Technische Universitaet. – 1990. – 136 p.
 15. Hnatiienko H. Choice manipulation in multicriteria optimization problems / H. Hnatiienko // In Selected papers of the XIX international scientific and practical conference "Information Technologies and Security". – 2019. – Pp. 234–245.
 16. Holland J.H. Adaptation in natural and artificial systems. An introductory analysis with application to biology, control and artificial intelligence / J.H. Holland. – London: Bradford book edition, 1994. – 211 p.
 17. Kohonen T. Self-Organizing Maps / T. Kohonen. – Berlin–New York: Springer-Verlag, 2001.
 18. Kosiur D. Understanding policy-based networking, 2nd. ed. / D. Kosiur. – Wiley, New York, NY, 2001.
 19. Kriegel H.-P. Density-based Clustering / H.-P. Kriegel, P. Kröger, J. San-der, A. Zimek // WIREs Data Mining and Knowledge Discovery. – 2011. – Vol. 1 (3). – P. 231–240.
 20. Kryshstal V. System analysis of formation rescuing equipment sets / V. Kryshstal, V. Snytyuk // International Journal "Information Technologies and Knowledge". – 2016. – Vol. 10, Number 1. – P. 91-99.
 21. Levitin G. Computational Intelligence in Reliability Engineering. Studies in AI / G. Levitin. – Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. – 40. – 427 p.
 22. Liu H.-c. Fuzzy possibility c-mean clustering algorithms based on complete mahalanobis distances / H.-c Liu, J.-m Yih, D.-b Wu, and S.-w Liu // In 2008 int. conf. on Wavelet

- Analysis and Pattern Recognition, IEEE.- 2008/ - Pp. 50-55.
23. Lodi A. Recent advances on two-dimensional bin packing problems / A. Lodi, S. Martello, D. Vigo // Discrete Appl. Math. - 2002. - Vol. 123. - P. 379-396.
 24. Martello S. Knapsack problems / S. Martello, P. Toth. - Chichester, UK: John Wiley and Sons, 1990. - P. 221-245.
 25. Meilă M. Comparing clusterings by the variation of information. Learning theory and kernel machines. Lecture Notes in Computer Science / M. Mei-lă. - 2003. - Vol. 2777. - Pp. 173-187.
 26. Michalewicz Z. Genetic Algorithms+Data Structures=Evolution Programs / Z. Michalewicz. - Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York, 1996. - 387 p.
 27. Mirkes E.M. K-means and K-medoids applet / E. M. Mirkes. - University of Leicester, 2011.
 28. Pisinger D. Algorithms for Knapsack Problems / D. Pisinger. -Copenhagen, Denmark: University of Copenhagen. - 1995. - 199 p.
 29. Rechenberg I. Evolutionsstrategie "94" / I. Rechenberg. - Stuttgart-Bad Gannstatt: Frommann Halzboog. - 1994. - 434 p.
 30. Ribeiro C. Essays and surveys in metaheuristics / C. Ribeiro, P. Hansen (eds.). - Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001. - 651 p.
 31. Saaty T. Group Decision Making: Drawing out and Reconciling Differences / T. Saaty, K. Peniwati. - Pittsburgh, Pennsylvania: RWS Publications. - 2008. - 385 p.
 32. Sheikh R.~H. Genetic algorithm based clustering: A survey / R.~H Sheikh, M~Raghuwanshi, and A.~N Jaiswal // In proc. of 2008 first int. conf. on Emerging Trends in Engineering and Technology.- 2008.- Vol. 2(6). - Pp. 314-319.
 33. Silvano M. Knapsack problems / M. Silvano, P. Toth. - Chichester, UK: John Wiley and Sons, 1990. - 221 p.
 34. Simon D. Evolutionary optimization algorithms / D. Simon. - John Wiley & Sons, Inc., Hobohen, New Jersey, 2013.

35. Snytyuk V. Evolutionary technique of shorter route determination of fire brigade following to fire place with the optimized space of search / V. Snytyuk, O. Dghulay // Information Technologies and Knowledge. – 2007. – Vol. 1. – № 4. – P. 325-332.
36. Snytyuk V. Problem and mathematical models for rescue technics acquisiti-on / V. Snytyuk, P. Kucher // International Journal “Information Theories and Applications”. – 2014. – Vol. 21, Number 1. – P. 60-64.
37. Spears W.M. The Role of Mutation and Recombination in Evolutionary Algorithms. PhD Thesis / W.M. Spears. – George Mason University: Fairfax, Virginia. – 1998. – 240 p.
38. Sridharan R. The capacitated plant location problem / R. Sridharan // European J. Oper. Res. – 1995. – V. 87. – P. 203-213.
39. Takagi T. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control / T. Takagi, M. Sugeno // IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics. – 1985. – Vol. 15. – P. 116-132.
40. Thomas H.C. et al. Introduction to Algorithms / H.C. Thomas et al. – MIT Press, 2001. – 1292 p.
41. Ting C.-K. On the Mean Convergence Time of Multi-parent Genetic Algorithms Without Selection / C.-K. Ting // Advances in Artificial Life. – 2005. – Pp. 403-412.
42. Tsyganok V.V. Simulation of expert judgements for testing the methods of information processing in decision-making support systems/ V.V. Tsyganok, S.V. Kadenko, O.V. Andriichuk // Journal of Automation and Information Sciences. – 2011. – Vol. 43(12). – Pp. 21-32.
43. Valiant L. Probably Approximately Correct: Nature's Algorithms for Learning and Prospering in a Complex World / L. Valiant. – New York: Basic Books, 2013.
44. Weber R.O. Wildland Fire Spread Models. In “Forest Fires”, ed. E.A. Johnson and K. Miyanishi / R.O. Weber. – Academic Press, Feb, 2001. – P. 151-169.
45. Whitley D. Complexity theory and the no free lunch theorem / D. Whitley, J.P. Watson. E.K. Burke, G. Kendall (eds.) // Search Methodologies: Introductory Tutorials in

- Optimization and Decision Support Techniques. New York: Springer, 2005. – P. 1-24.
46. Wolpert D.H. No Free Lunch Theorems for Optimization / D.H. Wolpert, W.G. Macready // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 1997. – Vol. 1, 67.
 47. Zadeh L.A. et al. Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, Fuzzy Systems / L.A. Zadeh et al. – World Scientific Press, 1996.
 48. Zadeh L.A. Fuzzy logic, neural network and soft computing / L.A. Zadeh // Communications of the ACM. – 1994. – Vol. 37, № 3. – P. 77-84.
 49. Zagoruiko N.G. Applied methods for data analysis and knowledge / N.G. Zagoruiko. – Nowosibirsk, IM SB RAS, 1999.
 50. Zaki M. J. Data mining and analysis: fundamental concepts and algorithms / M. J. Zaki, W. Meira. – Cambridge University Press, New York, 2014.
 51. Zhang J. Clustering-Based Adaptive Crossover and Mutation Probabilities for Genetic Algorithms / J. Zhang, H. Chung, W.L. Lo // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 2007. – Vol. 11 (3). – Pp. 326-335.
 52. Батищев Д.И. Оптимизация многоэкстремальных функций с помощью генетических алгоритмов / Д. И. Батищев, С.А. Исаев // Мужвуз. сборник. – ВГТУ: Воронеж, 1997. – С. 4-17.
 53. Башмаков А.И. Интеллектуальные информационные технологии: Учеб. пособие. / А.И. Башмаков, И.А. Башмаков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 304 с.
 54. Бидюк П. И. Параллельные генетические алгоритмы / П.И. Бидюк, В.И. Литвиненко, А.А. Токарь // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2002. – № 4. – С. 7-16.
 55. Бойко Л.А. Системи з нечіткою логікою в задачах експертного оцінювання / Л.А. Бойко, Ю.П. Зайченко // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2007. – № 2. – С. 33-46.
 56. Букатова И.Л. Эволюционная информатика: Теория и практика эволюционного моделирования / И. Л. Букатова, Ю. И. Михасев, А.М. Шаров. – М.: Наука, 1991. – 205 с.

57. Витковски Т. Многоэтапные процессы принятия решений в управлении предприятием / Т. Витковски // Проблемы управления и информатики. – 1998. – № 3. – С. 124-138.
58. Волкович В.Л. Модели и методы оптимизации надежности сложных систем // В.Л. Волкович, А.Ф. Волошин и др. – К.: Наук. думка, 1993. – 312 с.
59. Волошин О.Ф. Послідовний аналіз варіантів: Технології та застосування: Монографія / О. Ф. Волошин, Г. М. Гнатієнко, В.І. Кудін // К.: Стилос, 2013. – 304 с.
60. Волошин О. Ф. Теория принятия решений / О. Ф. Волошин, С. О. Мащенко – К.: Киевский университет, 2006. – 304 с.
61. Воронин А. Синергетические методы комплексирования в задачах принятия решений / А. Воронин, Ю. Михеев // Proc. XII-th Int. Conf. "KDS-2006". – Varna, 2006. – P. 180-185.
62. Гайдышев И. Анализ и обработка данных: специальный справочник. – СПб.: Питер, 2001. – 752 с.
63. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности. / Вороновский Г. К., Махотило К. В., Петрашев С. Н., Сергеев С. Н. – Харьков: Основа, 1997. – 112 с.
64. Гладков Л. А. Биоинспирированные методы в оптимизации: моногр. / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик и др. – М: Физматлит, 2009. – 384 с.
65. Гладун В. П. Растущие пирамидальные сети / В. П. Гладун // Новости искусственного интеллекта. – 2004. – № 1. – С. 30-40.
66. Гнатієнко Г.М. Експертні технології прийняття рішень / Г.М. Гнатієнко, В.Є. Снитюк. – К.: McLaut, 2008. – 444 с.
67. Гришко В. Ф. Оптимизация комплектования компьютерных систем по критериям надежности / В. Ф. Гришко, С. В. Жульжик // Наукові праці ВНТУ. – 2009. – № 2. – С. 17-22.
68. Гуляницкий Л. Ф. Формализация и использование

- знаний в системах дискретной оптимизации / Л. Ф. Гуляницкий // Кибернетика и системный анализ. – 1995. – № 4. – С. 126-136.
69. Дюбуа Р. Теория возможностей / Р. Дюбуа, П. Прад. – М.: Радио и связь, 1990. – 288 с.
70. Загоруйко Н. Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. – Новосибирск: Изд-во И-та математики, 1999. – 270 с.
71. Зайченко О. Ю. Дослідження операцій / О. Ю. Зайченко, Ю. П. Зайченко. – К.: Видавничий дім «Слово», 2009. – 472 с.
72. Зайченко Ю. П. Основи проектування інтелектуальних систем / Ю. П. Зайченко. – К.: Видавничий дім «Слово», 2004. – 352 с.
73. Зайченко Ю. П. Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах / Ю. П. Зайченко. – К.: Слово, 2008. – 344 с.
74. Зак Ю. А. Принятие решений в условиях нечетких и размытых данных: Fuzzy-технологии / Ю. А. Зак. – М.: «ЛИБРОКОМ», 2013. – 352 с.
75. Згуровский М. З. Исследование социальных процессов на основе методологии системного анализа / М. З. Згуровский, А. В. Доброногов, Т. Н. Померанцева. – К.: Наукова думка, 1997. – 221 с.
76. Згуровский М. З. Иерархическое планирование в системах, имеющих сетевое представление технологических процессов и ограниченные ресурсы, как задача принятия решений / М. З. Згуровский, А. А. Павлов // Системні дослідження та інформаційні технології: науково-технічний журнал. – 2009. – № 3. – С. 70–75.
77. Згуровский М. З. Основы вычислительного интеллекта / М. З. Згуровский, Ю. П. Зайченко. – Київ: Наук. думка, 2013. – 407 с.
78. Згуровский М. З. Системный анализ. Проблемы, методология, приложения / М. З. Згуровский, Н. Д. Панкратова. – К.: Наук. думка, 2005.
79. Землянський О. М. Інформаційна технологія

- прогнозування концентрації небезпечної хімічної речовини при аварійному викиді в умовах невизначеності [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / О. М. Землянський. – Черкаси, 2014. – 20 с.
80. Землянський О. М. Моделі та еволюційні методи оптимізації структури систем пожежного моніторингу будівель і споруд [Текст]: авто-реф. дис ... канд. техн. наук / О. М. Землянський. – Київ, 2012. – 22 с.
81. Иваненко Д. Локальный поиск с чередующимися окрестностями для задачи размещения с ограничениями по мощности / Д. Иваненко, Ю. Кочетов // Материалы III Всеросс. Конф. «проблемы оптимизации и экономические приложения», 11-15 июля. – 2008. – Омск. – С. 105.
82. Ивахненко А. Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами / А. Г. Ивахненко. – К.: Техника, 1975. – 312 с.
83. Исаев С. А. Разработка и исследование генетических алгоритмов для принятия решений на основе многокритериальных нелинейных моделей / Автореф. дисс. к.т.н.– Н. Новгород: НГУ, 2000. – 18 с.
84. Исмагилова Л. А. Интеллектуальная система поддержки решений по управлению производством в условиях неопределенности / Л. А. Исмагилова, В. Ю. Афанасьев // Информационные технологии. – 2000. – № 11. – С. 32–37.
85. Канеман Д. Принятие решений в неопределенности. Правила и предубеждения/ Д. Канеман, П. Словик, А. Тверски. – Гуманитарный центр, 2021. – 540 с.
86. Кисляков А. В. Генетические алгоритмы: математический анализ некоторых схем репродукции / А. В. Кисляков // Информационные технологии. – 2000. – № 12. – С. 9–14.
87. Кодекс цивільного захисту України (Закон України № 5403-VI від 2.10.2012 р. із змінами і доповненнями) / Режим доступу:
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text>.
88. Кормен Т. Алгоритмы: Построение и анализ / Т. Кормен,

- Ч. Лайзерсон, Р. Ривест, К. Штайк. – М.: «Вільямс», 2005. – 1296 с.
89. Кришталь В. М. Визначення оптимального варіанту комплектації аварійно-рятувальної техніки з використанням нечітких висновків / В. М. Кришталь, А. В. Сергеев, В. Є. Снитюк // Вестник НТУ "ХПИ". – 2015. – № 49 (1158). – С. 144-148.
90. Кришталь В. М. Еволюційне моделювання процесу комплектування аварійно-рятувальної техніки / В. М. Кришталь, П. П. Кучер, В. Є. Снитюк // Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2015: матеріали 10-ї міжн. наук.-практ. конф. (м. Чернігів, 2015 р.). – Чернігів. – 2015. – С. 237-241.
91. Кришталь В. М. Еволюційний метод формування оптимального комплекту аварійно-рятувальної техніки / В. М. Кришталь, В. Є. Снитюк // Математичні машини і системи. – 2016. – № 1. – С. 168-174.
92. Кришталь В. М. Інтелектуальні технології розв'язання задачі комплектування аварійно-рятувальної техніки / В. М. Кришталь // Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи): матеріали IV міжн. наук.-практ. конф. (м. Київ-Черкаси, 2017 р.). – Київ. – 2017. – С. 251.
93. Кришталь В. М. Інформаційно-аналітична підтримка прийняття рішень при розв'язанні задачі комплектування техніки / В. М. Кришталь // Інформаційні управляючі системи та технології (ІУСТ-2015) : матеріали IV міжн. наук.-практ. конф. (м. Одеса, 2015 р.). – Одеса. – 2015. – С. 264-266.
94. Кришталь В. М. Критерій актуальності обладнання при розв'язанні задачі комплектування аварійно-рятувальної техніки в умовах невизначеності / В. М. Кришталь, В. Є. Снитюк, Д. С. Федоренко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2021. – № 2(8). – С. 70-76.
95. Кришталь В. М. Оптимізація процесу комплектування аварійно-рятувальної техніки / В. М. Кришталь,

- В. Є. Снитюк // Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2018: матеріали 13-ї міжнар. наук.-практ. конф. (м. Чернігів, 2018 р.). – Чернігів. – 2018. – С. 180-181.
96. Кришталь В. М. Принципи і критерії комплектування аварійно-рятувальної техніки / В. М. Кришталь // Електроніка та інформаційні технології (ЕЛІТ-2015): матеріали VII Українсько-польської наук.-практ. конф. (м. Львів-Чинадієво, 2015 р.). – Львів. – 2015. – С. 8-9.
97. Кришталь В. М. Цільова функція в задачі неповного комплектування аварійно-рятувальної техніки / В. М. Кришталь // Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи): матеріали III міжн. наук.-практ. конф. (м. Київ-Черкаси, 2015 р.). – Київ. – 2015. – С. 218.
98. Крышталь В. Н. Задача комплектования аварийно-спасательной техники и эволюционный метод решения / В. Н. Крышталь // Інформаційні технології та взаємодії (IT&I – 2015: матеріали II міжн. наук.-практ. конф. (м. Київ, 2015 р.). – Київ. – 2015. – С. 308-310.
99. Крышталь В. Н. Проблема комплектования аварийно-спасательной техники и технологии ее решения / В. Н. Крышталь, В. Е. Снитюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Вып. 3 (72), Т. 6. – С. 35-41.
100. Куваева В. И. Предварительная обработка экспертной информации при формировании агрегированной консенсусной ранговой оценки / В. И. Куваева, В. А. Болтенков, А. В. Позняк // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: технічні науки. – 2018. – Том 29 (68). Ч.1, Т 1. – С. 155-162.
101. Кузнецов Ю. Концептуальный пожарный автомобиль – 2000 / Ю. Кузнецов, Н. Навценя, Ю. Яковенко // Бюлетень пожежної безпеки. – 1999. – № 1. – С. 49-57.
102. Курейчик В. М. Эволюционные вычисления: генетическое и эволюционное программирование / В. М. Курейчик, С. И. Родзин //Новости искусственного интеллекта. – 2003. – № 5. – С. 13-20.

103. Кучер П. Формализация задачи комплектования и эволюционные аспекты ее решения / П. Кучер, В. Снитюк // Штучний інтелект. – 2009. – № 4. – С. 268-273.
104. Кучер П. П. Комплектование аварийно-спасательной техники – задача нечеткой многокритериальной оптимизации / П. П. Кучер, В. Е. Снитюк // АСУ и приборы автоматики. – 2009. – Вып. 149. – С. 60-65.
105. Кучер П. П. Метод решения задачи комплектования аварийно-спасательной техники с использованием принципа доминирования и генетического алгоритма / П. П. Кучер, В. Е. Снитюк // Вісник національного транспортного університету. – 2010. – № 21. – С. 431-437.
106. Лавров Є. А. и др. Математические методы исследования операций / Є. А. Лавров и др. – Суми: СДУ, 2017. – 212 с.
107. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений [Текст] / О. И. Ларичев. – М.: Логос, 2003. – 392 с.
108. Левитин А. В. Алгоритмы: введение в разработку и анализ / А. В. Левитин. – М.: «Вильямс», 2006. – 576 с.
109. Лотов А. В. Многокритериальные задачи принятия решений / А. В. Лотов, И. И. Поспелова. – М.: Макс Пресс, 2008.
110. Михалевич В. С. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем / В. С. Михалевич, В. Л. Волкович. – М.: Наука, 1982. – 286 с.
111. Нужнов Е. В. Трехмерная упаковка на основе эвристических процедур / Е. В. Нужнов, А. В. Барлит // Известия ТРТУ. – 2002. – № 3. – С. 95-101.
112. Панфілов Є. В. Технічні засоби і обладнання, що застосовуються при веденні пошуково-рятувальних робіт (Аварійно-рятувальний інструмент). Навчальний посібник. Переклад / Є. В. Панфілов. – СпБ., 2007. – 53 с.
113. Пожежна та аварійно-рятувальна техніка: (Історія, сьогодення, майбутнє) / О. М. Ларін, І. М. Грицина, С. В. Васильев, Б. І. Кривошей; Під заг. ред. О. М. Ларіна. – Х.: АГЗУ, 2005. – 160 с.

114. Ротштейн А. П. Влияние методов дефаззификации на скорость настройки нечеткой модели / А. П. Ротштейн, С. Д. Штовба // Кибернетика и системный анализ. – 2002. – Том 5. – С. 169-176.
115. Ротштейн А. П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы, нейронные сети / А. П. Ротштейн. – Винница: УНИВЕРСУМ-Винница, 1999. – 320 с.
116. Ротштейн А. П. Нечеткий многокритериальный анализ вариантов с применением парных сравнений / А. П. Ротштейн, С. Д. Штовба // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2001. – № 3. – С.150-154.
117. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М: Горячая линия-Телеком, 2008. – 452 с.
118. Саати Т. Аналитическое планирование организации систем / Т. Саати, К. Кернс. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.
119. Сетлак Г. Решение задач многокритериальной оптимизации с использованием генетических алгоритмов / Г. Сетлак // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2002. – № 3. – С. 32-42.
120. Смирнов А. В. О задаче упаковки в контейнеры / А. В. Смирнов // УМН. – 1991. – Т. 46, вып. 4 (280). – С. 173-174.
121. Снитюк В. Информационно-аналитические модели и эволюционные аспекты решения задача комплектования / В. Снитюк, П. Кучер // «Decision Making and Business Intelligence Strategies and Techniques», Number 3: Supplement to Int. Journal “Information Technologies and Knowledge”. – 2008. – Vol. 2. – P. 133-138.
122. Снитюк В. Эволюционное моделирование процесса распространения пожара / В. Снитюк, А. Биченко // Proc. XIII-th Int. Conf. Knowledge-dialogue-Solution”. – Bulgaria, Varna. –2007 (June). – P. 247-254.
123. Снитюк В. Е. Комплектование аварийно-спасательной

- техники – задача нечеткой многокритериальной оптимизации / В. Е. Снитюк, П. П. Кучер // АСУ и приборы автоматики. – 2009. – Вып. 149. – С. 60-65.
124. Снитюк В. Е. Модели и методы определения компетентности экспертов на базе аксиомы несмещенности / В. Е. Снитюк, Рифат Мохаммед Али // Вісник ЧІТІ. – 2000. – № 4. – С. 121-126.
125. Снитюк В. Е. Моделирование и прогнозирование процессов на рынке недвижимости / В. Е. Снитюк, О. Н. Мирошник. – Черкассы: “Чабаненко”, 2014. – 416 с.
126. Снитюк В. Е. Эволюционные технологии принятия решений при пожаротушении / В. Е. Снитюк, А. Н. Джулай, А. А. Быченко. – К.: Маклаут, 2008. – 268 с.
127. Снитюк В. Е. Оптимізація процесу оцінювання в умовах невизначеності на основі структуризації предметної області та аксіоми незміщеності / В. Е. Снитюк, Г. М. Гнатієнко // Штучний інтелект. – 2008. – № 3. – С. 217-223.
128. Снитюк В. Е. Спрямована оптимізація і особливості еволюційної генерації потенційних розв'язків // Матеріали V Міжн. школи-семінару «Теорія прийняття рішень», Ужгород (1-6 жовтня 2012). – С. 182-183.
129. Таха Х. А. Глава 14. Теория игр и принятия решений // Введение в исследование операций = Operations Research: An Introduction. – 7-е изд. / Х. А. Таха. – М.: «Вильямс», 2007. – С. 549-594.
130. Тимченко А. А. Информатика системного проектирования объектов новой техники / А. А. Тимченко, А. А. Родионов. – К.: Наук. думка, 1991. – 231 с.
131. Тимченко А. А. Исследование разрешимости задачи системного проектирования объектов новой техники / А. А. Тимченко, С. И. Алешников, В. Е. Снитюк // Препринт ИК НАН Украины. – Киев. – № 4-96. – 24 с.
132. Трофимова Л. А. Управление знаниями. Учебное пособие / Л. А. Трофимова, В. В. Трофимов. – СПб.: Изд-во СПбГУЭФ. 2012. – 77 с.
133. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ:

- Пер. с англ. / Дж.-О. Ким, Ч. У. Мьюллер, У. Р. Клекка и др.; Под ред. И. С. Енюкова. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 215 с.
134. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.
135. Чавкин А. М. Методы и модели рационального управления в рыночной экономике / А. М. Чавкин. – М.: Финансы и статистика, 2001. – 320 с.
136. Черноруцкий И. Г. Методы принятия решений / И. Г. Черноруцкий. – СПб.: ВНУ, 2005. – 416 с.
137. Ширгазин Р. Р. Эволюционные методы и программное обеспечение для решения задач ортогональной упаковки на базе блочных структур: автореф. дис ... канд. техн. наук / Р. Р. Ширгазин. – Уфа, 2006. – 18 с.

Наукове видання

Кришталь Василь Миколайович

Куліца Олег Сергійович

Григор'ян Микола Борисович

**РОЗВИТОК ТЕХНОЛОГІЇ
ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ
ПРИ КОМПЛЕКТУВАННІ
АВАРІЙНО-РЯТУВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ**

МОНОГРАФІЯ

Обл.-вид. арк. 3,5. Ум. друк. арк. 6,2.

Замовлення № 25.

ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України
вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034