

ЕВОЛЮЦІЙНИЙ МЕТОД ФОРМУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО КОМПЛЕКТУ АВАРІЙНО-РЯТУВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

*Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Черкаси, Україна

**Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Анотація. Комплектування аварійно-рятувальної техніки є актуальною задачею багатокритеріальної оптимізації, яка розв'язується в умовах фінансового та ресурсного дефіциту. У статті запропоновано еволюційний метод для визначення оптимального комплекту такої техніки. Оскільки він є параметричним, то визначено основні аспекти формування потенційних розв'язків на основі принципу протекціонізму.

Ключові слова: аварійно-рятувальна техніка, комплект, оптимізація, цільова функція, еволюційні технології.

Аннотация. Комплектование аварийно-спасательной техники является актуальной задачей многокритериальной оптимизации, которая решается в условиях финансового и ресурсного дефицита. В статье предложен эволюционный метод для определения оптимального комплекта такой техники. Поскольку он является параметрическим, то определены основные аспекты формирования потенциальных решений на основе принципа протекционизма.

Ключевые слова: аварийно-спасательная техника, комплект, оптимизация, целевая функция, эволюционные технологии.

Abstract. Formation of rescue equipment is an actual task of multicriteria optimization, which is solved in terms of financial and resource shortages. An evolutionary method of the optimum set of such equipment determination is proposed in the paper. Since this method is parametric, thus the basic aspects of potential solutions formation based on the principle of protectionism are suggested.

Keywords: rescue equipment, set, optimization, objective function, evolutionary technologies.

1. Введение

В останні роки технології проведення аварійно-рятувальних робіт в Україні визначаються такими факторами: створенням єдиної служби для організації та проведення аварійно-рятувальних заходів різної направленості; уніфікацією надання форм допомоги населенню при аваріях, катастрофах та пожежах; орієнтацією на закордонні форми організації та проведення рятувальних заходів; потенціальною інтеграцією окремих служб (01, 02, 03 та 04). Дефіцит фінансових та матеріальних ресурсів є причиною зменшення кількості носіїв аварійно-рятувального обладнання (АРО). На сьогодні це найчастіше спеціальні та пожежні автомобілі. Обмеженість площі та просторові обмеження для розміщення обладнання на автомобілі, багатофункціональність і зростаюча номенклатура сучасних приладів та засобів для проведення аварійно-рятувальних робіт зумовлюють необхідність вибору оптимального або прийнятного комплекту як розв'язку відповідної оптимізаційної задачі або задачі прийняття рішень.

Задача оптимізації процесу комплектування аварійно-рятувальної техніки (АРТ) та визначення її оптимального комплекту для конкретного носія розглядалась в роботах [1–2]. Виконані формалізовані постановки задач, розглянуті фактори, від яких залежить якість її розв'язання, встановлені критеріальні функції. Очевидно, що задача комплектування АРТ є задачею багатокритеріальної оптимізації. Відомий ряд технологій, що дозволяють звести її до однокритеріальної, певним чином модифікуючи при цьому простір пошуку оптимального розв'язку.

Одним із таких методів, що 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.

Виконуючи постановку задачі, автори [1–2] вказували на особливості, серед яких слід відзначити її спільні та відмінні риси у порівнянні із задачею упаковки в контейнери. Зокрема, упаковка в контейнери, на відміну від задачі комплектування АРТ, найчастіше є однокритеріальною задачею із жорстко заданими елементами її розв'язку. 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 унеможливорює здійснення його оцінювання одним експертом.

У [1, 2] запропоновано використання еволюційного моделювання для знаходження оптимального варіанта комплектування АРТ, оскільки цільова функція є поліекстремальною, негладкою залежністю. Але процес пошуку розв'язку задачі наштовхується на необхідність визначення компромісу або пріоритетів між цільовою функцією та обмеженнями. Розглянемо еволюційний метод, що дозволяє уникнути такої проблеми й базується на застосуванні принципу домінування і елементів генетичного алгоритму.

2. Попередня підготовка даних та формалізована постановка задачі

Нехай множина $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ містить елементи номенклатури АРТ. Кожен елемент з X належить до одного з класів іншої множини $C = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$, де $k \ll n$. Зробимо припущення, що в комплект має входити обладнання кожного з $\{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ класів, $m < k$, тобто необхідно вибрати по одному елементу з множин

$$\{X_{i_1}^1, X_{i_2}^1, \dots, X_{i_m}^1\} \subset C_1, \dots, \{X_{i_1}^m, X_{i_2}^m, \dots, X_{i_m}^m\} \subset C_m.$$

У загальному випадку таке припущення значно спрощує задачу і його можна посилити, вважаючи можливою ситуацію, коли в комплект обладнання входять елементи не з усіх класів. Тоді в задачу необхідно буде ввести додаткові обмеження або додаткові критеріальні функції. Основні складові методу її розв'язання не зміняться.

Кожному елементу множини X поставимо у відповідність сукупність значень

$$X_q \rightarrow \langle F_{1q}, F_{2q}, \dots, F_{pq}, a_q, b_q, c_q \rangle,$$

де F_{iq} – значення i -го критерію оцінки q -го елемента, $i = \overline{1, p}$, a_q, b_q, c_q – його габаритні розміри, $q = \overline{1, n}$. Кожен комплект АРТ K_i містить елементи множини X , тобто $K_i \subset X$, де K – максимальна кількість можливих варіантів, $i = \overline{1, K}$. При цьому можуть існувати такі комплекти, кількість елементів в яких не співпадають, $\exists i, j, i \neq j: |K_i| \neq |K_j|$. І ще одна вимо-

га, яка не є обов'язковою, але виконання якої є переважним: в один комплект АРТ не входять два і більше елементів з одного класу, тобто не існує таких $j, q, p: (X_{jq} \in K_i) \& (X_{jp} \in K_i)$. Ці обмеження значно звужують простір можливих розв'язків, і їх використання є раціональним при проведенні попередніх розрахунків.

Без обмеження загальності вважатимемо, що АРО має бути розміщеним у контейнері, який має форму прямокутного паралелепіпеда з габаритними розмірами a, b і c .

Запропонуємо декілька евристик, які є обмеженнями на габаритні розміри обладнання.

1. Сумарний об'єм елементів комплекту АРТ не повинен перевищувати об'єм контейнера, тобто

$$\forall i \sum_{j=1}^{k_i} (a_j^i \cdot b_j^i \cdot c_j^i) \leq a \cdot b \cdot c, \quad i = \overline{1, K}. \quad (1)$$

2. Жоден габаритний розмір будь-якого елемента комплекту АРТ не повинен перевищувати максимальний габаритний розмір контейнера:

$$\forall i \max\{a_j, b_j, c_j\} \leq \max\{a, b, c\} \quad \forall j = \overline{1, k_i}. \quad (2)$$

Раніше встановлено [1, 3], що критеріальними функціями, які визначають вибір того чи іншого комплекту АРТ, є F_1 – функціональність, F_2 – потужність, F_3 – надійність, F_4 – ціна, F_5 – функція, що інтегрує у своїх значеннях не враховані фактори і характеристики. Перша задача полягає у пошуку оптимального елемента АРТ у своєму класі, що означає необхідність знаходження:

$$\forall C_l \text{ Arg max}_i \sum_{j=1}^5 \alpha_j^l F_j(X_i^l), \quad l = \overline{1, m}, \quad (3)$$

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

Перед формуванням передумов розв'язання задачі (3) 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 або висновки, які виражені у кількісній формі, якщо апріорна інформація відсутня.

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

На наступному етапі здійснимо нормування значень критеріальних функцій, використовуючи одне з таких перетворень:

$$F_j^{*i} = \frac{F_j^i - F_{j\min}}{F_{j\max} - F_{j\min}}, \quad F_j^{*i} = \frac{F_{j\max} - F_j^i}{F_{j\max} - F_{j\min}}, \quad j = \overline{1, 5}, \quad i = \overline{1, |C_q|}, \quad q = \overline{1, m}, \quad (4)$$

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:

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

Для визначення коефіцієнтів α_j^k достатньо мати таблицю з кортежами

$$T = \langle Id, Class, F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F \rangle, \quad (6)$$

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, яке вказується експертами. Якщо кількість рядків 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 більша 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 найбільш часто для ідентифікації нелінійних залежностей використовуються метод Брандона [4], метод групового урахування аргументів [5], нейронні мережі [6] тощо. Реалізація кожного із зазначених методів має свої особливості. При виконанні відповідних умов їх результати досить точні. Далі будемо припускати, що для кожного елемента АРТ розраховане значення цільової функції

$$F(X_p), \quad p = \overline{1, n}.$$

З аналізу практичних застосувань випливає, що оптимальні часткові розв'язки підзадач, складені разом, аж ніяк не є оптимальним розв'язком задачі в цілому. Тому розв'язки задач (3) є всього лише інформативним фактором і можуть бути використані при попередньому обговоренні та пошуку опорного розв'язку більш загальної задачі пошуку оптимального варіанта 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 (N), при яких використовується відповідне обладнання, кількості загиблих (R), травмованих (P), величини відповідного матеріального збитку (M). Для визначення вагових коефіцієнтів критеріальних функцій елементів необхідно використовувати технологію, аналогічну вищенаведеній. Відповідна таблиця матиме такі кортежі:

$$T_i = \langle Id_i, N_i, R_i, P_i, M_i, V_i \rangle, \quad i = \overline{1, m}. \quad (7)$$

Інтегральна критеріальна функція для комплекту АРТ будет такою:

$$F(K_p) = \sum_{j=1}^m u_j \sum_{l=1}^n \left(\sum_{i=1}^5 \alpha_i^j \cdot F_i(X_l) \right) \cdot \chi[(X_l \in C_j) \& (X_l \in K_p)], \quad p = \overline{1, K}. \quad (8)$$

Друга задача полягає у пошуку оптимального варіанта комплектування АРТ і формально полягає у пошуку

$$\text{Arg max}_p F(K_p) = \text{Arg max}_p \sum_{j=1}^m u_j \sum_{l=1}^n (\sum_{i=1}^5 \alpha_i^j \cdot F_i(X_l)) \cdot \chi[(X_l \in C_j) \& (X_l \in K_p)]. \quad (9)$$

3. Метод визначення оптимального варіанта комплектування АРТ

Задача вибору оптимального або прийняттого варіанта комплектування АРТ має комбінаторний характер. Для її розв'язання використаємо ідеї та принципи реалізації генетичного алгоритму [7]. Основним його елементом є хромосома – потенційний розв'язок задачі. Як було зазначено раніше [1], хромосома складатиметься з m фрагментів, кожен з яких розділимо на три частини. Припустимо, що все обладнання АРТ має унікальні габаритні розміри i , виходячи з цих 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. Довжина хромосоми-розв'язку обчислюватиметься за формулою $L = \sum_{j=1}^m l_j = \sum_{j=1}^m \lceil \log_2 n_j \rceil + m$. Оскільки деякі бінарні представлення не будуть мати реальних аналогів, то виникає інформаційна надлишковість і, як наслідок, необхідність реалізації відповідної перевірки. Очевидно, що допоміжною операцією необхідно передбачити перетворення

$$Z \rightarrow B, B \rightarrow Z \rightarrow \{a_i, b_i, c_i\}, \quad (10)$$

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 комплектування АРТ, 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, сформувати генеральну популяцію.

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

$$K_j = \langle \text{rnd}\{1..n_1\}, \dots, \text{rnd}\{1..n_m\} \rangle, j = 1, \dots, H.$$

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, який займає k -й елемент.

Крок 5. Вибрати два розв'язки K_i і K_j з імовірностями, 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-розв'язки K_i і K_j та обміняти їх частинами. Одержимо 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 та обміняти фрагменти – елементи АРТ частинами, одержавши розв'язки K_i^* і K_j^* .

Крок 6. Розмістити розв'язки K_i^* і K_j^* у проміжній вибірці, попередньо з імовірністю $P_m \approx 0,005$ здійснивши над K_i та K_j мутацію одним із таких 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 раз, повністю сформувати проміжну вибірку. Серед елементів початкової вибірки і проміжної вибірки визначити кращі H розв'язків, виходячи із значень цільової функції, та сформувати із них вибірку наступного покоління.

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

Реалізація алгоритму має деякі особливості. Подамо їх як зауваження.

Зауваження 1. У запропонованому методі реалізовано принцип домінування, у відповідності з яким більш пріоритетним є розв'язок, що має більшу ефективність, незважаючи на габаритні розміри комплекту АРТ.

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

$$F^* = F_j - \eta / V_j, \quad (11)$$

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

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

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

Зауваження 5. Кроки методу можна модифікувати, посиливши його обчислювальні характеристики. Зокрема, перспективним видається пошук оптимального варіанта 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

$$\max_{p, q \in \{i, j\}} |F(K_p) - F(K_q^*)| < \delta, \quad (12)$$

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 відмовитись.

4. Висновок

Задача комплектування АРТ є слабкоструктурованою і важкоформалізованою, а в умовах фінансового та ресурсного дефіциту, безумовно, актуальною. Наведені у статті формалізація і розв'язок задачі є лише одним із можливих. Адекватність розв'язку впливає із поліекстремального характеру цільової функції і таблично заданих вихідних даних. Відомо, що використання класичних методів, які базуються на інтегро-диференціальному численні, у такому випадку є проблематичним, якщо не неможливим. Тому еволюційні технології, в основі яких лежить випадковий, але спрямований пошук, є чи не єдиним способом розв'язати поставлену задачу. Зауважимо, що в ній значну увагу приділено побудові цільової функції і запропонована структура відкрита до внесення змін і доповнень. У перспективі необхідно розв'язати задачу візуального моделювання процесу комплектування АРТ, оскільки отримані результати вказують тільки на можливість існування оптимального комплекту АРТ, але не дають відповіді на питання про те, яким чином можна здійснити його упаковку в контейнер.

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

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кришталь В.М. Визначення оптимального варіанта комплектації аварійно-рятувальної техніки з використанням нечітких висновків / В.М. Кришталь, А.В. Сергєєв, В.Є. Снитюк // Вестник НТУ "ХПІ". – 2015. – № 49 (1158). – С. 144 – 148.
2. 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.
3. Кучер П.П. Метод решения задачи комплектования аварийно-спасательной техники с использованием принципа доминирования и генетического алгоритма / П.П. Кучер, В.Є. Снитюк // Вісник національного транспортного університету. – 2010. – № 21. – С. 431 – 437.
4. Чавкин А.М. Методы и модели рационального управления в рыночной экономике / Чавкин А.М. – М.: Финансы и статистика, 2001. – 320 с.
5. Ивахненко А.Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами / Ивахненко А.Г. – К.: Техника, 1975. – 312 с.
6. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / Хайкин С. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.
7. Holland J.H. Adaptation in natural and artificial systems. An introductory analysis with application to biology, control and artificial intelligence / Holland J.H. – London: Bradford book edition, 1994. – 211 p.

Стаття надійшла до редакції 16.12.2015