УДК 004.89:614.841.4

П. П. Кучер, Д. В. Лагно,
Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля НУЦЗ Украины

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ КОМПЛЕКТОВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ГСЧС

Выполнена постановка задачи комплектования аварийно-спасательной техники. Предложена технология ее решения как задачи нечеткой многокритериальной оптимизации с использованием элементов метода анализа иерархий и метода построения функций принадлежности на основе попарных сравнений приоритетности целевых функций. Определены ограничения, позволяющие на этапе предварительного анализа отсеять неперспективные варианты, и рассмотрены возможности применения других методов, относящихся к «мягким» вычислениям.

Ключевые слова: комплектование аварийно-спасательной техники, подразделения ГСЧС, динамическое программирование, оптимальное комплектование АСТ.

Введение. Современный мир живет в условиях непрекращающихся природных катаклизмов. Это цунами и ураганы, землетрясения, засухи, наводнения и пожары. К таким природным явлениям добавляются техногенные, экологические катастрофы, обусловленные ростом промышленного производства, а также угрозы, исходящие от отдельных субъектов, или вызванные другими, возможно случайными факторами. В развитых странах мира созданы специальные службы, оказывающие помощь людям, пострадавшим в вышеуказанных ситуациях. В Украине такие функции возложены на подразделения ГСЧС. Некий универсализм функций, выполняемых его сотрудниками, является причиной существования проблемы обеспечения и комплектования таких подразделений техническими средствами. В большинстве случаев их носителем является пожарный автомобиль, и в этом случае имеем противоречие между необходимостью обеспечения универсальности аварийно-спасательной техники (АСТ) и ограниченностью его носителя. Необходимо решать задачу оптимального комплектования АСТ.

Такая задача имеет общие черты с известными задачами, в частности, с задачей об упаковке в контейнеры по весу или по стоимости и задачей о ранце [1,2]. Известными методами их решения является динамическое программирование, метод ветвей и границ, метод полного перебора, генетические алгоритмы, алгоритмы муравьиной колонии, «жадные» алгоритмы и др.

Особенностями таких задач и соответствующих методов решения являются четко заданные параметры объектов и одно- или двокритериальность. В отличие от них задача комплектования АСТ является многокритериальной задачей с нечетко заданными предпочтениями на множестве целевых функций. Кроме того, она есть неким аналогом задачи упаковки в контейнеры, т.е. трехмерной. При этом количество контейнеров считается заданным, а количество элементов АСТ – переменно.

Постановка задачи. Постановка задачи комплектования аварийно-спасательной техники выполнена в [4]. Приведем ее основные элементы. Пусть множество $X=\{X_1, X_2, ..., X_n\}$ представляет ассортимент АСТ. Каждый элемент множества X принадлежит к одному из классов множества $C=\{C_1, C_2, ..., C_k\}$, где $k \ll n$. Предположим, что в комплект должно входить оборудование из каждого из $\{C_1, C_2, ..., C_m\}$ классов, $m<k$, т.е. необходимо выбрать по одному элементу из множеств $\{X^1_{i_1}, X^1_{i_2}, ..., X^1_{i_{j_m}}\} \subset C_1, ..., \{X^m_{i_1}, X^m_{i_2}, ..., X^m_{i_{j_m}}\} \subset C_m$. Каждому элементу множества X поставим в соответствие совокупность значений: $X_q \to \langle F_{1q}, F_{2q}, ..., F_{pq}, a_q, b_q, c_q \rangle$, где F_{iq} – значение i-го критерия оценки q-го элемента, $i=\overline{1,p}$, a_q, b_q, c_q – его габаритные размеры, $q=\overline{1,n}$.

Предположим, что один комплект АСТ K_i содержит элементы множества X, т.е. $K_i \subset X$. При этом могут существовать такие комплекты, количество элементов в которых не совпадают, т.е. $\exists i, j, i \neq j : |K_i| \neq |K_j|$. И еще одно требование, которое не является обязательным, но выполнение которого предпочтительно: в один комплект АСТ не входят два и больше элементов из одного класса, т.е. не существует таких $j, q, p : (X_{jq} \in K_i) \& (X_{jp} \in K_i)$.

Не ограничивая общность, предположим, что контейнер один, и он имеет форму прямоугольного параллелепипеда с габаритами a, b, c. Используя элементы метода последовательного анализа вариантов [3], исключим из рассмотрения те возможные решения, которые не удовлетворяют одному или нескольким условиям.

Очевидными являются такие ограничения:

1. $\sum_i (a_i \cdot b_i \cdot c_i) \leq a \cdot b \cdot c$, т.е. суммарный объем элементов комплекта не должен превышать общий объем контейнера.

2. $\forall i \max\{a_i, b_i, c_i\} < \max\{a, b, c\}$, указывающее на то, что если один элемент имеет хотя бы один габаритный размер, превышающий наибольший габарит контейнера, то такой комплект исключается.

Критериями, определяющими выбор того или иного комплекта АСТ, являются F_1 – функциональность, F_2 – мощность, F_3 – надежность, F_4 – цена. Имеем задачу многокритериальной оптимизации: найти комплект АСТ, соответствующий решению задачи

$$F_1 \to \max,\ F_2 \to \max,\ F_3 \to \max,\ F_4 \to \min, \tag{1}$$

при вышеуказанных ограничениях. Ее решение предваряет определение весовых коэффициентов критериальных функций.

Метод решения задачи комплектования АСТ при нечетких экспертных предпочтениях. В дальнейшем изложении будем использовать школу сравнений, предложенную проф. Т. Саати [5]. Так, значения элементов матрицы попарных сравнений будут такими:

– 1, если сущность А и сущность В имеет равную важность;

– 3, если сущность А умеренно превосходит сущность В;

– 5, если сущность А имеет существенное превосходство над сущностью В;

– 7, если сущность А значительно превосходит сущность В;

– 9, если сущность А имеет очень сильное превосходство над сущностью В;

2,4,6,8– соответствуют промежуточным утверждениям о важности.

Если при сравнении А и В имеем одно из вышеуказанных чисел, то при сравнении В с А получим обратную величину.

Определим приоритеты критериальных функций. Для этого выберем m экспертов, которые, используя шкалу, предложенную Т.Саати [5], осуществляют их сравнение. Получим матрицы

$$G_i = \begin{pmatrix} 1 & g_{12}^i & g_{13}^i & g_{14}^i \\ 1/g_{12}^i & 1 & g_{23}^i & g_{24}^i \\ 1/g_{13}^i & 1/g_{23}^i & 1 & g_{34}^i \\ 1/g_{14}^i & 1/g_{24}^i & 1/g_{34}^i & 1 \end{pmatrix},\ i = \overline{1, m}. \tag{2}$$

Предположим, что компетентность w_i каждого из экспертов известна (если это не так, то компетентность можно определить, используя метод, предложенный в [6]) и $\sum_{i=1}^{m} w_i = 1$.

Очевидно, что суждения эксперта при решении задачи сравнения альтернатив зачастую бывают несогласованны. Для осуществления возможности учета этого фактора для каждой матрицы $G_i, i=\overline{1,m}$, вычисляем индекс согласованности, который равен абсолютной величине отклонения размерности матрицы G_i и ее максимального собственного числа, т.е. $\delta_i = |4 - q_i|, i=\overline{1,m}$. Меньшее значение δ_i соответствует лучшей согласованности сравнений эксперта. Если δ_i достаточно большое, то матрицу, соответствующую суждениям такого эксперта, необходимо исключить из рассмотрения или выполнить определенные уточняющие процедуры.

На следующем шаге осуществляем сложение элементов матриц $G_i, i=\overline{1,m}$, находящихся над главной диагональю, с соответствующими весовыми коэффициентами. Остальные элементы результирующей матрицы G найдем как обратные величины к уже вычисленным элементам. Имея матрицу G, определим приоритеты критериальных функций [5] по формуле

$$p_i = \frac{(\prod_{j=1}^{4} g_{ij})^{\frac{1}{4}}}{\sum_{i=1}^{4}(\prod_{j=1}^{4} g_{ij})^{\frac{1}{4}}}, \; i=\overline{1,4}. \tag{3}$$

Таким образом, мы установили важность критериальных функций при определении того или иного варианта комплектования АСТ.

На следующем шаге необходимо оценить варианты комплектования АСТ по каждому из критериев $F_i, i=\overline{1,4}$. Предположим, что после проведения предварительного анализа и проверки выполнения ограничений осталось p возможных вариантов. Аналогично предыдущему шагу необходимо получить четыре матрицы Q_i, элементы каждой из которых содержат значения парных сравнений вариантов комплектования по критериям $F_i, i=\overline{1,4}$. Получить матрицы можно двумя способами. В первом из них элементы матрицы определяют традиционно, исходя из заключений экспертов для всех пар вариантов. Поскольку число таких вариантов даже в самых малоразмерных задачах довольно большое, то матрица попарных сравнений будет плохо согласованной и ее анализ и применение в дальнейших расчетах становится проблематичным. Рациональным представляется использовать другой способ получения матриц $Q_i, i=\overline{1,4}$ [7,8]. Для этого необходимо определить только значения попарных сравнений для одного варианта комплектования АСТ, например, для первого. Все остальные элементы матриц рассчитываются по формуле: $q_{kl} = \frac{q_{1l}}{q_{1k}}, k,l=\overline{1,p}$. Получим такие матрицы:

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

Матрицы $Q_i, i=\overline{1,4}$, являются хорошо согласованными. Далее вычисляем степени принадлежности каждого из вариантов комплектования соответствующим нечетким множествам (определяемых критериальными функциями):

$$\mu(K_j) = \frac{1}{wk_{1j} + wk_{2j} + \ldots + wk_{pj}}, \ j=\overline{1,p}, \qquad (5)$$

где wk_{lj} – элементы матриц $Q_i, i=\overline{1,4}$. Таким образом, получим нечеткие множества:

$$F_i = \{\frac{\mu_{F_i}(K_1)}{K_1}; \frac{\mu_{F_i}(K_2)}{K_2}; \ldots; \frac{\mu_{F_i}(K_p)}{K_p}\}, \qquad (6)$$

или

$$F_i = \{\frac{1/(1+\sum_{j=1}^{p}\frac{1}{q_{1j}^i})}{K_1}; \frac{1/(1+q_{12}^i+\sum_{j=3}^{p}\frac{q_{12}^i}{q_{1j}^i})}{K_2}; \ldots; \frac{1/(1+q_{1p}^i+\sum_{j=2}^{p-1}\frac{q_{1p}^i}{q_{1j}^i})}{K_p}\}, \ i=\overline{1,4}. \qquad (7)$$

Значения, находящиеся в числителе, указывают на то, насколько функциональны, мощны, надежны и приемлемы по цене варианты комплектования (в знаменателе).

Учитывая, что наилучшим является тот вариант, который одновременно лучший по всем критериям, нечеткое решение F находим как пересечение критериев F_i:

$$F = F_1 \cap F_2 \cap F_3 \cap F_4 = \{\frac{\min_{i=\overline{1,4}} \mu_{\bar{F}_i}(K_1)}{K_1}; \frac{\min_{i=\overline{1,4}} \mu_{\bar{F}_i}(K_2)}{K_2}; \ldots; \frac{\min_{i=\overline{1,4}} \mu_{\bar{F}_i}(K_p)}{K_p}\}. \qquad (8)$$

Наилучшим вариантом является тот, который является решением задачи поиска

$$\arg \max_{j=\overline{1,p}} \min_{i=\overline{1,4}} \mu_{F_i}(K_j). \qquad (9)$$

Если учитывать важность критериальных функций, то подход к определению оптимального варианта комплектования остается неизменным, а выражение (7) перепишется следующим образом:

$$F_i = \{\frac{(1/(1+\sum_{j=1}^{p}\frac{1}{q_{1j}^i}))^{p_i}}{K_1}; \frac{(1/(1+q_{12}^i+\sum_{j=3}^{p}\frac{q_{12}^i}{q_{1j}^i}))^{p_i}}{K_2}; \ldots; \frac{(1/(1+q_{1p}^i+\sum_{j=2}^{p-1}\frac{q_{1p}^i}{q_{1j}^i}))^{p_i}}{K_p}\}, \ i=\overline{1,4}. \qquad (10)$$

Решение задачи (9) определяет оптимальный вариант комплектования и позволяет учитывать меру оптимальности его выбора, исходя из значения соответствующей функции принадлежности.

Практическая реализация метода комплектования АСТ. Пусть необходимо выбрать один из шести вариантов комплектования АСТ, исходя из суждений шести экспертов. На первом этапе осуществляем попарное сравнение критериальных функций. Получим такие матрицы:

$$G_1=\begin{pmatrix}1&7&5&7\\0{,}14&1&1&5\\0{,}2&1&1&7\\0{,}14&0{,}2&0{,}14&1\end{pmatrix};\ G_2=\begin{pmatrix}1&5&1&7\\0{,}2&1&3&7\\1&0{,}33&1&7\\0{,}14&0{,}14&0{,}14&1\end{pmatrix};G_3=\begin{pmatrix}1&9&9&5\\0{,}11&1&5&9\\0{,}11&0{,}2&1&9\\0{,}2&0{,}1&0{,}1&1\end{pmatrix};$$

$$G_4=\begin{pmatrix}1&9&5&7\\0{,}1&1&5&7\\0{,}2&0{,}2&1&9\\0{,}14&0{,}14&0{,}1&1\end{pmatrix};\ G_5=\begin{pmatrix}1&3&1&5\\0{,}3&1&1&1\\0{,}2&0{,}2&1&9\\0{,}14&0{,}14&0{,}1&1\end{pmatrix};G_6=\begin{pmatrix}1&5&7&1\\0{,}2&1&9&5\\0{,}14&0{,}1&1&9\\1&0{,}2&0{,}1&1\end{pmatrix}.$$

Компетентности экспертов определены лицом, принимающим решения, и они равны:

$$\gamma_1=0{,}34;\ \gamma_2=0{,}24;\ \gamma_3=0{,}2;\ \gamma_4=0{,}14;\ \gamma_5=0{,}05;\ \gamma_6=0{,}03.$$

Максимальные собственные числа матриц $G_i,\ i=\overline{1,6}$ такие:

$$\lambda_1=4{,}35;\lambda_2=4{,}77;\ \lambda_3=5{,}45;\ \lambda_4=5{,}13;\ \lambda_5=4{,}26;\ \lambda_6=6{,}99.$$

Таким образом, индексы согласованности равны:

$$\delta_1=0{,}35;\ \delta_2=0{,}77;\ \delta_3=1{,}45;\ \delta_4=1{,}13;\ \delta_5=0{,}26;\ \delta_6=2{,}99.$$

Наилучшим образом согласованы суждения первого и пятого экспертов, суждения шестого эксперта необходимо корректировать.

Складывая матрицы $G_i,\ i=\overline{1,6}$ по описанной выше процедуре, получим матрицу

$$G=\begin{pmatrix}1&6{,}94&4{,}7&6{,}32\\0{,}14&1&3{,}08&6{,}36\\0{,}21&0{,}32&1&7{,}64\\0{,}15&0{,}15&0{,}13&1\end{pmatrix}.$$

Используя (3), рассчитаем приоритеты критериальных функций:

$$p_1=0{,}61;\ p_2=0{,}21;\ p_3=0{,}14;\ p_4=0{,}04.$$

Вычислим значения матриц $Q_i,\ i=\overline{1,4}$:

$$Q_1=\begin{pmatrix}1&3&2&0{,}9&0{,}33&0{,}7\\0{,}33&1&0{,}67&0{,}3&0{,}11&0{,}23\\0{,}5&1{,}5&1&0{,}45&0{,}17&0{,}35\\1{,}11&3{,}33&2{,}22&1&0{,}37&0{,}78\\3&9&6&2{,}7&1&2{,}1\\1{,}43&4{,}29&2{,}86&1{,}29&0{,}48&1\end{pmatrix},\ Q_2=\begin{pmatrix}1&0{,}5&4&3&0{,}7&0{,}5\\2&1&8&6&1{,}4&1\\0{,}25&0{,}13&1&0{,}75&0{,}18&0{,}13\\0{,}33&0{,}17&1{,}33&1&0{,}23&0{,}17\\1{,}43&0{,}71&5{,}71&4{,}29&1&0{,}71\\2&1&8&6&1{,}4&1\end{pmatrix},$$

$$Q_3=\begin{pmatrix}1&0{,}4&0{,}5&2&0{,}8&3\\2{,}5&1&1{,}25&5&2&7{,}5\\2&0{,}8&1&4&1{,}6&6\\0{,}5&0{,}2&0{,}25&1&0{,}4&1{,}5\\1{,}25&0{,}5&0{,}63&2{,}5&1&3{,}75\\0{,}33&0{,}13&0{,}17&0{,}67&0{,}27&1\end{pmatrix},\ Q_4=\begin{pmatrix}1&6&4&0{,}9&4&0{,}8\\0{,}17&1&0{,}67&0{,}15&0{,}67&0{,}13\\0{,}25&1{,}5&1&0{,}23&1&0{,}2\\1{,}11&6{,}67&4{,}44&1&4{,}44&0{,}89\\0{,}25&1{,}5&1&0{,}23&1&0{,}2\\1{,}25&7{,}5&5&1{,}13&5&1\end{pmatrix}.$$

Далее находим степени принадлежности каждого из вариантов комплектования соответствующим нечетким множествам:

$$F_1 = \{\frac{0,12}{K_1}; \frac{0,38}{K_2}; \frac{0,25}{K_3}; \frac{0,11}{K_4}; \frac{0,04}{K_5}; \frac{0,09}{K_6}\},$$

$$F_2 = \{\frac{0,10}{K_1}; \frac{0,05}{K_2}; \frac{0,41}{K_3}; \frac{0,31}{K_4}; \frac{0,07}{K_5}; \frac{0,05}{K_6}\},$$

$$F_3 = \{\frac{0,13}{K_1}; \frac{0,05}{K_2}; \frac{0,06}{K_3}; \frac{0,26}{K_4}; \frac{0,10}{K_5}; \frac{0,39}{K_6}\},$$

$$F_4 = \{\frac{0,05}{K_1}; \frac{0,36}{K_2}; \frac{0,24}{K_3}; \frac{0,05}{K_4}; \frac{0,24}{K_5}; \frac{0,05}{K_6}\}.$$

Нечеткое решение находим как пересечение критериев $F_i, i = \overline{1,4}$:

$$F = \{\frac{0,05}{K_1}; \frac{0,05}{K_2}; \frac{0,06}{K_3}; \frac{0,05}{K_4}; \frac{0,04}{K_5}; \frac{0,05}{K_6}\}.$$

Учитывая значимость критериальных функций, уточним полученные результаты:

$$F_1 = \{\frac{0,28}{K_1}; \frac{0,55}{K_2}; \frac{0,43}{K_3}; \frac{0,26}{K_4}; \frac{0,14}{K_5}; \frac{0,22}{K_6}\},$$

$$F_2 = \{\frac{0,62}{K_1}; \frac{0,54}{K_2}; \frac{0,83}{K_3}; \frac{0,78}{K_4}; \frac{0,58}{K_5}; \frac{0,53}{K_6}\},$$

$$F_3 = \{\frac{0,75}{K_1}; \frac{0,66}{K_2}; \frac{0,68}{K_3}; \frac{0,82}{K_4}; \frac{0,72}{K_5}; \frac{0,87}{K_6}\},$$

$$F_4 = \{\frac{0,89}{K_1}; \frac{0,95}{K_2}; \frac{0,94}{K_3}; \frac{0,88}{K_4}; \frac{0,94}{K_5}; \frac{0,88}{K_6}\}.$$

Тогда, исходя из (8), получим нечеткое решение

$$F = \{\frac{0,28}{K_1}; \frac{0,54}{K_2}; \frac{0,43}{K_3}; \frac{0,26}{K_4}; \frac{0,14}{K_5}; \frac{0,22}{K_6}\}.$$

Решением задачи (9) будет вариант комплектования АСТ K_2, соответствующий максимальному значению функции принадлежности.

Выводы и перспективы. Рассмотренный метод комплектования АСТ является только одним возможным элементом технологий принятия решений, базирующийся на использовании теории нечетких множеств, которая является одной из составляющих парадигмы «Soft Computing» [9]. И, хотя не все ее положения имеют строгие доказательства, их применение целесообразно при решении задач, связанных с необходимостью учета субъективных суждений. Такой задачей и является комплектование АСТ. Рассматривая ее как задачу многокритериальной оптимизации, важно обращать внимание на значимость критериальных функций, поскольку ее учет прямо влияет на выбор решения – варианта комплектования.

К важным аспектам, которые необходимо учитывать при решении задачи, относится наличие переменного количества элементов в каждом варианте комплектации. Такое обстоятельство требует формального определения критериальных функций, поскольку для разного типа оборудования понятия и единицы измерения функциональности и мощности являются различными. Экспертам должна быть доступна информация о сравнительных характеристиках элементов АСТ одного класса, а также предусмотрена возможность приведения разнородных показателей к одной шкале.

Предложенный метод, кроме преимуществ, имеет и определенные недостатки. Так, он ориентирован на определенное количество вариантов комплектования, которое не может измениться в процессе анализа, и полученные результаты не могут быть использованы для оценки нового варианта комплектования. Преодолеть ограничение метода предполагается с использованием и других составляющих «Soft Computing», а именно нейронных сетей, эволюционного моделирования, нейро-нечетких сетей, а также их композиции. Это позволить осуществлять оценку того или иного варианта комплектования АСТ на основе уже построенной модели. Кроме того, возможно осуществить разработку процедуры устранения противоречий в оценках экспертов, что будет направлено на определенную объективизацию субъективных заключений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Левитин А.В. Алгоритмы: введение в разработку и анализ. – М.: «Вильямс», 2006. – 576 с.

2. Кормен Т., Лайзерсон Ч., Ривест Р., Штайк К. Алгоритмы: Построение и анализ. – М.: «Вильямс», 2005. – 1296 с.

3. Волкович В.Л. Модели и методы оптимизации надежности сложных систем / В.Л. Волкович, О.Ф. Волошин и др. – К.: Наук. думка, 1993. – 312 с.

4. Снитюк В., Кучер П. Информационно-аналитические модели и эволюционные аспекты решения задачи комплектования // Искусственный интеллект – 2009. – № 4. – С. 268-273.

5. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование организации систем. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.

6. Снитюк В.Е., Рифат Мохаммед Али. Модели и методы определения компетентности экспертов на базе аксиомы несмещенности // Вісник ЧІТІ. − № 4. − 2000. − С. 121-126.

7. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы, нейронные сети. – Винница: УНИВЕРСУМ-Винница, 1999. – 320 с.

8. Ротштейн А.П., Штовба С.Д. Нечеткий многокритериальный анализ вариантов с применением парных сравнений // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2001. – № 3. – С.150-154.

9. Zadeh L. A. Fuzzy logic, neural network and soft computing // Communications of the ACM. − 1994. − Vol. 37, № 3. − P. 77–84.