

Применение экспертных оценок для распределения сил и средств на основе транспортной модели при одновременных вызовах на пожар

В.Я. Вилисов

Технологический университет, Королев

Аннотация: Предложен подход к решению задачи распределения сил и средств (СиС) в тех ситуациях, когда диспетчер пожарного гарнизона города получает практически одновременно (на коротком интервале времени) несколько вызовов на пожар. Распределению подлежат пожарные автомобили различной специализации и другое оборудование пожарно-спасательных частей. В качестве формальной модели для оптимального распределения СиС по вызовам предложена транспортная задача (ТЗ). Однако, для ее использования необходимо знание платежной функции (транспортной таблицы), отражающей показатели различных типов, что априори достоверно задать практически невозможно. Для преодоления этой неопределенности предложено использование структурированной экспертной процедуры, представленной в виде детализированного алгоритма. Работа алгоритма проиллюстрирована на модельном примере.

Ключевые слова: транспортная модель, оптимальное распределение, целевая функция, задача линейного программирования, парные сравнения, ранжирование, план распределения.

Введение

Ликвидация чрезвычайных ситуаций (ЧС), в частности, пожаров, сопряжена с привлечением и распределением разнообразных ресурсов [1, 2], в роли которых выступают разнообразные силы и средства (СиС) [3]. Эти ресурсы находятся в распоряжении пожарно-спасательных частей (ПЧ). К их числу относятся автоцистерны (АЦ), автонасосы (АН), другой автотранспорт, оборудование и материалы. Их количество в ПЧ ограничено и обусловлено некоторой прогнозной интенсивностью пожаров и ЧС в субъекте [4]. Поскольку возникновение пожаров случайно, то существует вероятность возникновения на малом интервале времени одновременно нескольких возгораний. Проблемы, связанные с одновременными вызовами на пожары в городах, исследуются уже достаточно длительное время [5], однако, являются актуальными и сегодня. Именно в таких ситуациях возникает задача *оптимального распределения СиС, находящихся в распоряжении*

диспетчера гарнизона, по нескольким пожарам.

Статистические данные о пожарах в Москве, например, в первом полугодии 2016 году таковы [6], что было 29992 вызова на пожары, т.е. в среднем ежедневно 164 выезда. В Москве находится около 120 ПЧ, т.е. ежедневно в среднем каждая ПЧ участвует в 1-2 выездах с переменным количеством и составом пожарных автомобилей и других ресурсов.

Количество выездов нарядов на пожар, как показано в [4], подчиняется распределению Пуассона с интенсивностью λ , а распределение времени обслуживания пожара ($\tau_{\text{обсл}}$) может быть описано гамма-распределением. Плотности распределения Пуассона и гамма-распределения имеют вид:

$$p(k, \lambda) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}, \quad f(t, \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} t^{\alpha-1} e^{-\frac{t}{\beta}}, \quad (1)$$

где k - количество выездов в единицу времени (в сутки); $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функция Эйлера; α – параметр формы; β – параметр масштаба; t - время.

Параметры распределений (1), аппроксимирующих статистические данные пожаров в Москве в 2014 году, следующие: $\lambda = 15$; $\alpha = 7,047$; $\beta = 6,077$. При этом среднее значение гамма-распределения $m_\gamma = 0,71$ час.; среднеквадратическое отклонение (СКО) $\sigma_\gamma = 0,27$ час.

Локальные кратности пожаров, как следствие локальных всплесков интенсивности потока событий (вызовов на пожары), приведены на рис. 1.

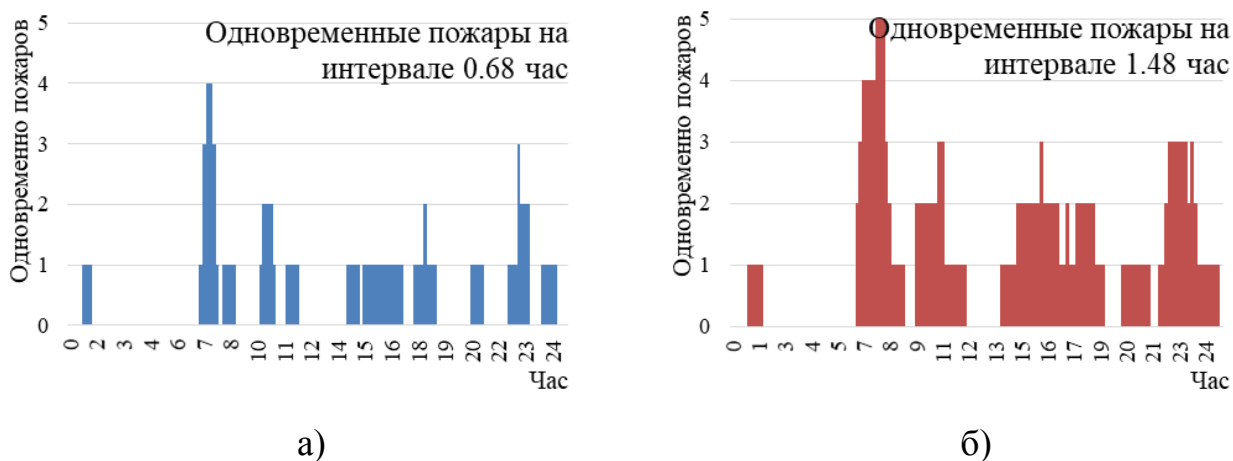


Рис. 1. Временная диаграмма кратности пожаров

На рис. 1а приведено количество пожаров, которые могут происходить одновременно, при наиболее вероятной их продолжительности (не совпадает со средней) в 0,68 часа. На рис. 1б приведена диаграмма количества одновременных пожаров, если их продолжительность составляет 1,48 часа. Вероятность такой продолжительности, в соответствии с приведенными параметрами гамма-распределения, составит 0,01, что является крайне редким случаем, но если он происходит, то возникает потребность в распределении СиС и в такой ситуации. При этом локальные (на отдельных интервалах времени в суточном цикле) интенсивности потока вызовов могут превышать среднегодовые значения в 5-10. Исследования [7] показали, что максимальная кратность одновременных вызовов (на примере Москвы) может составлять не более семи с вероятностью сколько-нибудь значимой. Вместе с тем, в [7] показано, что локальное увеличение потока вызовов приводит к росту показателей удельного (на один пожар) ущерба, что свидетельствует об актуальности задачи оптимального распределения СиС при одновременных пожарах/вызовах.

Постановка задачи

Одновременные вызовы на пожары из разных районов города, как ситуация, требующая принятия решения (СТПР), схематично можно представить в виде, приведенном на рис. 2.

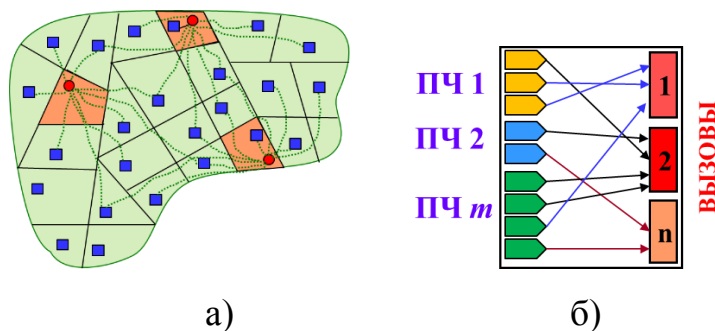


Рис. 2. Ситуация одновременных вызовов

Диспетчер пожарного гарнизона, как лицо, принимающее решение (ЛПР), реагирует на вызовы, привлекая СиС пожарных частей (ПЧ). Задача ЛПР заключается в том, чтобы в соответствии с рангом пожара (уровнем его

сложности), назначить тот или иной вид ресурса той или иной ПЧ на тот или иной пожар. При выборе варианта распределения ЛПР учитывает много различных показателей, т.е. он решает задачу многокритериальной (векторной) оптимизации. При этом следует принимать во внимание, что состав СиС, которые могут быть привлечены диспетчером к реагированию на вызовы, постоянно меняется, т.к. некоторые подразделения еще не вернулись к местам дислокации, а часть вернувшихся еще не восстановили свою готовность к реагированию.

По своей структуре данная ситуация может быть представлена в виде транспортной задачи (ТЗ). Математическая постановка ТЗ заключается в следующем [8, 9]. Все готовые ПЧ составляют множество источников однородных ресурсов, где в каждой ПЧ имеется известное для ЛПР количество ресурсов (например, автоцистерн - АЦ) - a_i , где $i = \overline{1, m}$. Каждый из одновременных пожаров, в соответствии со своим рангом требует определенного количества ресурсов этого же типа - b_j , где $j = \overline{1, n}$. Здесь номер пожара соответствует номеру района (территориального участка) города, в котором возникает пожар.

С перемещением одной единицы ресурса от i -го источника (из i -ой ПЧ) к j -ому получателю (району места вызова) связаны некоторые затраты/издержки c_{ij} . Издержки могут выражаться, например, в финансовых затратах на переезд (перевозку), в затратах времени, в показателях ущерба и т. п. Далее будем считать, что c_{ij} имеет смысл некоторого обобщенного показателя издержек (затрат), включающего все возможные. С учетом этого, задача распределения ресурсов (СиС ПЧ) по потребителям (вызовам/пожарам) заключается в определении величин x_{ij} - количества ресурсов, которое следует выделить (переместить) от i -го источника к j -ому получателю при минимальных совокупных издержках по всем «перевозкам».

СТПР в этой задаче характеризуется парой векторов (\bar{a}, \bar{b}) (здесь

$\bar{a} = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_m]^T$; $\bar{b} = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_n]^T$; T - символ транспонирования), т.е. - множеством значений наличия однородного ресурса во всех источниках и множеством значений потребностей этих же ресурсов у всех потребителей.

Поскольку в предметной области ликвидации пожаров общее количество ресурсов (например, АЦ) во всех ПЧ существенно больше потребных, то для приведения текущей СТПР к ТЗ стандартной структуры (к сбалансированному виду) необходимо добавить «фиктивный пожар», т.е. столбец с нулевыми значениями c_{ij} в транспортную таблицу.

Целевая функция (ЦФ) ТЗ имеет вид:

$$L(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}, \quad (2)$$

где L - целевой показатель, отражающий совокупные издержки; $X = \|x_{ij}\|_{mn}$ - матрица искомым переменных задачи; $C = \|c_{ij}\|_{mn}$ - матрица транспортных издержек.

Элементы векторов (\bar{a}, \bar{b}) для сбалансированной ТЗ должны удовлетворять следующим ограничениям:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, \quad i = 1, \dots, m; \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, \quad j = 1, \dots, n; \quad (4)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = 1, \dots, m; \quad j = 1, \dots, n. \quad (5)$$

Для показателя L , имеющего смысл потерь (издержек, ущерба), критерий оптимальности ТЗ имеет вид:

$$X_{opt} \rightarrow \arg \min_x L(X) \quad (6)$$

Таким образом, выражения (2)-(6) представляют собой постановку ТЗ,

результатом решения которой является оптимальное распределение имеющихся ресурсов. Поскольку ТЗ ориентирована на однородный распределяемый ресурс, а в реальной пожарной практике их несколько (АЦ, автонасосы, пожарные лестницы и т.п.), то для каждого распределяемого ресурса следует построить свою ТЗ.

Для использования ТЗ в целях распределения ресурсов при одновременных вызовах, из трех групп, участвующих в задаче параметров (\bar{a}, \bar{b}, C) , первые две отражают значения текущей СТПР, т.е. становятся известными автоматически, а третья, как правило, достоверно априори определена быть не может. Поэтому далее предложен алгоритм выбора оптимального варианта распределения СиС по одновременным вызовам на основе транспортной модели (ТЗ) с использованием методов экспертного оценивания [10]. Такой подход позволяет, с одной стороны, воспользоваться одной из классических оптимизационных моделей (ТЗ), а с другой стороны, преодолеть априорную неопределенность, связанную с отсутствием информации о функции потерь (платежной матрице).

Алгоритм экспертного оценивания вариантов распределения ресурсов

Применительно к ликвидации ЧС объектами экспертного оценивания являются варианты решений, один из которых следует принять в той или иной сложившейся ситуации (СТПР). В терминах экспертного оценивания, выбрать один из вариантов распределения СиС по вызовам — это ранжировать все альтернативные варианты распределений и принять самый предпочтительный из них. Поскольку распределение СиС рассматривается как транспортная задача, то альтернативами являются все вершины многогранника ограничений ТЗ [8]. Поскольку, как было показано выше, количество потребителей ресурсов (вызовов - столбцов транспортной таблицы), как правило, не велико, то рассмотрим логику работы алгоритма на примере ТЗ размерности 2×3 (2 ПЧ и 3 вызова). Как следует из теории [8],

для данного примера максимальное количество альтернативных вариантов распределения (вершин многогранника ограничений) - шесть.

Из теории экспертного оценивания [10] известно, что если количество альтернатив более чем 3-5, то для их ранжирования, как правило, применяется метод парных сравнений. Продемонстрируем далее на примере ТЗ 2×3 работу алгоритма выбора оптимального распределения с применением экспертных оценок. Предлагаемый алгоритм приведен на рис. 3.

В блоках 1-2 выполняются подготовительные операции (без участия ЛПР) - по текущей ситуации (СТПР) формируются значения пары векторов \bar{a}, \bar{b} , которые затем преобразуются в параметры задачи линейного программирования (ЗЛП) - A, \bar{a}_0 , где A - матрица левых частей ограничений ЗЛП, а \bar{a}_0 - вектор их правых частей. Число независимых переменных x_k в ЗЛП, полученной из ТЗ 2×3, равно двум.

В блоках 3-7 выполняются (без участия ЛПР) операции выявления альтернативных планов распределения ресурсов на основании данных текущей СТПР - формируется множество Ψ альтернативных планов.

Из множества ограничений ЗЛП с параметрами A, \bar{a}_0 выбирается очередная пара ограничений-неравенств вида (\leq) - блок 3. Решается эта пара уравнений u и v (из неравенств), в результате чего находятся координаты точки их пересечения (\bar{x}_{uv}). В блоке 5 проверяется условие принадлежности полученной точки к области допустимых решений (ОДР) ЗЛП: $\bar{x}_{uv} \in \Omega$. Если условие выполняется, то множество крайних точек ОДР пополняется еще на одну данную точку (блок 6), иначе - рассматривается следующая пара уравнений (блок 7).

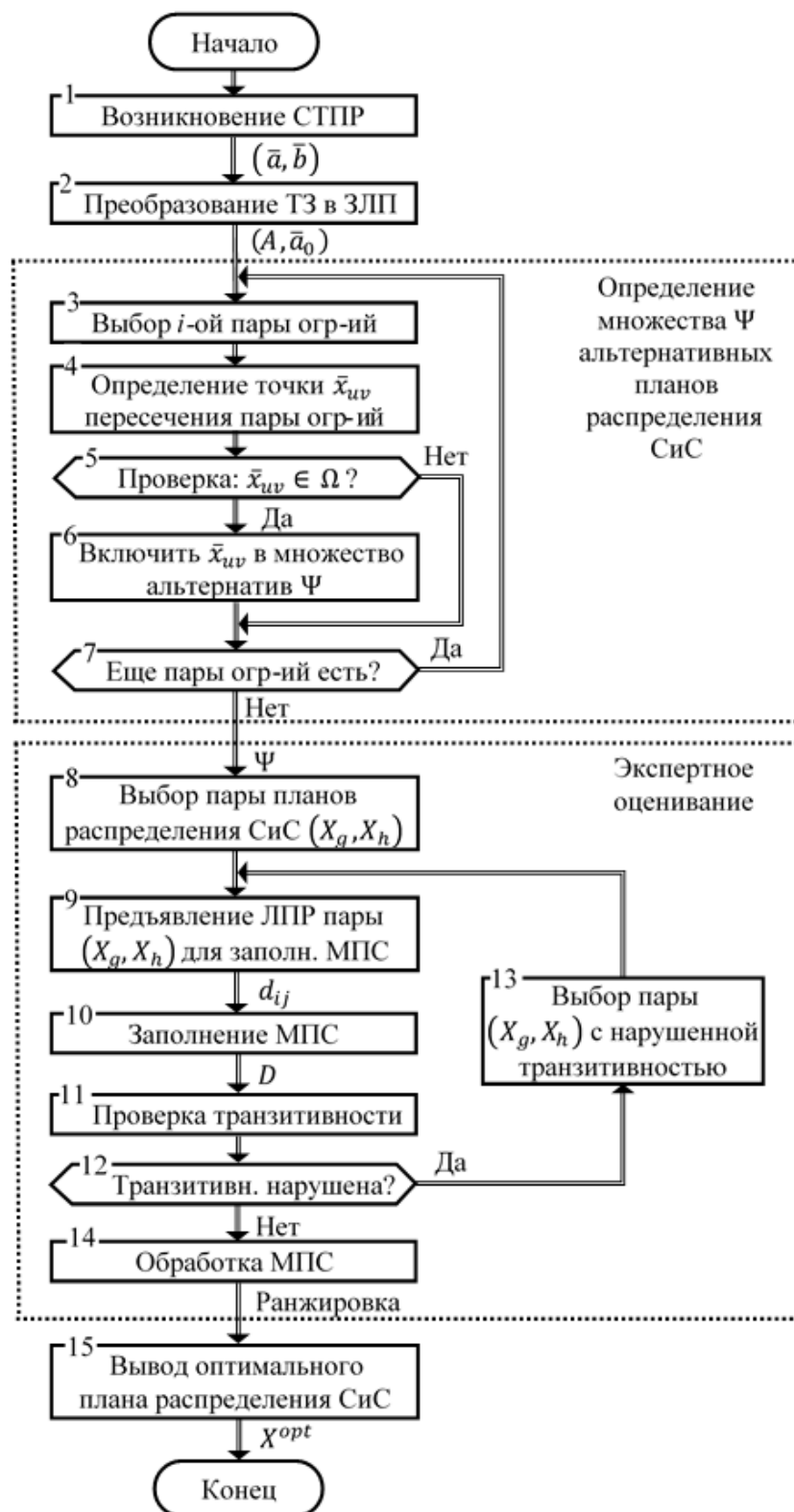


Рис. 3. Алгоритм выбора оптимального плана распределения СиС

Для очередной точки $\bar{x}_{uv} \in \Omega$ (обозначим ее \bar{x}_{uv}^{Ω}) определяется соответствующий ей вариант плана распределения СиС ($X_k \in \Psi$) путем

обратного перехода - от переменных ЗЛП к переменным ТЗ. После выявления всех \bar{x}_{uv}^{Ω} в цикле блоков 3-7, получим следующие альтернативные планы распределения ресурсов:

$$\begin{cases} X_1 = \begin{pmatrix} 3 & 5 & 0 \\ 2 & \mathbf{0} & \mathbf{6} \end{pmatrix}; & X_2 = \begin{pmatrix} 0 & 5 & 3 \\ 5 & \mathbf{0} & \mathbf{3} \end{pmatrix}; & X_3 = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 6 \\ 5 & \mathbf{3} & \mathbf{0} \end{pmatrix}; \\ X_4 = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 6 \\ 3 & \mathbf{5} & \mathbf{0} \end{pmatrix}; & X_5 = \begin{pmatrix} 5 & 0 & 3 \\ 0 & \mathbf{5} & \mathbf{3} \end{pmatrix}; & X_6 = \begin{pmatrix} 5 & 3 & 0 \\ 0 & \mathbf{2} & \mathbf{6} \end{pmatrix}, \end{cases} \quad (7)$$

где жирным шрифтом выделены значения пары независимых переменных ТЗ (в качестве которых в данном примере приняты переменные x_{22} и x_{23}).

В блоках 8-14 выполняются человеко-машинные операции экспертного оценивания предпочтительности альтернативных планов (7). Экспертом является диспетчер гарнизона, сравнивающий пары альтернативных планов распределения СиС, в результате чего строится матрица парных сравнений (МПС) - блок 10.

Оценки предпочтительности d_{gh} пары альтернативных планов $X_g; X_h$ проставляются экспертом по дискретной шкале [10] (блок 9):

$$d_{gh} = \begin{cases} 3, \text{ если } X_g > X_h, \text{ т. е. } X_g \text{ предпочтительнее чем } X_h \\ 2, \text{ если } X_g \approx X_h, \text{ т. е. } X_g \text{ эквивалентен } X_h \\ 1, \text{ если } X_g < X_h, \text{ т. е. } X_h \text{ предпочтительнее чем } X_g \end{cases}. \quad (8)$$

В процессе имитационного моделирования [11] ЛПР-эксперт моделировался в двух вариантах - как идеальный измерительный прибор, который имеет абсолютную разрешающую способность при сравнении альтернатив и не допускает ошибок в оценивании d_{gh} , и как неидеальный, допускающий ошибки. В реальных обстоятельствах эксперт может допускать ошибки в силу уровня своей квалификации (проявляющейся в *слабой разрешающей способности*), либо по объективным причинам, например, при *слабой контрастности альтернатив* [10]. При моделировании вероятность правильного измерения (1, 2 или 3 по формуле (8)) была задана равной 0,6, а вероятности каждой из двух других значений дискретной шкалы измерений приняты равными 0,2.

Результаты парных сравнений представлены в табл. 1 (МПС и результаты ее обработки *методами сложения, перемножения и методом, основанным на аксиоме Льюиса* [10]).

Таблица №1

Матрица парных сравнений неидеального эксперта, и ранжирование

Парные сравнения, d_{gh}	Планы распределения, h						Вес			Ранги			Сумм. рангов	Средний ранг	
	1	2	3	4	5	6	Слож.	Перем.	Лью.	Слож	Пер.	Лью			
Планы распределен, g	1	2	3	2	2	3	3	15	216	0,250	1.5	1	1	3.5	1
	2	1	2	3	3	1	1	11	18	0,094	3.5	3.5	3	10	3
	3	2	1	2	3	1	1	10	12	0,088	5.5	5.5	5	16	5
	4	2	1	1	2	3	1	10	12	0,088	5.5	5.5	6	17	6
	5	1	3	3	1	2	1	11	18	0,094	3.5	3.5	4	11	4
	6	1	3	3	3	3	2	15	162	0,188	1.5	2	2	5.5	2

После построения МПС проверяется транзитивность отношений, представленных в ней (блок 11). На рис. 4 приведены два графа отношений планов, построенных для идеального эксперта (а) и неидеального (б), где стрелки направлены от более предпочтительных объектов к менее предпочтительным (для пар, имеющих оценки 3).

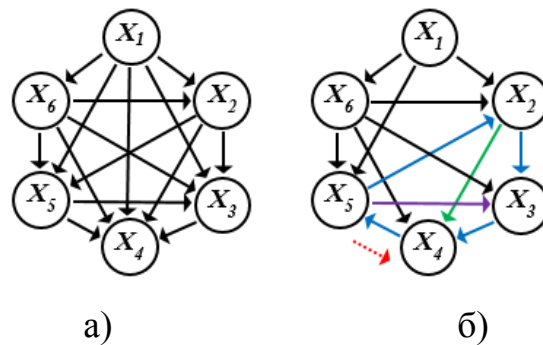


Рис. 4. Графы отношений шести вариантов планов распределения ресурсов (СиС) для идеального (а) и неидеального (б) эксперта

Нарушение транзитивности проявляется в появлении цикла на графе отношений. Граф идеального эксперта не содержит циклов, а значит все отношения между сравниваемыми планами транзитивны (не противоречивы). Граф, построенный по МПС, заполненной неидеальным экспертом, содержит

несколько циклов (на рис. 4б стрелки циклов выделены синим, зеленым и фиолетовым цветом).

В соответствии с логикой алгоритма, при нарушении транзитивности эксперт должен вновь выполнить оценивание проблемных пар (блоки 12, 13) до тех пор, пока не будет восстановлена транзитивность. В модельном примере в МИС табл. 1 приведены исходные парные оценки. Проблемные отношения, участвующие во всех трех выявленных циклах в табл. 1 выделены оранжевым цветом. После восстановления транзитивности данные отношения поменяются на противоположные (на рис. 4б - красная пунктирная стрелка).

Обработка МПС (блок 14) заключается в вычислении весов каждой альтернативы (p_g), а по ним и рангов альтернатив (r_g). Каждый из методов (k) обработки МПС может приводить к своим ранжировкам ($R^k = [r_1^k \ r_2^k \ \dots \ r_G^k]^T$) объектов. Для сглаживания методических погрешностей в практике экспертного оценивания принято усреднять ранжировки, полученные каждым из методов. В табл. 1 приведены все расчеты по неисправленной МПС, но заметим, что в нашем модельном эксперименте полученные по ней средние ранги альтернатив совпали с аналогичными рангами для идеального эксперта. После восстановления транзитивности и пересчета средних рангов ранжировки для идеального и неидеального экспертов имеют следующий вид:

$$\begin{cases} R_{\text{идеал}} = [\mathbf{1} \ 3 \ 5 \ 6 \ 4 \ \mathbf{2}]^T \\ R_{\text{неидеал}} = [\mathbf{1} \ 4 \ 5 \ 6 \ 3 \ \mathbf{2}]^T \end{cases} \quad (9)$$

Как видно, первые два места в обеих ранжировках занимают соответственно план X_1 и план X_6 (см. (7)). Полученные результаты (блок 15) означают, что даже, если эксперт не является идеальным измерительным прибором с существенной вероятностью ошибки (0,4), в качестве оптимального будет выбран план распределения СиС X_1 , который

соответствует и оптимальному моделируемому (истинному) варианту.

Выводы

Предложенный алгоритм выбора оптимального плана распределения СиС на пожаре позволяет:

- структурировать процесс выбора плана распределения СиС, разбив его на ряд элементарных процедур;
- автоматически выполнить подготовительную часть процедур по формированию множества альтернативных планов распределения СиС на основе представления задачи выбора в форме транспортной модели;
- выполнить парные сравнения альтернативных планов в интерактивном режиме с ЛПР-экспертом на основе использования парных сравнений, чем обеспечивается максимальная надежность выбора оптимального варианта распределения СиС.

Литература

1. Fertier A. Barthe-Delanoë A.-M., Montarnal A., Truptil S., Bénaben F. A new emergency decision support system: the automatic interpretation and contextualisation of events to model a crisis situation in real-time // Decision Support Systems. Volume 133. 2020. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923620300154](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923620300154).
 2. Cavdur F., Sebatli A. A decision support tool for allocating temporary-disaster-response facilities // Decision Support Systems. Volume 127. 2019. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923619301745](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923619301745).
 3. Терехнев В.В., Терехнев А.В. Управление силами и средствами на пожаре. М.: Академия ГПС МЧС России, 2003. 261 с.
 4. Брушлинский Н.Н. Моделирование оперативной деятельности пожарной службы. М.: Стройиздат, 1981. 96 с.
 5. Брушлинский Н.Н., Брушлинская Г.К. О продолжительности и частоте одновременного обслуживания нескольких вызовов пожарными
-

подразделениями города // Сборник научных трудов «Вопросы экономики в пожарной охране». М.: ВНИИПО МВД СССР, 1975, №4. С. 34-38.

6. Пожарные МЧС Москвы выезжали на вызовы почти 30 тысяч раз в первом полугодии 2016 года. URL: riamo.ru/article/151912/pozharnye-mchs-moskvy-vyezshali-na-vyzovy-pochti-30-tysyach-raz-v-pervom-polugodii-2016-goda.xl.

7. Топольский Н.Г., Бутузов С.Ю., Вилисов В.Я. Информационно-аналитические модели поддержки управления при ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций. М.: Академия ГПС МЧС России, 2021. 201 с.

8. Таха Х. Введение в исследование операций. М.: Изд. дом Вильямс, 2005. 912 с.

9. Нечитайло Н.М., Панасов В.Л., Линденбаум Т.М. Оптимизация назначения средств доставки в транспортных задачах по критерию времени // Инженерный вестник Дона, 2021, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2021/6840.

10. Орлов А.И. Организационно-экономическое моделирование. Экспертные оценки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 486 с.

11. Сидоров М.В., Сидоров В.Н. Имитационное моделирование работы трансмиссии трактора МТЗ-82 в среде Simulink // Инженерный вестник Дона, 2020, №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6709.

References

1. Fertier A. Barthe-Delanoë A.-M., Montarnal A., Truptil S., Bénaben F. Decision Support Systems. Volume 133. 2020. URL: sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923620300154.

2. Cavdur F., Sebatli A. Decision Support Systems. Volume 127. 2019. URL: sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923619301745.

3. Terebnev V.V., Terebnev A.V. Upravlenie silami i sredstvami na pozhare [Management of forces and means in a fire]. М.: Akademiya GPS MCHS Rossii, 2003. 261 p.



4. Brushlinskij N.N. Modelirovanie operativnoj deyatel'nosti pozharnoj sluzhby [Modeling the operational activities of the fire service]. M.: Strojizdat, 1981. 96 p.
5. Brushlinskij N.N., Brushlinskaya G.K. Sbornik nauchnyh trudov "Voprosy ekonomiki v pozharnoj ohrane" (Collection of scientific papers "Questions of economics in fire protection"). M.: VNIPO MVD SSSR, 1975, №4. pp. 34-38.
6. Pozharnye MCHS Moskvy vyezjali na vyzovy pochni 30 tysyach raz v pervom polugodii 2016 goda. [Firefighters of the Moscow Emergencies Ministry went on calls almost 30 thousand times in the first half of 2016]. URL: riamo.ru/article/151912/pozharnye-mchs-moskvy-vyezjali-na-vyzovy-pochni-30-tysyach-raz-v-pervom-polugodii-2016-goda.xl.
7. Topol'skij N.G., Butuzov S.YU., Vilisov V.YA. Informacionno-analiticheskie modeli podderzhki upravleniya pri likvidacii pozharov i chrezvychajnyh situacij [Information and analytical models of management support in the elimination of fires and emergencies]. M.: Akademiya GPS MCHS Rossii, 2021. 201 p.
8. Taha H. Vvedenie v issledovanie operacij [Introduction to Operations Research]. M.: Izd. dom Vil'yams, 2005. 912 p.
9. Nechitajlo N.M., Panasov V.L., Lindenbaum T.M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2021/6840.
10. Orlov A.I. Organizacionno-ekonomicheskoe modelirovanie. Ekspertnye ocenki [Organizational and economic modeling. Expert assessments]. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2011. 486 p.
11. Sidorov M.V., Sidorov V.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020, №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6709.