

# АДАПТАЦИЯ МЕТОДОВ СЕМЕЙСТВА ELECTRE ДЛЯ ВКЛЮЧЕНИЯ В ЭКСПЕРТНУЮ СИСТЕМУ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

**Т.К. КРАВЧЕНКО**

доктор экономических наук, профессор, заведующая кафедрой бизнес-аналитики,  
школа бизнес-информатики, факультет бизнеса и менеджмента,  
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
Адрес: 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20  
E-mail: tkravchenko@hse.ru

**А.А. ДРУЖАЕВ**

кандидат технических наук, доцент кафедры бизнес-аналитики,  
школа бизнес-информатики, факультет бизнеса и менеджмента,  
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
Адрес: 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20  
E-mail: druzhaev@hse.ru

Аналитическое обоснование вариантов решений с использованием систем поддержки принятия решений (СППР) существенно повышает качество принимаемых решений. Использование существующих в настоящее время СППР, как правило, включающих в себя один-два метода принятия решений, не всегда приводит к желаемым результатам, поскольку каждый метод основан на определенных предпосылках и не является универсальным. Наибольший эффект достигается в том случае, когда в базу знаний СППР включается множество методов принятия решений. Единственной системой, которая отвечает данным требованиям, является Экспертная система поддержки принятия решений (ЭСППР), разработанная под руководством автора статьи. В настоящее время ЭСППР включает в себя около 50 методов принятия решений. Расширение базы знаний ЭСППР путем включения в нее новых методов позволит для каждой задачи принятия решения подобрать наиболее подходящий метод.

Дополнение модели «таблица решений», лежащей в основе базы знаний системы, позволяет развивать ЭСППР, не перерабатывая полностью программный код системы. База знаний системы содержит правила решения, построенные по принципу «если – то» (если выполняются такие-то условия принятия решения, то следует применить такой-то метод принятия решения). Для расширения базы знаний ЭСППР выбраны методы семейства ELECTRE. Основанием для выбора служит их ключевая особенность, заключающаяся в том, что они не используют операцию свертки оценок альтернатив, заданных в разных шкалах по отдельным критериям. В статье адаптированы алгоритмы методов семейства для включения в ЭСППР.

Результаты исследования могут быть использованы для развития ЭСППР, позволяя аналитически обосновывать варианты решений с применением методов, которые ранее в системе не использовались.

**Ключевые слова:** принятие решений, информационная система, Экспертная система поддержки принятия решений (ЭСППР), методы семейства ELECTRE, адаптация алгоритмов, база знаний ЭСППР.

**Цитирование:** Кравченко Т.К., Дружаев А.А. Адаптация методов семейства ELECTRE для включения в Экспертную систему поддержки принятия решений // Бизнес-информатика. 2015. № 2 (32). С. 69–78.

## 1. Введение

Среди информационно-аналитических систем особое место занимают системы поддержки принятия решений (СППР), основанные на использовании методов теории принятия решений. Под СППР обычно понимают интерактивные компьютерные системы, которые помогают лицу, принимающему решение (ЛПР), использовать информацию и модели для решения слабоструктурированных или трудноформализуемых задач [1; 2].

К числу наиболее известных СППР относятся Super Decisions, Decisions Lens, Expert Choice, Экспертная система поддержки принятия решений (ЭСППР) [3; 4]. Первые две системы используют метод анализа иерархий (МАИ) и метод аналитических сетей (МАС) Т.Л. Саати [5; 6]. Системы Expert Choice, Император 3.1, Эксперт, OPTIMUM, Выбор, MPRIORITY, WinEXP+, используют только МАИ [3].

Важной особенностью Экспертной системы поддержки принятия решений (ЭСППР) является ее универсальность: эта система содержит более 50 методов принятия решений, включая методы принятия решений в условиях риска и неопределенности, предусматривающие моделирование проблемных ситуаций принятия решений. Отличительной особенностью системы является также то, что она содержит базу знаний: набор правил выбора методов принятия решений для обоснования альтернатив в зависимости от условий принятия решения. При помощи системы можно осуществлять многомерный анализ решаемых задач и формирование аналитических отчетов с использованием OLAP-сервера.

Для дальнейшего развития ЭСППР использовано семейство методов ELECTRE. Одной из ключевых особенностей этих методов является возможность использования оценок альтернатив в различных единицах измерения и/или с разными масштабами.

### Методы семейства ELECTRE

Методы семейства ELECTRE включают в себя ELECTRE I, ELECTRE Iv, ELECTRE IS, ELECTRE II, ELECTRE III, ELECTRE IV, ELECTRE TRI. Автором базового метода семейства ELECTRE является профессор В.Рой [7]. Алгоритмы перечисленных методов подробно описаны в работах [8–10].

Каждый метод семейства обладает индивидуальными особенностями, что делает их применение

наиболее эффективным для различных типов задач принятия решений. Методы ELECTRE I и ELECTRE Iv являются базовыми методами семейства. Основными недостатками базовых методов являются отсутствие возможности получения полного ранжирования альтернатив. Однако процедура решения задач с применением базовых методов является достаточно быстрой, так как требуется минимальный набор исходных данных. Таким образом, базовые методы наиболее эффективны, если требуется произвести быстрое ранжирование альтернатив с низкой точностью или невозможно найти подходящего эксперта, который достаточно компетентен, чтобы подготовить исходные данные для других методов семейства.

Методы ELECTRE IS и ELECTRE II последовательно развивают базовые методы семейства, благодаря использованию псевдокритериев и процедуры дистилляции альтернатив. Наиболее эффективным является метод ELECTRE III, использующий преимущества методов ELECTRE IS и ELECTRE II.

В статье адаптированы (описаны в терминах ЭСППР и приведены к виду, удобному для разработки программного обеспечения) алгоритмы методов ELECTRE IS, ELECTRE II и ELECTRE III, с целью включения в ЭСППР.

## 2. Особенности метода ELECTRE IS

Для описания метода введем условные обозначения исходных данных:  $X_1, X_2, \dots, X_l$  – множество альтернатив;  $K_1, K_2, \dots, K_L$  – множество критериев (для каждого критерия задается также его направление: максимизация или минимизация);  $Z_1, Z_2, \dots, Z_L$  – множество весов критериев (веса нормированы);  $F_{il}$  – оценка альтернативы  $X_i$  по критерию  $K_l$ , элементы  $F_{il}$  образуют матрицу «критерии–альтернативы»;  $X_i S X_k$  – «альтернатива  $X_i$  не хуже чем  $X_k$ » – логическое отношение, которое может иметь значения «истина» или «ложь». Вето-граница для  $l$ -го критерия –  $v_l$  обозначает критичную разницу между оценками альтернатив по  $l$ -му критерию, которая позволяет наложить вето на утверждение о том, что одна альтернатива «не хуже» другой. Граница безразличия для  $l$ -го критерия –  $q_l$  обозначает разницу между оценками двух альтернатив по  $l$ -му критерию, которая несущественна для лица, принимающего решение (ЛПР). Граница предпочтения для  $l$ -го критерия –  $p_l$  обозначает разницу между оценками двух альтернатив по  $l$ -му критерию, которая

существенна для ЛПР и позволяет сделать вывод о строгом превосходстве одной альтернативы над другой по данному критерию. Оценка  $p_l$  должна быть всегда больше  $q_l$ .  $\eta$  – коэффициент, который применяется к уровню границы безразличия  $q_l$  для его корректировки в процессе определения «ситуации вето».  $s$  – уровень согласия, который считается минимально достаточным для определения отношения  $X_i SX_k$ .  $SO(X_i, X_k)$  – индекс согласия между альтернативами  $X_i$  и  $X_k$ .

Ключевым отличием метода ELECTRE IS является использование псевдокритериев. Концепция псевдокритериев основывается на том, что оценки альтернатив не обладают абсолютной точностью и разница между оценками альтернатив может трактоваться по-разному. В этих целях в методе ELECTRE IS используются «границы безразличия и предпочтения», которые позволяют учитывать степень превосходства одной альтернативы над другой по каждому критерию.

Процедура ранжирования альтернатив методом ELECTRE IS базируется на последовательном парном сравнении альтернатив. Для каждой пары альтернатив вычисляется индекс согласия  $SO(X_i, X_k)$  следующим образом: относительно критериев с направлением «максимизация» индекс согласия  $SO_+(X_i, X_k)$  равен сумме весов всех критериев, по которым альтернатива  $X_i$  лучше, чем  $X_k$ . Если разница между оценками альтернатив  $X_i$  и  $X_k$  по критерию  $l$  меньше границы безразличия, то его вес не учитывается. Если разница между оценками альтернатив  $X_i$  и  $X_k$  по критерию  $l$  больше или равна границе безразличия, но меньше границы предпочтения, то его вес учитывается с понижающим коэффициентом  $\varphi_l(X_i, X_k)$ . Если разница между оценками альтернатив  $X_i$  и  $X_k$  по критерию  $l$  больше или равна границе предпочтения, то его вес учитывается с коэффициентом 1.

$$SO_+(X_i, X_k) = \sum_{l=1}^L Z_l \{l: F_{il} - F_{kl} \geq p_l\} + \sum_{l=1}^L \varphi_l(X_i, X_k) \cdot Z_l \{l: q_l \leq F_{il} - F_{kl} < p_l\},$$

где  $\varphi_l = \frac{F_{il} - F_{kl} - q_l}{p_l - q_l}$ .

Относительно критериев с направлением «минимизация» индекс согласия  $SO_-(X_i, X_k)$  равен сумме весов всех критериев, по которым альтернатива  $X_k$  лучше, чем  $X_i$ . Если разница между оценками альтернатив  $X_k$  и  $X_i$  по критерию  $l$  меньше границы безразличия, то его вес не учитывается. Если разница

между оценками альтернатив  $X_k$  и  $X_i$  по критерию  $l$  больше или равна границе безразличия, но меньше границы предпочтения, то его вес учитывается с понижающим коэффициентом  $\varphi_l(X_i, X_k)$ . Если разница между оценками альтернатив  $X_k$  и  $X_i$  по критерию  $l$  больше или равна границе предпочтения, то его вес учитывается с коэффициентом 1:

$$SO_-(X_i, X_k) = \sum_{l=1}^L Z_l \{l: F_{kl} - F_{il} \geq p_l\} + \sum_{l=1}^L \varphi_l(X_i, X_k) \cdot Z_l \{l: q_l \leq F_{kl} - F_{il} < p_l\},$$

где  $\varphi_l = \frac{F_{kl} - F_{il} - q_l}{p_l - q_l}$ .

Индекс согласия  $SO(X_i, X_k)$  по всем критериям (с направлением максимизация и с направлением минимизация):

$$SO(X_i, X_k) = SO_+(X_i, X_k) + SO_-(X_i, X_k).$$

Далее для каждой пары альтернатив по каждому критерию проверяется наличие ситуации вето. Ситуация вето для критериев с направлением «максимизация» возникает в случае, если  $F_{kl} - F_{il} \geq v_l - q_l \cdot \eta$ , а для критериев с направлением «минимизация» – если  $F_{il} - F_{kl} \geq v_l - q_l \cdot \eta$ ,

$$\text{где: } \eta = \frac{1 - SO(X_i, X_k)}{1 - s}.$$

$\eta$  – коэффициент, который применяется к уровню границы безразличия  $q_l$  для его корректировки в процессе определения «ситуации вето». Чем больше та величина, на которую индекс согласия  $SO(X_i, X_k)$  превосходит уровень согласия  $s$ , тем меньше  $\eta$ , а, соответственно, и вероятность возникновения ситуации вето (т.к. значение  $q_l \cdot \eta$  уменьшается).

Если индекс согласия  $SO(X_i, X_k)$  выше или равен заданному уровню согласия  $s$ , то между альтернативами  $X_i$  и  $X_k$  возникает отношение  $X_i SX_k$ . Если хотя бы по одному критерию между альтернативами существует ситуация вето, то отношение  $S$  между ними возникнуть не может.

### 3. Особенности метода ELECTRE II

В методе ELECTRE II применяются два уровня согласия  $s^1$  и  $s^2$  для определения двух порядков ранжирования альтернатив. Для определения отношения предпочтения  $S$  первого порядка применяется уровень согласия  $s^1$ , а для второго – уровень  $s^2$ . В первом порядке ранжирования ( $S^1$ ) остаются только самые «сильные» отношения предпочте-

ния. Для того, чтобы второй порядок ранжирования ( $S^2$ ) включал «слабые и сильные» отношения предпочтения, следует задавать уровень согласия  $s^1$  больше, чем  $s^2$ : чем меньше уровень согласия, тем ниже требования к величине индекса согласия для определения отношения  $S$  между альтернативами.

Метод ELECTRE II позволяет осуществлять полное ранжирование, благодаря использованию процедуры дистилляции альтернатив: наилучшей альтернативой считается та, которая предпочитается наибольшему количеству альтернатив, а наихудшей – та, которая предпочитается наименьшему количеству альтернатив.

Процедура ранжирования альтернатив методом ELECTRE II базируется на последовательном сравнении каждой пары альтернатив, для которых производится расчет индекса согласия и проверка ситуации вето. Ситуация вето возникает в следующих случаях: для критериев с направлением «максимизация» разница между оценками альтернатив  $X_k$  и  $X_i$  по критерию  $l$  превышает или равна его вето-границе  $v_l$ :  $F_{ki} - F_{il} \geq v_l$ ; для критериев с направлением «минимизация» разница между оценками альтернатив  $X_i$  и  $X_k$  по критерию  $l$  превышает или равна его вето-границе  $v_l$ :  $F_{il} - F_{ki} \geq v_l$ , где  $l$  – номер критерия,  $F_{il}$  и  $F_{ki}$  – оценки сравниваемых альтернатив по критерию  $l$ .

Если индекс согласия  $SO(X_i, X_k)$  выше или равен заданному уровню согласия  $s^1$ , то между альтернативами  $X_i$  и  $X_k$  возникает отношение  $X_i S^1 X_k$ . Если хотя бы по одному критерию между альтернативами возникает ситуация вето, то отношение  $S^1$  между ними возникнуть не может.

Если индекс согласия  $SO(X_i, X_k)$  выше или равен заданному уровню согласия  $s^2$ , то между альтернативами  $X_i$  и  $X_k$  возникает отношение  $X_i S^2 X_k$ . Если хотя бы по одному критерию между альтернативами возникает ситуация вето, то отношение  $S^2$  между ними возникнуть не может.

Заключительным этапом ранжирования альтернатив с использованием метода ELECTRE II является процедура дистилляции альтернатив. Обозначим через  $r_{X_k}$  количество альтернатив  $X_k$ , которым предпочитается альтернатива  $X_i$ :  $X_i S^1 X_k$ , причем  $k \neq i$ .

В первую очередь, определяется множество  $D_1$ , в которое входят все наилучшие альтернативы, предпочитаемые наибольшему числу других альтернатив по отношению  $S^1$  (формируется экспертным

путем на основе значений  $r_{X_k}$ ). Если множество  $D_1$  содержит больше одной альтернативы, то значение  $r_{X_k}$  для них вычисляется повторно.

При повторном вычислении рассматриваются только те альтернативы, которые входят в множество  $D_1$ . На основании повторно вычисленных значений  $r_{X_k}$  формируется новое множество наилучших альтернатив  $D_2$  по отношению  $S^1$ .

Процедура повторяется до тех пор, пока не будет определена единственная наилучшая альтернатива или не будет выделено несколько альтернатив, входящих во множество наилучших и имеющих одинаковое значение  $r$ . Наилучшая альтернатива (или несколько альтернатив) получает ранг 1 и удаляется из рассмотрения. Далее процедура дистилляции повторяется снова для определения альтернативы с рангом 2 и так далее до тех пор, пока все альтернативы не будут полностью проранжированы.

Если несколько альтернатив имеют ранг 1 и не могут быть проранжированы с помощью процедуры дистилляции, то они формируют множество  $N$ , в котором все альтернативы считаются равнозначными. Если необходимо проранжировать элементы множества  $N$ , то между альтернативами в данном множестве определяется отношение предпочтения  $S^2$ , с помощью которого можно повторить процедуру дистилляции на множестве  $N$ .

Процедура определения отношения предпочтения  $S^2$  аналогична процедуре, используемой для определения отношения предпочтения  $S^1$ . Однако для ее применения используется уровень согласия  $s^2$ . Таким образом, между альтернативами возникает отношение  $S^2$ , если индекс согласия выше или равен заданному уровню согласия  $s^2$ .

Так как уровень согласия  $s^1 > s^2$ , отношение предпочтения  $S^2$  позволяет ЛПП выявить более «слабые» отношения предпочтения. Таким образом, отношения предпочтения  $S^2$  могут помочь ЛПП сделать выбор между альтернативами, которые считаются равнозначными исходя из ранжирования с использованием отношения предпочтения  $S^1$ .

#### 4. Особенности метода ELECTRE III

В качестве дополнительного условного обозначения в данном методе используется индекс согласия  $SO_l(X_i, X_k)$  между альтернативами  $X_i$  и  $X_k$  по критерию  $l$ . Общее отношение предпочтения обозна-

чается  $PR$ . Граница отношения предпочтения  $\lambda$  – значение  $PR$ , которое ЛПП считает минимально достаточным для определения отношения  $S$  между двумя альтернативами.  $NE_l(X_i, X_k)$  – индекс несогласия по каждому критерию  $l$ .  $ND(X_i, X_k)$  – общее отношение не-несогласия.

Высокая точность ранжирования метода ELECTRE III достигается, благодаря возможности использования нескольких псевдокритериев (см. метод ELECTRE IS) и процедуре дистилляции альтернатив (см. метод ELECTRE II). Использование псевдокритериев позволяет учесть неструктурированные данные при ранжировании альтернатив, а процедура дистилляции – присвоить каждой альтернативе свой ранг.

Процедура ранжирования альтернатив методом ELECTRE III базируется на последовательном сравнении каждой пары альтернатив.

Для критериев с направлением «максимизация» индекс согласия  $SO_l(X_i, X_k)$  по каждому признаку рассчитывается по следующей формуле:

$$SO_l(X_i, X_k) = \begin{cases} 1, & \text{if } F_{il} - F_{kl} \geq p_l \\ \frac{F_{il} - F_{kl}}{p_l}, & \text{if } q_l < F_{il} - F_{kl} < p_l \\ 0, & \text{if } F_{il} - F_{kl} \leq q_l. \end{cases}$$

Аналогично для критериев с направлением «минимизация»:

$$SO_l(X_i, X_k) = \begin{cases} 1, & \text{if } F_{kl} - F_{il} \geq p_l \\ \frac{F_{kl} - F_{il}}{p_l}, & \text{if } q_l < F_{kl} - F_{il} < p_l \\ 0, & \text{if } F_{kl} - F_{il} \leq q_l, \end{cases}$$

где  $F_{kl}$  – оценка альтернативы  $X_k$  по критерию  $l$ ,  $F_{il}$  – оценка альтернативы  $X_i$  по критерию  $l$ ,  $q_l$ ,  $p_l$  – границы безразличия и предпочтения для критерия  $l$ .

Индекс согласия по критерию  $l$  может принимать значение от 0 до 1. Если  $SO_l(X_i, X_k) = 1$ , то « $X_i$  строго лучше  $X_k$  по критерию  $l$ »; если  $SO_l(X_i, X_k)$  принимает значения в пределах от 0 до 1, имеем «нестрогое предпочтение»; если  $SO_l(X_i, X_k) = 0$  – нет предпочтения.

Далее вычисляется индекс несогласия  $NE_l(X_i, X_k)$  по каждому критерию  $l$ .

Для критериев с направлением «максимизация»:

$$NE_l(X_i, X_k) = \begin{cases} 0, & \text{if } F_{kl} - F_{il} \leq q_l \\ \frac{F_{kl} - F_{il}}{v_l}, & \text{if } q_l < F_{kl} - F_{il} < v_l \\ 1, & \text{if } F_{kl} - F_{il} \geq v_l. \end{cases}$$

Для критериев с направлением «минимизация»:

$$NE_l(X_i, X_k) = \begin{cases} 0, & \text{if } F_{il} - F_{kl} \leq q_l \\ \frac{F_{il} - F_{kl}}{v_l}, & \text{if } q_l < F_{il} - F_{kl} < v_l \\ 1, & \text{if } F_{il} - F_{kl} \geq v_l, \end{cases}$$

где  $F_{kl}$  – оценка альтернативы  $X_k$  по критерию  $l$ ,  $F_{il}$  – оценка альтернативы  $X_i$  по критерию  $l$ ,  $q_l$  – граница безразличия для критерия  $l$ ,  $v_l$  – вето-граница для критерия  $l$ .

Индекс несогласия  $NE_l(X_i, X_k)$  может принимать значение от 0 до 1. Значение 0 означает: «нет оснований полагать, что альтернатива  $X_i$  хуже альтернативы  $X_k$  по критерию  $l$ ». Если индекс несогласия  $NE_l(X_i, X_k)$  принимает значения в пределах от 0 до 1, то «существуют основания полагать, что альтернатива  $X_i$  хуже альтернативы  $X_k$ ». Если  $NE_l(X_i, X_k) = 1$ , то критерий  $l$  накладывает вето на утверждение, что альтернатива  $X_i$  лучше, чем  $X_k$ .

Для оценки того, насколько одна альтернатива лучше другой по всем критериям, используется общий индекс согласия

$$C(X_i, X_k) = \sum_{l=1}^L Z_l \cdot SO_l(X_i, X_k),$$

где  $Z_l$  – веса критериев.

Если  $C(X_i, X_k) = 1$ , то альтернатива  $X_i$  имеет строгое предпочтение альтернативе  $X_k$  по всем критериям, если  $C(X_i, X_k) = 0$ , то нет оснований полагать, что альтернатива  $X_i$  лучше альтернативы  $X_k$ .

Для того чтобы оценить, насколько одна альтернатива хуже другой по всем критериям, используется общее отношение не-несогласия  $ND(X_i, X_k)$ :

$$ND(X_i, X_k) = \prod_{l: NE_l(X_i, X_k) > C(X_i, X_k)} \frac{1 - NE_l(X_i, X_k)}{1 - C(X_i, X_k)}.$$

Общее отношение не-несогласия может принимать значение от 0 до  $+\infty$ . Если  $ND(X_i, X_k) = 0$ , то, как минимум один критерий накладывает вето на утверждение, что альтернатива  $X_i$  лучше, чем  $X_k$ . Если отношение не-несогласия стремится к  $+\infty$ , то по всем критериям  $SO_l(X_i, X_k) = 1$ . Соответственно, чем меньше значение общего отношения не-несогласия  $ND(X_i, X_k)$ , тем меньше оснований утверждать, что альтернатива  $X_i$  хуже, чем  $X_k$ .

Для того, чтобы определить наличие отношения  $S$  между двумя альтернативами, требуется одновременно учесть два основных аспекта сравнения: отношение согласия и отношение не-несогласия. Учет отношения согласия и не-несогласия реали-

зует величина *общего отношения предпочтения PR* по соответствующей паре альтернатив:

$$PR(X_i, X_k) = ND(X_i, X_k) \cdot C(X_i, X_k).$$

*PR* принимает значение от 0 до  $+\infty$ ,  $PR = 0$  в том случае, если, как минимум, один критерий накладывает вето на утверждение, что альтернатива  $X_i$  лучше, чем  $X_k$  ( $ND(X_i, X_k) = 0$ ) и/или нет оснований полагать, что альтернатива  $X_i$  лучше альтернативы  $X_k$  ни по одному из критериев ( $C(X_i, X_k) = 0$ ). Согласно методу ELECTRE III, альтернатива  $X_i$  считается «не хуже чем»  $X_k$ , если значение  $PR(X_i, X_k)$  не меньше границы отношения предпочтения  $\lambda$ . Чем выше  $\lambda$ , тем выше «строгость» ранжирования альтернатив. Заключительным этапом ранжирования альтернатив с использованием метода ELECTRE III является процедура дистилляции альтернатив (см. метод ELECTRE II).

#### 5. Формирование матрицы «критерии – альтернативы» в условиях неопределенности условий принятия решения

Методы семейства ELECTRE применяются в условиях определенности. Однако для заполнения матрицы «критерии – альтернативы» не всегда имеются объективные данные, особенно если решение принимается на перспективу и существует неопределенность в условиях принятия решения. В этом случае предлагается разработать возможные проблемные ситуации, в которых может оказаться ЛПР, используя следующие подходы: имитационное моделирование, экспертное прогнозирование, когнитивное моделирование, моделирование на основе таблиц решений [11].

Для работы с имитационной моделью необходимо задать набор условий, воздействующих на формирование проблемных ситуаций, а также выявить зависимости, характеризующие возникновение тех или иных проблемных ситуаций в результате взаимодействия учитываемых условий. Тогда можно попытаться получить ответ на вопрос, какова будет проблемная ситуация, если результаты проверки условий в период прогноза примут определенные значения. Если же в формальном виде описать такие зависимости не удастся, то моделирование проблемных ситуаций чаще всего осуществляется на основе экспертного прогнозирования.

Качественный экспертный прогноз может быть разработан лишь в том случае, если он основательно подготовлен, задействованы компетентные специали-

сты, использована достоверная информация, оценки получены корректно и обработаны эффективно.

Когнитивное моделирование проблемных ситуаций основано на понятии когнитивной карты – ориентированного графа. Вершины когнитивной карты соответствуют условиям принятия решения, ориентированные ребра – причинно-следственным связям между условиями. Исторически первой когнитивной моделью был знаковый граф, затем появились нечеткие когнитивные карты. Существенным продвижением явилось создание модели когнитивной карты, управляемой нечеткими правилами. Благодаря наличию множества модификаций когнитивных карт, можно говорить о различных типах моделей их использования.

На практике наиболее удобным оказалось моделирование проблемных ситуаций на основе функциональной модели процесса принятия решения – таблицы решений. Таблица решений (ТР) состоит из четырех разделов: условия, учитываемые при принятии решения (раздел II); действия, предпринимаемые в результате проверки условий (раздел III); правила решения (по столбцам I и IV разделов). Каждое правило решения показывает, какие действия из числа перечисленных в III разделе, выполняются в каждой проблемной ситуации, определяемой конкретным сочетанием результатов проверки условий.

Для получения элементов матрицы «критерии – альтернативы» обращаются к экспертам, которые в количественной шкале (наиболее часто используются 10-балльные шкалы) задают оценки вариантов решения по каждому признаку в каждой проблемной ситуации. Мнения экспертов затем усредняются, чтобы получить согласованные оценки альтернатив по каждому признаку. В качестве исходных данных используются:

- ◆ множество альтернатив  $X_i, i = 1, \dots, I$ ;
- ◆ множество критериев  $K_l$  (с направлением максимизации или минимизации) и коэффициентами относительной значимости каждого критерия  $Z_l, l = 1, \dots, L$  (коэффициенты относительной значимости  $Z_l$  нормированы);
- ◆ множество проблемных ситуаций  $j, j = 1, \dots, J$ ;
- ◆ вероятности появления проблемных ситуаций  $P_j$ ,

$$\sum_{j=1}^J P_j = 1;$$

- ◆ множество экспертов  $d$  и коэффициенты компетентности экспертов  $W_d, d = 1, \dots, D$  (коэффициенты компетентности экспертов  $W_d$  нормированы).

Оценка  $i$ -альтернативы по  $l$ -критерию, выставленная  $d$ -экспертом в  $j$ -проблемной ситуации в

количественной шкале —  $F_{ildj}$ . Усредненные оценки альтернатив по каждому  $l$ -критерию обозначаются  $F_{il}$  и вычисляются по следующей формуле:

$$F_{il} = \sum_{j=1}^J \sum_{d=1}^D P_j \cdot W_d \cdot F_{ildj}, \quad i = 1, \dots, I, \quad l = 1, \dots, L.$$

Полученная матрица «критерии — альтернативы» может быть использована для всех методов семейства ELECTRE.

### 6. Встраивание новых методов в базу знаний ЭСППР

Как показал проведенный выше сравнительный анализ методов семейства, наиболее эффективным является метод ELECTRE III, который рекомендуется включить в ЭСППР. Учитывая, что матрица «критерии — альтернативы» на практике определяется преимущественно экспертным путем, введем в ЭСППР также комбинированный метод, использующий усредненную матрицу «критерии — альтернативы» в качестве исходной информации для метода ELECTRE III (алгоритм формирования матрицы приведен выше). Данный метод назовем  $PUR_qRou$  (по имени автора семейства методов ELECTRE).

При разработке модуля выбора метода принятия в зависимости от характеристик задачи принятия решения в ЭСППР также использовалась модель «таблица решений» (ТР). В этом случае в качестве условий, необходимых для выбора соответствующего метода, в ТР вводились вопросы об элементах задачи принятия решения, а входов условий — результаты проверки условий или возможные ответы на задаваемые вопросы (табл. 1). Раздел действий в ТР формируют различные методы принятия решения, включенные в ЭСППР (в табл. 1 не приведены).

Правила решения при такой трактовке ТР показывают, какие методы принятия решения должны выбираться в различных ситуациях, задаваемых различными комбинациями ответов на задаваемые вопросы об элементах задачи принятия решения. Совокупность решения и формирует базу знаний ЭСППР.

Для включения новых методов в систему может потребоваться изменить состав как вопросов, так и ответов. В данном случае в таблицу решения дополнительно включаются следующие ответы: на вопрос 2 «Принцип согласования оценок альтернатив в различных проблемных ситуациях с заданными вероятностями их появления» вводится ответ 2.3 «взвешенной суммы оценок альтернатив». Контекстная подсказка к ответу: «для согласования оценок альтернатив по  $l$ -признаку, заданных в различных

$j$ -проблемных ситуациях, используется принцип взвешенной суммы оценок альтернатив, причем весами служат вероятности  $j$ -ситуаций». На вопрос 7 «Принцип согласования оценок альтернатив, заданных отдельными экспертами» предлагается ответ 7.4 «взвешенной суммы оценок альтернатив». Контекстная подсказка к ответу: «для согласования оценок альтернатив по  $l$ -признаку, заданных отдельными экспертами, используется принцип взвешенной суммы оценок альтернатив, причем весами служат коэффициенты компетентности экспертов». На вопрос 10 «Принципы согласования оценок альтернатив по отдельным критериям (признакам)» предлагается ответ 10.5 «Принцип  $Rou$ ».

Для включения в ЭСППР метода  $PUR_qRou$  правило решения будет выглядеть следующим образом: если выбраны ответы 1.3, 2.3, 5.1, 6.2, 7.4, 8.2, 9.1, 10.5, 11.1, 12.1, 13.1 (их формулировка в таблице 1 выделена курсивом), то применяется метод  $PUR_qRou$ .

Для включения в ЭСППР метода ELECTRE III соответствующее правило решения будет выглядеть следующим образом: если выбраны ответы 1.1, 5.1, 6.1, 8.2, 9.1, 10.5, 11.1, 12.1, 13.1, то применяется метод ELECTRE III.

### 7. Заключение

В результате проведенного исследования были адаптированы алгоритмы методов ELECTRE IS, ELECTRE II, ELECTRE III — описаны в терминах Экспертной системы поддержки принятия решений (ЭСППР) и приведены к виду, удобному для разработки программного обеспечения.

Для включения в ЭСППР предложены методы ELECTRE III и комбинированный метод  $PUR_qRou$ , предполагающий предварительный расчет элементов матрицы «критерии — альтернативы», когда нет объективных данных для ее заполнения.

Разработаны новые правила решения для включения в ЭСППР методов ELECTRE III и  $PUR_qRou$  путем введения соответствующих ответов на задаваемые системой вопросы об элементах задачи принятия решения. Новые правила решения включены в управляющую таблицу решений, лежащую в основе построения экспертной оболочки системы.

Результаты исследования могут быть использованы для развития Экспертной системы поддержки принятия решений, позволяя аналитически обосновывать варианты решений с применением различных методов принятия решения. ■

Таблица 1.

Вопросы об элементах задачи принятия решения и их различные реализации (ответы)

Условия (вопросы)	Номер ответа	Входы условий (варианты ответов)
1. Информированность об условиях принятия решения	1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6	Одна проблемная ситуация. Несколько проблемных ситуаций с неизвестными вероятностями их появления. <i>Несколько проблемных ситуаций с заданными вероятностями их появления.</i> Несколько ненаблюдаемых проблемных ситуаций с заданными вероятностями их появления и вероятностями их взаимосвязи с наблюдаемыми событиями, им присущими. Несколько проблемных ситуаций, упорядоченных по степени достоверности их появления. На первом этапе решения задачи моделируется несколько проблемных ситуаций с неизвестными вероятностями их появления, на втором этапе ЛПР предпринимает попытку их оценить.
2. Принцип согласования оценок альтернатив в различных проблемных ситуациях с заданными вероятностями их появления	2.1 2.2 2.3	Принцип большинства. Принцип Байеса. <i>Принцип взвешенной суммы оценок альтернатив.</i>
3. Принцип согласования оценок альтернатив в различных проблемных ситуациях с неизвестными вероятностями их появления	3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 3.7	Принцип Парето. Принцип пессимизма. Принцип оптимизма. Принцип Гурвица. Принцип антагонистического игрока. Принцип Сэвиджа. Принцип Лапласа.
4. Принцип согласования оценок альтернатив в различных проблемных ситуациях задачи принятия решения в два этапа	4.1	На первом этапе для согласования оценок альтернатив в различных проблемных ситуациях применяется принцип Парето, на втором этапе – принцип большинства.
5. Информированность о последствиях принимаемого решения	5.1 5.2 5.3	<i>Полная определенность на одном этапе.</i> Частичная неопределенность на конечном множестве дискретных этапов. Частичная неопределенность на бесконечном множестве дискретных этапов.
6. Количество экспертов, привлекаемых к решению задачи	6.1 6.2	Один эксперт. <i>Несколько экспертов.</i>
7. Принцип согласования оценок альтернатив, заданных отдельными экспертами	7.1 7.2 7.3 7.4	Принцип большинства. Принцип Парето. На первом этапе решения задачи для согласования оценок альтернатив с позиций различных экспертов применяется принцип Парето, на втором этапе – принцип большинства. <i>Принцип взвешенной суммы оценок альтернатив.</i>
8. Количество признаков оценки альтернатив	8.1 8.2	Один признак. <i>Несколько признаков.</i>
9. Степень сравнимости признаков	9.1 9.2	<i>Признаки несравнимы.</i> Признаки сравнимы.
10. Принципы согласования оценок альтернатив по отдельным критериям (признакам)	10.1 10.2 10.3 10.4 10.5	Принцип большинства. Принцип Парето. Принцип последовательного рассмотрения критериев. Решение задачи в два этапа: на первом этапе для согласования оценок альтернатив с позиций различных критериев (признаков) применяется принцип Парето, на втором этапе – принцип большинства. <i>Принцип Roy.</i>
11. Способ задания оценок относительной значимости критериев	11.1 11.2	<i>Заданы веса критериев (признаков).</i> Признаки упорядочены по значимости.
12. Способ задания множества альтернатив	12.1 12.2	<i>Множество альтернатив конечно.</i> Множество альтернатив представлено в виде подмножества n-мерного пространства.
13. Способ задания предпочтений на множестве альтернатив	13.1 13.2	<i>Заданы количественные оценки альтернатив по каждому признаку.</i> Заданы порядковые оценки альтернатив по каждому признаку.



## Литература

1. Burstein F., Holsapple C.W. Handbook on decision support systems 1. Basic themes. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 833 p.
2. Трахтенгерц Э.А. Компьютерные системы поддержки принятия управленческих решений // Проблемы управления. 2003. № 1. С. 13–28.
3. Кравченко Т.К., Середенко Н.Н. Выделение признаков классификации систем поддержки принятия решений // Открытое образование. 2010. № 4. С. 71–79.
4. Кравченко Т.К. Экспертная система поддержки принятия решений // Открытое образование. 2010. № 6. С. 147–156.
5. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
6. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях. Аналитические сети. М.: ЛКИ, 2008. 360 с.
7. Roy B. Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE) // La Revue d'Informatique et de Recherche Opérationnelle (RIRO). 1968. No. 8. P. 57–75.
8. Roy B. The outranking approach and the foundation of ELECTRE methods // Theory and Decision. 1991. No. 31. P. 49–73.
9. Figueira J., Mousseau V., Roy B. ELECTRE methods / In: J.Figueira, S.Greco, M.Ehrgott (eds.) Multiple criteria decision analysis. State of the art surveys. Boston: Springer, 2005. P. 133–162.
10. Kangas A., Kangas J., Pykäläinen, J. Outranking methods as tools in strategic natural resources planning // Silva Fennica. 2001. No. 35 (2). P. 215–227.
11. Кравченко Т.К. Метод аналитических сетей при принятии решений в условиях неопределенности // Экономика и математические методы. 2012. Т. 48, № 4. С. 99–112.

## ADAPTATION OF ELECTRE FAMILY METHODS FOR THEIR INTEGRATION INTO THE EXPERT DECISION SUPPORT SYSTEM

**Tatiana K. KRAVCHENKO**

*Professor, Head of Department of Business Analytics, School of Business Informatics,  
Faculty of Business and Management, National Research University Higher School of Economics  
Address: 20, Myasnitskaya str., Moscow, 101000, Russian Federation  
E-mail: tkravchenko@hse.ru*

**Alexey A. DRUZHAEV**

*Associate Professor, Department of Business Analytics, School of Business Informatics,  
Faculty of Business and Management, National Research University Higher School of Economics  
Address: 20, Myasnitskaya str., Moscow, 101000, Russian Federation  
E-mail: druzhaev@hse.ru*

*Analytical justification of solutions using a decision support system (DSS) significantly increases the quality of decisions. The existing DSS generally employs 1 or 2 methods of decision-making. It does not always lead to the desired results as each method is based on certain assumptions and is not universal. The maximum effect can be achieved only insofar as a set of decision making methods is included into the knowledge base of the DSS. The only system that meets these requirements is an Expert decision support system (EDSS) developed under supervision of the author. Currently the EDSS includes about 50 methods of decision making. The expansion of the EDSS knowledge base by including new methods will allow choosing the most suitable method for solving each decision-making task.*

Addition of the «decision table» model underlying the system knowledge base allows you to develop the EDSS without a complete reworking of the system code. The system knowledge base contains decision rules built on the principle of «if... then...» (if given some definite conditions of decision making, then a certain method of decision-making should be employed). To expand the knowledge base the EDSS selected ELECTRE collection methods. Their key feature consists in the fact that they do not use the convolution operation of evaluation of the alternatives specified in different scales on individual criteria. This was the reason for selecting the methods of this family. In the article the algorithms of these methods are adapted for their inclusion in the EDSS. An algorithm for obtaining a criterion-alternative matrix is proposed. It serves as input information for the ELECTRE family methods in cases where there is no objective information for its formation.

The results of the study can be used to develop the EDSS, allowing analytical justification of solutions using methods that were not previously used in the system.

**Key words:** decision making, information system, Expert Decision Support System (EDSS), ELECTRE family methods, adaptation of algorithms, EDSS knowledge base.

**Citation:** Kravchenko T.K., Druzhaev A.A. (2015) Adaptacija metodov semejtva ELECTRE dlja vključenija v Ekspertnuju sistemu podderzhki prinjatija reshenij [Adaptation of ELECTRE family methods for their integration into the Expert Decision Support System]. *Business Informatics*, no. 2 (32), pp. 69–78 (in Russian).

#### References

1. Burstein F., Holsapple C.W. (2008) *Handbook on decision support systems 1. Basic themes*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
2. Trakhtengerts E.A. (2003) Komp'juternye sistemy podderzhki prinjatija upravlencheskih reshenij [Computer systems for management decisions support]. *Problems of management*, no. 1, pp. 13–28. (in Russian)
3. Kravchenko T.K., Seredenko N.N. (2010) Vydelenie priznakov klassifikacii sistem podderzhki prinjatija reshenij [Allocation of classification characteristics for decision support systems]. *Open education*, no. 4, pp. 71–79. (in Russian)
4. Kravchenko T.K. (2010) Ekspertnaja sistema podderzhki prinjatija reshenij [Expert based decision support system]. *Open education*, no. 6, pp. 147–156. (in Russian)
5. Saati T.L. (1993) *Prinjatie reshenij. Metod analiza ierarhij* [Decision making. Analytic hierarchy process]. Moscow: Radio i svyaz. (in Russian)
6. Saati T.L. (2008) *Prinjatie reshenij pri zavisimostjah i obratnyh svyazjah. Analiticheskie seti* [Decision making with relationships and feedbacks. Analytic network process]. Moscow: LKI. (in Russian)
7. Roy B. (1968) Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE). *La Revue d'Informatique et de Recherche Opérationnelle (RIRO)*, no. 8, pp. 57–75. (in French)
8. Roy B. (1991) The outranking approach and the foundation of ELECTRE methods. *Theory and Decision*, no. 31, pp. 49–73.
9. Figueira J., Mousseau V., Roy B. (2005) ELECTRE methods / In: J.Figueira, S.Greco, M.Ehrgott (eds.) *Multiple criteria decision analysis. State of the art surveys*. Boston: Springer, pp. 133–162.
10. Kangas A., Kangas J., Pykäläinen, J. (2001) Outranking methods as tools in strategic natural resources planning. *Silva Fennica*, no. 35 (2), pp. 215–227.
11. Kravchenko T.K. (2012) Metod analiticheskikh setej pri prinjatii reshenij v uslovijah neopredelennosti [Analytic network process for decision making under uncertainty]. *Economics and mathematical methods*, vol. 48, no. 4, pp. 99–112. (in Russian)