

УДК 519.816

**В. В. Цыганок**

Институт проблем регистрации информации НАН Украины  
ул. Н. Шпака, 2, 03113 Киев, Украина

## **Повышение устойчивости баз знаний систем поддержки принятия решений к погрешностям экспертного оценивания**

*Предложены два метода повышения количественного показателя устойчивости оценивания вариантов решений экспертных баз знаний систем поддержки принятия решений, в которых применяется метод целевого динамического оценивания альтернатив. Первый метод предполагает повышение устойчивости базы знаний — иерархии целей — за счет изменения в структуре иерархии. Вторым предполагает организовать обратную связь с группой разработчиков — экспертов и в ее процессе обеспечить необходимый уровень устойчивости за счет изменения количественных параметров базы знаний. Методы имеют смысл использовать последовательно в предложенном порядке или же отдельно друг от друга.*

**Ключевые слова:** системы поддержки принятия решений, метод целевого динамического оценивания альтернатив, устойчивость к ошибкам экспертов.

При поддержке принятия решений в слабо структурированных предметных областях, таких как государственное управление, бизнес, прогнозирование научно-технического прогресса и т.п., имеет место применение систем поддержки принятия решений (СППР) для оценивания потенциальной эффективности возможных вариантов решений лиц, принимающих решения (ЛПР). Такие СППР производят расчеты на основе знаний, полученных от специалистов — экспертов в конкретной предметной области, т.е. на основе данных из экспертных баз знаний (БЗ). В такой ситуации актуальным является вопрос, на сколько оценки вариантов решений, рассчитанные с помощью СППР, зависят от возможных ошибок экспертов. Другими словами, вопрос состоит в стабильности оценок вариантов решений, рассчитываемых на основе БЗ, ведь результат расчета оценок, который бы значительно изменялся при незначительных изменениях в экспертных суждениях, крайне нежелателен.

Вопросу оценки устойчивости уделено достаточно внимания в научной литературе [1–3], особенно в источниках, посвященных устойчивости метода анализа

иерархий [4] — наиболее распространенного в последние десятилетия благодаря своей простоте. Оценке устойчивости метода целевого динамического оценивания альтернатив [5] при расчете эффективности вариантов решений на основе экспертных БЗ, называемых в этом случае иерархиями целей, уделялось внимание в работах [6, 7]. После расчета предложенным в [7] способом числового показателя устойчивости иерархии целей, созданной на базе экспертной информации, возникает вопрос, что делать, если найденный уровень устойчивости не удовлетворяет изначально поставленным требованиям? Частично, ответом на этот вопрос может служить метод, описанный в данной статье.

Прежде всего, остановимся на понятии устойчивости, предложенном в [7], которое предполагает рассмотрение устойчивости в двух основных аспектах. Под устойчивостью оценок рассматриваемых вариантов решений при ранжировании понимается свойство сохранения порядка ранжирования альтернатив (вариантов решений) при наличии естественных ошибок (погрешностей) в процессе экспертного оценивания. Показателем устойчивости в данном случае служит величина, отражающая вероятность сохранения полученного ранжирования. Когда же речь идет о задаче оценивания (расчета числовых показателей эффективности) альтернатив, для обеспечения устойчивости решений важно, чтобы рассчитанные оценки всегда находились в диапазоне, ограниченном заранее заданной относительной погрешностью. И тогда, показателем устойчивости служит величина, соответствующая вероятности «не выхода» оценки за пределы заданного относительного отклонения.

В работе [7] также отмечалось, что на устойчивость БЗ СППР — иерархий целей — влияют как структурные, так и количественные параметры. Изменить структуру иерархии целей так, чтобы ее устойчивость возросла, не всегда возможно. Для этого нужно добиться уменьшения длин максимальных путей от целей нижнего уровня до корневой (главной) цели. В таком случае, открытым остается вопрос, как это сделать корректно, считаясь с мнением экспертов, предоставлявших свои знания в предметной области при построении иерархии целей? На решении данного вопроса будет акцентировано внимание в описании первого метода, изложенного ниже. При описании второго метода, излагаемого в данной статье, предлагается сосредоточить внимание на повышении устойчивости за счет количественных параметров иерархии целей. Фактически, такими количественными параметрами являются частные коэффициенты влияния (ЧКВ) целей друг на друга в данной иерархии. ЧКВ являются положительными, нормированными к единице, действительными числами. Как отмечалось в [7], для повышения устойчивости следует добиться того, чтобы ЧКВ целей на некоторую определенную цель были различимы (отличались, как можно сильнее, в рамках группы целей, влияющих на какую-либо конкретную цель).

### **Повышение устойчивости баз знаний за счет структурных изменений**

В БЗ СППР, вследствие специфики ее построения, основанной на декомпозиции целей с привлечением экспертных знаний, могут возникать так называемые «линейные» участки иерархии, которые представляют собой цепочки, состоящие

из целей (узлов/вершин графа иерархии), связанных последовательно влияниями (дугами графа). Причем, каждое из промежуточных (не окончательных/не терминальных) звеньев таких цепочек является вершиной, в которую входит и из которой выходит по одной единственной дуге графа иерархии целей. Такие линейные участки, благодаря специфике расчета методом целевого динамического оценивания альтернатив, можно исключить из графа иерархии целей, заменив их участком, состоящим из одной из двух терминальных вершин. Схематично такое преобразование представлено на рис. 1, где цели — вершины графа обозначены буквой  $G$ , а влияния — дуги взвешены ЧКВ, обозначенными буквой  $k$ .

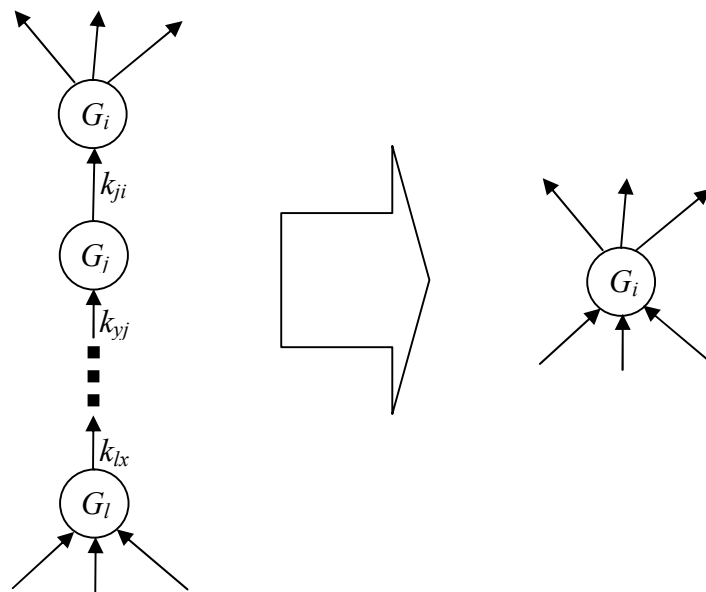


Рис. 1. Удаление линейного участка из графа иерархии целей

Такое преобразование иерархии целей возможно потому, что все ЧКВ — это нормированные к единице величины в группах ЧКВ целей, непосредственно влияющих на какую-либо конкретную цель  $G_c$ :  $\sum_i k_{ic} = 1, \forall i | k_{ic} > 0$ , и в изображенной на рис. 1 удаляемой цепочке, ЧКВ  $k_{ji}, k_{yj}, \dots, k_{lx}$  все равны 1, и поэтому они не влияют на результаты расчета методом целевого динамического оценивания альтернатив.

После такого рода удаления линейного участка иерархии целей, цель  $G_i$  может быть переформулирована экспертами, поскольку на данную цель стали непосредственно влиять цели нижнего уровня, но обычно, из-за того, что в первоначальном виде иерархии целей присутствуют косвенные влияния на цель  $G_i$  этих же целей нижнего уровня, то такого изменения в формулировке не требуется.

Таким образом, для повышения устойчивости базы знаний предлагается исключать из графа иерархии линейные цепочки и тем самым уменьшить среднюю длину путей от целей нижнего уровня до главной цели иерархии. Отметим, что применение метода может происходить без дополнительного вмешательства экспертов, что является бесспорным достоинством данного метода. Однако, поскольку на практике, в графе иерархии, наличие таких линейных цепочек не очень час-

тое явление, основное внимание все-таки будет уделено второму методу, представленному ниже.

### Повышение устойчивости за счет изменения количественных параметров

Следует акцентировать внимание на том, что устойчивость иерархии целей зависит от устойчивости ЧКВ групп целей, влияющих на какую-либо общую для них цель. Поэтому повышение устойчивости иерархии целей можно рассматривать как повышение устойчивости ЧКВ отдельных групп целей этой иерархии.

Описанный ниже метод состоит в том, чтобы за счет согласованного с экспертами — составителями иерархии целей — изменения ЧКВ по определенным правилам, добиться улучшения устойчивости иерархии целей. Как отмечалось ранее, устойчивость БЗ СППР зависит от значений отношений между ЧКВ группы целей, влияющих на некоторую общую цель в иерархии. Если сформулировать точнее, то устойчивость сильно зависит от величины минимального различия между ЧКВ в таких группах целей. Базируясь на этих, ранее проведенных исследованиях и сделанных выводах, сформулируем идею метода.

Сущность метода состоит в нахождении в графе иерархии целей такой пары влияний целей  $G_i$  и  $G_j$  (с соответствующими им ЧКВ  $k_{ic}$  и  $k_{jc}$ ) на некоторую общую цель  $G_c$ , для которой различие ЧКВ минимально среди всех допустимых для сравнения пар ЧКВ в иерархии целей, т.е.  $(k_{ic}/k_{jc}) \rightarrow 1$ , или точнее  $(\max(k_{ic}, k_{jc})/\min(k_{ic}, k_{jc})) \rightarrow \min$ . Далее предлагается, учитывая мнение экспертов, увеличивать различия между ЧКВ найденной пары влияний целей. Вследствие циклического повторения описанных процедур метод приведет к достижению желаемого уровня устойчивости.

Сходимость метода подтверждается экспериментальными данными, свидетельствующими о монотонном увеличении показателя устойчивости при увеличении минимальных различий среди ЧКВ в группах [7].

Остановимся на некоторых особенностях реализации метода.

1. В процессе поиска минимума предлагается находить некоторый показатель  $D$  различия для всех сравнимых пар ЧКВ:  $D_{ijc} = \max(k_{ic}, k_{jc}) / \min(k_{ic}, k_{jc})$ . Причем, вычисленные таким образом показатели следует хранить в упорядоченной по возрастанию последовательности  $[D_1, D_2, \dots, D_n]$ , где  $1 \leq D_1 \leq D_2 \leq \dots \leq D_n$ . Эта упорядоченная последовательность используется для определения необходимой меры увеличения различий в паре ЧКВ, т.е. найденный минимальный показатель различий  $D_1$  следует увеличивать, пока его величина не превзойдет значение следующего по возрастанию показателя —  $D_2$ . Данный механизм служит для обеспечения изменения значения минимального показателя различий на последующем шаге итерационного процесса, и тем самым способствует более быстрой сходимости алгоритма метода.

2. Рассмотрим проблемы, связанные с увеличением различия в паре найденных ЧКВ. Во-первых, найденная пара с минимальным показателем различия принадлежит к группе — множеству нормированных к единице значений, и поскольку ЧКВ являются положительными относительными величинами ( $\sum_i k_{ic} = 1$ ), по-

этому изменение одного какого-либо значения из множества неизбежно повлечет изменение остальных значений из этого множества. Причем, если некоторое заданное значение из множества увеличивать (как этого требует метод), то другие значения из этого множества могут стать меньше заданного значения, что приведет к заикливанию метода.

Выходом из такой ситуации видится определение некоего ограничения на увеличение показателя различий ЧКВ в парах группы. Таким ограничением может служить максимально возможное минимальное различие среди пар ЧКВ, нормированных в рамках некоторой группы. Такое различие будет иметь место, когда ЧКВ в группе являются равно удаленными значениями в шкале отношений, т.е. выполняется равенство:  $k_{1c}C^{n-1} = k_{2c}C^{n-2} = \dots = k_{n-1c}C = k_{nc}$ , где в группе  $n$  ЧКВ, которые упорядочены по возрастанию,  $C = \text{const} > 1$ . Так, в соответствии с приведенным равенством минимальное различие в парах ЧКВ наблюдается в парах из соседних ЧКВ, причем это различие одинаково для всех пар соседних ЧКВ и равно  $C$ :  $k_{2c} / k_{1c} = k_{3c} / k_{2c} = \dots = k_{nc} / k_{n-1c} = C$ . Такие ЧКВ — это члены возрастающей геометрической прогрессии со знаменателем прогрессии  $C > 1$ .

Из-за первой, вышеуказанной проблемы, возникает необходимость рассмотрения изменения каждого множества связанных нормировкой ЧКВ в целом, а не в рамках изменения отдельных пар ЧКВ из этого множества. Рассмотрим формальную постановку возникающей задачи.

*Дано:* множество из  $n$  ЧКВ  $\{k_{1c}, k_{2c}, \dots, k_{nc}\}$  целей иерархии, влияющих на некоторую цель  $G_c$ ,  $\sum_{i=1}^n k_{ic} = 1, \forall i | k_{ic} > 0$  (фрагмент иерархии показан на рис. 2).

*Найти:* способ увеличения минимального различия между ЧКВ из заданного множества.

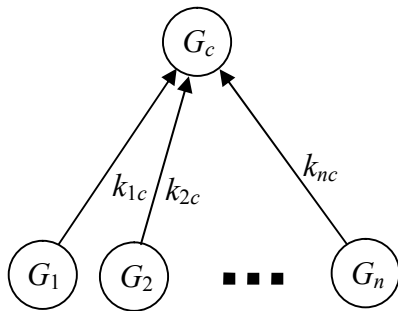


Рис. 2. Фрагмент графа иерархии целей

*Решение:* без потери общности будем считать, что ЧКВ пронумерованы в порядке возрастания их значений. Кроме того, поскольку в дальнейших выкладках будем иметь дело с ЧКВ целей, влияющих на одну единственную цель с индексом «с», и, чтобы упростить вид выражений с индексами будем считать, что  $\forall i | k_{ic} \equiv k_i$  и, тем самым, избавимся от двойной индексации при изложении материала. Итак, имеем последователь-

ность ЧКВ  $[k_1, k_2, \dots, k_n]$ , определим для каждой соседней пары ЧКВ их отношение:  $D_{i-1} = k_i / k_{i-1}, i \in \{2 \dots n\}$ . Как видим, таких значений будет  $(n - 1)$ . Для последующих манипуляций с данными величинами, упорядочим их по возрастанию

и найдем среднее геометрическое этих значений по формуле:  $\tilde{D} = \sqrt[n-1]{\prod_{i=2}^n D_{i-1}}$ .

Пронумеруем упорядоченные по возрастанию значения, обозначив их порядковый номер верхним индексом в скобках, получим упорядоченную последовательность  $[D_{i-1}^{(1)}, D_{jj-1}^{(2)}, \dots, D_{zz-1}^{(n-1)}], (i \neq j \neq \dots \neq z) \in \{2 \dots n\}$ , где  $1 \leq D_{i-1}^{(1)} \leq D_{jj-1}^{(2)} \leq \dots \leq D_{zz-1}^{(n-1)}$ .

Приступим к изменению (увеличению) минимального отношения ЧКВ  $D_{ii-1}^{(1)}$ . Оно является минимальным как в рассматриваемой на данный момент группе ЧКВ, так и в целом в иерархии целей (как отмечалось в начале описания метода). Увеличив данное минимальное значение, мы, по существу, повысим устойчивость иерархии целей. Увеличение  $D_{ii-1}^{(1)}$  можно произвести двумя способами: 1) увеличив  $k_i$ ; 2) уменьшив  $k_{i-1}$ . Не следует забывать, что ЧКВ  $[k_1, k_2, \dots, k_n]$  — это относительные нормированные положительные величины, и увеличение одной из них влечет уменьшение, хотя и менее значительное, остальных величин и наоборот.

Теперь опишем предлагаемую стратегию выполнения операции увеличения  $D_{ii-1}^{(1)}$ , которая обеспечивает увеличение минимума среди отношений соседних ЧКВ.

*Первый случай:*  $i = 2$ , т.е. есть вариант увеличить  $k_2$  или уменьшить  $k_1$ . В данном случае, поскольку  $k_1$  — минимальный ЧКВ в группе и, следовательно, он фигурирует только в единственном из отношений —  $D_{21}^{(1)}$ , предлагается, в первую очередь, уменьшить его. Это повлечет минимальные изменения среди остальных ЧКВ в рассматриваемой группе.

*Второй случай:*  $i = n$ , т.е. имеется вариант увеличить  $k_n$  или уменьшить  $k_{n-1}$ . В этом случае, поскольку  $k_n$  — максимальный из ЧКВ группы и фигурирует только в единственном отношении —  $D_{nn-1}^{(1)}$ , то предлагается в первую очередь, увеличить его, что также не повлечет значительных изменений среди остальных ЧКВ.

*Третий случай:*  $(i \neq 2) \wedge (i \neq n)$ , имеется, например, при  $i = y$  вариант для  $D_{yx}^{(1)} \mid x = y - 1$ , — увеличить  $k_y$  или уменьшить  $k_x$ . Следует отметить, что в первом и втором из описанных случаев мы имели дело с изменениями значений крайних ЧКВ (уменьшением минимального и увеличением максимального), и величина изменения этих значений не имела значения. В третьем же случае, увеличение ЧКВ  $k_y$  влияет не только на увеличение  $D_{yx}^{(1)}$ , но и на уменьшение некоторого  $D_{y+1y}^{(d)} \mid 1 < d \leq n - 1$ , а уменьшение  $k_x$  влечет за собой не только увеличение  $D_{yx}^{(1)}$ , но и уменьшение некоторого  $D_{xx-1}^{(e)} \mid 1 < e \leq n - 1$ . В связи с этим, в таком случае предполагается делать выбор между изменением  $k_x$  или  $k_y$ , исходя из следующих соображений. Предлагается допускать изменение  $D_{y+1y}^{(d)}$  и  $D_{xx-1}^{(e)}$  только в сторону приближения его к рассчитанному заранее  $\tilde{D}$  — среднему геометрическому всей последовательности отношений. Если же оба из этих возможных изменений допустимы, то выбирается изменение той величины, которая больше удалена от  $\tilde{D}$ .

Таким образом, предложенный способ позволяет увеличивать минимальное различие между ЧКВ.

Отметим, что все описанные выше изменения ЧКВ производятся с помощью процедуры обратной связи с экспертами и согласуются с ними. В случае же отклонения экспертной группой предложения об изменении того или иного ЧКВ или невозможности его изменения из соображений описанной стратегии, производится попытка увеличить следующее по величине значение  $D$  в упорядоченной последовательности значений всей иерархии целей. После каждого удачного из-

менения ЧКВ предлагается формировать упорядоченную последовательность от-  
ношений соседних ЧКВ снова, т.е. заново рассчитать все  $D$ .

Таким образом, описанный метод позволяет с учетом мнения экспертов по-  
высить устойчивость заданной иерархии целей за счет изменения ее количествен-  
ных параметров, а именно значений ЧКВ.

## Выводы

В данной работе предложены методы увеличения устойчивости БЗ СППР (иерархий целей) в случае, когда рассчитанный показатель устойчивости [6, 7] не удовлетворяет необходимым требованиям к СППР по устойчивости рассчитываемых ими оценок вариантов решений. Предложены метод повышения устойчивости иерархий целей за счет структурных изменений в них и метод с обратной связью с экспертами, позволяющий достичь повышения устойчивости за счет изменения значений ЧКВ. Методы целесообразно использовать последовательно в предложенном порядке или же отдельно друг от друга (но не первый метод после второго).

Заметим, что описанные методы являются лишь примерами возможного решения проблемы повышения устойчивости БЗ СППР и дальнейшие исследования планируется производить в сфере поиска и разработки новых методов подобного плана.

1. *Arbel A.* Preference Simulation and Preference Programming: Robustness Issues in Priority Derivation / A. Arbel, L.G. Vargas // *European Journal of Operational Research*. — 1993. — **69**(2). — P. 200–209.

2. *Stam A.* The Stability of AHP Rankings in the Presence of Stochastic Paired Comparisons / A. Stam A., A.P. Duarte Silva // *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. — 1998. — Vol. 465. — P. 96–105.

3. *Tsyganok Vitaliy.* AHP/ANP Stability Measurement and Its Applications [Электронный ресурс]: Proceedings of the 10-th International Symposium on the Analytic Hierarchy/Network Process. Multi-Criteria Decision Making. Pittsburgh, PA, USA. 29/07 – 1/08/2009 / Vitaliy Tsyganok // ISSN 1556-8296. — Режим доступа: [http://www.isahp.org/2009Proceedings/Final\\_Papers/88\\_Tsyganok\\_Stability\\_Measurement\\_REV\\_FIN.pdf](http://www.isahp.org/2009Proceedings/Final_Papers/88_Tsyganok_Stability_Measurement_REV_FIN.pdf)

4. *Saaty T.L.* The Analytic Hierarchy Process / T.L. Saaty. — N. Y.: McGraw-Hill, 1980.

5. *Тоценко В.Г.* Об одном подходе к поддержке принятия решений при планировании исследований и развития. Часть 2. Метод целевого динамического оценивания альтернатив / В.Г. Тоценко // *Проблемы управления и информатики*. — 2001. — № 2. — С. 127–139.

6. *Цыганок В.В.* Оцінка стійкості рішень, отримуваних цільовим методом / В.В. Цыганок // *Система підтримки прийняття рішень. Теорія і практика: зб. доповідей наук.-практ. конф. з міжнародною участю*. — НАН України, Інститут проблем математичних машин і систем. — 2008. — С. 27–31.

7. *Цыганок В.В.* Методика досліджень стійкості рішень, отримуваних цільовим методом / В.В. Цыганок // *Реєстрація, зберігання і оброб. даних*. — 2007. — Т. 9, № 4. — С. 140–151.

Поступила в редакцію 09.12.2010