

УДК 681.34

## КОНЦЕПЦИЯ ДВУХУРОВНЕВОГО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ БЛИЗОСТИ К ИДЕАЛЬНОЙ АЛЬТЕРНАТИВЕ

<sup>1</sup>Тынченко В.В., <sup>2</sup>Царев Р.Ю.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный аэрокосмический университет  
имени академика М.Ф. Решетнева», Красноярск, e-mail: 051301@mail.ru;

<sup>2</sup>ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, e-mail: tsarev.sfu@mail.ru

Двухуровневое принятие решений характеризуется принятием решений на двух уровнях иерархии. В терминах двухуровневого принятия решений лицо, принимающее решения (ЛПР) верхнего уровня, именуется лидером, а ЛПР нижнего уровня – ведомым. Каждый из ЛПР не имеет возможности непосредственно влиять на решение другого ЛПР, однако принятое им решение отражается на решении другого уровня. Лидер и ведомый стремятся получить оптимальное решение, исходя из собственных, иногда конфликтующих, целей. При этом и перед лидером, и перед ведомым может стоять задача многоцелевого принятия решений. При принятии решений на каждом из уровней могут быть использованы классические методы принятия решений. В данной работе формализована задача двухуровневого принятия решений. Для ее решения предлагается использовать методы принятия решений, основанные на близости решения к идеальной точке или идеальной альтернативе. Таким образом, в статье предложена концепция двухуровневого принятия решений на основе близости к идеальной альтернативе. В статье рассмотрены вопросы, связанные с измерением расстояния между рассматриваемыми альтернативами и идеальной альтернативой.

**Ключевые слова:** двухуровневое принятие решений, мера расстояния, метрика, близость, идеальная альтернатива

## CONCEPT OF TWO-LEVEL DECISION MAKING BASED ON CLOSENESS TO THE IDEAL ALTERNATIVE

<sup>1</sup>Tynchenko V.V., <sup>2</sup>Tsarev R.Y.

<sup>1</sup>Siberian state aerospace university named after academician M.F. Reshetnev,  
Krasnoyarsk, e-mail: 051301@mail.ru;

<sup>2</sup>Siberian Federal University, Krasnoyarsk, e-mail: tsarev.sfu@mail.ru

Two-level decision making is characterized by decision making at two different levels of the hierarchy. In terms of the two-level decision making decision maker at the upper level is named the leader and decision maker at the lower level is named the follower. Each of the decision makers has no possibility to effect directly on the decision of another decision maker. However the decision reflects on the decision of another level. The leader and the follower seek the best solution based on their own, sometimes conflicting, objectives. Moreover, the leader and the follower might have a multiple objective decision making problem. When making decisions classic decision making methods can be applied at each level. In this paper the two-level decision making problem is formulated. It is proposed to use decision making methods based on closeness of solution to the ideal point or ideal alternative to solve the problem. Thus, the article presents the concept of two-level decision making based on closeness to the ideal alternative. The article discusses issues related to the measurement of the distance between alternatives and the ideal alternative.

**Keywords:** two-level decision making, distance measure, metric, closeness, ideal alternative

Двухуровневое принятие решений представляет собой проблему, в которой два лица, принимающих решения (ЛПР), принимают решения последовательно, один за другим. При этом принятие решений обоими ЛПР происходит на двух разных уровнях иерархии. Каждый ЛПР работает в одном и том же пространстве решений, но с различными и, возможно, конфликтующими целями. При таком подходе ЛПР нижнего уровня принимает решение, после того как принял решение ЛПР верхнего уровня. Несмотря на то, что ЛПР верхнего уровня принимает решение независимо, тем не менее на его решение может повлиять ЛПР нижнего уровня.

Идея двухуровневого принятия решений заключается в следующем: ЛПР верхнего

уровня определяет цели и принимает решение, после этого он запрашивает решение от ЛПР нижнего уровня, полученное независимо, в соответствии с целями последнего. Получив решение от ЛПР нижнего уровня, ЛПР верхнего уровня рассматривает его и изменяет в соответствии с целями двухуровневого принятия решений. Затем ЛПР нижнего уровня опять принимает решение уже с учетом этого нового решения ЛПР верхнего уровня. Процесс продолжается до тех пор, пока не будет получено удовлетворяющее решение [14].

ЛПР верхнего уровня, лидер, принимает стратегические решения. ЛПР нижнего уровня, ведомый, принимает решения в установленных рамках. Например, в каче-

стве лидера может выступать правительство, которое намерено сократить воздействие на окружающую среду и обеспечить финансовый баланс в области энергосбережения, а также уменьшить выбросы углерода. Предприятие, выступающее в роли ведомого, стремится оптимизировать свои расходы в условиях субсидирования и штрафов, определяемых правительством [13].

Двухуровневое принятие решений находит широкое применение при решении различных практических задач в технических, экономических и организационных системах. Так, в работе [6] описана двухуровневая система поддержки принятия решений, предназначенная для проектирования дорожно-транспортной сети. Предложена двухуровневая модель принятия решений, целью которой является уменьшение задержки в пути участников дорожного движения и, одновременно с этим, снижение уязвимости сети. В статье [10] разработана новая модель принятия решений, использующая двухуровневое программирование, предназначенная для планирования строительного проекта в нечеткой случайной среде с ограниченными ресурсами. Инвестор, который выступает в качестве ЛПР верхнего уровня, стремится к максимизации прибыли, тогда как подрядчик, как ЛПР нижнего уровня, пытается минимизировать затраты. Эффективность предложенной модели подтверждена при строительстве ГЭС в г. Nuozhadu, Китай. В статье [8] представлен метод формализации процесса изготовления бумаги и выполняемых при этом технологических операций. Этот метод основывается на двухуровневом принятии решений и позволяет избежать излишних итераций во время процесса изготовления бумаги. В статье [12] представлена двухуровневая система, где задача оптимизации решается на основе целочисленного линейного программирования на верхнем уровне системы, реакция на предложенное решение происходит на нижнем уровне. Разработанная система предлагается к использованию при управлении гибкими производственными системами. В статье [15] предложена модель двухуровневого программирования, предназначенная для выбора места раз-

мещения нефтедобывающей платформы с учетом ограниченных ресурсов и стохастического характера изменения цен на нефть. На верхнем уровне модели принятие решений происходит на основе адаптивного алгоритма оптимизации, алгоритм поиска с запретами используется на нижнем уровне принятия решений и обеспечивает верификацию решения верхнего уровня. В работе [9] предложен новый подход к выбору пути беспилотных летательных аппаратов в реальном времени на основе двухуровневого программирования. Проблема выбора оптимального пути формализована как модель лидер – ведомый. Данный подход позволяет найти оптимальный путь с учетом всех возможных путей достижения цели, обхода препятствий, длины различных путей, сглаживания траектории полета и адаптации к изменениям кинематических и сенсорных свойств беспилотного летательного аппарата.

Область применения двухуровневого программирования не ограничивается указанными выше примерами, что подтверждает важность и актуальность проблемы создания методов и средств, предназначенных для повышения эффективности двухуровневого принятия решений.

#### Формальное представление проблемы двухуровневого принятия решений

Пусть вектор переменных решения  $x = (x_1, x_2) \in R^n$  определяется лицами, принимающими решения, двух уровней: ЛПР верхнего уровня и ЛПР нижнего уровня. Тогда ЛПР верхнего уровня может управлять вектором  $x_1 \in R^{n_1}$ , в то время как ЛПР нижнего уровня может управлять вектором  $x_2 \in R^{n_2}$ , где  $n = n_1 + n_2$ . Кроме того, предположим, что

$$F_i(x_1, x_2) : R^{n_1} \times R^{n_2} \rightarrow R^{m_i}, i = 1, 2$$

являются векторами нелинейных целевых функций верхнего и нижнего уровней соответственно.

Проблема двухуровневого принятия решений может быть сформулирована следующим образом: решение может быть получено в том случае, если для верхнего уровня достигнута цель:

$$\max_{x_1} F_1(x_1, x_2) = \max_{x_1} (f_{11}(x_1, x_2), f_{12}(x_1, x_2), \dots, f_{1m_1}(x_1, x_2)),$$

в то время как для  $x_2$

$$\max_{x_2} F_2(x_1, x_2) = \max_{x_2} (f_{21}(x_1, x_2), f_{22}(x_1, x_2), \dots, f_{2m_2}(x_1, x_2)),$$

при условии

$$x \in G = \{x = (x_1, x_2) \in R^n \mid g_i(x_1, x_2) \leq 0, i = 1, 2, \dots, q\} \neq \emptyset,$$

где  $x_1 = (x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n_1})$ ,  $x_2 = (x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n_2})$ ;  $G$  – множество ограничений;  $m_i$ ,  $i = 1, 2$  – количество целевых функций  $i$ -го ЛПР;  $q$  – количество ограничений.

На верхнем и нижнем уровнях могут быть использованы различные методы и алгоритмы принятия решений. В данной статье при принятии решений предлагается использовать методы, отлично зарекомендовавшие себя в задачах традиционного одноуровневого принятия решений, которые основаны на близости альтернатив к идеальной альтернативе.

#### Определение альтернативы, ближайшей к идеальной альтернативе

На сегодняшний день разработан ряд методов принятия решений с учетом близости к идеальной альтернативе или идеальной точке, в основе которых лежит понятие меры расстояния [1–5, 7, 11]. Идеальная альтернатива, как правило, вводится искусственно на основе лучших значений целевых функций. Выбор лучшей альтернативы из множества рассматриваемых происходит при решении задачи минимизации расстояния от текущей альтернативы до идеальной. При этом некоторые методы, в частности метод упорядоченного предпочтения через сходство с идеальным решением, учитывают не только близость к идеальной наилучшей альтернативе, но и удаленность от идеальной наихудшей альтернативы [4].

Рассмотрим вектор целевых функций  $F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))$  в  $m$ -целевом пространстве. Тогда идеальной альтернативе будет соответствовать вектор

$$F^* = (f_1^*, f_2^*, \dots, f_m^*),$$

где  $f_j^* = \max_{x \in G} f_j(x)$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ . Для идеальной наихудшей альтернативы в этом случае можно определить вектор

$$F^- = (f_1^-, f_2^-, \dots, f_m^-),$$

где  $f_j^- = \min_{x \in G} f_j(x)$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ . В качестве меры близости может использоваться  $L_p$ -метрика, которая определяет расстояние между двумя точками  $F(x)$  и  $F^*$ :

$$d_p = \left\{ \sum_{j=1}^m \lambda_j^p [f_j^* - f_j(x)]^p \right\}^{\frac{1}{p}}, p = 1, 2, \dots, \infty,$$

где  $\lambda_j$ ,  $j = 1, \dots, m$  – относительная важность (вес) цели.

Если целевые функции  $f_j(x)$ ,  $j = 1, \dots, m$ , несоизмеримы, то необходимо их нормализовать: функции масштабируются и представляются в безразмерном виде на

интервале  $[0, 1]$ . Для этого может быть использована следующая метрика:

$$d_p = \left\{ \sum_{j=1}^m \lambda_j^p \left[ \frac{f_j^* - f_j(x)}{f_j^* - f_j^-} \right]^p \right\}^{\frac{1}{p}}, p = 1, 2, \dots, \infty.$$

Задачу выбора альтернативы, ближайшей к идеальной, можно записать в следующем виде:

$$\min_{x \in G} d_p = \left\{ \sum_{j=1}^m \lambda_j^p \left[ \frac{f_j^* - f_j(x)}{f_j^* - f_j^-} \right]^p \right\}^{\frac{1}{p}},$$

$$p = 1, 2, \dots, \infty.$$

Выбор значения параметра  $p$  отражает способ обеспечения компромисса между целями. Параметр  $p$  определяет баланс между общей полезностью и максимальной индивидуальной уступкой. С увеличением значения  $p$  общая полезность (расстояние  $d_p$ ) уменьшается, т.е.  $d_1 \geq d_2 \geq \dots \geq d_p$  и наибольшее внимание уделяется наибольшему отклонению при определении конечного результата. Так,  $p = 1$  подразумевает равную важность (вес) для всех отклонений. При  $p = 2$  веса отклонений пропорциональны величине отклонений. Наконец, для  $p = \infty$  наибольшее отклонение полностью доминирует при определении расстояния, а  $L_\infty$ -метрика имеет вид

$$d_\infty = \max_j \left\{ \lambda_j [f_j^* - f_j(x)] \right\}$$

или

$$d_\infty = \max_j \left\{ \lambda_j \left[ \frac{f_j^* - f_j(x)}{f_j^* - f_j^-} \right] \right\}.$$

#### Заключение

Двухуровневое принятие решений представляет собой процесс взаимосвязанного принятия решений лицами, принимающими решения, верхнего и нижнего уровней с целью получения оптимального результата, основываясь на компромиссе при достижении целей ЛПР обоих уровней иерархии. Проведенный анализ литературных источников показал необходимость и актуальность разработки новых методов и подходов, позволяющих повысить эффективность решения задачи двухуровневого принятия решений. В статье представлена формализация данной проблемы при принятии решений на двух уровнях иерархии. Принятие решений на каждом из уровней может выполняться с применением существующих методов и алгоритмов с учетом особенностей проблемной области. В данной работе

предложена концепция двухуровневого принятия решений на основе близости к идеальной альтернативе, что позволяет использовать широко известные методы принятия решений, основанные на близости рассматриваемых альтернатив к идеальной альтернативе, которые уже подтвердили свою эффективность при решении различных практических задач.

#### Список литературы

1. Ковалев И.В. Комбинированный метод формирования мультиверсионного программного обеспечения управления космическими аппаратами / И.В. Ковалев, Р.Ю. Царев // Авиакосмическое приборостроение. – 2006. – № 9. – С. 8–14.
2. Ковалев И.В. Учет субъективных предпочтений ЛПР при мультиверсионном проектировании АСУ / И.В. Ковалев, М.Ю. Слободин, Р.Ю. Царев // Системы управления и информационные технологии. – 2005. – № 1(18). – С. 44–49.
3. Царев Р.Ю. Методология многоатрибутивного формирования мультиверсионного программного обеспечения сложных систем управления и обработки информации: монография; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2011. – 210 с.
4. Царев Р.Ю. Модификация метода упорядоченного предпочтения через сходство с идеальным решением для решения задач многоцелевого принятия решений // Информационные технологии. – 2007. – № 7. – С. 19–23.
5. Царев Р.Ю. Fuzzy-метод формирования структуры мультиверсионного программного обеспечения информационно-управляющих систем // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2007. – № 12. – С. 72–75.
6. Chiou S.-W. A bi-level decision support system for uncertain network design with equilibrium flow (2015) Decision Support Systems, 69. – P. 50–58.
7. Hwang C.L., Yoon K. Multiple attribute decision making: methods and applications, Springer-Verlag, Heidelberg, 1981.
8. Linnala M., Hämmäläinen J. Bi-level optimization in papermaking process design // Nordic Pulp and Paper Research Journal. – 2012. – № 27 (4). – P. 774–782.
9. Liu W., Zheng Z., Cai K.-Y. Bi-level programming based real-time path planning for unmanned aerial vehicles // Knowledge-Based Systems. – 2013. – № 44. – P. 34–47.
10. Ma Y., Xu J. A novel multiple decision-maker model for resource-constrained project scheduling problems // Canadian Journal of Civil Engineering. – 2014. – № 41 (6). – P. 500–511.
11. Opricovic S., Tzeng G.-H. Extended VIKOR method in comparison with outranking methods // European Journal of Operational Research. – 2007. – № 178 (2). – P. 514–529.
12. Pach C., Adam E., Berger T., Trentesaux D. Switching between levels of decision making in MAS organisation: Application to flexible assembly cells // 13th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, AAMAS. – 2014. – № 2. – P. 1673–1674.
13. Wang H.-F. Multi-level subsidy and penalty strategy for a green industry sector // Proceedings – IEEE 9th International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing, DASC 2011, art. no. 6118904. – P. 776–783.
14. Wang L., Ye J., Wan Z., Ji C. A dual approach method for solving a class of bi-level linear programming system // Advances in Modelling and Analysis A. – 2008. – № 45 (1–2). – P. 27–35.
15. Yuan S.-B., Liu, T. Programming model for the site selection of offshore platforms based on stochastic oil price and its solution / Xian Shiyou Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban) // Journal of Xian Shiyou University, Natural Sciences Edition. – 2012. – № 27 (6). – P. 84–87.

#### References

1. Kovalev I.V., Tsarev R.Yu. *Kombinirovannyj metod formirovaniya mul'tiversionnogo programmnogo obespechenija upravlenija kosmicheskimi apparatami* [Combined method of multiversion spacecraft control software design]. Aerospace Instrument-Making, 2006, no. 9, pp. 8–14.

2. Kovalev I.V., Slobodin M.Yu., Tsarev R.Yu. *Uchet subektivnyh predpochtenij LPR pri multiversionnom proektirovanii ASU* [Account of subjective preferences of expert at multiversion projection of automated control system]. Control systems and information technologies, 2005, no. 1, pp. 44–49.

3. Tsarev R.Yu. *Metodologija mnogoatributivnogo formirovaniya multiversionnogo programmnogo obespechenija slozhnyh sistem upravlenija i obrabotki informacii* [Methodology of multiple attribute formation of multiversion software for complex control and information processing systems]. Krasnojarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University, 2011, 210 p.

4. Tsarev R.Yu. *Modifikacija metoda uporyadochemogo predpochtenija cherez shodstvo s idealnym resheniem dlja reshenija zadach mnogocелеvogo prinjatija reshenij* [Modification of technique for order preference by similarity to ideal solution for multi-objective decision making problems]. Information technologies, 2007, no. 7, pp. 19–23.

5. Tsarev R.Yu. *Fuzzy-metod formirovaniya struktury multiversionnogo programmnogo obespechenija informacionno-upravljajushih sistem* [Fuzzy-method of multiple version software structure design for information control systems]. Information-measuring and control systems, 2007, no. 12, pp. 72–75.

6. Chiou S.-W. A bi-level decision support system for uncertain network design with equilibrium flow (2015) Decision Support Systems, 69, pp. 50–58.

7. Hwang C.L., Yoon K. Multiple attribute decision making: methods and applications, Springer-Verlag, Heidelberg, 1981.

8. Linnala M., Hämmäläinen J. Bi-level optimization in paper making process design (2012) Nordic Pulp and Paper Research Journal, 27 (4), pp. 774–782.

9. Liu W., Zheng Z., Cai K.-Y. Bi-level programming based real-time path planning for unmanned aerial vehicles (2013) Knowledge-Based Systems, 44, pp. 34–47.

10. Ma Y., Xu J. A novel multiple decision-maker model for resource-constrained project scheduling problems (2014) Canadian Journal of Civil Engineering, 41 (6), pp. 500–511.

11. Opricovic S., Tzeng G.-H. Extended VIKOR method in comparison with outranking methods (2007) European Journal of Operational Research, 178 (2), pp. 514–529.

12. Pach C., Adam E., Berger T., Trentesaux D. Switching between levels of decision making in MAS organisation: Application to flexible assembly cells (2014) 13th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, AAMAS 2014, 2, pp. 1673–1674.

13. Wang H.-F. Multi-level subsidy and penalty strategy for a green industry sector (2011) Proceedings – IEEE 9th International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing, DASC 2011, art. no. 6118904, pp. 776–783.

14. Wang L., Ye J., Wan Z., Ji C. A dual approach method for solving a class of bi-level linear programming system (2008) Advances in Modelling and Analysis A, 45 (1–2), pp. 27–35.

15. Yuan S.-B., Liu, T. Programming model for the site selection of offshore platforms based on stochastic oil price and its solution (2012) Xian Shiyou Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban) // Journal of Xian Shiyou University, Natural Sciences Edition, 27 (6), pp. 84–87.

#### Рецензенты:

Бронов С.А., д.т.н., профессор, руководитель научно-учебной лаборатории систем автоматизированного проектирования кафедры систем искусственного интеллекта, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск.

Ченцов С.В., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Системы автоматизации, автоматизированное управление и проектирование», Сибирский федеральный университет, г. Красноярск.