

УДК 316.422: 004.81

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ В ВЫБОРЕ СТРАТЕГИИ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ

О.С. КИСЕЛЕВСКИЙ¹

¹к.т.н., доцент кафедры Менеджмента
Белорусский государственный университет информатики и
радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация: Предложена структурная схема трансформации предприятия из инновационно-пассивной в инновационно-активную форму. В ключевых моментах принятия решений о выборе стратегии развития предложено использовать методы нечёткой логики.

Ключевые слова: системы поддержки принятия решений.

MATHEMATICAL METHODS OF FUZZY LOGIC IN CHOOSING AN INNOVATIVE DEVELOPMENT STRATEGY

O.S. KISELEVSKI¹

¹PhD, Associate Professor of the Department Management
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Republic of Belarus

Annotation. A structural scheme of enterprise transformation from an innovative-passive to an innovative-active form is proposed. In key moments of decision-making on the choice of development strategy, it is proposed to use fuzzy logic methods.

Key words: decision support systems.

Современные предприятия в условиях конкурентной борьбы сталкиваются с потребностью оптимизации своего информационного пространства. Понимая под информационным пространством не только средства хранения, упорядочения и оперативного доступа к данным, но также объективированные и неobjективированные корпоративные знания, приходится смещать фокус исследования с сугубо технических вопросов на исследование принципов функционирования социально-экономических организационных систем.

Основным звеном таких систем является человек, выступающий одновременно и как объект, и как субъект управления, и как непосредственно носитель знаний. Не поддающийся строгой формализации человеческий фактор создаёт в управлении такими системами эффект неравновесности и неопределённости.

Решение проблемы инновационного развития предприятия включает в себя достаточно сложную структуру мероприятий, требующих междисциплинарного подхода (рисунок 1). Основной задачей данной работы является выбор тех математических моделей, которые на основании нечёткой логики принятия решений помогут сделать выбор между стратегиями инновационного развития (поз. 1 и 2 на рисунке 1).



Рисунок 1 – Структурная схема пути инновационного развития предприятия

В трактовке инновационной деятельности, предлагаемой «Руководством Осло» [1] инновационную деятельность предприятий рекомендовано подразделять на четыре принципиально отличающихся типа (рисунок 2).



Рисунок 2 – Типы инновационной деятельности предприятий [1]

В зависимости от уровня инновационной активности предприятия инновационные стратегии принято разделять на наступательные и оборонительные. Б. Твисс перечень этих стратегий расширяет до шести (рисунок 3).



Рисунок 3 – Инновационные стратегии предприятий по Б. Твиссу [2]

Избирая стратегию инновационного лидерования, предприятия сталкиваются с потребностью направлять значительную часть своих инвестиций на исследования и научные разработки не только прикладного, но и фундаментального характера. Сложность решения таких задач порождает необходимость в создании в рамках НИОКР стратегических союзов предприятия с другими научно-техническими организациями. Повышение эффективности управления и принятия обоснованных решений в условиях больших объёмов данных требует от инновационно-активных предприятий инвестиций в цифровую трансформацию менеджмента [3]. Плодотворный опыт предприятий в реализации стратегий «технологического лидерства» приведен в [4].

Оценка уровня инновационной активности предприятия лежит в основе принятия решений о необходимости мер инновационного развития или реинжиниринга информационной структуры. Набор метрик и показателей уровня инновационной активности не является стандартным и сильно зависит от профильной деятельности предприятия [5]. Среди метрик зачастую рекомендуют использовать такие параметры, как изменение патентного портфеля, изменение доли рынка, изменение внереализационных доходов, изменение товарного портфеля, изменение стоимости компании, среднегодовые темпы прироста производительности труда и фондоотдачи, индекс экологичности производства и многие другие. Для того, чтобы свести этот огромный перечень к нескольким параметрам, влияющим на принятие решения, приходится изобретать метод их свёртки. Эта свёртка сильно зависит от конкретных обстоятельств, сопутствующих принятию актуального решения.

Многокритериальные решения как в секторе информационно-коммуникационных технологий, так и в секторе цифровых услуг не могут быть приняты однозначно. Проблемы принятия многокритериальных решений вариативны, сильно зависят от внешних и внутренних условий, и не поддаются формальной логике. В оценке степени приемлемости и качества инноваций, а также в прогнозировании рисков используются экспертные методы с элементами нечёткой логики. Ниже перечислены отличительные признаки некоторых из этих методов.

Метод анализа иерархий позволяет оценивать и сравнивать представленные альтернативы по десятибалльной шкале.

Математическая обработка экспертных оценок производится по формулам среднегеометрического вектора, а также средневзвешенных значений экспертных оценок [6].

Важнейшей из причин широкого использования этого метода является возможность осуществлять анализ в нескольких входных и выходных средах. Кроме того, среди методов многокритериального принятия решений метод аналитической иерархии является одним из наиболее просто реализуемых. Этот метод был предложен Т. Саати в 1970 году как прототип работы человеческого мозга при решении сложных проблем. Добавление в этот метод элементов нечёткой логики [7] позволило использовать его в управления сложными процессами и информацией в случаях неопределенности. Этапы этого метода можно кратко описать следующим образом:

Пусть дана таблица парных экспертных оценок (формула 1):

$$D_k = \begin{bmatrix} b_{11k} & \cdots & b_{1nk} \\ \vdots & b_{ijk} & \vdots \\ b_{n1k} & \cdots & b_{nnk} \end{bmatrix} \quad k = 1, \dots, K, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, n \quad (1)$$

Рассчитаем среднее геометрическое экспертных мнений (формула 2):

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & \cdots & d_{nn} \end{bmatrix} \quad d_{ij} = \sqrt[k]{\prod_{k=1}^K b_{ijk}} = \frac{1}{d_{ij}} \quad \forall i, j \quad (2)$$

Нормализуем и вычислим весовые коэффициенты (формула 3):

$$\tilde{r}_{ij} = \frac{d_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n d_{ij}^2}} \quad \forall i, j; \quad \tilde{w}_i = \frac{\sum_{j=1}^n r_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n r_{ij}} \quad \forall i \quad (3)$$

Оценим фактор несоответствия (формула 4):

$$CR = \frac{CI}{RI}; \quad CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1}; \quad \lambda_{max} = \frac{\sum_{j=1}^n d_{ij} w_j}{w_i} \quad (4)$$

где k – экспертный индекс;

K – общее количество экспертов;
 D_k – матрица парных сравнений, составленная k -м экспертом;
 b_{ijk} – степень влияния i -го критерия на j -й критерий с точки зрения k -го эксперта;
 D – геометрическое среднее матрицы мнений экспертов;
 \tilde{r}_{ij} – матрица нормализованных оценок;
 \tilde{w}_i – вектор весовых коэффициентов;
 CR – фактор несогласованности;
 CI – индекс несогласованности;
 RI – фактор устойчивости.

Важным параметром релевантности метода аналитической иерархии является мера согласованности экспертных мнений, которую можно рассчитать, как коэффициент конкордации Кендалла (формула 5):

$$W = \frac{12D}{K^2(n^3 - n)} \quad (5)$$

В отличие от метода аналитической иерархии в методе ELECTRE мнения экспертов кроме оценочного балла содержат знак + или -. Название метода происходит от аббревиатуры «ELimination Et Choix Traduisant la REalite», что переводится как «исключение и выбор, отражающие реальность» [8].

На первом этапе реализации этого метода так же, как и в методе аналитической иерархии составляется матрица весовых критериев \tilde{w}_k . После чего по данным критериям составляют матрицу оценки альтернатив m критериев по n параметрам (формула 6):

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} r_{1,1} & \cdots & r_{1,k} & r_{1,n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ r_{i,1} & \cdots & r_{i,k} & r_{i,n} \\ r_{m,1} & \cdots & r_{m,k} & r_{m,n} \end{bmatrix} \quad (6)$$

В зависимости от преобладания гипотезы о превосходстве i -ой альтернативы над j -ой для каждой пары множество критериев K разбивается на три подмножества:

- K^+ подмножество факторов, по которым i предпочтительнее j , $c_{ij} = 1$;
- K° подмножество факторов, по которым альтернативы равнозначны, $c_{ij} = 0$;
- K^- подмножество факторов, по которым j предпочтительнее i , $c_{ij} = -1$

Матрица индексов согласия с гипотезой о превосходстве альтернативы i над j имеет вид (формула 7):

$$\tilde{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1j} \\ \vdots & & \vdots \\ c_{i1} & \cdots & c_{ij} \end{bmatrix} \quad (7)$$

На основании весовых критериев производится расчет индекса согласованности каждого члена этой матрицы. Индекс согласия должен находиться в пределах $c_{ij} \in [0, 1]$ и не должен изменяться при замене одного критерия несколькими, разделяющими между собой свой суммарный вес.

Преимуществом ELECTRE перед методом аналитической иерархии является определение обобщенного уровня согласованности экспертных оценок. В качестве недостатков метода отмечают [9] высокую рутинность расчётов и низкую точность оценки согласованности экспертных мнений.

Метод упорядочения предпочтений по сходству с идеальным решением TOPSIS [10] не требует парных сравнений, и вместе с тем обладает высокой производительностью для большого количества альтернатив [11]. В этом методе лицами, принимающими решения, также используются вербально выраженные оценки весовых критериев выбора альтернатив D_r ($r = 1, \dots, k$). Вес j -го критерия C_j ($j = 1, \dots, m$), заданного $г$ -ым экспертом описывается как \tilde{w}_r^j . Аналогично матрица \tilde{x}_{ij}^r описывает рейтинг i -й альтернативы A_i ($i = 1, \dots, n$) относительно критерия j , заданного $г$ -ым экспертом.

Первым шагом метода TOPSIS будет обобщение весовых критериев и рейтингов альтернатив, предоставленных экспертами (формула 8, 9):

$$\tilde{w}_j = \frac{1}{k} (\tilde{w}_j^1 + \tilde{w}_j^2 + \dots + \tilde{w}_j^k) \quad (8)$$

$$\tilde{x}_j = \frac{1}{k} (\tilde{x}_{ij}^1 + \tilde{x}_{ij}^2 + \dots + \tilde{x}_{ij}^k) \quad (9)$$

Матрицы нечётких альтернатив \tilde{D} и нечётких решений \tilde{W} приобретают вид (формула 10):

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \dots & \tilde{x}_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{x}_{n1} & \dots & \tilde{x}_{nm} \end{bmatrix}; \quad W = [\tilde{w}_1 \ \tilde{w}_2 \ \dots \ \tilde{w}_m] \quad (10)$$

Далее требуется с помощью линейного масштабного преобразования нормализовать нечеткую матрицу решений альтернатив \tilde{D} . Нормализованная нечеткая матрица решений \tilde{R} определяется как (формула 11):

$$\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n}, \text{ где} \quad (11)$$

$$r_{ij} = \left(\frac{l_{ij}}{u_j^+}, \frac{m_{ij}}{u_j^+}, \frac{u_{ij}}{u_j^+} \right) \text{ и } u_j^+ = \max_i u_{ij} - \text{критерии выгоды,}$$

$$r_{ij} = \left(\frac{l_j^-}{u_{ij}}, \frac{l_j^-}{m_{ij}}, \frac{l_j^-}{l_{ij}} \right) \text{ и } l_j^- = \max_i l_{ij} - \text{критерии потерь.}$$

Перемножив весовые критерии \tilde{w}_j на элементы нормализованной нечёткой матрицы решений \tilde{r}_{ij} можно вычислить взвешенную нормализованную матрицу решений \tilde{V} (формула 12):

$$\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n}, \text{ где } \tilde{v}_{ij} = \tilde{x}_{ij} \times \tilde{w}_j \quad (12)$$

Нечеткие идеальные положительное и отрицательное решения вычисляются по формулам (формула 13):

$$A^+ = \{\tilde{v}_1^+, \tilde{v}_j^+, \dots, \tilde{v}_m^+\} \text{ и } A^- = \{\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_j^-, \dots, \tilde{v}_m^-\} \quad (13)$$

Затем вычисляются расстояния d_j^+ и d_j^- каждой альтернативы от v_j^+ и v_j^- соответственно (формула 14):

$$d_j^+ = \sum_{j=1}^n d_v(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+) \text{ и } d_j^- = \sum_{j=1}^n d_v(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) \quad (14)$$

где $d_v(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+)$ и $d_v(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-)$ представляют расстояния между двумя нечеткими числами согласно методу вершин треугольников нечетких чисел (формула 15):

$$d(\tilde{x}, \tilde{z}) = \sqrt[2]{\frac{((l_x - l_z)^2 + (m_x - m_z)^2 + (u_x - u_z)^2)}{3}} \quad (15)$$

Коэффициент близости $CC_i = d_i^+ / (d_i^+ + d_i^-)$ позволит проранжировать альтернативы в порядке убывания их благоприятности. Метод оптимизации и компромиссного решения VIKOR [12] также является вариацией метода многокритериального принятия на основании аналитической иерархии. Перечень из m альтернативных решений $\tilde{A} = [A_1, A_2, \dots, A_m]$, также оценивается по n критериев $\tilde{C} = [C_1, C_2, \dots, C_n]$, согласно матрице весовых коэффициентов каждого из критериев $\tilde{W} = [w_1, w_2, \dots, w_n]$. Однако помимо прочего метод учитывает рейтинги компетентности каждого из k принимающих решения экспертов, относительно каждой из альтернатив (формула 16):

$$\tilde{D}_{km} = \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ d_{k1} & \dots & d_{km} \end{bmatrix} \quad (16)$$

В методе Борда [13] значимость критерия дополнительно охарактеризована функцией его полезности. Также следует отметить методы организации ранжирования предпочтений PROMETHEE [14], методе Терстоуна-Мостеллера [15], метод Раша [16]. В работе [17] приведен аналитический обзор более чем тридцати аналитических методов выбора.

В заключении необходимо отметить, что управление социальными и экономическими системами представляет собой сложную, но вместе с тем крайне актуальную проблему. Научные подходы к

решению проблемы учёта человеческого фактора на производстве требуют строгой формализации и алгоритмизации. Эти проблемы активно решаются прогрессивными научными школами [18]. В свою очередь системы управления, поддержки принятия решения и в целом системы информатизации должны быть также нацелены на гуманизацию, человекоориентированность своих подходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. OECD/Eurostat. Oslo Manual 2018: Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation, 4th Edition, The Measurement of Scientific, Technological and Innovation Activities. – Paris, Luxembourg. – 2018. – 258 p.
2. Твисс Б. Управление нововведениями / Б. Твисс. – М.: Экономика, 2009. – 272 с.
3. Перепелица Л.А. Этические аспекты цифровой трансформации менеджмента // Трансформация механизма государства в период становления и развития инновационного электронного государства : сб. статей междунар. круглого стола. Минск : БГЭУ, 2024. – С.357-361
4. Киселевский О.С., Кондрашов О.В. Пути преодоления инновационного барьера в развитии наукоемких технологий // Наука и инновации. – 2024. – № 7. – С. 4-10
5. Опекун Е.В., Хацкевич Г.А. Подходы к разработке показателей и индекса инновационности предприятий // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 5. Экономика. Социология. Биология. – 2012. – №. 3. – С. 21-30.
6. Ersoy Y., Dogan N.Ö. An integrated model of fuzzy AHP/Fuzzy DEA for measurement of supplier performance: A case study in textile sector // International Journal of Supply and Operations Management. – 2020. – Т. 7. – №. 1. – С. 17-38.
7. Wichapa N., Khokhajaikiat P. Solving multi-objective facility location problem using the fuzzy analytical hierarchy process and goal programming: a case study on infectious waste disposal centers // Operations Research Perspectives. – 2017. – Т. 4. – С. 39-48.
8. Fattoruso G., Marcarelli G., Olivieri M.G., Squillante M. Using ELECTRE to analyse the behaviour of economic agents // Soft Computing. – 2020. – Т. 24. – С. 13629-13637

9. Sirait S., Saragih D.Y., Sugara H., Yunus M. Selection of the Best Administrative Staff Using Elimination Et Choix Traduisant La Realite (ELECTRE) Method //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1933. – №. 1. – 012068– 7 p
10. Bianchini A. 3PL provider selection by AHP and TOPSIS methodology //Benchmarking: An International Journal. – 2018. – Т. 25. – №. 1. – С. 235-252.
11. Junior F.R.L., Osiro L., Carpinetti L.C.R. A comparison between Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS methods to supplier selection //Applied soft computing. – 2014. – Т. 21. – С. 194-209.
12. Awasthi A., Govindan K., Gold S. Multi-tier sustainable global supplier selection using a fuzzy AHP-VIKOR based approach //International Journal of Production Economics. – 2018. – Т. 195. – С. 106-117.
13. Ветров О.С., Довбня К.М., Ливицька Д.О. Комп'ютерно-математичне моделювання можливостей корекції визначення переможця голосування методом Борда // Матер. наук. конф. Вінниця: ДНУ ім. В. Стуса. – Т. 2. – 2019. С.121-122
14. Arikan F., Kucukce Y. A supplier selection-evaluation problem for the purchase action and its solution //Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University. – 2012. – Т. 27. – №. 2.
15. Бугаев Ю. В., Шурупова И. Ю., Бабаян М. К. Применение процедуры Терстоуна-Мостеллера в экстраполяции экспертных оценок //Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2015. – №. 1. – С. 107-113.
16. Киреев Ю. В., Зенин А. Ю. Экспертное оценивание методом парных сравнений с использованием модели Раша измерения латентных переменных //Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Управление строительством. – 2015. – №. 1. – С. 86-89.
17. Govindan K. et al. Multi criteria decision making approaches for green supplier evaluation and selection: a literature review //Journal of cleaner production. – 2015. – Т. 98. – С. 66-83.
18. Новиков Д.А., Губанов Д.А. Анализ терминологической структуры теории управления //Управление большими системами. – 2024. – Т. 110. – С. 181-210.

REFERENCES

1. OECD/Eurostat. Oslo Manual 2018: Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation, 4th Edition, The Measurement of Scientific, Technological and Innovation Activities. – Paris, Luxembourg. – 2018. – 258 p.
2. Tviss B. Upravlenie novovvedeniyami / B. Tviss. – M.: Ekonomika, 2009. – 272 s.
3. Perepelica L.A. Eticheskie aspekty cifrovoj transformacii menedzhmenta // Transformaciya mekhanizma gosudarstva v period stanovleniya i razvitiya innovacionnogo elektronnoogo gosudarstva : sb. statej mezhdunar. kruglogo stola. Minsk : BGEU, 2024. – S.357-361
4. Kiselevskij O.S., Kondrashov O.V. Puti preodoleniya innovacionnogo bar'era v razvitii naukoemkih tekhnologij // Nauka i innovacii. – 2024. – № 7. – S. 4-10
5. Opekun E.V., Hackedvich G.A. Podhody k razrabotke pokazatelej i indeksa innovacionnosti predpriyatij //Vestnik Grodnenskogo gosudarstvennogo universiteta imeni YAnki Kupaly. Seriya 5. Ekonomika. Sociologiya. Biologiya. – 2012. – №. 3. – S. 21-30.
6. Ersoy Y., Dogan N.Ö. An integrated model of fuzzy AHP/Fuzzy DEA for measurement of supplier performance: A case study in textile sector //International Journal of Supply and Operations Management. – 2020. – T. 7. – №. 1. – S. 17-38.
7. Wichapa N., Khokhajaikiat P. Solving multi-objective facility location problem using the fuzzy analytical hierarchy process and goal programming: a case study on infectious waste disposal centers //Operations Research Perspectives. – 2017. – T. 4. – S. 39-48.
8. Fattoruso G., Marcarelli G., Olivieri M.G., Squillante M. Using ELECTRE to analyse the behaviour of economic agents //Soft Computing. – 2020. – T. 24. – S. 13629-13637
9. Sirait S., Saragih D.Y., Sugara H., Yunus M. Selection of the Best Administrative Staff Using Elimination Et Choix Traduisant La Realite (ELECTRE) Method //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – T. 1933. – №. 1. – 012068– 7 p
10. Bianchini A. 3PL provider selection by AHP and TOPSIS methodology //Benchmarking: An International Journal. – 2018. – T. 25. – №. 1. – S. 235-252.

11. Junior F.R.L., Osiro L., Carpinetti L.C.R. A comparison between Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS methods to supplier selection //Applied soft computing. – 2014. – T. 21. – S. 194-209.
12. Awasthi A., Govindan K., Gold S. Multi-tier sustainable global supplier selection using a fuzzy AHP-VIKOR based approach //International Journal of Production Economics. – 2018. – T. 195. – S. 106-117.
13. Vetrov O.S., Dovbnya K.M., Livic'ka D.O. Komp'yuterno-matematichne modelyuvannya mozhlivostej korekcii viznachennya perezmozhcya golosuvannya metodom Borda // Mater. nauk. konf. Vin-nicya: DNU im. V. Stusa. – T. 2. – 2019. S.121-122
14. Arikan F., Kucukce Y. A supplier selection-evaluation problem for the purchase action and its solution //Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University. – 2012. – T. 27. – №. 2.
15. Bugaev YU. V., SHurupova I. YU., Babayan M. K. Primenenie procedury Terstouna-Mostellera v ekstrapolyacii ekspertnyh ocenok //Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyj analiz i informacionnye tekhnologii. – 2015. – №. 1. – S. 107-113.
16. Kireev YU. V., Zenin A. YU. Ekspertnoe ocenivanie metodom parnyh sravnenij s ispol'zovaniem modeli Rasha izmereniya latentnyh peremennyh //Nauchnyj vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Upravlenie stroitel'stvom. – 2015. – №. 1. – S. 86-89.
17. Govindan K. et al. Multi criteria decision making approaches for green supplier evaluation and selection: a literature review //Journal of cleaner production. – 2015. – T. 98. – S. 66-83.
18. Novikov D.A., Gubanov D.A. Analiz terminologicheskoy struktury teorii upravleniya //Upravlenie bol'shimi sistema-mi. – 2024. – T. 110. – S. 181-210.