

Решение обратной задачи моделирования для предприятия розничной торговли с использованием теории нечетких когнитивных карт

А.В. Петухова

Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

Аннотация: В статье была рассмотрена компания розничной торговли, как сложная система, приведено соответствие основным свойствам сложных систем. Показаны трудности проектирования рассматриваемой системы, связанные с множественными нелинейными взаимосвязями и наличием скрытых влияний. Предложено применение алгоритма решения обратной задачи для улучшения процессов стратегического планирования на предприятии, которое поможет понять сложные процессы влияния изменяющейся среды на результативность реализованной стратегии.

Ключевые слова: нечеткие когнитивные карты, нечеткое моделирование, стратегическое планирование, обратная задача моделирования.

Введение

Супермаркеты и гипермаркеты сегодня являются примерами розничного бизнеса, где покупатели могут найти всё, что им нужно для комфортной жизни. Предприятием розничной торговли называется сеть торговых точек одного формата, одного собственника и с хорошо налаженной системой логистики. Розничная торговля на развитом рынке — это медленно растущая отрасль, в частности, вследствие перенасыщенности рынка, ограниченных располагаемых доходов клиентов и острой конкуренции [1].

Процесс работы компании розничной торговли состоит из взаимодействующих компонентов, таких, как отношения с поставщиками и клиентами, финансовое и стратегическое планирование, технические операции, управление сотрудниками и многие другие. Такой процесс сложно спроектировать, так как он включает в себя множественные нелинейные взаимосвязи и скрытые влияния. В результате, у менеджеров по стратегическому планированию возникают проблемы при оценке влияния изменяющейся среды на результативность реализованной стратегии. Они сталкиваются с проблемами, которые нельзя решить простым сбором

дополнительных данных, более четким определением проблем или их разбивкой на небольшие проблемы.

Некоторые компоненты системы розничной торговли являются материальными, например, прибыль или расходы на рекламу, в то время как другие являются нематериальными, например, лояльность сотрудников или репутация компании. Кроме того, часто работа с абсолютным значением изменения компонента невозможна, поэтому возникает необходимость использования веса изменения в компоненте, через который можно рассчитать его влияние на систему в целом. Взаимодействие компонентов также нелинейно во времени. Лояльность клиентов, например, может колебаться в зависимости от расходов на рекламу, стоимости продукта и уровня обслуживания; эти изменения нелинейны и будут влиять на систему с разной задержкой во времени. Нелинейные взаимодействия, развивающиеся во времени и сформированные под влиянием начальных условий, чрезвычайно затрудняют статистический анализ этих процессов [2]. Сфера розничной торговли характеризуется интенсивной конкуренцией, постоянно расширяющимся ассортиментом продуктов, многочисленными категориями клиентов различающихся по группам доходов и географическому положению. Управлять сотней магазинов, разбросанных по всей стране, даже тысячами различных магазинов в мировом масштабе, и обеспечивать одинаковое качество обслуживания в каждом магазине - довольно сложная задача. Чтобы смоделировать предполагаемое изменение поведения, менеджеры, занимающиеся анализом стратегии развития организации, должны изучить историю системы и текущее состояние.

Разработка моделей розничной торговли требует специализированных знаний, которые можно описать с помощью нечетких когнитивных карт (НКК). НКК были впервые предложены в 1986 году Б. Коско [3] и представляют систему «ориентированный причинно-следственный граф»,

который содержит концепты и связи между ними. Начальная структура графа задается с помощью экспертной оценки, далее проводится обучение НКК для выявления скрытых влияний и моделирование рассматриваемой системы [4].

Нечеткие когнитивные карты традиционно используются для анализа и моделирования сложных систем [5]. В литературе описаны примеры применения НКК для моделирования работы предприятия розничной торговли [6], построения процесса стратегического планирования [7] и для понимания влияния различных действий на доходы и расходы [8]. НКК могут обрабатывать как сложные, так и неполные или противоречивые данные для плохо структурированных систем.

Розничная торговля как пример сложной системы

Рассмотрим систему розничной торговли как сложную систему, для этого выделим в ней основные характеристики сложных систем [9]:

1) Возникновение. Возникновение описывает свойство сложной системы, при котором систему нельзя напрямую описать через сумму ее частей. Например, изменяющуюся лояльность клиентов можно концептуализировать, как нелинейную взаимосвязь качества продукта предприятия розничной торговли, репутации компании при обслуживании клиентов, маржи на товары, затрат на рекламу и других систем.

2) Потоки. Элементы розничной компании динамично взаимодействуют, обмениваясь информацией и влияя друг на друга. Некоторые концепты, такие, как «техническая готовность поставщика» или «размер уплаченных налогов», взаимодействуют с ограниченным числом концептов, но последствия этих взаимодействий распространяются на всю систему. Изменение одного концепта приводит к изменению всей системы, но, поскольку система является сложной, невозможно оперировать абсолютными значениями изменения, однако можно определить вес (или импульс) изменения в концепте и его влияние на всю систему. Правильное

определение концептов и взаимодействий между ними - важная задача моделирования любой сложной системы.

3) Внутренние модели. Некоторые из концептов могут контролировать систему и быть доступными для изменения руководства, другие представляют собой концепты состояния, претерпевающие внутренние изменения в результате изменения внешней среды. Последняя группа — это целевые концепты, которые описывают целевые состояния системы и показывают управленческие цели, которых необходимо достичь (например, лояльность клиентов или мотивация сотрудников).

4) Нелинейность. Взаимодействие компонентов сложной системы не является линейным во времени и может изменять вес влияния при изменении состояния системы. Например, в зависимости от расходов на рекламу, стоимости продукта и уровня обслуживания клиентов, лояльность клиентов может различаться. Статистический анализ этих процессов - чрезвычайно сложная задача из-за эффектов нелинейных взаимодействий, представляющих собой комбинацию состояния и начальных условий, из которых возникла та или иная форма поведения в сложной системе [2].

5) Ограниченная предсказуемость. Внезапные изменения в сложных системах, таких, как розничная компания, могут вынудить систему перейти в другой режим и перейти от высокой степени стабильности к очень нестабильному поведению. Даже небольшое изменение начальных условий может со временем привести к различной динамике системы. Например, падение обменного курса валюты повлияет на эксплуатационные расходы, закупочную цену поставщиков и, впоследствии, на прибыльность компании в целом. Это изменение будет запомнено системой, и его последствия будут расположены не в определенном месте, а распределены по всей системе. Для менеджеров, выполняющих планирование сценариев и анализ стратегии для розничной компании, важна оценка истории и текущего состояния системы,

чтобы иметь возможность моделировать потенциальные изменения поведения.

Отрасль розничной торговли — это динамичная система, которая состоит из множества слабо связанных сложно измеримых компонентов, которые должны быть описаны по их влиянию на систему.

Методы исследования

Моделирование уже в течение длительного периода времени является одним из наиболее широко используемых методов управленческого планирования [10], для помощи менеджерам в анализе сложных проблем и принятии стратегических решений. Известны различные методы прогноза развития экономических систем, одним из которых является использование теории НКК [11].

С целью решения обратной задачи для предприятия розничной торговли был выбран алгоритм решения обратной задачи моделирования [12], в основе которого лежит математический аппарат нейтрософских нечетких уравнений.

Разделим структуру НКК на подматрицы $w = |w_{ij}|$ условий; $A = |a_{ij}|_{n_x \times n_u}$ управления; цели $B = |b_{ij}|_{n_x \times n_u}$; $C = |c_{ij}|_{n_y \times n_x}$ состояния и прямого влияния $D = |d_{ij}|_{n_y \times n_x}$:

$$\vec{S}_{k+1} - W^t \circ \vec{S}_k = \begin{bmatrix} \otimes & \otimes & \otimes \\ B & A & \otimes \\ D & C & \otimes \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} \vec{u}_k \\ \vec{x}_k \\ \otimes \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} \otimes \\ \vec{x}_{k+1} \\ y_k \end{bmatrix} \quad (1)$$

Уравнение (1) определяет правила

изменения веса вершин в модели. Вектор \vec{S}_k можно разбить на соответствующие векторы $\vec{u}_k, \vec{x}_k, \vec{y}_k$, где по аналогии с традиционной теорией линейных систем, \vec{u}_k — вектор концептов управления; \vec{x}_k — вектор концептов

состояния; \vec{y}_k — вектор целевых концептов. Элементы, содержащие 0 в строках матрицы W , принадлежат подматрице целей B , содержащие 0 в столбцах - подматрицы управления C . Решение для задачи прямого

сценарного моделирования представлено в виде $(\vec{x}_{k+1} - A \circ \vec{x}_k \vee B \circ \vec{u}_k, \vec{y}_k - C \circ \vec{x}_k \vee D \circ \vec{u}_k, \quad (2) \quad \text{и}$

$$\begin{aligned} & \vec{x}_k - A^* \circ B \circ \vec{u}_0, \\ & (\vec{y}_k - C \circ A^* \circ B \circ \vec{u}_0 \vee D \circ \vec{u}_0, \quad (3): \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \vec{x}_{k+1} - A \circ \vec{x}_k \vee B \circ \vec{u}_k, \\ & \vec{y}_k - C \circ \vec{x}_k \vee D \circ \vec{u}_k, \end{aligned} \quad (2)$$

Или:

$$\begin{aligned} & \vec{x}_k - A^* \circ B \circ \vec{u}_0, \\ & \vec{y}_k - C \circ A^* \circ B \circ \vec{u}_0 \vee D \circ \vec{u}_0, \end{aligned} \quad (3)$$

Рассмотрим обратную задачу моделирования для нечетких соответствий заключающуюся в:

1. определении A при известных X, B и \circ
2. определении X с известными A, B и \circ

Используемый в статье алгоритм ориентирован на выбор детерминированных концептов в системе нечетких полиномиальных уравнений для минимизации операций перебора списков. Этот подход основан на идее нахождения всех выбранных элементов A_{ij} в A , являющихся решениями i -го (т.е. $A_{ij} \circ X_j = B_i$) уравнения. X_j присваивается значение соответствующего B_i , когда коэффициент A_{ij} является частью решения, или 0 в противном случае. Для наибольшего решения существует аналитическое выражение, а для поиска минимальных решений был использован метод,

основанный на концепции доминантности [13] в сочетании с операциями перебора списков.

Результаты численного эксперимента

В основе численного эксперимента для решения обратной задачи лежит НКК, описанная в работе [6] и представленная на рис.1 НКК была обучена с использованием метода вероятностного транзитивного замыкания [14].

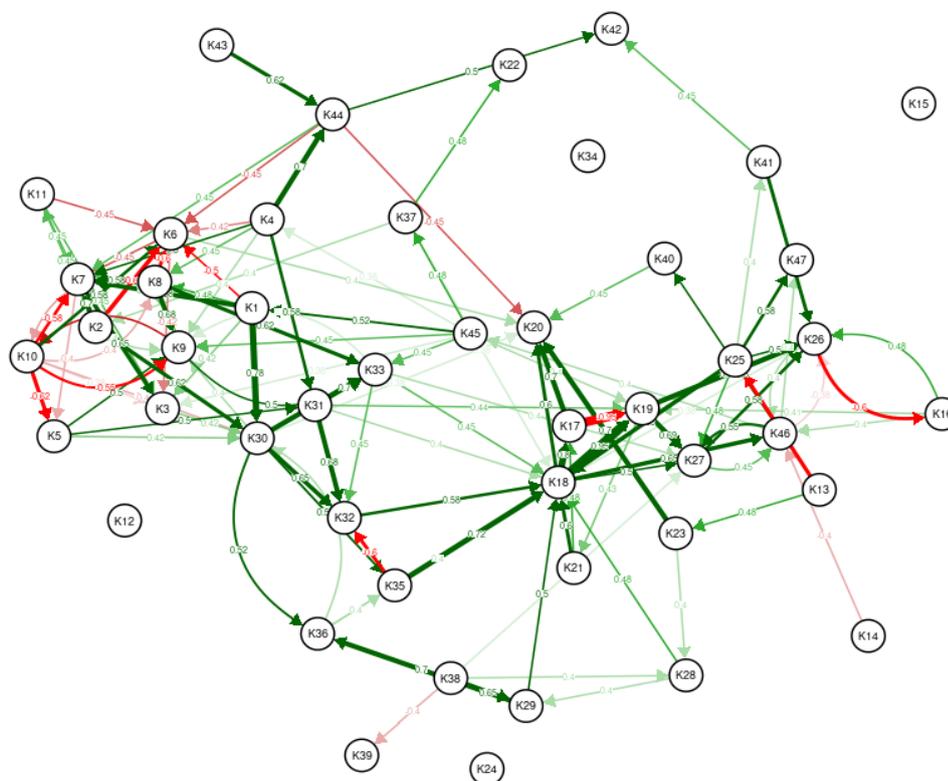


Рис. 1. – Нечеткая когнитивная карта предприятия розничной торговли.

Соединения показаны только для абсолютных влияний, равных или превышающих 0.4. Зеленые стрелки обозначают положительные влияния, а красные стрелки — отрицательные. Более толстые стрелки подразумевают более сильное влияние концепции. Отдельные концепты имеют абсолютное влияние ниже 0.4.

Решим задачу формирования стратегии развития розничной системы, которая определяется уровнем изменения целевых концептов системы. Для

этого получим начальные значения векторов управления системой, которые приводят к заданным целевым показателям. Зададим как целевую стратегию увеличения прибыли и репутации компании и присвоим значение изменения и консонанса этих концептов равное 0.1. Для решения задачи найдем вектор значений приращений управляющих концептов и проведем анализ влияния различных операторов нечеткой композиции на формирование стратегий.

Таблица №1

Полученные приращения управляющих концептов с использованием композиции max - min

Тип решения	IT инфраструктура	Ассортимент товаров	Курс обмена валюты	Инвестиции
Max	0.08	0	0	0
Min	-0.08	0	0	0
Min	0	0.08	0	0
Min	0	-0.08	0	0
Min	0	0	0.08	0
Min	0	0	-0.08	0
Min	0	0	0	0.08
Min	0	0	0	-0.08
Min	0.08	0.08	0.08	0.08

Анализируя данные, полученные из таблицы 1 и таблицы 2, можно увидеть, что система более устойчива при использовании композиции максимум - алгебраическое произведение, в то время как при использовании композиции max-min система безразлична к вектору управления и будет

приходить к цели при любых минимальных воздействиях. Также были произведены расчеты с использованием наиболее консервативной композиции - усиленное производство. В этом случае нет такой стратегии, при использовании которой система перейдет в целевое состояние. Этот оператор не предоставляет конструктивной информации для анализа и моделирования стратегий развития системы.

Таблица №2

Полученные приращения управляемых концептов с использованием композиции max - алгебраический продукт

Тип решения	IT инфраструктура	Ассортимент товаров	Курс обмена валюты	Инвестиции
Max	0.21	0.42	-1.0	0.52
Min	0	0.42	0.87	0.52
Min	0.21	0.42	0.87	-0.43
Min	-0.17	0.42	0.87	0.52
Min	0.21	0.42	0.87	0
Min	0	0.42	0	0.52
Min	0.21	0.42	0	-0.43
Min	-0.17	0.42	0	0.52
Min	0.21	0.42	0	0

Приведём анализ полученных решений обратной задачи при построении стратегии управления предприятием. Анализ таблицы 2 позволяет сделать вывод, что полученное решение определяет необходимость увеличения «Ассортимента товаров» и в максимальном, и в

минимальных решениях, что показывает важность ассортимента для достижения целевых показателей прибыли и репутации компании. Другие управляющие концепты в этом сценарии противоречат друг другу и позволяют менеджерам принимать решение о повышении одного управляющего концепта и уменьшении другого. С помощью решения обратной задачи в НКК можно смоделировать процесс управления предприятием розничной торговли и получить различные сценарии изменения управляющих концептов для достижения целевых показателей предприятия. Это поможет менеджерам в стратегическом планировании, что в определенной степени помогает определять развитие компании и прогнозировать потенциальные результаты управленческих решений.

Литература

1. Беккер Е.И. Современное состояние и динамика развития торговых розничных сетей (обзор) // Инженерный вестник Дона, 2011, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2011/492/.
2. Johnson C.W. What are emergent properties and how do they affect the engineering of complex systems? *Reliability Engineering & System Safety*. 2006. №91. pp. 1475-1481.
3. Kosko B. Fuzzy cognitive maps. *International Journal of Man-Machine Studies*. 1986. №24. pp. 65-75.
4. Петухова А.В., Коваленко А.В., Теунаев Д.М. Обзор динамических свойств и алгоритмов обучения нечетких когнитивных карт // Политематический сетевой электронный научный журнал кубанского государственного аграрного университета, 2021. №167. С. 43-74.
5. Гинис Л.А. Развитие инструментария когнитивного моделирования для исследования сложных систем // Инженерный вестник Дона, 2013, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1806/.

6. Petukhova A., Fachada N. Retail system scenario modeling using fuzzy cognitive maps. *Information*. 2022. №13. pp. 251.

7. Kardaras D., Karakostas B. The use of fuzzy cognitive maps to simulate the information systems strategic planning process. *Information and Software Technology*. 1999. №41. pp. 197-210.

8. Groumpos P.P. Modelling business and management systems using Fuzzy cognitive maps: A critical overview. *International Journal of Business and Technology*. 2016. №42. pp. 207-212.

9. Holland J.H. Complex Adaptive Systems. *Daedalus*. 1992. №121. pp. 17-30.

10. Watson, Hugh & Wixom, Barb. The Current State of Business Intelligence. *Computer*. 2007 №40. 96-99.

11. Petukhova A.V., Kovalenko A.V. Methods for forecasting the development of complex systems using the theory of fuzzy cognitive map. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2022. №1. pp. 81-95.

12. Petukhova A.V., Kovalenko A.V., Ovsyannikova A.V. Algorithm for Optimization of Inverse Problem Modeling in Fuzzy Cognitive Maps. *Mathematics*. 2022. №10. pp. 3452.

13. Peeva K. Universal algorithm for solving fuzzy relational equations. *Italian Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2006. №19. pp. 169.

14. Niesink P, Poulin K, Šajna M. Computing transitive closure of bipolar weighted digraphs. *Discrete Applied Mathematics*. 2013. №1. pp. 217-243.

References

1. Bekker E.I. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2011, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2011/492/.

2. Johnson C.W. *Reliability Engineering & System Safety*. 2006. №91. pp. 1475-1481.

3. Kosko B. *International Journal of Man-Machine Studies*. 1986. №24. pp. 65-75.



4. Petukhova A.V., Kovalenko A.V., Teunayev D.M. Politematicheskij setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2021. №167. pp. 43-74.
5. Ginis L.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1806/.
6. Petukhova A, Fachada N. Information. 2022. №13. pp. 251.
7. Kardaras D., Karakostas B. Information and Software Technology. 1999. №41. pp. 197-210.
8. Groumpos P.P. International Journal of Business and Technology. 2016. №42. pp. 207-212.
9. Holland J.H. Complex Adaptive Systems. Daedalus. 1992. №121. pp. 17-30.
10. Watson, Hugh & Wixom, Barb. The Current State of Business Intelligence. Computer. 2007 №40. 96-99.
11. Petukhova A.V., Kovalenko A.V. Computational Mathematics and Information Technologies. 2022. №1. pp. 81-95.
12. Petukhova A.V., Kovalenko A.V., Ovsyannikova A.V. Mathematics. 2022. №10. pp. 3452.
13. Peeva K. Italian Journal of Pure and Applied Mathematics. 2006. №19. pp. 169.
14. Niesink P, Poulin K, Šajna M. Discrete Applied Mathematics. 2013. №1. pp. 217-243.