

УДК 15:519.876

СТРУКТУРНО-ЦЕЛЕВОЙ АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ

В. И. Максимов

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова, г. Москва

Рассмотрены модели, предназначенные для анализа и моделирования проблем, возникающих в слабоструктурированных ситуациях. Представлен структурно-целевой анализ динамической модели управляемого развития ситуации. Рассмотрены методы нахождения векторных управлений, обеспечивающих целенаправленное развитие ситуации.

ВВЕДЕНИЕ

На рубеже тысячелетий внешняя среда для сложных социально-экономических объектов — geopolитическая, экономическая, социальная и технологическая — все более приобретает свойства нестабильности и неопределенности. Нестабильность проявляется в том, что темпы изменения внешней среды растут, а неопределенность — в том, что возникающие ситуации все чаще становятся неизвестными (совершенно новыми). В таких ситуациях управление развитием отрасли, округа, региона, крупной корпорации резко усложняется, причем прошлый опыт управления, пусть даже успешный, не всегда пригоден для разрешения новых проблемных ситуаций. Это приводит к увеличению вероятности принятия неверных стратегических решений по обеспечению целенаправленного развития социально-экономических ситуаций.

Возникла необходимость перехода от управления на основе прошлого опыта к стратегическому управлению, выявляющему внешние тенденции, риски, опасности и шансы, которые способны не только изменить сложившуюся ситуацию в настоящем, но и вызвать новые направления развития в будущем.

Учет и использование в своих интересах изменений, которые происходят во внешней среде, позволит экономить ограниченные ресурсы на развитие (инвестиции).

Несмотря на значительное число публикаций по вопросам развития социально-экономических объектов (СЭО), проблема целеполагания на предпроектном этапе по-прежнему остается открытой, поскольку основные усилия в исследовании операций и теории принятия решений направлены на достижение уже определенной цели [1].

При анализе слабоструктурированных систем затруднен традиционный эконометрический (социомет-

рический и т. п.) подход к анализу процессов для выработки комплексных (т. е. затрагивающих различные аспекты исследуемой системы) решений.

Предлагаемый подход ориентирован на качественный анализ сложных ситуаций, интерпретируемых как слабоструктурированные системы, характеризующиеся отсутствием точной количественной информации о происходящих в них процессах. Число переменных в таких ситуациях может измеряться десятками, и все они вплетены в паутину причин и следствий. Увидеть и осознать логику развития событий на таком многофакторном поле крайне трудно, и в то же время непрерывно приходится принимать решения о выборе тех или иных мер, способствующих развитию ситуации в нужном направлении.

Качественный анализ сложной ситуации предусматривает определение тенденций протекающих процессов, качественную оценку этих тенденций и выбор мер, способствующих их развитию в нужном направлении [2—5].

1. СТРУКТУРИЗАЦИЯ И СТАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СИТУАЦИЙ

Понятие ситуации включает в себя различные по природе и характеру процессы (социальные, экономические, политические и др.), характеризующие взаимодействие внутренней и внешней сред СЭО. Сложность выработки решений обусловлена тем, что эти процессы взаимосвязаны друг с другом, и для прогнозирования последствий решения необходимо учитывать эту сложную структуру взаимосвязей процессов. Положение усложняется тем, что, как правило, достоверная количественная информация об этих процессах отсутствует, и о них можно судить только по косвенным характеристикам. Это затрудняет построение количественных моделей развития процессов для принятия решений. Вы-



ход состоит в обращении к качественным моделям ситуации.

Возникающие проблемные ситуации (проблемы) можно разделить на два типа.

- *Хорошо структурированные*, для которых характерна четкая структура, определенные данные, известные источники информации, небольшие затраты на сбор информации.
- *Слабоструктурированные*. Во многих проблемных областях невозможно создание традиционных количественных формальных моделей. Для задач подобного типа характерны неопределенность, описание на качественном уровне, неоднозначность последствий решений поставленных проблем. Информационные технологии, обеспечивающие процесс передачи ЭВМ информации о таких проблемах, т. е. знаний и их обработке, носят название когнитивных (*cognitive*), иначе — познавательных.

Структуризация или концептуализация знаний характерна тем, что *разрабатывается структура полученных знаний* о предметной области, т. е. определяется список основных понятий о предметной области, выявляются отношения между понятиями, определяются связи данной предметной области с окружающим миром. Происходит разработка *неформального описания знаний* о предметной области, которую можно наглядно изобразить в виде графа, таблицы, текста и т. д. При формализации знаний аналитик-когнитолог выбирает один из способов формализации знаний, адекватный его представлению о предметной области (см. цветную вклейку).

Этап получения знаний имеет свои особенности, которые заключаются в том, что его можно разделить на более тонкие процессы (извлечения, приобретения, формирования), имеющие свою собственную специфику.

В процессе *извлечения (elicitation)* знаний происходит взаимодействие с экспертом — источником знаний, при котором становится ясным способ рассуждения специалистов при поддержке принятия решений и структура его представлений о предметной области. Процесс извлечения — это процедура, в которой аналитик, имеющий опыт в области системного анализа, математической логики и когнитивной психологии, создает «скелетную» модель предметной области, которая на последующих этапах будет наполнена конкретными сведениями об объектах предметной области.

Разработанная нами методология синтезирует *системный и когнитивный подходы*.

Цель когнитивной структуризации состоит в формировании и уточнении *гипотезы о функционировании исследуемого объекта*, рассматриваемого как сложная система, которая состоит из отдельных внутренних и внешних элементов, подсистем, взаимодействующих друг с другом, на основе структурной схемы причинно-следственных связей.

Содержательные выводы о тенденциях развития ситуации можно получить, пользуясь качественными оценками, сформулированными на концептуальном уровне.

В настоящей работе рассмотрены модели для решения слабоструктурированных проблем, построенные на основе *когнитивной карты ситуации*. Когнитивная карта представляет собой квадратную таблицу, в которой:

— строки и столбцы взаимно однозначно соответствуют базисным факторам, в терминах которых описывается ситуация;

— элемент, стоящий на пересечении *i*-й строки и *j*-го столбца, отражает факт непосредственного влияния *i*-го фактора на *j*-й фактор. Знак этого элемента отображает знак влияния (положительный или отрицательный), а модуль — силу такого влияния в соответствующей шкале.

Когнитивная карта является исходным статическим представлением (отображением) связей между факторами, существующими в исследуемой ситуации. Разрешение проблем целенаправленного развития, возникающих в слабоструктурированных ситуациях, требует построения динамической имитационной модели и получения на ее основе новых знаний о структуре и динамике исследуемой ситуации.

Модель сложной ситуации строится следующим образом.

- Для описания качественных значений базисных факторов выбирается набор соответствующих лингвистических переменных. Выбор градаций по значениям лингвистических переменных позволяет дать необходимую степень детализации — «слабо—средне—сильно» или, более подробно, «очень слабо—слабо—средне—сильно—очень сильно» и т. д. Каждой лингвистической переменной соответствует определенное число в шкале [0, 1], являющееся числовым эквивалентом этой переменной. Эти числовые эквиваленты назовем *качественными переменными*.
- На основе знаний об исследуемой ситуации составляется уравнение для каждого базисного фактора, включающее в себя набор всех факторов, непосредственно влияющих на этот фактор (этот набор выбирается по когнитивной карте ситуации) вместе с функциональными характеристиками соответствующих влияний.

Моделирование основано на сценарном подходе [2, 3, 6] и представляет собой процесс передачи управлений по вершинам графа модели.

Сценарий — набор тенденций, характеризующих саморазвитие ситуации в начальный момент, векторы целей развития, векторы управлений (управляющих воздействий); они характеризуют комплексы мероприятий, влияющих на развитие ситуации, и системы наблюдаемых параметров (факторов), иллюстрирующих тенденции результирующих процессов в ситуации.

Модель может исследоваться по трем основным направлениям:

- *прогноз саморазвития ситуации* (без внешнего воздействия на процессы в ситуации — ситуация развивается сама по себе);
- *прогноз развития ситуации с выбранным вектором управлений* (прямая задача);
- *синтез вектора управлений* для достижения необходимого направления развития ситуации (обратная задача).

Моделирование включает в себя определенную последовательность взаимосвязанных этапов:

- определение начальных условий, тенденций, характеризующих развитие ситуации на начальном этапе;
- задание целевых направлений (увеличение, уменьшение) и силы (слабо, сильно) изменения тенденций процессов в ситуации;



- выбор набора управляющих факторов, определение их силы и направленности воздействия на ситуацию;
- выбор вектора управлений (факторов) ситуацией, силу и направленность которых необходимо определить;
- выбор наблюдаемых факторов (индикаторов), характеризующих результирующее развитие ситуации, осуществляется в зависимости от целей анализа и желания пользователя;
- моделирование по одному из перечисленных ранее трёх направлений.

2. ИМИТАЦИОННЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ КОГНИТИВНЫЕ МОДЕЛИ САМОРАЗВИТИЯ СИТУАЦИИ

С когнитивной картой ассоциируется графовая модель ситуации [7], анализ которой позволяет выявить структурные свойства ситуации. В основе модели лежит взвешенный орграф $G = (X, A)$, в котором X — множество вершин, взаимно однозначно соответствующее множеству базисных факторов, A — множество дуг, отражающих факт непосредственного влияния факторов. Каждая дуга, связывающая некоторый фактор x_j с некоторым фактором x_i , имеет вес a_{ij} , знак которого говорит о знаке влияния фактора x_i на фактор x_j , а модуль величины a_{ij} — о силе этого влияния. Таким образом, когнитивную карту можно рассматривать как матрицу смежности A_g графа $G = (X, A)$ [3, 8].

Пусть задан вектор начальных тенденций всех факторов $x(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t), x_{n+1}(t), \dots, x_N(t))$ в момент $t = 0$. Динамика изменений его компонент во времени определяется видом модели, выбираемой для описания взаимодействия непосредственных влияний, одновременно приходящих на каждый базисный фактор от «соседних» факторов.

Модель саморазвития ситуации для приращений тенденций изменения факторов предназначена для исследования динамики изменения тенденций развития ситуаций, т. е. ее переменные отражают «приращение тенденций изменения фактора», численные значения которых определяются в качественной шкале $[-1, 1]$. В её основу положена гипотеза о том, что текущее приращение каждого фактора является взвешенной суммой текущих приращений действующих на него «соседних» факторов. Элементарный такт квантования по времени в модели равен 1. Обозначим через $p_i(t)$ значение (в шкале $[-1, 1]$) приращения i -го базисного фактора в момент t .

Модель для приращений тенденций изменения факторов имеет вид:

$$p_i(t+1) = \sum_{j \in I_i} a_{ij} p_j(t), \quad i = 1, \dots, N, \quad (1)$$

где I_i — множество номеров факторов, от которых идут дуги (непосредственные влияния) к фактору x_i ; a_{ij} — элементы матрицы $A = A_g^T$ (веса соответствующих дуг); N — количество факторов в когнитивной карте — модели ситуации; T — знак транспонирования.

В матричной форме модель саморазвития ситуации (1) выглядит так: $p(t+1) = Ap(t)$, где $p(t) = (p_1(t), \dots, p_N(t))^T$.

Модель саморазвития ситуации для значений тенденций изменения факторов получается из модели (1) путем представления приращения $p_i(t)$ как разности значений фактора x_i в соседние моменты времени: $p_i(t) = \Delta x_i(t) = x_i(t) - x_i(t-1)$.

Переход от приращений факторов $p_i(t)$ к значениям факторов $x_i(t)$ позволяет исследовать значение любого фактора модели в различные моменты времени.

Тогда, учитывая выражение (1), значение фактора x_i в момент времени $(t+1)$ определим как

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \sum_{j \in I_i} a_{ij} (x_j(t) - x_j(t-1)), \quad i = 1, \dots, N, \quad (2)$$

или в матричной форме

$$x(t+1) = (E_N + A)x(t) - Ax(t-1), \quad (3)$$

где $x(t) = (x_1(t), \dots, x_N(t))^T$, E_N — единичная матрица порядка N .

Модифицированная модель саморазвития ситуации для значений тенденций изменения факторов отличается от модели (2) иным определением характера взаимодействия одновременных влияний «соседних» факторов на каждый фактор: алгебраическая сумма приращений факторов, входящая в выражение (2), заменяется средним арифметическим таких приращений, т. е.

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \frac{1}{|I_i|} \sum_{j \in I_i} a_{ij} (x_j(t) - x_j(t-1)), \quad i = 1, \dots, N,$$

где $|I_i|$ — мощность множества I_i .

Обобщенная модель саморазвития ситуации для значений тенденций изменения факторов. Описанные выше модели для значений факторов являются линейными, со всеми их достоинствами и недостатками. При более глубоком изучении ситуации может потребоваться учет того, что характер и сила влияний факторов друг на друга не постоянные, веса дуг могут менять знаки, а сила влияния — зависеть от текущих значений фактора. Учет подобных обстоятельств приводит к тому, что когнитивная карта ситуации превращается в функциональный граф, вес каждой дуги в котором есть, в общем случае, произвольная функция от текущих значений инцидентных ей факторов-вершин.

Одна из таких нелинейных моделей описывается следующими уравнениями:

$$x_i(t+1) = \frac{1}{|I_i^+(t)|} \sum_{j \in I_i^+(t)} a_{ij} x_j(t) + \frac{1}{|I_i^-(t)|} \sum_{j \in I_i^-(t)} a_{ij} x_j(t), \quad i = 1, \dots, N. \quad (4)$$

Здесь $I_i^+(t)$, $I_i^-(t)$ — множества номеров факторов, от которых поступают на фактор x_i соответственно положительные и отрицательные непосредственные воздействия в момент t . Согласно уравнениям (4), результирующее значение представляет собой сумму средних



арифметических в момент t как по положительным, так и по отрицательным воздействиям.

В силу нелинейности модель (4) обладает большим «богатством» фазового портрета, позволяющим исследовать ряд эффектов, свойственных сложным ситуациям.

В процессе развития модельной ситуации во времени на каждый фактор помимо непосредственных влияний от «соседних» факторов приходят также влияния от более «отдаленных» факторов, эти *опосредованные влияния* передаются через цепочки соответствующих факторов и соединяющих их дуг графа. Множество влияний, как непосредственных, так и опосредованных, которым подвержен каждый фактор в ситуации, описывается с помощью понятия *транзитивного замыкания* когнитивной карты ситуации [8], определяемого как сумма бесконечного ряда $E_N + A + A^2 + \dots + A^t + \dots$ по степеням матрицы A . Каждый элемент этого ряда характеризует прохождение путей длины t в графе, т. е. осуществление непосредственных, опосредованных через один фактор, через два фактора взаимовлияний.

Оценку суммы этого ряда можно получить только при условии *устойчивости матрицы смежности* A_g графа G . Тогда все элементы этого ряда стремятся к конечным пределам при неограниченном возрастании длины t .

Для нахождения *транзитивного замыкания* достаточно рассмотреть N членов в ряду по степеням матрицы A , где N — порядок матрицы A , т. е. число базисных факторов в когнитивной карте ситуации. Тогда транзитивное замыкание матрицы A оценивается матрицей:

$$Q = E_N + A + A^2 + \dots + A^N \cong (E_N - A)^{-1}. \quad (5)$$

Отсюда вытекает необходимость стабилизации графа G формального описания ситуации. Под *стабилизацией* графа G (или, что то же самое, под стабилизацией когнитивной карты ситуации) будем понимать такую «нормировку» матрицы A_g когнитивной карты, при которой все собственные значения результирующей матрицы содержатся внутри окружности единичного радиуса на комплексной плоскости. Это условие является необходимым и достаточным условием устойчивости линейной системы (т. е. ограниченности диапазонов значений её переменных), работающей в дискретном времени [3, 8].

Если исходная матрица A_g когнитивной карты неустойчива (т. е. некоторые из её собственных значений выходят из окружности единичного радиуса), то варианты её «нормировки» могут состоять в следующем.

Исходная матрица A_g умножается на так называемый стабилизирующий множитель $0 < k_{ct} < 1$, такой, что матрица $k_{ct}A_g$ будет устойчивой. При этом каждое собственное значение матрицы $k_{ct}A_g$ равно соответствующему собственному значению матрицы A_g , умноженному на k_{ct} . Согласно теории линейных систем время переходного процесса модели (т. е. время от подачи начальных условий на модель до момента перехода модели в установившееся состояние) тем меньше, чем меньше собственные значения матрицы $k_{ct}A_g$ модели, а следовательно — чем меньше величина k_{ct} . При малом k_{ct} модель довольно быстро переходит в установившееся состояние и её динамика (временные изменения факторов) слабо

выражена ввиду кратковременности переходного процесса.

Другой вариант стабилизации матрицы A_g состоит в делении каждого i -го столбца (или строки) матрицы A_g на число $(s_i + \varepsilon)$, где s_i — число ненулевых элементов i -го столбца (или строки), а ε — некоторое малое число, необходимость которого вызвана лишь наличием строк (или столбцов) в матрице A_g с одним ненулевым элементом, так что без числа ε результат деления такой строки (столбца) на s_i был бы равен 1, что недопустимо для выполнения условия устойчивости матрицы A_g .

Таким образом, транзитивное замыкание когнитивной карты описывает интегральные (т. е. непосредственные и опосредованные) влияния изменения одних факторов на изменения других факторов (т. е. связывает приращения факторов).

При этом (i, j) -й элемент матрицы Q транзитивного замыкания связывает знак исходного приращения Δx_i фактора x_i со знаком интегрального приращения Δx_j фактора x_j .

Другими словами, если в ситуации возмущается (получает приращение) только фактор x_i , то с учетом всех опосредованных влияний фактора x_i на фактор x_j знак результирующего приращения фактора x_j определяется как $\text{sign}\Delta x_j = \text{sign}q_{ij} \cdot \text{sign}\Delta x_i$, где q_{ij} — элемент матрицы Q [8].

3. СТРУКТУРНО-ЦЕЛЕВОЙ АНАЛИЗ

Когнитивные имитационные модели, рассмотренные в § 2, предназначены для анализа и моделирования проблем, возникающих в слабоструктурированных ситуациях. Для разрешения проблемной ситуации необходимо понимание её структурных свойств (переходящих в структурные свойства модельного отображения проблемы) и динамических характеристик ситуации и самой проблемы, определяющих пути её разрешения.

Эти вопросы рассматриваются на примере модели для значений тенденций изменения факторов, определенной уравнением (3).

Из уравнения (3) следует (с учетом, что $X(t) = 0$ для $t < 0$)

$$X(t) = (E_N + A + A^2 + \dots + A^t)X(0). \quad (6)$$

Если управление развитием ситуации понимать как управление начальным состоянием $X(0)$, то при $t \geq N$ уравнение (6) при наличии управления принимает вид (с учетом выражения (5))

$$X(t) = QX(0) + QBU(0), \quad (7)$$

где $U(0)$ — вектор управлений, B — $(0, 1)$ -матрица, ненулевые элементы которой указывают на номера корректируемых координат начального состояния $X(0)$.

Из уравнения (7) следует, что влияния начальных условий и управлений на текущее состояние модели при больших t ($t \geq N$) опосредуются через матрицу Q транзитивного замыкания и зависят от её структурных свойств, которые рассматриваются в п. 3.2. Процедуры



выбора управлений, обеспечивающих целенаправленное развитие ситуаций, также основанные на уравнении (7), описываются в п. 3.3.

3.1. Целеполагание при управляемом развитии ситуации

Гипотеза целеполагания [9–11]: лицо, принимающее решение, ЛПР (или аналитик), может указать, какое направление изменения фактора (наиболее значимых для него факторов) он рассматривает как желательное (благоприятное). Желательное направление изменения фактора x_i определяется показателем (оценкой) r_p , принимающим значение +1, если желательно увеличение значения фактора x_i (положительная динамика фактора), и -1, если желательно уменьшение фактора x_i (отрицательная динамика); $r_i = 0$, если затруднительно указать желательную динамику по фактору x_i .

Показатель r_i называется *оценкой динамики фактора* (ОДФ) x_i .

Цель развития ситуации описывается подмножеством целевых факторов когнитивной карты модели. Это означает, что вектор целей развития ситуации есть либо вектор значений целевых факторов (фиксированная цель), либо вектор направления изменения этих значений (нефиксированная цель).

Определение 1. *Фиксированная векторная цель включает в себя вектор Y^* целей вместе с заданными значениями тенденций изменения каждой из целей y_i^* .*

Фиксированная векторная цель — это точка в m -мерном пространстве тенденций целей, представляющая для пользователей вектор некоторых «идеальных» значений тенденций изменения целевых факторов.

Определение 2. *Нефиксированная векторная цель включает в себя вектор Y^* целей вместе с указанием благоприятных тенденций изменения его координат в соответствии с их оценками изменения факторов.*

Вектор благоприятных тенденций представляет собой вектор интересов ЛПР (аналитика). При этом на значения благоприятных изменений целевых факторов не налагаются ограничений (чем больше — тем лучше).

3.2. Структурно-целевой анализ управляемого развития ситуации

Анализ координат вектора целей на непротиворечивость. Обозначим через $Y = \{y_1, \dots, y_m\}$ множество целевых факторов. Пусть $r(Y)$ — вектор желательной динамики целевых факторов (ОДФ).

Определение 3. *Вектор целей Y называется непротиворечивым, если*

$$r_i r_k = \text{sign} q_{ik}, \forall y_i, y_k \in Y, \quad (8)$$

где q_{ik} — элемент матрицы Q .

При выполнении условия (8) целевые факторы y_i и y_k согласованы, в противном случае — не согласованы.

Суть задания непротиворечивого вектора целей состоит в том, чтобы обеспечение желательного интегрального изменения одних целевых факторов не приводило бы к нежелательным интегральным изменениям других целевых факторов.

Анализ координат вектора управлений на согласованность с вектором целей. Для управляющих факторов понятие ОДФ неприменимо, поскольку аналитик изначально (до проведения структурно-целевого анализа) «не знает», как скажется изменение того или иного управляющего фактора на интегральном поведении целевых факторов.

Определение 4. *Вектор управлений согласован с вектором целей Y , если для каждой координаты вектора управлений $U = (u_1, \dots, u_p)$ можно указать такой знак, что для результирующего знакового вектора $\text{sign} U$*

$$r_s = \text{sign} q_{st} \text{sign} u_t, \forall u_t \in U, \forall y_s \in Y. \quad (9)$$

Суть согласованности управляющих факторов с вектором целей состоит в том, что при выполнении условия (9) всякое изменение управляющих факторов в соответствии с вектором $\text{sign} U$ не вызовет изменения никакой координаты вектора целей Y в нежелательном направлении. Обозначим через $U^*(0)$ вектор управлений, знаки которых выбраны в соответствии с условием (9), а через $|U^*(0)|$ — вектор $U^*(0)$, в котором все координаты заменены их абсолютными значениями. Введенные понятия позволяют сформулировать следующее

Утверждение. *Если выбранный вектор целей Y непротиворечив и множество управляющих факторов согласовано с вектором целей, то возможен такой выбор вектора управлений U , для которого*

$$|U_1^*(0)| \leq |U_2^*(0)| \rightarrow Y(U_1^*(0)) \leq Y(U_2^*(0)), \quad (10)$$

где $Y(U_i^*(0))$ — вектор изменений целевых факторов, обусловленных подачей вектора $U_i^*(0)$, $i = (1, \dots, m)$, управлений, т. е. свойство «доминирования» по модулям управлений переходит в свойство «доминирования» по результатам их воздействия на целевые факторы.

Другими словами, более «интенсивное» управление (с большими абсолютными значениями координат) вызовет более «интенсивные» изменения координат вектора целей в желательных направлениях.

Введенные определения полезны при анализе и моделировании ситуаций. Так, нарушение условий непротиворечивости выбранного вектора целей может помочь аналитику разобраться во взаимодействии целевых факторов и более «правильно», сообразуясь с ситуацией, задать вектор целей. Анализ вектора выбранных управляющих факторов на согласованность с вектором целей позволит отказаться от противоречивых управлений и, наоборот, активнее использовать «выигрышные» управляющие факторы, изменения которых в соответствии с подаваемыми на них управлениями приведут к большим благоприятным изменениям целевых факторов.

Анализ эффективности интегрального воздействия управляющих факторов на целевые факторы. Суть подачи управлений на ситуацию состоит в таком изменении управляющих факторов, чтобы их влияния на целевые факторы привели к благоприятным изменениям целевых факторов, т. е. к изменениям целевых факторов в направлении их ОДФ.

В связи с этим важно ответить на вопрос — какие из управляющих факторов являются более «действенными» по их интегральному влиянию на целевые факторы



для получения положительного эффекта? Для ответа на этот вопрос полезно рассмотреть матрицу Q транзитивного замыкания когнитивной карты исследуемой ситуации и ОДФ целевых факторов.

Формально показатель эффективности $E(u_k)$ управляющего фактора u_k (т. е. максимальный положительный эффект от изменения фактора u_k) определяется как абсолютное значение суммы коэффициентов влияния данного управляющего фактора u_k на целевые факторы, умноженных на ОДФ целевых факторов, т. е.

$$E(u_k) = \left| \sum_{i=1}^m r_i q_{ki} \right|,$$

где r_i — ОДФ целевого фактора y_i , q_{ki} — элемент матрицы Q .

Действительно, максимальный положительный эффект Δy от подачи управления g_k на фактор u_k оценивается как

$$\Delta y = g_k \sum_{i=1}^m r_i q_{ik},$$

где знак воздействия g_k выбирается совпадающим со

знаком суммы $\sum_{i=1}^m r_i q_{ik}$, а его значение равно 1.

Итак, структурно-целевой анализ динамической модели управляемого развития ситуации состоит из следующих этапов.

- *Анализ целей* (координат вектора целей) на взаимную непротиворечивость для ответа на вопрос — не является ли вектор целей (фиксированный или нефиксированный) противоречивым, т. е. не получится ли так, что достижение какой-либо из целей (координат векторе заданных целей) будет препятствовать достижению других целей?
- *Проверка согласованности множества управляющих факторов с заданным вектором целей*, т. е. не получится ли так, что изменение значения какого-либо управляющего фактора (с помощью соответствующего управления) будет способствовать достижению некоторых подцелей в векторе цели и в то же время препятствовать достижению других подцелей вектора целей.
- *Оценка эффективности воздействия управляющих факторов* на все координаты вектора целей. Такая оценка полезна при выборе наиболее эффективных управляющих факторов, изменения которых с помощью выбираемых управлений обеспечат целенаправленное развитие ситуации.

Далее рассмотрим различные процедуры выбора управлений, обеспечивающих достижение фиксированных или нефиксированных целей.

3.3. Процедура нахождения вектора управлений для достижения заданной фиксированной цели

Прежде чем решать задачу поиска управлений (воздействий), обеспечивающих достижение фиксированной цели, необходимо проанализировать *саморазвитие ситуации* (без подачи управлений) из заданного начального состояния $X(0)$. Структура модели и начальное условие $X(0)$ могут оказаться такими, что её состояние при

саморазвитии (лишь из-за взаимодействия факторов) будет смещаться «в сторону цели», что можно считать «*попутным ветром*» ситуации при достижении цели.

Динамика саморазвития состояния $x(t)$ модели описывается уравнением (3). Если текущие значения целевых факторов в векторе $x(t)$ удаляются от целевых значений, то считается, что состояние $x(t)$ удаляется от цели (что можно считать «*встречным ветром*» ситуации при достижении цели) и *необходима коррекция* развития процессов в модели с помощью тех или иных управлений.

Нахождение вектора управлений с помощью импульсных управлений, подаваемых в начальный момент времени. Фиксированная цель Y^* считается достигнутой из начального состояния $X(0)$, если установленные значения целевых факторов совпадают с их заданными значениями [3, 5, 8]. Установившийся целевой вектор $Y_{\text{уст}}$ определяется через матрицу транзитивного замыкания Q и начальное состояние $X(0)$ модели следующим образом:

$$Y_{\text{уст}} = CQX(0) + CQBU, \quad (11)$$

где $CQX(0)$ — составляющая целевого вектора, обусловленная саморазвитием ситуации; $CQBU$ — составляющая целевого вектора, обусловленная подачей управлений; ненулевые элементы матриц C и B выделяют, соответственно, целевые и управляющие факторы в матрице A исходной когнитивной карты.

Фиксированная цель Y^* считается достигнутой, если $Y_{\text{уст}} = Y^*$, что с учетом выражения (10) дает $Y_{\text{уст}} = CQX(0) + CQBU = Y^*$.

Отсюда получаем уравнение для нахождения искомого вектора U управлений:

$$CQBU = Y^* - CQX(0). \quad (12)$$

Вектор находится из уравнения (12) методом наименьших квадратов (МНК) [12, 13] и в случае, когда управляющих факторов больше, чем целевых (т. е. в случае $p > m$), МНК-решение имеет вид:

$$U^* = (CQB)^+ (Y^* - CQX(0)) + (E_N - (CQB)^+ CQB)h,$$

где $(CQB)^+$ — матрица, псевдообратная [13] матрице CQB ; h — произвольный вектор размера p .

Таким образом, в случае $p > m$ (недоопределенная система уравнений (12)) имеется бесконечное множество допустимых МНК-решений, каждое из которых формально приводит к достижению цели [13]. Из множества этих решений выбирается так называемое нормальное решение вида

$$U^* = (CQB)^+ (Y^* - CQX(0)), \quad (13)$$

обладающее минимальной нормой среди всех решений вида (12).

В случае переопределенной ($p < m$) системы (12) существует единственное МНК-решение вида (13).

З а м е ч а н и е. МНК-процедура достижения фиксированной цели, минимизирующая сумму квадратов отклонений установленных значений целевых факторов от соответствующих заданных значений, обладает двумя недостатками:

— координаты формального МНК-решения (13) могут выходить за пределы интервала $[-1, 1]$, определяющего допустимые области значений для управлений



(тогда в программе вычислений они приравниваются к ближайшим граничным точкам интервала $[-1, 1]$);

— может оказаться, что для приближения текущих значений целевых факторов к заданным целевым значениям (т. е. чтобы попасть в «точку»), некоторые управление, согласно МНК-решению (13), следует изменять в направлениях, противоречащих предметным соображениям, вытекающим из исследуемой ситуации (подобные парадоксы исчезают при переходе к нефиксированным целям).

Нахождение вектора управлений с изменяющимися во времени координатами. В данном случае налагается требование, чтобы фиксированная цель Y^* была достигнута в заданный момент t^* . На основе этого требования определяется соответствующее матричное уравнение относительно векторов управлений $U(0), U(1), U(2), \dots, U(t^*)$, из которого искомая последовательность векторов управлений также находится как нормальное МНК-решение.

Нахождение вектора управлений путем покоординатного рассмотрения вектора целей. В данном методе каждая координата $y_{i_k}^*$ фиксированной цели Y^* рассматривается отдельно как скалярная подцель. Составляется уравнение, аналогичное уравнению (11), для вектора управлений, обеспечивающего достижение скалярной подцели $y_{i_k}^*$:

$$C_{i_k}(E_N - A)^{-1}Bg = y_{i_k}^* - C_{i_k}(E_N - A)^{-1}X(0), \quad (14)$$

где C_{i_k} — i_k -я строка матрицы C .

Пусть g^k — нормальное МНК-решение уравнения (14). Рассматривается выпуклая оболочка (многогранник) U векторов g^1, \dots, g^m вида

$$U = \alpha_1 g^1 + \alpha_2 g^2 + \dots + \alpha_m g^m.$$

Показано [12], что коэффициенты α_i этой выпуклой оболочки, при которых вектор U обеспечивает максимальное приближение (в среднеквадратичном смысле) целевых координат установившегося состояния к фиксированной цели, могут быть найдены методом наименьших квадратов.

3.4. Процедура нахождения вектора управлений (решение обратной задачи) для достижения заданной нефиксированной цели

Пусть для установившихся значений целевых факторов справедливо соотношение (11).

Свойство аддитивности этого соотношения, т. е. независимости вкладов в изменения целевых факторов, обусловленные начальным состоянием (см. первое слагаемое в формуле (11)) и подаваемыми управляющими воздействиями (см. второе слагаемое), позволяет анализировать эти слагаемые раздельно [3]. Остановимся вначале на втором слагаемом.

Приращение целевого фактора y_i , обусловленное по-дачей вектора управлений U , представляется в виде

$$\Delta y_i = (CQBU)_i = \sum_{k=1}^p q_{ik} u_k, \quad (15)$$

где q_{ik} — элементы матрицы Q . Благоприятное изменение вектора y_i означает, что оно происходит в направлении ОДФ r_i этого вектора. Тогда задача выбора вектора U состоит в том, чтобы максимизировать сумму

$$\sum_{i=1}^m r_i \Delta y_i \Rightarrow \max,$$

что с учетом выражения (15) запишется как

$$\sum_{i=1}^m r_i \sum_{k=1}^p \Delta q_{ik} u_k \Rightarrow \max.$$

После перегруппировки слагаемых исходная задача по выбору значений управлений представляется в виде:

$$\sum_{k=1}^p \left(\sum_{i=1}^m r_i q_{ik} \right) u_k \Rightarrow \max \quad (16)$$

при условиях

$$-1 \leq u_k \leq 1, \quad (17)$$

$$\sum_{k=1}^p U_k \leq P, \quad (18)$$

где P — ограничения на число одновременно выбранных управлений.

Задача (16)–(18) решается методами линейного программирования. Её решение обозначим как $U^* = (u_1^*, u_2^*, \dots, u_p^*)$.

Пусть $X(0)$ — вектор начальных тенденций в ситуации. Результатирующий вектор Y^* наиболее благоприятных значений целевых факторов, достижимых из начального состояния $X(0)$ при использовании выбранного множества U управлений определяется как

$$Y_{\text{уст}}^* = CQX(0) + COQU^*.$$

Значения координат вектора $Y_{\text{уст}}^*$ — это наилучшие целевые значения, достижимые при начальном состоянии $X(0)$ и выбранном векторе управлений U таком, при

котором достигается максимум суммы $\sum_{i=1}^m r_i \Delta y_i$, т. е. максимум положительного эффекта от применения выбранного вектора управлений U .

3.5. Предотвращение чрезвычайных ситуаций

Максимально положительный эффект (в плане благоприятного изменения всех целевых факторов) от применения возможных управлений определяется как

$$E = \sum_{i=1}^m r_i \sum_{k=1}^p q_{ik} u_k^*,$$

где r_i — ОДФ i -го целевого фактора, q_{ik} — элементы матрицы Q транзитивного замыкания исходной матрицы A когнитивной карты, $(u_1^*, u_2^*, \dots, u_p^*)$ — решение задачи (16)–(18) линейного программирования.



При саморазвитии ситуации из состояния $X(0)$ устанавливающееся состояние (при отсутствии управлений) определяется как $X_{\text{сам}}^* = Q X(0)$, а установившиеся значения целевых факторов — как $Y_{\text{сам}}^* = C Q X(0)$.

Пусть S — интегральная оценка достижения цели развития ситуации:

$$S = \sum_{i=1}^m r_i y_i^*_{\text{сам}} = R(Y) Y_{\text{сам}}^*,$$

где $R(Y)$ — вектор ОДФ целевых факторов.

Состояние $Y_{\text{сам}}^*$ назовем чрезвычайной ситуацией (ЧС), если

- интегральная оценка достижения цели развития ситуации S отрицательна, т. е. саморазвитие ситуации не способствует достижению нефиксированной цели;
- никакой из векторов управлений в рамках ограничений R , подаваемых в момент $t = 0$, не позволяет добиться положительного эффекта в изменении целевых факторов.

Другими словами, $X_{\text{сам}}^*$ — чрезвычайная ситуация, если $S < 0$, $|S| > |E|$.

Состояние $X(0)$ в этом случае назовем *предвестником ЧС* $X_{\text{сам}}^*$.

В рамках модели предотвращение ЧС заключается в том, что помимо стремления к достижению цели необходимо следить за текущим состоянием модели. Если такое состояние становится предвестником ЧС, то для её предотвращения необходимо ослабить ресурсные ограничения и максимально усилить управления, препятствующие наступлению ЧС. Эти вопросы решаются путем предварительного моделирования саморазвития ситуации, а также рассмотрения сценариев с различными векторами управлений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформированные положения позволяют на формализованном уровне определить последовательность процедур по структуризации ситуации с учетом влияния вы-

Основные этапы технологии анализа и моделирования стратегического развития СЭО

Структуризация знаний о СЭО и внешней для него среды на основе PEST¹-анализа и SWOT²-анализа

- Анализ исходной ситуации (“как есть”) вокруг СЭО с выделением базисных факторов, характеризующих экономические, политические и другие процессы, протекающие в СЭО и в его макроокружении и влияющие на развитие объекта.
- Определение факторов, характеризующих сильные и слабые стороны СЭО.
- Определение факторов, характеризующих возможности и угрозы со стороны внешней среды объекта.
- Построение проблемного поля СЭО.

Построение имитационной модели развития СЭО — формализация знаний, полученных на этапе когнитивной структуризации

- Определение и обоснование факторов.
- Установление и обоснование взаимосвязей между факторами.
- Построение графовой модели.

Структурно-целевой анализ

- Определение вектора целей развития СЭО (с учетом проблемного поля СЭО).
- Анализ непротиворечивости целей в векторе целей.
- Анализ непротиворечивости вектора целей и вектора управлений.
- Анализ эффективности интегрального влияния вектора управлений на достижимость вектора целей.

Сценарное исследование тенденций развития СЭО

- Задание сценариев исследования (на основе результатов структурно-целевого анализа).
- Выявление тенденций развития объекта в его макроокружении в условиях саморазвития и управляемого развития:
 - моделирование саморазвития ситуации в СЭО на основе экстраполяции начального состояния ситуации;
 - моделирование управляемого развития ситуации в СЭО, которое определяется выбираемой целью управления (вектором целей).
- Интерпретация результатов сценарного исследования.

Обоснование возможных сценариев развития и выработка рекомендаций

¹ PEST — *P* – political, *E* – economical, *S* – social, *T* – technological.

² SWOT — *Strengths* — сильные стороны, *Weaknesses* — слабые стороны, *Opportunities* — возможности, *Threats* — угрозы.



Иллюстрации к статье В.И. Максимова "Структурно-целевой анализ развития социально-экономических ситуаций" (см. стр. 30–38)

деленного «пограничного слоя» внешней среды, провести структурно-целевой анализ непротиворечивости вектора целей, согласованности вектора управлений с вектором целей и начальными тенденциями развития СЭО.

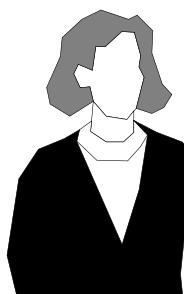
Разработанные модели и структурно-целевой анализ реализованы в интеллектуальной аналитической технологии моделирования развития ситуации (см. таблицу) на базе компьютерных диалоговых комплексов, позволившей государственным организациям обосновывать цели развития СЭО в меняющихся ситуациях [14–20].

ЛИТЕРАТУРА

1. Максимов В. И., Коврига С. В. Целеполагание и стратегическое управление развитием сложных социально-экономических объектов в нестабильной внешней среде // Труды 5-ой Междунар. науч.-практ. конф. «Анализ систем на рубеже тысячелетий: теория и практика—2001» / ИПУ РАН. — М., 2001. — Т. 2. — С. 23–36.
2. Максимов В. И., Качаев С. В., Корноушенко Е. К. Управление сферами банковской деятельности // Банковские технологии. — 1999. — № 5–6. — С. 21–26.
3. Максимов В. И., Корноушенко Е. К. Аналитические основы применения когнитивного подхода при решении слабо-структурированных задач // Труды Ин-та пробл. упр. им. В. А. Трапезникова РАН. — М., 1999. — Т. II. — С. 95–109.
4. Коврига С. В., Максимов В. И. Технология когнитивного моделирования целенаправленного развития регионов РФ // Труды Ин-та пробл. упр. им. В. А. Трапезникова РАН. — М., 2000. — Т. XI. — С. 91–103.
5. Максимов В. И. Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций // Материалы 1-й Междунар. конф. «Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций» (CASC'2001) / ИПУ РАН. — М., — 20001. — Т. 2. — С. 10–21.
6. Методы формирования сценариев развития социально-экономических систем / В. В. Кульба, Д. А. Кононов, С. А. Косяченко, А. Н. Шубин. — М.: СИНТЕГ, 2004. — 296 с.
7. Робертс Ф. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам. — М.: Наука, 1986.
8. Корноушенко Е. К., Максимов В. И. Управление ситуацией с использованием структурных свойств ее когнитивной карты // Тр. Ин-та пробл. упр. им. В. А. Трапезникова РАН. — М., — 2000. — Т. XI. — С. 85–90.
9. Прангисвили И. В., Максимов В. И. Разрешение проблемных ситуаций в период современной трансформации // Общество и экономика. — 2001. — № 11–12. — С. 42–70.
10. Максимов В. И. III Международная конференция «Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций» CASC'2003 // Проблемы управления. — 2004. — № 1. — С. 66–69.
11. Максимов В. И., Тер-Егизарова Н. В. IV Международная конференция «Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций» CASC'2004 // Проблемы управления. — 2005. — № 1. — С. 83–87.
12. Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач метода наименьших квадратов. — М.: Наука, 1986. — 232 с.
13. Формулировка и обсуждение ряда нестандартных задач и их математическое обеспечение в существующих пакетах / Алгоритмическое и программное обеспечение прикладного статистического анализа. — М.: Наука, 1980. — 424 с.
14. Maximov V. Cognitive Analysis and Situation Modelling // Proc. of the 8th IFAC Conference on «Social Stability: The Challenge of Technology Development» (SWIIS'01). Sept. 27–29, 2001, Vienna, Austria.
15. Maximov V., Kornoushenko E. Analytical Basics of Construction of Graph and Computer Models for Complicated Situations // Proc. of the 10th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM 2001). Sept. 20–22, 2001, Vienna, Austria.
16. Maximov V., Kornoushenko E. Mathematical Basics of Construction of Graph and Computer Models for Complicated Situations // Proc. of the IFAC Symposium on Modelling and Control of Economic Systems (SME 2001). Sept. 6–8, 2001, Klagenfurt, Austria.
17. Maximov V., Kornoushenko E., Makarenko D. Use of Cognitive Modelling for Analysis of Socio-Economic Processes and Estimation of Variants of the Regional Development // Proc. of the 10th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM 2001). Sept. 20–22, 2001. Vienna, Austria.
18. Goal Setting and Structure and Goal Analysis of Complex Systems and Situations / Z. Avdeeva, S. Kovriga, D. Makarenko, V. Maximov // Proc. of the 8th IFAC Symposium on Automated Systems Based on Human Skill and Knowledge, Sept., 2003, Göteborg, Sweden.
19. Goal Setting and Working out of the Strategy of Development of Socio-economic Objects / Z. Avdeeva, S. Kovriga, D. Makarenko, V. Maximov // Proc. of the IFAC Workshop on Technology and International Stability. July, 2003, Waterford, Ireland.
20. Makarenko D., Avdeeva Z., Maximov V. Cognitive Approach to Control of Socio-Economic Systems Security // Systems, Men & Cybernetics. Proc. of the 2004 IEEE International Conference. — Hague, Netherlands, 2004. — P. 899–903.

☎ (095) 334-78-00

E-mail: maxi@ipu.ru



Вниманию подписчиков!

В каталоге "Роспечать" на 2005 г. ошибочно указана периодичность журнала "Проблемы управления" – 4 номера в год. Однако с 2005 г. мы выходим **6 раз в год**. Если Вы подписались по каталогу "Роспечать", то для получения № 3 и 6 Вам необходимо на них подписаться по объединенному каталогу "Пресса России" (индекс **38006**) или через Редакцию.

Редакция