



СЦЕНАРНО-КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ СОБЫТИЙНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИКИ ФАКТОРОВ

И.В. Чернов

Аннотация. Работа посвящена методологическим проблемам повышения эффективности технологии сценарного анализа и моделирования процессов развития социально-экономических систем, результаты которого предназначены для использования в системах поддержки принятия управленческих решений с целью опережающей оценки их эффективности. Рассмотрен ряд ограничений традиционного подхода к сценарно-когнитивному моделированию, которые приводят прежде всего к упущению в получаемом в результате моделирования сценарии ключевых событий, непосредственно влияющих на оценку ситуации и принятие решений. Предложен подход, обеспечивающий возможность идентификации и анализа динамики изменения значений факторов модели в процессе ее исследования, а также формирование на его основе дополнительных сценарно-событийных взаимосвязей между факторами с целью повышения адекватности модели анализируемой ситуации. Разработан расчетный алгоритм анализа динамики поведения факторов модели, реализованный и апробированный в рамках программно-аналитического комплекса сценарного моделирования. Приведен пример использования алгоритма.

Ключевые слова: управление, сценарный подход, графовые модели, имитационное моделирование, событийная идентификация, факторы, верификация.

ВВЕДЕНИЕ

Процессы подготовки и опережающей оценки эффективности управленческих решений, особенно на длительном временном горизонте, требуют достаточно четкого представления об альтернативах развития ситуации как на объекте управления, так и во внешней среде. Эффективным инструментом, обеспечивающим возможность опережающего анализа данных альтернатив, является базирующийся на использовании математического аппарата знаковых орграфов сценарный подход, который в настоящее время фактически стал одним из ключевых элементов в структуре систем поддержки принятия решений. Потенциал рассматриваемого подхода заключается в широких возможностях исследования имитационных моделей, позволяющих проводить комплексный опережающий анализ разнообразных по своей природе взаимосвязанных и взаимозависимых процессов и явлений, отражающих возможные пути развития объекта управления и внешней среды [1].

В настоящее время накоплен значительный опыт решения широкого круга практических задач в области сценарного анализа процессов организа-

ционного управления [2]. Одновременно с этим обобщение результатов практического применения сценарного подхода позволило выявить и ряд имеющихся технологических ограничений, в частности, не позволяющих в полной мере анализировать влияние динамики изменения значений ключевых факторов модели и (или) моментов смены характера данной динамики на исследуемые свойства и характеристики моделируемых процессов развития сложных объектов управления (социально-экономических, общественно-политических, информационных и иных систем), что неизбежно сказывается на качестве генерируемых сценариев.

1. ПРОБЛЕМЫ ТРАДИЦИОННОГО ПОДХОДА К СЦЕНАРНО-КОГНИТИВНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ

Методологической основой технологии сценарного анализа является математическая модель знаковых, взвешенных знаковых, функциональных знаковых ориентированных графов, представляющая собой расширение классической графовой модели. Кроме орграфа $G(X, E)$, где X – конечное множество вершин, а E – множество дуг графа, в

модель включаются дополнительные компоненты: вводится множество параметров вершин $V = \{v_i, i \leq N = \|X\|\}$; в соответствие каждой вершине x_i ставится ее параметр $v_i \in V$; вводится также функционал преобразования дуг, т. е. в соответствие каждой дуге ставится либо знак («+» или «-»), либо вес ($+W_{ij}$ или $-W_{ij}$), либо функция $f_{ij}(v_i, v_j)$ [2].

Содержательно параметрами вершин графа являются ключевые количественные или качественные показатели (факторы), структура знакового графа отражает причинно-следственные взаимосвязи между ними. Совокупность значений параметров вершин в графовой модели описывает конкретное состояние исследуемой ситуации в определенный момент времени. Изменение значений параметров вершин графа порождает импульс и интерпретируется как переход исследуемой системы из одного состояния в другое.

Развитие технологий моделирования на основе описанного математического аппарата длительное время шло преимущественно в направлении создания и анализа нечетких когнитивных моделей слабоструктурированных систем [3, 4], а также использования в процессе сценарного исследования сложных функциональных взаимосвязей между факторами [1, 2].

Несмотря на очевидные достоинства методологии сценарного моделирования при решении широкого круга задач повышения эффективности управленческих решений, в традиционном подходе, как уже упоминалось выше, существует ряд серьезных ограничений, накладываемых на формируемые модели:

- ограниченное количество характеристик факторов, которые можно использовать для расчетов результатов моделирования;
- невозможность гибкой перестройки структуры модели в зависимости от текущих (промежуточных) результатов моделирования, определяющих необходимость ее изменения в рамках поставленных целей исследования;
- сложность реализации межмодельных (и в особенности иерархических) связей;
- трудности содержательной интерпретации результатов моделирования и, соответственно, их понимания лицами, принимающими решения (ЛПР);
- сложности организации взаимосвязи с внешними источниками данных и информационными системами и т. д.

Ограниченное количество характеристик факторов, используемых как для расчетов результатов моделирования, так и при формировании взаимосвязей в структуре модели, значительно сужает возможности генерации и анализа полученных сценариев, а также сужает составляющее данные сценарии множество исследуемых процессов и явлений. Использование в процессе моделирования только трех типов составляющих (значения факторов, значения импульсов, шаги моделирования) приводит к тому, что в генерируемом сценарии могут быть упущены ключевые для анализа ситуации и принятия управленческих решений события, связанные, например, с типом и характером динамики изменения факторов, моментом его смены (например, с роста на снижение), абсолютным или относительным периодом сохранения характера данной динамики (в последнем случае – процентного соотношения периода сохранения определенного характера динамики выделенного фактора к полному временному интервалу сценарного исследования) и т. д.

Использование фиксированных причинно-следственных взаимосвязей между факторами модели также далеко не всегда в полной мере соответствует свойствам моделируемого объекта или ситуации. Зачастую в зависимости от характера получаемой в процессе моделирования динамики изменения значимых факторов должна гибко меняться структура модели. Например, рост значения одного значимого фактора и падение значения другого в течение определенного временного интервала (задаваемого в шагах моделирования), может привести к необходимости реализации дополнительных управленческих воздействий в качестве реакции на происходящие изменения ситуации. При этом моделирование данных воздействий будет осуществляться путем изменения свойств определенных причинно-следственных связей (в простейшем случае уменьшающих или увеличивающих взаимовлияние соответствующих факторов модели), активации или деактивации какого-либо фактора или группы факторов, внесения дополнительных внешних импульсов в выбранные подструктуры модели и т. п. Таким образом, для обеспечения большей адекватности модели исследуемому объекту управления или анализируемой ситуации необходимо наличие возможности гибкой перестройки структуры и состава факторов модели в зависимости от результатов оценивания текущих модельных результатов.

При моделировании сложного объекта или ситуации может возникнуть необходимость объединения нескольких моделей объектов управления,

смежных предметных областей или исследуемых процессов и систем в единую мультимодель. К основным особенностям применения технологий сценарного моделирования на базе аппарата знаковых функциональных графов в подобных ситуациях можно отнести наличие взаимосвязей трех базовых типов:

- прямые причинно-следственные связи между факторами внутри каждой подсистемы;
- опосредованные не прямые связи между отдельными подсистемами, основанные не на обязательной однозначной и практически одномоментной реакции одной подсистемы на любое изменение значений факторов другой, как в первом случае, а на результатах анализа динамики данного изменения, в конечном счете и определяющих рассматриваемую взаимосвязь;
- опосредованные иерархические связи между подсистемами различного уровня (например, «государство – регион – сфера деятельности»), основанные на анализе и оценке реакции каждого вышестоящего уровня иерархии на тенденции развития ситуации в подсистемах нижестоящих уровней с учетом определенной самостоятельности, обособленности и характера соподчиненности данных подсистем.

2. РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ ПОВЕДЕНИЯ ФАКТОРОВ

Будем рассматривать выявленный в процессе моделирования характер динамики изменения значений определенного фактора, требующий установления (коррекции) опосредованной связи в процессе моделирования, как *событие*, и в соответствии с этим данную связь назовем *сценарно-событийной*. Для краткости будем называть *динамикой фактора* характер временной зависимости изменения его значений в процессе моделирования.

В соответствии с приведенным выше определением к формированию событий приводят изменения характеристик факторов, которые являются значимыми для анализа поведения объекта моделирования. Таким образом, если из всего множества факторов модели выделено подмножество значимых, то изменение динамики хотя бы одного из них (например, смена роста значения фактора на его падение) автоматически должно привести к появлению нового события в сценарии. Разумеется, это лишь простейший пример критерия для

формирования нового события. В общем случае событие может включать совокупности характеристик динамик факторов, образуя сложные логические выражения.

Введем в рассмотрение множество базовых типов динамики факторов, каждому i -му фактору присвоим соответствующий идентификатор текущей динамики SC_i (табл. 1).

Таблица 1

Идентификаторы элементарных динамик факторов

Идентификатор сценария SC	Тип динамики фактора
0	Не определен (не рассчитывается)
1	Рост
2	Падение
3	Постоянно
4	Колебания, ограниченные по амплитуде
5	Расходящиеся колебания
6	Сходящиеся колебания

В качестве примера рассмотрим упрощенную иерархическую мультимодельную структуру, представленную на рис. 1.

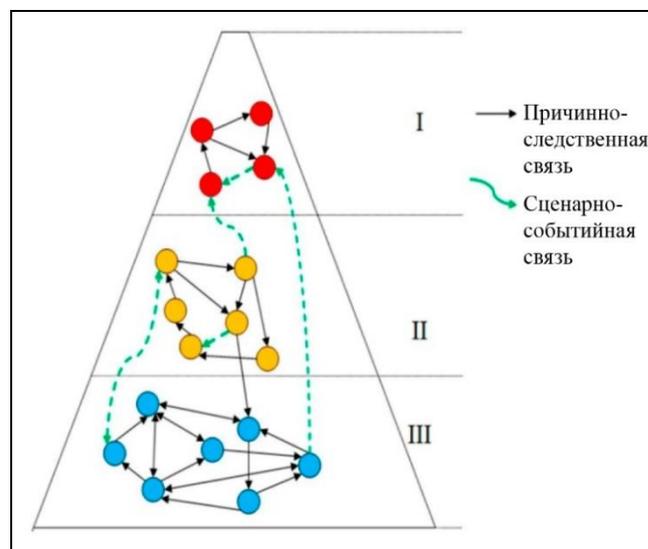


Рис. 1. Иерархия сценарной модели

Нередко при управлении иерархической структурой встречается ситуация, когда система верхнего уровня реагирует только на определенную долгосрочную динамику факторов, входящих в структуру системы нижнего уровня. Например, пусть V_{1i} – i -й фактор (вершина) подсистемы первого уровня, V_{2j} – j -й фактор (вершина) подсистемы второго

уровня, I_{2j} – импульс, исходящий из фактора $2j$. Тогда вес дуги D_{2j1i} мог бы быть таким:

$$D_{2j1i} = \text{iif}(SC_{2j} = 1, 2I_{2j}, 0),$$

что означает следующее: если изменение параметра вершины $2j$ является ростом в течении некоторого времени, то по дуге D_{2j1i} в каждый момент времени проходит импульс, равный $2I_{2j}$. Если динамика параметра иная (отличная от роста), то данной дуги вообще не существует (ее вес равен нулю).

Кроме того, связь между двумя подсистемами может быть следующей. Пусть V_{1i} – i -й фактор (вершина) подсистемы первого уровня, а V_{1j} – j -й фактор (вершина) той же подсистемы. Тогда вес дуги D_{1j1i} мог бы быть таким:

$$D_{1j1i} = \text{iif}(SC_{2j} = 2, -2I_{1j}, I_{1j}).$$

Это означает: если динамикой фактора вершины $2j$ является падение, то по дуге D_{1j1i} в каждый момент времени проходит импульс, равный $-2I_{1j}$. Если динамика фактора иная (отличная от падения), то вес этой дуги равен единице. То есть непосредственной дуги между двумя подсистемами может и не быть. Одновременно с этим отметим, что в общем случае динамика фактора одной подсистемы может оказывать влияние на вес дуги между факторами другой. Разумеется, могут применяться и более сложные условия с использованием логических операций отрицания (NOT), сложения (OR), умножения (AND), вычитания (XOR). Например, возможна такая конструкция: активировать (или деактивировать) ряд факторов, сгруппированных по определенному признаку (слой модели), если значение фактора v_k возрастало в течении последних десяти шагов и если значение фактора v_m убывало в 40 % прошедшего времени моделирования или пришел положительный импульс из фактора v_r .

В целях расширения возможностей моделирования сложных систем и процессов модифицируем процесс формирования аналитических данных для создания сценарно-событийных взаимосвязей между факторами. Введем следующие параметры:

- P – частота расчета динамик факторов (с помощью данного параметра имитируется частота мониторинга моделируемой системы);
- K – количество шагов моделирования, учитываемое при анализе динамик факторов (имитируется глубина мониторинга моделируемой системы);
- Z – количество шагов моделирования, используемое для имитации временной задержки процесса анализа исследуемой ситуации и принятия решения.

Общая схема моделирования с идентификацией событий сценария при этом выглядит следующим образом (рис. 2).

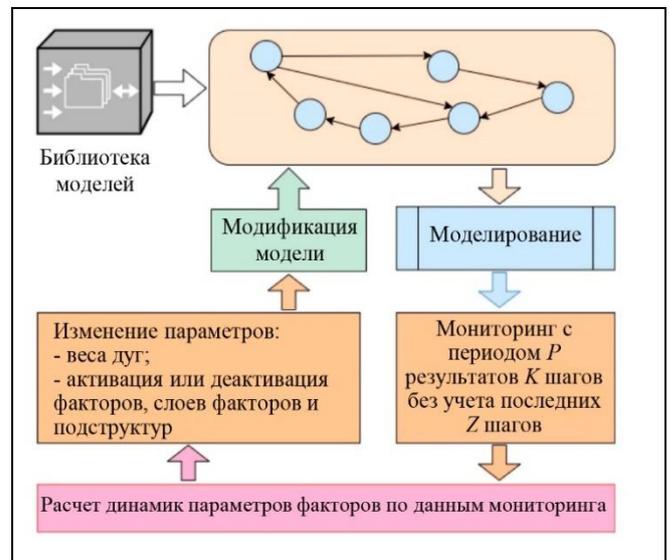


Рис. 2. Общая схема идентификации событий при сценарном моделировании

Например, если $P = 20$, $K = 10$, $Z = 2$, то через каждые 20 шагов моделирования будут обновляться данные о динамике факторов заданных вершин. При этом для расчета будут использоваться полученные значения за десять последних шагов без учета последних двух (к примеру, из-за задержки реакции управления на данные мониторинга развития ситуации). Например, на шаге моделирования, равном 40, запускается процедура перерасчета рассматриваемых показателей на шагах с 28-го по 38-й. Между запусками расчетной процедуры считается, что характер динамики факторов не изменяется.

Дальнейшее расширение аналитической составляющей в структуре модели предполагает расширение использования сценарных параметров в функциональных условиях активации или деактивации факторов (или их слоев).

3. АЛГОРИТМ СЦЕНАРНО-СОБЫТИЙНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Целью разработки алгоритма является использование в процессе моделирования результатов анализа динамики поведения отдельных факторов модели (динамик факторов). Результатами расчетов являются переменные, характеризующие тип динамики факторов. Назовем элементарным сценарием фактора тип динамики изменения фактора модели в определенный момент времени.



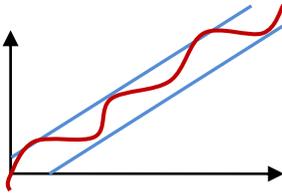
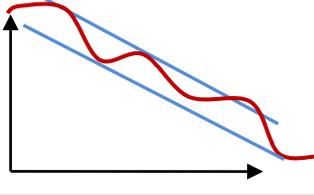
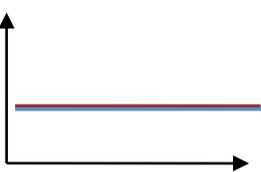
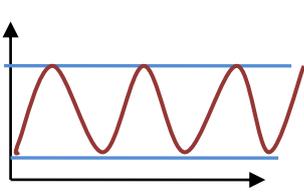
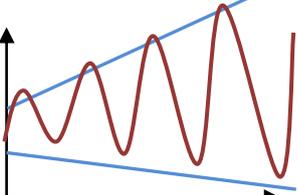
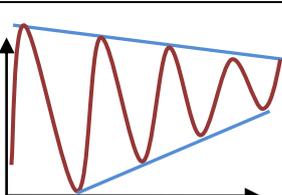
Идентификатор типа элементарного сценария может принимать значения, указанные выше в табл. 1. Очевидно, что все множество возможных динамик факторов можно охарактеризовать двумя линиями регрессии [5, 6]. В качестве исходных данных анализа для выбранного диапазона изменения значений факторов используются точки локальных максимумов и минимумов, на основе которых строятся верхняя и нижняя линии регрессии соответственно (табл. 2). Данный подход позволя-

ет в определенной мере детализировать более общий метод применения фиктивных переменных для точек перегиба, так как разделяет точки локальных максимумов и локальных минимумов на две выборки для отдельной оценки их тренда и дальнейшего сопоставления. При этом для подобного расчета не требуется оценка всей остальной выборки.

В случае линейного изменения фактора две линии регрессии совпадают.

Таблица 2

Регрессионные характеристики элементарных сценариев

Id	Описание динамики фактора	Динамика фактора модели и линии регрессии	Углы наклона линий регрессии	
			верхней	нижней
1	Рост		> 0	> 0
2	Падение		< 0	< 0
3	Постоянное значение		$= 0$	$= 0$
4	Колебания, ограниченные по амплитуде		$= 0$	$= 0$
5	Расходящиеся колебания		> 0	< 0
6	Сходящиеся колебания		< 0	> 0

Алгоритм анализа динамик i -го фактора модели f_i (f_i – логарифм значения i -го фактора) для периода времени с t_k до t_n включает несколько этапов.

Шаг 1. Для выбранного диапазона определяют множества локальных минимальных f_i^{\min} и максимальных f_i^{\max} значений (точек перегиба) фактора модели и соответствующих им значений шага моделирования t_i^{\min} и t_i^{\max} . При этом отбрасываются «ложные» (незначительные) точки перегиба.

Шаг 2. Подсчитываются мощности множеств $\text{col}_i^{\min} = |f_i^{\min}|$ и $\text{col}_i^{\max} = |f_i^{\max}|$.

Шаг 3. Если $\text{col}_i^{\min} < 2$ или $\text{col}_i^{\max} < 2$, то переходим к шагу 4, иначе к шагу 8.

Шаг 4. Для выбранного временного диапазона изменения значения фактора модели определяются средние значения двух переменных (время и значение фактора):

$$t_i^{\text{cp}} = \frac{(t_n - t_k)}{n - k},$$

$$t_i^{\text{cp}} = \sum_{j=k}^n \frac{t_i(j)}{n - k + 1},$$

$$f_i^{\text{cp}} = \sum_{j=k}^n \frac{f_i(j)}{n - k + 1}.$$

Шаг 5. Расчет ковариаций и выборочных дисперсий для этих двух переменных:

$$S(f_i) = \text{cov}(f_i, f_i) = \sum_{j=k}^n \frac{(f_i(j) - f_i^{\text{cp}})^2}{n - k + 1},$$

$$\text{cov}(f_i, t_i) = \sum_{j=k}^n \frac{(f_i(j) - f_i^{\text{cp}})(t_i(j) - t_i^{\text{cp}})}{n - k + 1},$$

$$S(t_i) = \text{cov}(t_i, t_i) = \sum_{j=k}^n \frac{(t_i(j) - t_i^{\text{cp}})^2}{n - k + 1}.$$

Шаг 6. Расчет угла наклона линий регрессии (показывает, насколько изменится значение минимума или максимума фактора с ростом шага):

$$\theta_i = \text{cov}(f_i, t_i) / \text{cov}(t_i, t_i).$$

Шаг 7. Вычисление коэффициента детерминации R^2 , который используется в качестве меры выраженности в данных наблюдениях линейной связи между переменными (между трендом и самими значениями) и определяет, насколько хорошо подобрана регрессия:

$$\text{если } \text{cov}(f_i, t_i) = 0 \text{ (} t_i, t_i \text{) = 0, то } R^2 = 0, \\ \text{иначе } R^2 = \left(\frac{\text{cov}(f_i, t_i)}{\sqrt{\text{cov}(t_i, t_i)} \times \sqrt{\text{cov}(f_i, f_i)}} \right)^2.$$

Минимальное значение коэффициента детерминации равно нулю. В этом случае тенденция линейной связи между переменными не обнаруживается, т. е. подобранная модель не объясняет изменчивость переменной f_i .

Максимальное значение коэффициента детерминации равно единице. В этом случае тенденция линейной связи между переменными выражена в наибольшей степени: все значения f_i располагаются на одной прямой $f_i = \alpha_i + \theta_i * t$. Это означает, что подобранная модель в полной мере объясняет изменчивость переменной f_i .

Таким образом, для коэффициента детерминации справедливо соотношение $0 \leq R^2 \leq 1$. При работе с эмпирическими данными в классических эконометрических расчетах крайние значения для R^2 недостижимы. Однако смоделированные по итогам симуляции результаты не являются случайными переменными, а регрессионный анализ используется для классификации сценариев в качестве метода машинного обучения. Поэтому возможны случаи, когда коэффициент детерминации равен единице, например, если динамика изучаемой переменной строго растет или падает в результате проведенного моделирования.

Переход к шагу 12.

Шаг 8. Определяются средние значения для каждого множества f_i^{\min} , f_i^{\max} , t_i^{\min} и t_i^{\max} :

$$f_i^{\text{min cp}} = \sum_{j=1}^{\text{col}_i^{\min}} \frac{f_i^{\min}(j)}{\text{col}_i^{\min}},$$

$$t_i^{\text{min cp}} = \sum_{j=1}^{\text{col}_i^{\min}} \frac{t_i^{\min}(j)}{\text{col}_i^{\min}},$$

$$f_i^{\max \text{cp}} = \sum_{j=1}^{\text{col}_i^{\max}} \frac{f_i^{\max}(j)}{\text{col}_i^{\max}},$$

$$t_i^{\max \text{cp}} = \sum_{j=1}^{\text{col}_i^{\max}} \frac{t_i^{\max}(j)}{\text{col}_i^{\max}}.$$

Шаг 9. Расчет ковариаций и дисперсий для этих множеств:

$$\text{cov}(f_i^{\max}, f_i^{\max}) = \sum_{j=1}^{\text{col}_i^{\max}} \frac{(f_i^{\max}(j) - f_i^{\max \text{cp}})^2}{\text{col}_i^{\max}},$$

$$\text{cov}(t_i^{\max}, t_i^{\max}) = \sum_{j=1}^{\text{col}_i^{\max}} \frac{(t_i^{\max}(j) - t_i^{\max \text{cp}})^2}{\text{col}_i^{\max}},$$

$$\begin{aligned} \text{cov}(f_i^{\max}, t_i^{\max}) &= \\ &= \sum_{j=1}^{\text{col}_i^{\max}} \frac{(f_i^{\max}(j) - f_i^{\max \text{cp}})(t_i^{\max}(j) - t_i^{\max \text{cp}})}{\text{col}_i^{\max}}, \end{aligned}$$

$$\text{cov}(f_i^{\min}, f_i^{\min}) = \sum_{j=1}^{\text{col}_i^{\min}} \frac{(f_i^{\min}(j) - f_i^{\min \text{cp}})^2}{\text{col}_i^{\min}},$$

$$\text{cov}(t_i^{\min}, t_i^{\min}) = \sum_{j=1}^{\text{col}_i^{\min}} \frac{(t_i^{\min}(j) - t_i^{\min \text{cp}})^2}{\text{col}_i^{\min}},$$

$$\begin{aligned} \text{cov}(f_i^{\min}, t_i^{\min}) &= \\ &= \sum_{j=1}^{\text{col}_i^{\min}} \frac{(f_i^{\min}(j) - f_i^{\min \text{cp}})(t_i^{\min}(j) - t_i^{\min \text{cp}})}{\text{col}_i^{\min}}. \end{aligned}$$

Шаг 10. Вычисление коэффициента детерминации R^2 аналогично шагу 7.

Шаг 11. Расчет угла наклона линий регрессии для двух множеств точек перегибов:

$$\theta_i^{\max} = \text{cov}(f_i^{\max}, t_i^{\max}) / \text{cov}(t_i^{\max}, t_i^{\max}),$$

$$\theta_i^{\min} = \text{cov}(f_i^{\min}, t_i^{\min}) / \text{cov}(t_i^{\min}, t_i^{\min}).$$

Шаг 12. Определение типа элементарного сценария на основе вычисленных параметров регрессии.

Шаг 13. Определение остальных параметров линий регрессии для графического представления результатов моделирования. Линия регрессии представлена формулой $y = \alpha + \theta x$. Параметры для верхней и нижней (по точкам перегиба ло-

кальных максимумов и минимумов) линии регрессии вычисляются по формулам:

$$\alpha_i^{\max} = f_i^{\max \text{cp}} - \theta_i^{\max} t_i^{\max \text{cp}},$$

$$\alpha_i^{\min} = f_i^{\min \text{cp}} - \theta_i^{\min} t_i^{\min \text{cp}}.$$

Шаг 14. Получение выражений для линий регрессии:

$$f_i^{\max}(t) = \alpha_i^{\max} + \theta_i^{\max} t,$$

$$f_i^{\min}(t) = \alpha_i^{\min} + \theta_i^{\min} t,$$

по которым находятся координаты линий для визуального представления.

4. ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛГОРИТМА СЦЕНАРНО-СОБЫТИЙНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

В качестве примера работы алгоритма приведем результаты исследования довольно известной модели регулирования экологической ситуации в регионе [2]. Структура модели представлена на рис. 3.

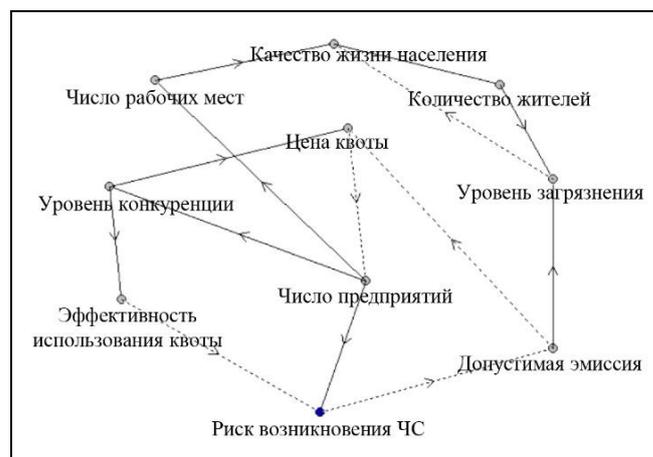


Рис. 3. Структура модели регулирования экологической ситуации в регионе

На рис. 4 приведен пример графического представления полученной в результате моделирования динамики двух факторов модели управления ликвидацией последствий чрезвычайной ситуации с наложенными линиями регрессии (слева) и отдельно линии регрессии (справа). Тестовое описание автоматически сгенерированного в соответствии с результатом анализа сценария представлено в табл. 3, а в табл. 4 представлен пример результатов расчета параметров регрессии. Прописными буквами обозначены факторы, изменение динамики которых привело к формированию нового события в сценарии.

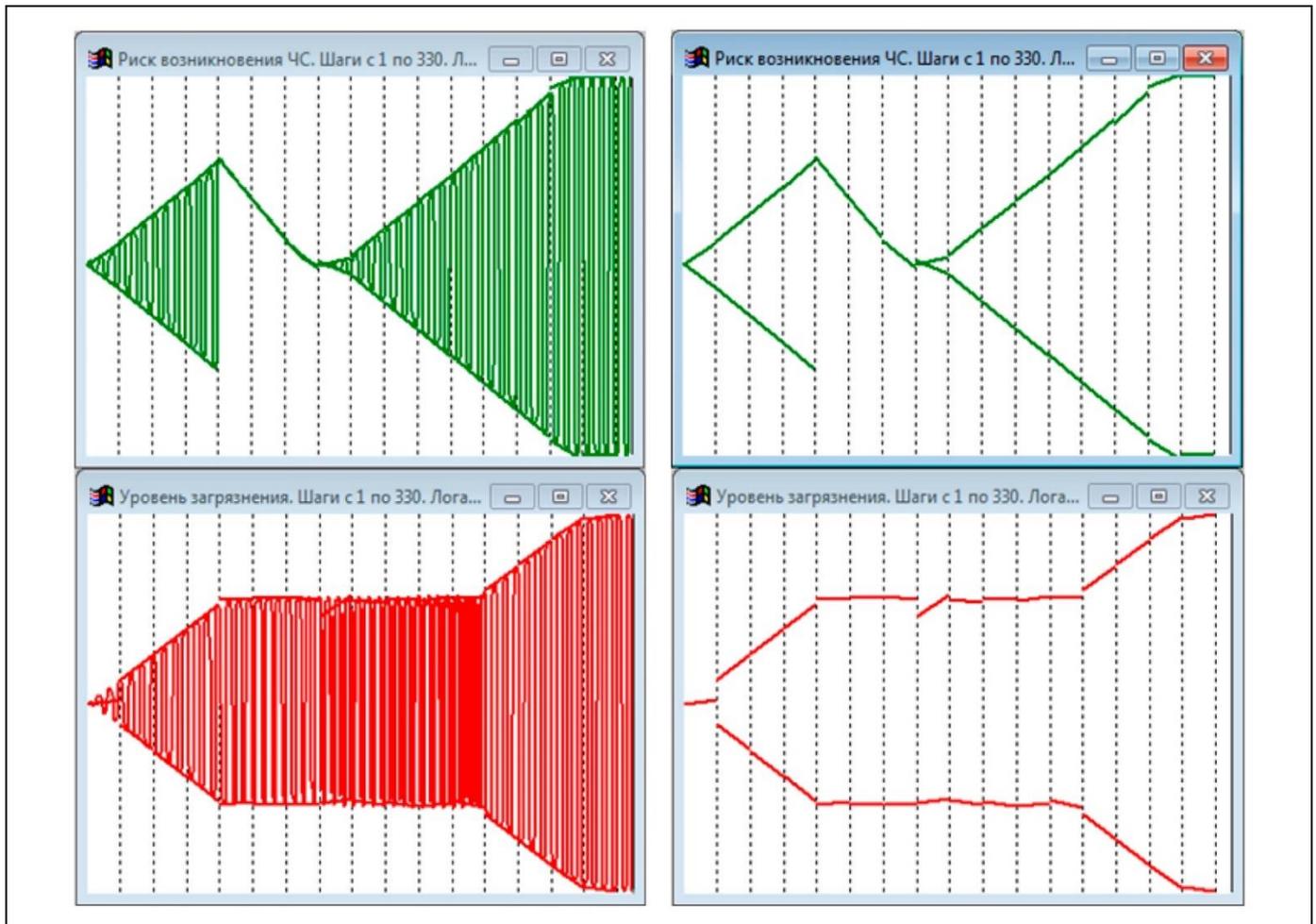


Рис. 4. Графики динамики факторов модели и линий регрессий

Таблица 3

Текстовое описание сценария

№ этапа	Шаги		Поведение факторов, формирующих события (этапы) сценария
	от	до	
1	1	20	«Риск возникновения ЧС» – Постоянно «Уровень загрязнения» – Постоянно
2	21	40	«РИСК ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧС» – НЕСТАБИЛЬНО «УРОВЕНЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ» – РАСТЕТ
3	41	100	«Риск возникновения ЧС» – Нестабильно «УРОВЕНЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ» – НЕСТАБИЛЬНО
4	101	120	«РИСК ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧС» – УМЕНЬШАЕТСЯ «УРОВЕНЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ» – РАСТЕТ
5	121	140	«Риск возникновения ЧС» – Уменьшается «УРОВЕНЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ» – НЕСТАБИЛЬНО
6	141	160	«Риск возникновения ЧС» – Уменьшается «УРОВЕНЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ» – УМЕНЬШАЕТСЯ

См. окончание табл. 3



Окончание табл. 3

№ этапа	Шаги		Поведение факторов, формирующих события (этапы) сценария
	от	до	
7	161	180	«РИСК ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧС» – НЕСТАБИЛЬНО «УРОВЕНЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ» – РАСТЕТ
8	181	220	«Риск возникновения ЧС» – Нестабильно «УРОВЕНЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ» – УМЕНЬШАЕТСЯ
9	221	240	«Риск возникновения ЧС» – Нестабильно «УРОВЕНЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ» – РАСТЕТ
10	241	260	«Риск возникновения ЧС» – Нестабильно «УРОВЕНЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ» – УМЕНЬШАЕТСЯ
11	261	320	«Риск возникновения ЧС» – Нестабильно «УРОВЕНЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ» – НЕСТАБИЛЬНО
12	321	340	«РИСК ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧС» – УСТОЙЧИВОЕ СОСТОЯНИЕ «Уровень загрязнения» – Нестабильно

Таблица 4

Результаты расчета параметров регрессии

Шаги		Имя вершины	Id	Описание сценария	R^2_{\max}	R^2_{\min}	θ_{\max}	θ_{\min}
от	до							
1	2	3	4	5	6	7	8	9
		...						
20	40	Риск возникновения ЧС	5	Нестабильно	0,9997	0,9965	0,230	-0,235
20	40	Уровень загрязнения	5	Нестабильно	1,0000	0,9932	0,247	-0,235
40	60	Риск возникновения ЧС	5	Нестабильно	0,9925	0,9990	0,232	-0,231
40	60	Уровень загрязнения	5	Нестабильно	1,0000	0,9970	0,230	-0,232
60	80	Риск возникновения ЧС	5	Нестабильно	0,9966	0,9999	0,235	-0,234
60	80	Уровень загрязнения	5	Нестабильно	0,9947	0,9991	0,232	-0,234
80	100	Риск возникновения ЧС	2	Уменьшается	0,9994	0,9994	-0,344	-0,344
80	100	Уровень загрязнения	1	Растет	0,9356	0,7590	0,013	0,033
100	120	Риск возникновения ЧС	2	Уменьшается	1,0000	1,0000	-0,339	-0,339
100	120	Уровень загрязнения	5	Нестабильно	0,9999	0,9997	0,005	-0,010
120	140	Риск возникновения ЧС	2	Уменьшается	0,9601	0,9601	-0,235	-0,235
320	340	Уровень загрязнения	5	Нестабильно	0,9965	0,9975	0,034	-0,029
		...						

Таким образом, кроме использования аналитических результатов при формировании функциональных зависимостей в структуре модели, появляется возможность автоматической генерации полученного сценария не только в графическом виде, но и в форме по-событийного текста сценария. Типовые описания динамик факторов, значимых для формирования событий («Уменьшается», «Растет» и т. п.), можно заменить на термины предметной области, получая тем самым текст сценария в виде, привычном для ЛПР. Например, для фактора «Политическая обстановка» «Растет» использовать термин «Благоприятная для РФ». Таким образом, для каждого фактора в программно-аналитическом

комплексе можно определить свой набор терминов описания его поведения, которые в виде словаря предметной области сохраняются в едином файле структуры модели.

На этом же примере можно проиллюстрировать иерархию связей. Например, существует иерархия моделей (рис. 5), такая что модель регулирования экологической ситуации в регионе (модель В) связана с моделью социальной стабильности (модель А). Причем в обеих моделях в структуре имеется фактор «Качество жизни населения». В модели А он имеет идентификатор А9 а в модели В идентификатор В4. Между этими моделями существует связь – дуга D_{B4A9} .

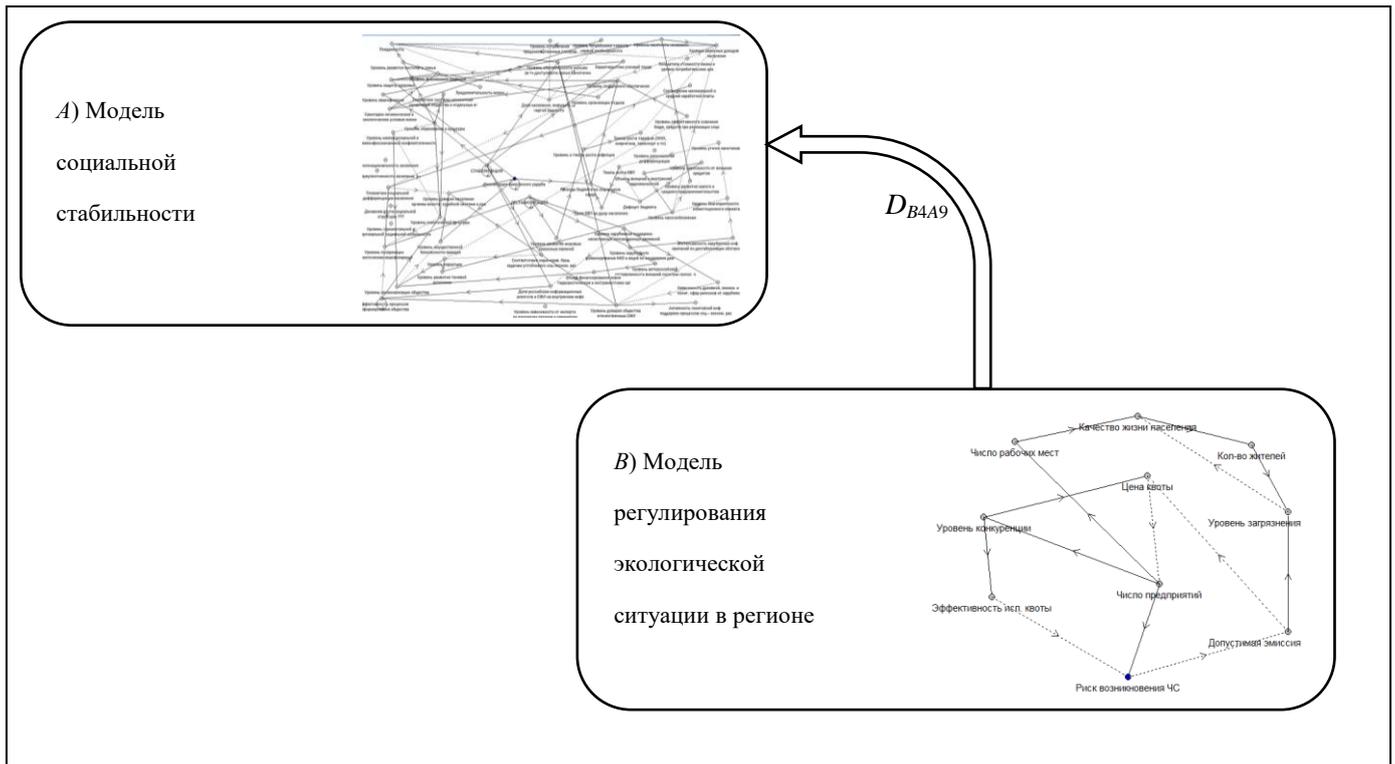


Рис. 5. Пример иерархии сценарной модели

Одной из причин социальной напряженности может являться снижение качества жизни населения, причем не одномоментные колебания этого фактора, а относительно долговременные и имеющие негативную историю в прошлом тенденции, что вполне соответствует реальности. К тому же будем полагать, что строго негативные тенденции оказывают намного более сильное влияние на социальную напряженность, чем прочие. Поэтому вполне обоснованным представляется формирование функционала одной из связей между этими моделями на основе сценарно-событийной идентификации. Тогда вес дуги D_{B4A9} мог бы быть, например, таким:

$$D_{B4A9} = \text{iif} (SC_{B4} = 2 \text{ and } TS_{B4} = 10 \\ \text{and } \text{dol}_{B4}(2) = 25, 2I_{B4}, 0).$$

Это означает следующее: если изменение параметра вершины $B4$ является падением ($SC_{B4} = 2$) и такая динамика сохранялась на протяжении десяти шагов моделирования ($TS_{B4} = 10$), причем эта же динамика в совокупности имела место в течении 25 % всего прошедшего времени моделирования ($\text{dol}_{B4}(2) = 25$), то по дуге D_{2j1i} в каждый момент времени проходит импульс, равный $2I_{B4}$. Если динамика параметра иная, то влияние ничтожно. В данном упрощенном примере рассмотренная ситуация означает разрыв дуги, хотя, безусловно, в модели можно выстроить ряд вложенных логических выражений, отражающих подобные ситуации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная в работе технология сценарного моделирования реализована в пилотном варианте программно-аналитического комплекса сценарного моделирования, целью разработки которого является автоматизация процессов сценарного исследования социально-экономических систем [2]. Программный комплекс предназначен для использования в рамках систем поддержки принятия решений с целью опережающей оценки их эффективности на основе анализа генерируемых альтернативных сценариев развития исследуемых ситуаций, процессов и явлений.

Практическая апробация предложенного подхода к расширению моделирующих возможностей показала высокую эффективность в процессе сценарного исследования сложных моделей социально-экономических систем. Применение предложенного подхода и алгоритма сценарно-событийной идентификации позволило реализовать механизм событийных функциональных взаимосвязей между факторами модели, в частности многослойного (в том числе – иерархического) представления структуры мультимодели, что обеспечивает возможность эффективного применения знаний экспертов в различных предметных



областях на стадиях разработки и исследования процессов развития социально-экономических и политических систем.

Программная реализация разработанного алгоритма позволила повысить качество визуализации результатов моделирования благодаря возможности представления текста сценария в терминах предметной области. Кроме того, появилась возможность передачи текущих аналитических данных моделирования в режиме реального времени в сторонние программные комплексы. В настоящее время, в частности, реализован такой интерфейс с геоинформационной системой «Панорама» и системами мониторинга информационного пространства.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Модели и методы анализа и синтеза сценариев развития социально-экономических систем: в 2-х кн.* / Под ред. В.Л. Шульца и В.В. Кульбы. – М.: Наука, 2012. Кн. 1. – 304 с., кн. 2. – 358 с. [*Modeli i metody analiza i sinteza scenarijev razvitiya so-cial'no-ekonomicheskikh sistem: v 2-h kn.* / Pod red. V.L. Shul'ca i V.V. Kul'by. – М.: Nauka, 2012. Кн. 1. – 304 с., кн. 2. – 358 с. (In Russian)]
2. *Дранко О.И., Новиков Д.А., Райков А.Н., Чернов И.В.* Управление развитием региона. Моделирование возможностей. – М.: URSS, ООО «ЛЕНАНД», 2023. – 432 с. [*Dranko O.I., Novikov D.A., Rajkov A.N., Chernov I.V.* Upravlenie razvitiem regiona. Modelirovanie vozmozhnostej. – М.: URSS, ООО «ЛЕНАНД», 2023. – 432 с. (In Russian)]
3. *Авдеева З.К., Коврига С.В.* О постановке задач управления ситуацией со многими активными субъектами с использо-

ванием когнитивных карт // Управление большими системами. – 2017. – Вып. 68. – С. 74–99. [Avdeeva, Z.K., Kovriga S.V. On the Statement of Control Problems of the Situation with Many Active Stakeholders with Use of Cognitive Maps // Large-Scale Systems Control. – 2017. – Vol. 68. – P. 74–99. (In Russian)]

4. *Plonsky, O., Apel, R., Ert, E., et al.* Predicting Human Decisions with Behavioral Theories and Machine Learning // arXiv. – 2019. – DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.06866>.
5. *Stulp, F., and Sigaud, O.* Many Regression Algorithms, One Unified Model: A Review // Neural Networks. – 2015. – Vol. 69. – P. 60–79.
6. *Wooldridge, J.M.* Introductory Econometrics: A Modern Approach // Boston: Cengage Learning, 2019.

Статья представлена к публикации членом редколлегии академиком РАН Д.А. Новиковым.

*Поступила в редакцию 04.04.2023,
после доработки 16.05.2023.
Принята к публикации 18.05.2023.*

Чернов Игорь Викторович – канд. техн. наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,
✉ ichernov@gmail.com

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8776-3064>

© 2023 г. Чернов И.В.



Эта статья доступна по [лицензии Creative Commons «Attribution» \(«Атрибуция»\) 4.0 Всемирная.](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

SCENARIO-COGNITIVE MODELING OF COMPLEX SYSTEMS BASED ON EVENT-DRIVEN IDENTIFICATION OF FACTOR DYNAMICS

I.V. Chernov

Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉ ichernov@gmail.com

Abstract. This paper is devoted to methodological problems of increasing the effectiveness of scenario analysis and modeling of development processes in socio-economic systems. The corresponding results can be used in management decision support systems for proactive evaluation of their effectiveness. Several limitations of the traditional approach to scenario-cognitive modeling are considered; due to these limitations, the resulting scenario neglects key events directly affecting the assessment of the current situation and decision-making. A novel approach is proposed to identify and analyze the dynamics of factor values when studying the model as well as to form additional scenario-event relationships between the factors in order to increase the adequacy of the model to the situation. A computational algorithm is developed to analyze the dynamics of factor values of the model. This algorithm is implemented and tested within the program-analytical complex of scenario modeling. Finally, an example of using the algorithm is given.

Keywords: control, scenario approach, graph models, simulation modeling, event identification, factors, verification.