

УДК 681.3.01(075):519.71

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-5-89-95

Прогнозирование по когнитивной модели реакции объекта на внешние воздействия

Г.А. Фомин

Рассмотрены вопросы применения когнитивных моделей в системах управления и поддержки принятия решений. Сформулированы предпосылки и ограничения для поставленной задачи получения количественных прогнозов развития процессов в объекте управления при изменении по какой-либо причине значения одного из факторов в составе его модели.

Проанализирован случай, когда когнитивная модель сформирована с использованием знаний экспертов об объекте управления в условиях отсутствия данных наблюдений, сделанных на этом объекте. Предполагается, что входящие в модель факторы измеряются только с помощью количественных шкал и при этом достаточно хорошо отражают процессы в моделируемом объекте. Использовано статистическое представление когнитивной модели, в котором межфакторные связи описываются линейными регрессионными зависимостями. Применен метод расчета прогноза изменения факторов, ранее использованный для создания имитационных данных по когнитивной модели. В нем использованы статистические характеристики факторов и оценки сил межфакторных связей, которые считаются известными экспертам.

Рассчитаны оценки параметров регрессионных зависимостей. Предполагается, что изменения во влияющих факторах каждой связи передаются на соседние зависимые факторы за один такт процесса. Это приводит к волнообразному распространению изменений факторов в графе когнитивной модели. Даны результаты расчета прогноза изменений факторов для трех когнитивных моделей. Первая из них демонстрирует разработанный метод расчета прогноза для одной связи типа «много к одному». Вторая в упрощенном виде описывает связь научных исследований и учебного процесса в вузах России. Эта модель показывает развитие процесса изменения факторов во времени и возможность устойчивости объекта управления даже при наличии в его когнитивной модели положительных циклов. Третий пример иллюстрирует на гипотетическом объекте возможность возникновения неустойчивости в функционировании объекта управления при наличии в когнитивной модели некоторых конфигураций связей, образующих циклы.

Ключевые слова: когнитивная модель, сила межфакторной связи, линейная регрессия, корреляция, анализ данных, прогнозирование процессов, устойчивость объекта управления.

Для цитирования: Фомин Г.А. Прогнозирование по когнитивной модели реакции объекта на внешние воздействия // Вестник МЭИ. 2018. № 5. С. 89—95. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-5-89-95.

Cognitive Model Based Prediction of the Object's Response to External Inputs

G.A. Fomin

Matters concerned with the use of cognitive models in control systems and in decision support systems are considered. Prerequisites and constraints for the problem of quantitatively predicting the evolution of processes in the controlled object are formulated for the case when one of the factors in the model changes for some reason.

The case when the cognitive model is constructed using the knowledge of experts about the controlled object in the absence of observational data made at this object is considered. It is assumed that the factors included in the model are only measured by means of quantitative scales and provide a sufficiently good reflection of the processes occurring in the modeled object. A statistical representation of the cognitive model, in which links between the factors are described by linear regression dependences, is used. The change of factors is predicted using the method that was previously applied to produce simulation data for the cognitive model. The method uses statistical characteristics of factors and estimated strength of links between the factors that are considered known to experts.

Estimates of regression dependence parameters are calculated. It is assumed that the changes in the influencing factors of each link are transferred to neighboring dependent factors within a single clock cycle. As a result, changes in the factors propagate over the cognitive model graph in a wave-like manner. The predicted changes of factors for three cognitive models are presented. The first of them demonstrates the developed method for calculating the prediction for one link of the "many to one" type. The second model describes in a simplified form the relationship between research activities and educational process in universities of Russia. This model shows how the variation of factors evolves with time and demonstrates the possibility of keeping the controlled object stability even if its cognitive model contains positive cycles. The third model illustrates, taking a hypothetical object as an example, that instability may occur in the controlled object operation if its cognitive model contains certain link configurations which form cycles.

Key words: cognitive model, strength of inter-factor link, linear regression, correlation, data analysis, process prediction, controlled object stability.

For citation: Fomin G.A. Cognitive Model Based Prediction of the Object's Response to External Inputs. MPEI Vestnik. 2018;5:89—95. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-5-89-95.

Когнитивное моделирование получило распространение при работе со сложными объектами управления, в тех задачах, где традиционные методы неприменимы. Когнитивные модели объектов управления описывают взаимосвязи важных факторов (концептов), отражающих процессы в этих объектах, а также часть внешней среды, влияющей на данные процессы [1, 2]. В каком-то смысле они подобны представлениям субъектов об окружающем мире, используемым при управлении своим существованием в этом мире. Этим обстоятельством можно объяснить повышенный интерес к когнитивному моделированию, особенно в связи с работами по использованию искусственного интеллекта в автоматизированных системах управления и системах поддержки принятия решений [3].

Основой для формирования когнитивных моделей служат знания экспертов в предметной области, к которой относится модель. Кроме того, в процессе формирования могут использоваться данные наблюдений, сделанных на моделируемом объекте. По сравнению с другими видами моделей когнитивные часто оказываются в значительно большей степени субъективными, особенно, если при их формировании вообще не использовались данные наблюдений. В любом случае, подобные модели отражают представления об объекте, сложившиеся у экспертов, участвовавших в формировании самой модели. Это является одновременно и их достоинством, и недостатком.

После окончания формирования модели используются для прогнозирования последствий тех или иных воздействий на объект управления, а также для выбора воздействий, обеспечивающих достижение целей управления. Считается, что когнитивные модели позволяют делать только качественные оценки возможного развития ситуаций в объекте, как реакции на воздействие, обусловленное изменением значений одного или нескольких характеризующих его факторов. Во многих практических задачах подобные оценки формулируются в виде вербальных суждений, которые часто оказываются слишком неточными. Более предпочтительным было бы получение количественных прогнозов изменения значений факторов, ожидаемых в результате таких воздействий. Попытки прогнозов делались на основе логических выводов, использования детерминированных или нечетких моделей [4 — 7]. Вместе с тем, представляется интересным использование в таких прогнозах статистических моделей.

В когнитивных моделях могут возникать процессы, подобные переходным процессам в динамических системах управления [1]. Особенно приемлемой такая аналогия оказывается при наличии в модели так называемых контуров или циклов. Поэтому актуальна разработка методов для изучения процессов и оценки влияния на них параметров моделей.

Задача прогнозирования процессов в объекте управления по когнитивной модели

Пусть в составе когнитивной модели некоторого объекта имеется n факторов X_1, X_2, \dots, X_n со значениями, представленными с помощью количественных шкал. Диапазоны изменения факторов известны, так фактор X_p может меняться в диапазоне значений от $X_{p\min}$ до $X_{p\max}$. Межфакторные связи — направленные и описываются квадратной, несимметричной (в общем случае) матрицей R с k строками и k столбцами. Элемент $r(X_p, X_q)$ в строке с номером p и столбце с номером q соответствует силе влияния фактора X_p (влияющий) на фактор X_q (зависимый) со значениями в диапазоне от -1 до $+1$.

Рассмотрим поставленную задачу в статистической интерпретации. Свойства $r(X_p, X_q)$ похожи на свойства коэффициента корреляции. Значение 0 соответствует отсутствию влияния или невыявленному влиянию, а значения 1 или -1 — пропорциональному влиянию. Положительный знак силы связи означает, что при увеличении значения влияющего фактора растет и значение зависимого фактора, и наоборот. Отрицательный знак говорит о том, что при увеличении значения влияющего фактора значение зависимого фактора скорее всего уменьшится, и наоборот.

Связи образуют циклы, в которых объединяются в замкнутую однонаправленную цепочку. Циклы являются положительными, если в них вообще нет связей с отрицательными силами или если число таких сил — четное, в ином случае они — отрицательны. Сходство подобных циклов с положительными и отрицательными обратными связями в системах автоматического управления отмечено в [1, 4]. Однако, анализ ограничился качественными оценками и рассуждениями. В ряде публикаций делались попытки оценки последствий изменения факторов, но при этом не учитывались статистические свойства взаимодействующих факторов и не детализировались способы расчета этих оценок [5 — 9].

Цель представленного исследования — разработка метода прогноза изменений во времени значений факторов модели при скачкообразном изменении значения одного из факторов в составе когнитивной модели. При этом не имеет значения, произошло такое изменение как следствие реализации некоторого управляющего воздействия или в результате действия некоторых внутренних или внешних обстоятельств, не учитываемых в когнитивной модели.

Приняты следующие предположения.

Когнитивная модель считается уже сформированной экспертами и ее соответствие объекту управления каким-либо образом установлено.

Время рассматривается как дискретная величина с интервалами Δt , которые назовем «тактами».

При изменении значения одного из факторов, влияющего на остальные факторы, значения зависимых от него факторов меняются в соответствии с силой связи в течение одного такта.

Изменчивость факторов случайна, ее можно описать цензурированным нормальным распределением, область существования которого ограничена диапазоном возможных значений факторов, а математическое ожидание совпадает с центром этого диапазона. Зависимости между факторами представим в виде линейных регрессий. Если факторы X_i, X_j, X_k в соответствии с когнитивной моделью влияют на X_m , то это означает, что между ними существует статистическая зависимость вида

$$X_m(t + \Delta t) = \beta_0 + \beta_i X_i(t) + \beta_j X_j(t) + \beta_k X_k(t) + e_m(t + \Delta t),$$

где $\beta_0, \beta_i, \beta_j, \beta_k$ — параметры регрессии; e_m — нормально распределенная случайная ошибка с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_m^2 (реализация данной ошибки на разных тактах и для разных факторов статистически независимы).

Наиболее ограничивающим является третье предположение. Поскольку в значениях факторов проявляются процессы, протекающие в моделируемом объекте, изменение любого фактора является отражением изменений в каком-то процессе. Данное изменение через некоторое время передается на другие процессы, взаимодействующие с тем, в котором оно произошло. Из третьего предположения следует, что изменение значения некоторого начального фактора вызывает «волновые эффекты». В первую очередь, через один такт меняются значения соседних факторов, для которых данный фактор является влияющим. Еще через такт меняются факторы, для которых влияющими являются факторы, соседние с начальным и так далее. Предположение о передаче влияния именно за один такт не критично и введено лишь для упрощения расчетов. Отказ от него приведет к некоторым усложнениям и заметным затруднениям в работе экспертов, которые должны будут хорошо знать временные характеристики взаимосвязей. Предположение о нормальном распределении используется в методе прогноза значений факторов. Для других видов распределений требуется специальное исследование влияния этого вида на оценки значений факторов.

Метод решения

При проведении исследования не предполагалось наличие данных наблюдений, проведенных на объекте исследований, поэтому для определения параметров регрессионных зависимостей применен прием, использованный в [10], где параметры оценивали по диапазонам изменения факторов и данным из когнитивной модели. Это позволило отказаться от участия экспер-

тов в процессе определения данных параметров.

Вначале с каждой когнитивной моделью осуществляется переход к нормированным представлениям всех факторов

$$x_i = d \left[X_i - 0,5(X_{i\min} + X_{i\max}) \right] / (X_{i\max} - X_{i\min}),$$

где d — коэффициент связи размаха и стандартного отклонения, который для многих задач принят равным 5,5. Отметим, что нормированные факторы — безразмерны.

Рассмотрен случай, в котором воздействие на объект сводится к изменению значения только одного фактора. Отметим, что предлагаемый метод прогнозирования достаточно просто обобщается на многофакторное воздействие.

Момент возникновения воздействия примем за такт с номером 1. В соответствии с предлагаемым методом прогнозирование реакции объекта на воздействие предполагает:

- определение начального состояния объекта — значения всех факторов до возникновения воздействия; принимаются за значения на такте с номером 0;
- локализацию местоположения фактора с изменившимся значением;
- поиск факторов, для которых изменившийся фактор является влияющим, они составляют «первую волну»;
- расчет оценок регрессии для каждого фактора из первой волны и последующее вычисление прогнозируемых значений зависимых факторов (принимаются за значения этих факторов на такте с номером 1);
- уточнение факторов, для которых факторы «первой волны» являются влияющими, они составляют «вторую волну»;
- расчет оценок регрессий и прогнозируемых значений зависимых факторов для каждого фактора из второй волны, их принимают за значения этих факторов на такте с номером 2.
- продолжение процесса расчета «волн» до тех пор, пока происходят заметные изменения значений факторов или пока значения факторов не достигнут границ диапазонов их изменения.

Поскольку изменение факторов содержит случайную составляющую, метод позволяет прогнозировать только общую тенденцию развития процессов в объекте управления.

Для иллюстрации метода прогнозирования реакции объекта на изменения значений факторов рассмотрим простую когнитивную модель $M1$, в которой три фактора влияют на четвертый. Циклы в ней отсутствуют. Представление модели в виде графа показано на рис. 1, где $x_1 - x_3$ — обозначения факторов в узлах графа, влияющих на фактор x_4 . Сплошные линии означают положительное, а штриховая линия — отрицательное влияние. Толщина линий связи соответствует силе влияния: чем толще линия, тем она больше. В примере связи

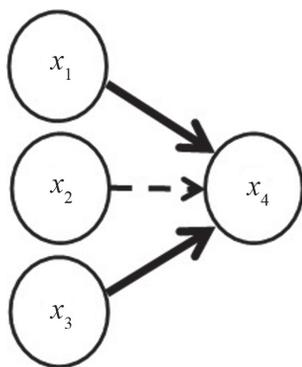


Рис. 1. Граф когнитивной модели M1

x_1 и x_3 с x_4 — сильные и положительные, а связь x_2 с x_4 — средней силы и отрицательная. Сильным связям приписано порядковое значение 0,8, а средним по силе — 0,6. Значения сил связи могут иметь вербальное или числовое представление, соотношение которых может быть задано, например, с помощью известной «шкалы Чеддока». Эту же когнитивную модель представим в виде табл. 1.

Таблица 1

Представление когнитивной модели M1

Факторы	x_1	x_2	x_3	x_4
x_1	—	—	—	0,8
x_2	—	—	—	-0,6
x_3	—	—	—	0,8
x_4	—	—	—	—

Пусть известны диапазоны возможных значений факторов: $12 \leq X_1 \leq 24$; $-15 \leq X_2 \leq 30$; $10 \leq X_3 \leq 50$; $100 \leq X_4 \leq 1000$ и начальные состояния: $X_1 = 15$; $X_2 = 18$; $X_3 = 32$; $X_4 = 221$. В соответствии с моделью связи между влияющими факторами отсутствуют, и для нормированных факторов уравнение регрессии имеет вид

$$x_4(t + \Delta t) = 0,8x_1(t) - 0,6x_2(t) + 0,8x_3(t). \quad (1)$$

Пусть значение фактора X_2 равно 12 или в нормированном виде $x_2 = 0,55$, тогда прогнозируемое по (1) значение фактора x_4 составит -1,21 или $X_4 = 352$. Прогнозируемое увеличение значения фактора X_4 объясняется тем, что он связан с изменившимся фактором X_2 отрицательной связью, а уменьшение значения влияющего фактора приводит к увеличению значения зависимого фактора.

Более интересные процессы прогнозируются при анализе когнитивных моделей, содержащих циклы. В качестве примера возьмем когнитивную модель M2, представляющую процессы бюджетного финансирования научно-исследовательских работ (НИР) в вузах России (рис. 2). Все связи в этой модели — положительные (табл. 2). В ней помимо очевидных циклов

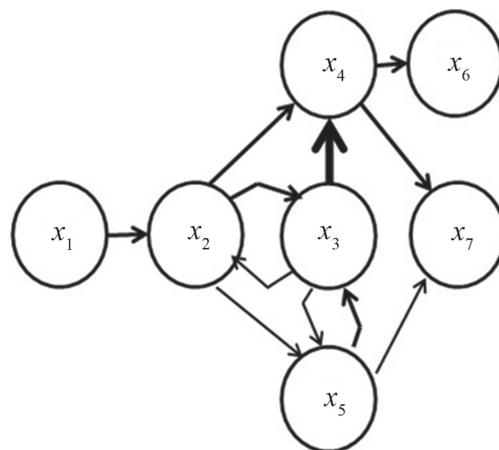


Рис. 2. Когнитивная модель процессов финансирования исследований в вузах (M2):

x_1 — объем финансирования; x_2 — обобщенные результаты; x_3 — квалификация исполнителей; x_4 — степень готовности результатов к практическому использованию; x_5 — степень новизны результатов; x_6 — объем продукции для использования в учебном процессе; x_7 — количество методических материалов, созданных при проведении НИР и используемых в преподаваемых дисциплинах

Таблица 2

Когнитивная модель M2

Факторы	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
x_1	—	0,4	—	—	—	—	—
x_2	—	—	0,6	0,4	0,3	—	—
x_3	—	0,3	—	0,7	0,3	—	—
x_4	—	—	—	—	—	0,5	0,5
x_5	—	—	0,4	—	—	—	0,3
x_6	—	—	—	—	—	—	—
x_7	—	—	—	—	—	—	—

$x_2 + x_3 + x_2$ и $x_3 + x_5 + x_3$ имеется цикл $x_2 + x_5 + x_3 + x_2$. Все циклы — положительные.

Значения нормированных факторов в начальном состоянии объекта следующие: $x_1 = -0,37$; $x_2 = -0,33$; $x_3 = x_4 = x_6 = 0$; $x_5 = -1,65$; $x_7 = -0,92$. Исследовалась реакция объекта на увеличение финансирования (фактор x_1) до 0,75. Изменение всех факторов представлено на рис. 3.

Как и следовало ожидать, при увеличении финансирования НИР значения всех факторов, характеризующих полезные результаты НИР, увеличились и установились на новых, более высоких уровнях. Оценки точности получаемых прогнозов требуют отдельного изучения, но можно предположить, что точность будет иметь тенденцию к снижению с увеличением номера такта (глубины прогноза), а также станет более низкой для связей с меньшей абсолютной величиной силы.

Хотя в предыдущем примере все циклы были положительными, это не привело к неустойчивости объ-

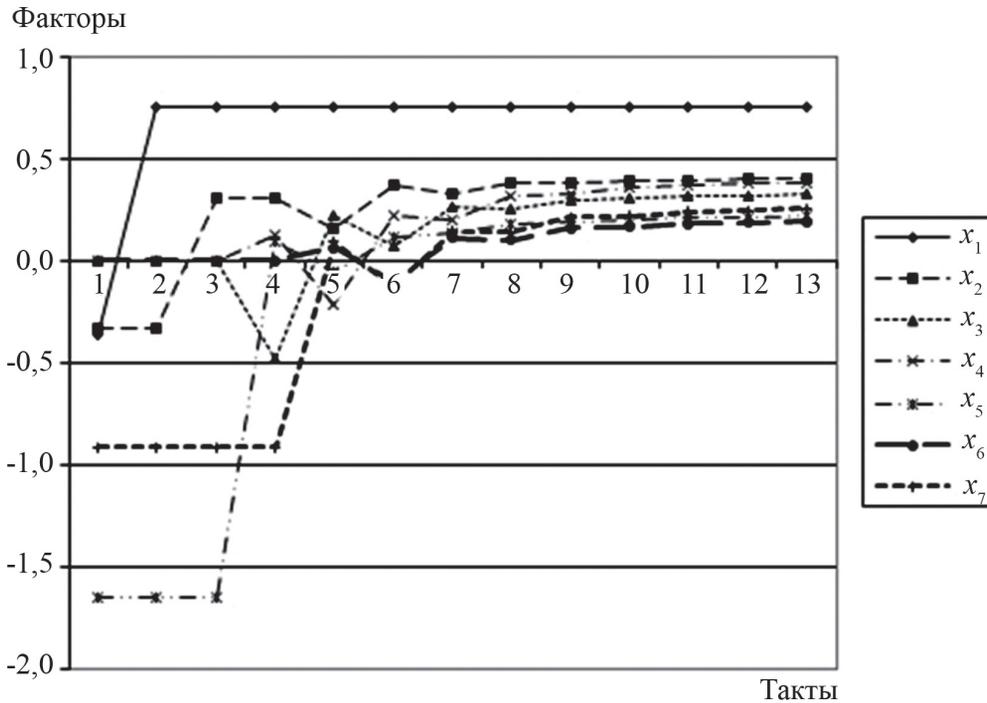


Рис. 3. Прогнозируемые изменения факторов в объекте управления при увеличении значения фактора x_1

екта. При некоторых структурах когнитивных моделей по ним можно прогнозировать нарушения устойчивости функционирования объекта. В качестве примера рассмотрим когнитивную модель МЗ гипотетического объекта, изображенную на рис. 4. В ней имеются положительный и отрицательный циклы: $x_2 + x_3 + x_5 - x_4 - x_2$ и $x_2 + x_3 + x_4 - x_2$. В табл. 3 даны силы связей для модели МЗ.

В начальном состоянии объекта значения нормированных факторов таковы: $x_1 = -0,86$; $x_2 = 0,68$; $x_3 = 0,66$;

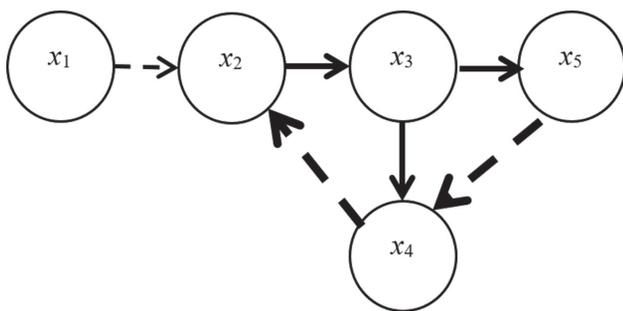


Рис. 4. Когнитивная модель МЗ

Таблица 3

Представление когнитивной модели М1

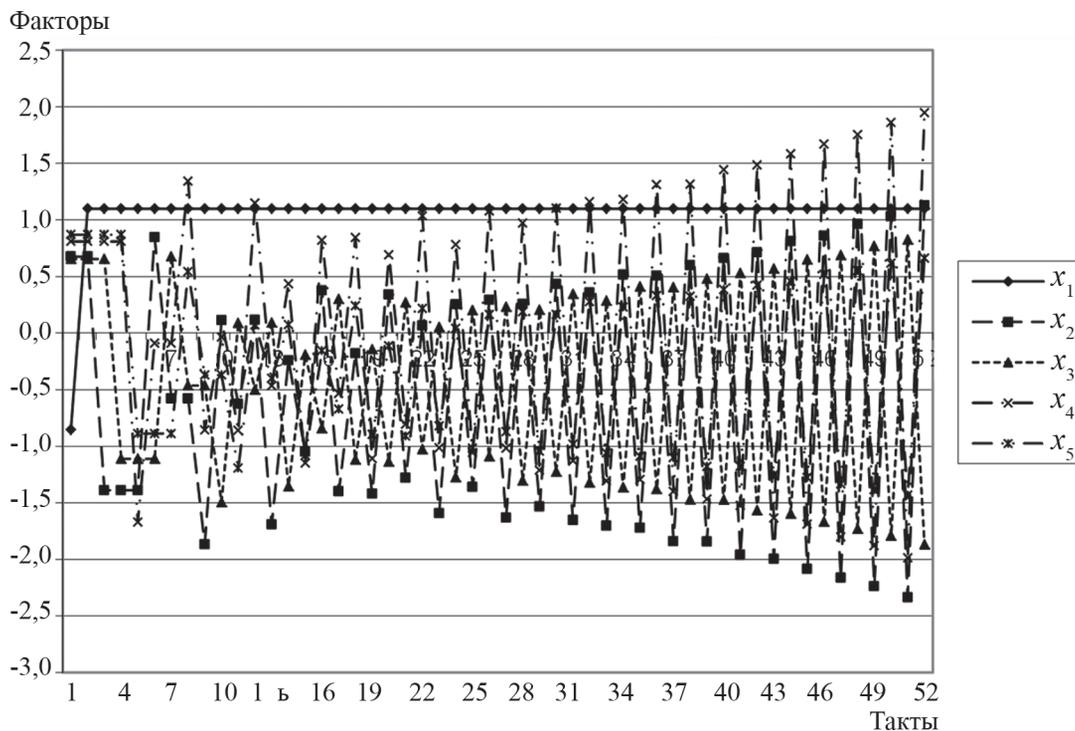
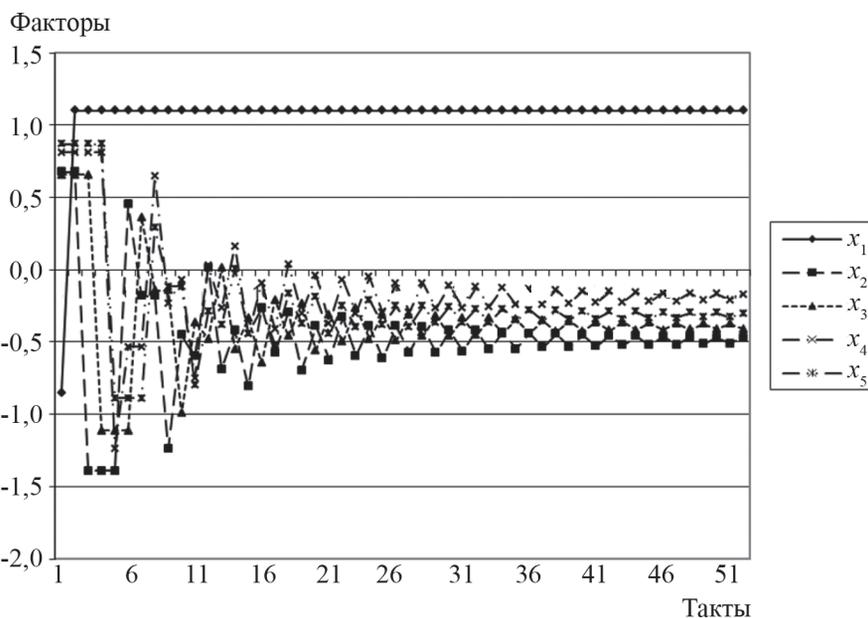
Факторы	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
x_1	—	-0,6	—	—	—
x_2	—	—	0,8	—	—
x_3	—	—	—	0,8	0,8
x_4	—	-0,9	—	—	—
x_5	—	—	—	-0,9	—

$x_4 = 0,81$; $x_5 = 0,87$. Если в некоторый момент значение фактора x_1 станет равным 1,1, то можно прогнозировать изменение остальных факторов, представленное на рис. 5. Видно, что объект стал неустойчивым, значения всех факторов, кроме первого, колеблются около средних значений с увеличением амплитуды колебаний. Исследования показали, что при разных силах связей между факторами в циклах могут получаться сходящиеся или расходящиеся колебания.

Пусть в той же когнитивной модели сила связи между факторами X_5 и X_4 уменьшилась по абсолютной величине и стала равной $-0,3$, тогда при всех тех же параметрах задачи факторы будут меняться так, как это показано на рис. 6.

Изменение факторов здесь представляет собой сходящиеся колебательные процессы. Сила связи между факторами X_5 и X_4 , равная $-0,74$, соответствует границе между сходящимися и расходящимися процессами изменения факторов.

Приведенные примеры показывают возможность использования когнитивной модели для количественной оценки развития процессов в моделируемом объекте при изменении по какой-либо причине значения одного из факторов. К числу достоинств можно отнести достаточно низкий уровень требований к знаниям о моделируемом объекте и отсутствие необходимости сбора, подготовки и обработки наблюдений. Благодаря разработанному методу становится возможным прогноз неочевидных отдаленных последствий принимаемых управленческих решений, в том числе и возникновения неустойчивости функционирования моделируемого объекта.

Рис. 5. Прогнозируемое изменение значений факторов по модели $M3$ Рис. 6. Прогнозируемое изменение значений факторов по модели $M3$ с уменьшенной силой одной межфакторной связи

Литература

1. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений. М.: СИНТЕГ, 1998.
2. Полотнов М.М., Фомин Г.А. Методы построения и использования когнитивных моделей объектов принятия решений. М.: Изд-во МЭИ, 2015.
3. Анадютис Дж. Путь от данных к аналитике и ИИ: от наглядного отображения к прогнозам // PC

Week. 2016. № 21 (920) [Электрон. ресурс] [https://www.pcweek.ru/ai/article/detail.php?ID=190406 ¶m=mail](https://www.pcweek.ru/ai/article/detail.php?ID=190406¶m=mail) (дата обращения 06.12.2016).

4. Кульба В.В., Мионов П.Б., Назаретов В.М. Анализ устойчивости социально-экономических систем с использованием знаковых орграфов // Автоматика и телемеханика. 1993. № 7. С. 130—137.

5. Радченко С.А. Когнитивное моделирование как средство поддержки принятия решений при управле-

нии социально-экономической системой // Проблемы регионального управления, экономики и права и инновационных процессов в образовании: Труды III Международ. науч.-практ. конф. Таганрог: Изд-во ТИУиЭ, 2003. С. 298—300.

6. **Федулов Ю.Г., Юсов А.Б., Матвеев А.А.** Исследование социально-экономических и политических процессов с помощью когнитивных моделей. М: Изд-во РАГС, 2004.

7. **Федулов А.С., Борисов В.В.** Анализ нечетких реляционных когнитивных карт // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2016. № 7. С. 7—14.

8. **Борисов В.В., Денисенков М.А., Федулов А.С.** Нечеткие ситуационные сети на основе когнитивных карт // Естественные и технические науки. 2016. № 2 (92). С. 118—123.

9. **Борисов В.В., Федулов А.С., Федулов Я.А.** «Совместимые» нечеткие когнитивные модели: прямые и обратные задачи // Нечеткие системы и мягкие вычисления. 2016. № 2 (11). С. 103—114.

10. **Фомин Г.А., Фомина Е.С.** Метод формирования имитационных данных по когнитивной модели объекта управления // Вестник МЭИ. 2018. № 1. С. 106—111.

References

1. **Trakhtengerts E.A.** Komp'yuternaya Podderzhka Prinyatiya Resheniy. M.: SINTEG, 1998. (in Russian).

2. **Polotnov M.M., Fomin G.A.** Metody Postroeniya i Ispol'zovaniya Kognitivnykh Modeley Ob'ektov Prinyatiya Resheniy. M.: Izd-vo MPEI, 2015. (in Russian).

3. **Anadiotis Dzh.** Put' ot Dannykh k Analitike i II: ot Naglyadnogo Otobrazheniya k Prognozam. PC Week. 2016;21 (920) [Elektron. Resurs] [https://www.pcweek.ru/ai/article/detail.php?ID=190406 ¶m=mail](https://www.pcweek.ru/ai/article/detail.php?ID=190406¶m=mail) (Data Obrashcheniya 06.12.2016). (in Russian).

4. **Kul'ba V.V., Mironov P.B., Nazaretov V.M.** Analiz Ustoychivosti Sotsial'no-ekonomicheskikh Sistem

s Ispol'zovaniem Znakovykh Oragrafov. Avtomatika i Telemekhanika. 1993;7:130—137. (in Russian).

5. **Radchenko S.A.** Kognitivnoye Modelirovaniye kak Sredstvo Podderzhki Prinyatiya Resheniy pri Upravlenii Sotsial'no-ekonomicheskoy Sistemoy. Problemy Regional'nogo Upravleniya, Ekonomiki i Prava i Innovatsionnykh Protsessov v Obrazovanii: Trudy III Mezhdunar. Nauch.-prakt. Konf. Taganrog: Izd-vo TIUиE, 2003:298—300. (in Russian).

6. **Fedulov Yu.G., Yusov A.B., Matveev A.A.** Issledovanie Sotsial'no-ekonomicheskikh i Politicheskikh Protsessov s Pomoshch'yu Kognitivnykh Modeley. M: Izd-vo RAGS, 2004. (in Russian).

7. **Fedulov A.S., Borisov V.V.** Analiz Nchetkikh Relyatsionnykh Kognitivnykh Kart. Neyrokompyutery: Razrabotka, Primenenie. 2016;7:7—14. (in Russian).

8. **Borisov V.V., Denisenkov M.A., Fedulov A.S.** Nchetkie Situatsionnye Seti na Osnove Kognitivnykh Kart. Estestvennye i Tekhnicheskie Nauki. 2016;2 (92): 118—123. (in Russian).

9. **Borisov V.V., Fedulov A.S., Fedulov Ya.A.** «Sovmestimye» Nchetkie Kognitivnye Modeli: Pryamye i Vychisleniya. 2016;2 (11):103—114. (in Russian).

10. **Fomin G.A., Fomina E.S.** A Method for Shaping Simulation Data from a Controlled Plant Cognitive Model. Vestnik MPEI. 2018;1:106—111. (in Russian).

Сведения об авторе

Фомин Геннадий Александрович — кандидат технических наук, профессор кафедры управления и информатики НИУ «МЭИ», e-mail: FominGA@mpei.ru

Information about author

Fomin Gennadiy A. — Ph.D. (Techn.), Professor of Control and Informatics Dept., NRU MPEI, e-mail: FominGA@mpei.ru

Статья поступила в редакцию 24.11.2017