

УДК 519.81

ББК 22.18

УПРАВЛЕНИЕ БИЗНЕС-ПРОЦЕССАМИ НА ОСНОВЕ ИХ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЧЕТКИМИ СИТУАЦИОННЫМИ СЕТЯМИ¹

Астанин С. В.²

(ФГОУ ВПО «Таганрогский государственный педагогический институт имени А.П.Чехова», Таганрог)

Жуковская Н. К.³

*(НОУ ВПО «Российский Новый университет»,
Таганрогский филиал, Таганрог)*

Рассмотрен подход к моделированию бизнес-процессов и проектов в условиях неопределенности. Предложены подходы к построению нечеткой ситуационной сети как модели возможных стратегий реализации бизнес-процесса (проекта), а также процедуры анализа данных стратегий.

Ключевые слова: ситуационное моделирование, нечеткие ситуационные сети, нечеткая аналогия, анализ стратегий.

1. Введение

В настоящее время выделяют два подхода к управлению современными организациями: процессный и проектный. Как правило, считается, что процессный подход хорош для организаций с уже сложившимися (регулярными) бизнес-процессами, и которые возможно описать последовательностью выполняе-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №12-01-00766-а).

² Сергей Васильевич Астанин, доктор технических наук, профессор (astser@mail.ru).

³ Наталья Константиновна Жуковская, кандидат технических наук, доцент (nasha-0207yandex.ru).

мых функций определенными исполнителями. Проектный подход более подходит для предприятий, которые выполняют неповторяющиеся заказы, контракты или услуги. Вместе с тем для ряда организаций характерно применение проектно-процессного подхода, что может определяться как неопределенностью внутрифирменных механизмов управления отдельных служб (например, ИТ-подразделений), так и неопределенностью внешней среды (увеличение ассортимента товаров или услуг в условиях конкуренции как инновационного проекта). В этих случаях можно рассматривать бизнес-процесс как решение задачи различными способами, в зависимости от сложившейся ситуации и использовать ситуационное моделирование бизнес-процесса, течение которого во времени может меняться в зависимости от возможных факторов (объема ресурсов, управляющих воздействий, внешней среды и т.п.) определенного уровня управления предприятия. Фактически речь идет об оптимизации реинжиниринга бизнес-процесса на основе построения его ситуационной модели в условиях неопределенности и риска. Согласно концепции реинжиниринга М. Хаммера деятельность предприятия представляет собой процесс, который совершает фирма из начального состояния (заказ) в целевое состояние (продукт), минуя ряд промежуточных состояний [7]. Для описания такой деятельности используются как методологии графических описаний бизнес-процессов (*IDEF0*, *IDEF3*, *BPMN*), так и формальные подходы, основанные на применении графов, гиперграфов и метаграфов [4, 8]. В отличие от этих подходов, в настоящей работе в качестве инструмента ситуационного моделирования предлагаются методы построения нечетких ситуационных сетей (НСС), анализа синтезированных бизнес-процессов как путей из начального состояния в целевое состояние, а также идентификации состояний. Первая группа методов позволяет синтезировать НСС, как многомерный граф, особенность которого состоит в том, что каждая его вершина может быть сконструирована по типу матрешки: самая большая матрешка является гиперребром, охватывающим некоторую графовую структуру. В свою очередь любая вершина этой структуры может являться

гиперребром внутренней структуры и т.д. В частности метаграф, на основе иерархического графа, может являться моделью вершины исходной НСС. При таком описании каждая вершина НСС определяет состояние бизнес-процесса, а структура состояния – ситуацию бизнес-процесса. В НСС вершины связаны дугами, маркированными управляющими решениями и, возможно, весами, определяющими возможность или риск перехода из одного состояния в другое состояние. Вторая группа методов может представлять и классические подходы к анализу графов, в зависимости от поставленной задачи (например, поиск кратчайшего или поиск наименее рискованного пути).

Задача идентификации состояний НСС является нетривиальной задачей определения изоморфизма нечетких графов.

2. Формализованное описание бизнес-процесса

В соответствии со стандартом *SADT* в каждый контролируемый момент времени бизнес-процесс представим схемой, изображенной на рис. 1. В таком представлении бизнес-процесс, по сути, является черным ящиком, преобразующим ресурс в готовое изделие при ограничениях, вносимых управляющими воздействиями и владельцем (механизмом реализации) процесса.



Рис. 1. Представление бизнес-процесса в стандарте *SADT*

Для определенных процессов функция (задача) f элементарна и поэтому нет необходимости вникать в «устройство» черного ящика, а переход к последующим функциям бизнес-процесса также не вызывает затруднений. Для неопределенных бизнес-процессов и проектов в лучшем случае удастся описать целевую и исходную составляющие, а для построения промежуточных составляющих необходимо знать механизм преобразования ресурсов в готовое изделие.

Реально подобный механизм можно (или целесообразнее) описать приближенно, используя процедуры нечеткой логики и теории графов. Так, неопределенный бизнес-процесс или проект в некоторый момент времени t представим следующим образом (рис. 2).

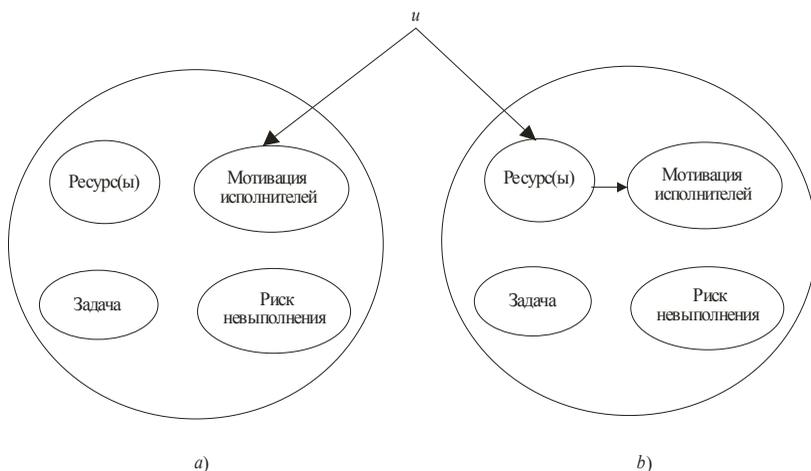


Рис. 2. Текущий неопределенный бизнес-процесс или проект в момент времени t : а) – независимые составляющие; б) – зависимые составляющие)

В отличие от рис. 1 здесь ресурсы не являются неким полуфабрикатом, из которого, посредством управляющих воздействий, механизм реализации получает готовое изделие. Здесь и ресурсы, и готовое изделие входят в понятие «задача», которая в каждый момент времени может иметь разное состояние. В ис-

ходном описании состояние задачи как раз и будет соответствовать состоянию ресурса в виде полуфабриката, а в целевом описании состояние задачи представляет готовый продукт. Соответственно, под ресурсами подразумеваются средства (финансы, кадры, материалы, оборудование), необходимые и достаточные для решения задачи. Использование других составляющих бизнес-процесса (проекта) определяется точностью его описания. В частности под мотивацией персонала имеется в виду текущая мотивация механизма реализации m . При описании управляющих воздействий предлагается использовать два типа: внешние и внутренние управления. Внешние управления воздействуют на конкретную составляющую бизнес-процесса (проекта), изменяя его состояние. Внутренние управления характерны для бизнес-процессов с взаимосвязанными составляющими: изменение состояния одной из них может повлечь изменение состояний других составляющих.

Например, руководство решило купить готовый проект вместо запланированной реализации проекта силами некоторого отдела (рис. 2, *b*). Использование других составляющих бизнес-процесса (проекта) определяется точностью его описания. В частности под мотивацией персонала имеется в виду текущая мотивация механизма реализации m . Решение о покупке является внешним управлением, воздействующим на составляющую «ресурс» и изменяющим его уровень с высокого на низкий. В свою очередь полное использование ресурсов означает окончательное решение задачи, т.е. изменение уровня ее решения с низкого на высокий. В то же время такое управление, связанное с отсутствием стимулирования собственных сотрудников, отрицательно скажется на их мотивации.

При таком представлении достаточно описать исходные (хорошо известные) и возможные целевые (планируемые) состояния бизнес-процессов (проектов), а также возможные внешние и внутренние управления. Процесс моделирования будет заключаться в переходе одного состояния бизнес-процесса в другое состояние под влиянием управляющих воздействий, причем возможно наличие как нескольких исходных, так и

нескольких целевых состояний бизнес-процесса, а также множества путей из исходных состояний в целевые состояния.

Формально опишем текущее состояние S бизнес-процесса с зависимыми составляющими следующим образом:

$$(1) S = (Y, U, N, M, \mu_S(y_i)),$$

где – $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ – множество лингвистических переменных (составляющих) бизнес-процесса, причем $y_i = \{T_i^1, T_i^2, \dots\}$, $i = 1, 2, \dots, n$;

– $\{T_i^1, T_i^2, \dots\}$ – терм-множество нечетких переменных, определяющих значения (свойства) лингвистических переменных;

– $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ – внешние управляющие воздействия;

– $N = \{N(u_j) = T_i \times T_j\}$, $j = 1, 2, \dots, m$, – матрицы изменений значений лингвистических переменных под воздействием управления u_j ;

– $M_{i,k} = \{(T_i^1, T_i^2, \dots) \times T_k^1, T_k^2, \dots\}$ – матрицы взаимодействия значений лингвистических переменных, $i, k = 1, 2, \dots, n$, $i \neq k$;

– $\mu_S(y_i)/y_i = \{\langle \mu_S(T_i) \rangle / T_i\}$ – нечеткая ситуация бизнес-процесса с функциями принадлежности нечетких значений лингвистических переменных.

3. Ситуационная сеть как модель бизнес-процесса (проекта)

Пусть $S_1 = \{S_n, S_2, \dots, S_p = S_n\}$ – совокупность состояний бизнес-процесса, причем S_1 – начальное состояние, а S_p – целевое состояние. Имея начальные и целевые описания состояний бизнес-процесса в виде (1) достаточно применить к начальным состояниям различные комбинации управляющих воздействий U , чтобы получить промежуточные состояния S_2, S_3, \dots . В свою очередь, воздействуя на промежуточные состояния можно получить новые состояния до тех пор, пока получим (или не получим) целевое состояние. В целом процесс перехода из одного состояния в другое удобно представить в виде ориентированного графа $G = (S, V)$, где $S = \{S_1, S_2, \dots, S_p\}$ – множество вершин, $V = \{V_1, V_2, \dots, V_l\}$ – множество дуг (комбинаций управляющих

воздействий). В связи с тем, что $S_h = (Y, \mu_S(y_i), M_{i,k})$, $h = 1, 2, \dots, p$, в каждый момент времени t описывается нечеткой структурой (графом) $S_h = (Y, \mu_S(y_i)/y_i, e)$, где Y – множество нечетких вершин с функциями принадлежности $\mu_S(y_i)/y_i$; e – множество ориентированных ребер, то граф G называется нечеткой ситуационной сетью (НСС), которая определяет переход от одной нечеткой ситуации $\mu_S(y_i)/y_i$ к другой $\mu_S(y_r)/y_r$ [5].

Для большого числа состояний построение ситуационной сети посредством декларативного описания трудоемко. В этой связи целесообразно применение процедурного подхода на основе имеющихся состояний и управляющих воздействий. Процедурный подход основан на прямом и обратном методах синтеза НСС, состояния которых определяются зависимыми составляющими [1], в отличие от методов, предложенных в [5], где состояния описываются независимыми признаками. Суть прямого метода заключается в следующем. Пусть начальные состояния составляют первый уровень ситуационной сети. Применяя к ним различные комбинации управляющих воздействий, получим состояния второго уровня и т.д., до тех пор, пока новых состояний не возникает. Обратный метод заключается в попытке построения связей, т.е. комбинаций управляющих воздействий, между состояниями различных уровней, полученных при использовании прямого метода.

Формально прямой метод реализуется следующим образом. Для простоты будем считать известными одно начальное состояние S_1 и одно управляющее воздействие u_1 . Нечеткая ситуация, связанная с S_1 , имеет вид:

$$\mu_{S_1} = (\mu(T_1^l), \mu(T_2^r), \dots).$$

Тогда нечеткая ситуация μ_{S_2} второго уровня ситуационной сети образуется посредством применения операции «композиция» к составляющим, входящих в описание состояния S_1 , т. е.

$$(2) \quad \mu_{S_2} = (\mu_{S_1} \circ N_{1,1}) \cup (\mu_{S_1} \circ N_{1,1} \circ M_{1,2}) \cup \\ \cup (\mu_{S_1} \circ N_{1,1} \circ M_{1,3}) \cup \dots = (\mu(T_1^v), \mu(T_2^w), \mu(T_3^d), \dots)'$$

где « \circ » – операция максиминной композиции.

Для определения структуры состояния S_2 , т.е. определения дуг e , используются нечеткие матрицы $M_{i,k}$, или для нашего случая матрицы $M_{1,2}, M_{1,3}, \dots, M_{2,1}, M_{2,3}, \dots, M_{3,1}, M_{3,2}, \dots$.

Обратный метод основан на анализе отношений взаимозависимости значений признаков состояний, сформированных прямым методом и заданных в виде нечетких матриц $M_S(Y, Y)$ с $\mu_S(T_i^g, T_k^q) > 0,5$. Матрицы строятся следующим образом. Среди элементов терм-множеств каждого признака выбираются элементы с функциями принадлежности, большими 0,5. Данные элементы и составляют значения строк и столбцов матриц $M_S(Y, Y)$. На пересечении строк и столбцов в соответствие матрицам N и $M_{i,k}$ ставятся функции принадлежности $\mu_S(T_i^g, T_k^q) > 0,5$. Смысл построенных матриц заключается в том, что применение управляющего воздействия u_i к i -му признаку конкретного состояния может изменить значения других признаков с возможностью, определяемой функцией $\mu_S(T_i^g, T_k^q)$. Другими словами, чем больше функций $\mu_S(T_i^g, T_k^q) > 0,5$ находится на пересечении i -й строки с k -ми столбцами, тем большее число признаков может одновременно изменить управляющее воздействие u_i .

Пусть необходимо определить возможное управляющее воздействие, переводящее состояние S_3 в состояние S_2 при известных матрицах $M_{S_3}(T_i^l, T_k^r)$ и $M_{S_2}(T_i^v, T_k^w)$. В матрице $M_{S_2}(T_i^v, T_k^w)$ найдем такую строку i , в которой находится наибольшее число элементов $\mu_{S_2}(T_i^v, T_k^w)$, отличных от нуля. Среди множества управляющих воздействий применим воздействие u к i -му признаку состояния S_3 , предполагая изменение этого признака на значение, соответствующее значению i -го признака состояния S_2 , т.е. $\mu_{S_2}(T_i^v) = \mu_{S_3}(T_i^r) \circ N_{i,i}$, где $\mu_{S_2}(T_i^v)$ – часть нечеткой ситуации состояния S_2 , связанная с описанием i -го признака. Если u действительно изменяет значение i -го признака состояния S_3 на значение i -го признака состояния S_2 , то в соответствии с (2) определяются остальные

части нечеткой ситуации состояния S_2 , связанные с определением оставшихся значений признаков. Если в результате (2) получена ситуация, значения признаков которой полностью совпадают со значениями признаков состояния S_2 , то задача решена, т.е. сформировано управляющее воздействие u , переводящее состояние S_3 в состояние S_2 . Если u изменяет значение i -го признака состояния S_3 на значение i -го признака состояния S_2 , но при этом, на основании матриц $M_{i,k}$, i -й признак не влияет на k -е признаки, то в матрице $M_{S_2}(T_i^v, T_k^w)$ среди оставшихся строк находится строка h , в которой находится наибольшее число элементов $\mu_{S_2}(T_h^v, T_k^w)$, отличных от нуля. Далее выбирается управляющее воздействие u_h и доопределяется нечеткая ситуация μ_{S_2} , в соответствии с (2). Вышеописанная процедура повторяется до тех пор, пока задача не будет решена, т.е. до формирования управляющего решения $\langle u_i, u_h, \dots \rangle$, преобразующего состояние S_3 в состояние S_2 .

Если в результате (2) получена ситуация, значения признаков которой не совпадают со значениями признаков состояния S_2 , то выбор управляющего воздействия u_i оказался неудачным. В этом случае в матрице $M_{S_2}(T_i^v, T_k^w)$ среди оставшихся строк находится строка h , в которой находится наибольшее число элементов $\mu_{S_2}(T_h^v, T_k^w)$, отличных от нуля. Далее выбирается управляющее воздействие u_h и повторяется процедура определения нечеткой ситуации μ_{S_2} в соответствии с (2) до формирования комбинации управляющих воздействий, преобразующих состояние S_3 в состояние S_2 .

Описанный подход повторяется до тех пор, пока не найдется решение задачи. При этом в последнюю очередь осуществляется выбор строк матрицы $M_{S_2}(T_i^v, T_k^w)$ с функциями принадлежности равными нулю. Если же при анализе матрицы оказалось несколько строк с равным числом элементов, отличных от нуля, то среди них выбирается любое.

Если использование процедуры обратного метода не приводит к решению, то это означает отсутствие связи между состояниями НСС.

Рассмотренный подход позволяет синтезировать НСС при наличии исходного множества известных состояний и различных комбинаций из набора управляющих воздействий, но не отвечает на вопрос: существует ли в сформированном множестве состояний НСС целевое состояние? Для ответа на этот вопрос необходимо использовать некоторую процедуру сравнения имеющегося описания целевого состояния бизнес-процесса с состояниями НСС – кандидатами на роль целевого состояния.

Выбор меры сравнения зависит от особенностей моделируемого бизнес-процесса (проекта): в одних случаях взаимосвязь составляющих целевого состояния бизнес-процесса не важна, в других случаях структура составляющих целевого состояния является определяющей для его идентификации.

Если составляющие целевого состояния независимы, то в качестве меры для определения степени близости состояния $S_h \in S$ целевому состоянию $S_{ц}$ могут использоваться степень нечеткого включения нечеткой ситуации в нечеткую ситуацию $\mu_{S_{ц}}$ и степень нечеткого равенства $\mu_{S_{ц}}$ и μ_{S_h} [5].

Более сложные процедуры сопоставления состояний применяются при учете структур составляющих состояний бизнес-процесса, в особенности наличия значительного их количества. В этом случае речь идет о сравнении двух нечетких графов $s_h = (Y_h, \mu_{S_h}(y_i)/y_i, e_h)$ и $s_{ц} = (Y_{ц}, \mu_{S_{ц}}(y_i)/y_i, e_{ц})$. В теории графов для сравнения неориентированных графов используется понятие изоморфизма. В случае если понятие изоморфизма применяется к ориентированным или взвешенным графам, накладываются дополнительные ограничения на сохранение ориентации дуг и значений весов. В математике изоморфизм уточняет более широкое понятие «аналогия» и определяет отношение между абстрактными объектами, выражающее тождество их структуры. Однако НСС является моделью конкретного, пусть и неопределенного, бизнес-процесса, состояния которого представляют конкретные объекты. С другой стороны, состояния

НСС – кандидаты на роль целевого состояния построены на основе приложения выбранных управляющих воздействий к исходным в данный момент времени, и предшествующим состояниям. Из-за неполноты знаний описание целевого состояния может быть сформировано на основе общих представлений о результате бизнес-процесса, без привязки к имеющимся условиям (исходным состояниям и управляющим воздействиям). Иными словами, такое целевое состояние в действительности может быть исходом других управлений, воздействующие на другие, возможно и близкие, исходные состояния. В этой связи, использования структурного изоморфизма, связанного с установлением взаимного соответствия элементов структур графов s_h и $s_{ц}$, недостаточно. Процедура сопоставления должна учитывать эти факты и «уметь» сопоставлять состояния, подобные с точки зрения отображаемых функций, результатов, отношений и т.п. В таком смысле близким к сопоставлению понятием является понятие аналогии, используемое в биологии для установления сходства каких-либо структур, не имеющих общего происхождения. Действительно, происхождение состояний НСС – кандидатов на роль целевого состояния может быть иным, чем происхождение целевого состояния, но более важно то, что все они дают одинаковый результат или позволяют выполнять одинаковые функции.

В этой связи в качестве процедуры сравнения графов s_h и $s_{ц}$ воспользуемся механизмом установления структурно-содержательной аналогии между нечеткими графами [2]. Исходными понятиями структурно-содержательной аналогии являются понятия формы и содержания моделируемого объекта. Признаки, черты или свойства объекта, характеризующие его единичное (частное) проявление, называются внутренним содержанием объекта. Внутреннее содержание структурно организовано, т.е. имеется способ взаимосвязи признаков, который выступает внутренней формой объекта и определяет общее проявление объекта. Кроме внутреннего содержания и внутренней формы объект может обладать внешним содержанием, т.е. совокупностью свойств (структурно организованных или нет), характеризующих внутреннюю форму объекта. Таким образом,

моделируемый объект определяется внутренним содержанием (частное проявление объекта), внутренней формой (общее проявление частного) и внешним содержанием как характеристикой внутренней формы.

Метод нахождения аналогии между объектами основан на выделении базовых множеств внутренних форм объектов и определении сходства между базовыми множествами [2]. Пусть $s_h = (Y_h, e_h)$ – граф внутренней формы состояния S_h ; $y_i \in Y_h$, $i \in I = \{1, \dots, n\}$ – множество вершин; $e_j \in e_h, j \in J = \{1, \dots, m\}$ – множество помеченных ребер.

Множество ребер $\{e_j/y_k\} \in e_h$ графа s_h , инцидентных вершинам $y_i \in Y_1 \subset Y$, называется базовым множеством, если в результате их удаления происходит разрушение структуры состояния S_h , т.е. по крайней мере любые две не смежные вершины оказываются не связанными.

Графы $s_h = (Y_h, e_h)$ и $s_u = (Y_u, e_u)$ с базовыми множествами $\{e_{s_h}/y_k\} \subset Y_1$ и $\{e_{s_u}/y_p\} \subset Y_2$ называются сходными, если для всех $y_k \in Y_1, y_p \in Y_2$ выполняется одно из следующих условий:

$$(\{e_{s_h}/y_k\} \subseteq \{e_{s_u}/y_p\}) \vee (\{e_{s_u}/y_p\} \subseteq \{e_{s_h}/y_k\});$$

$$(\{e_{s_h}/y_k\} \subseteq \{e_{s_u}/y_p\}) \& (\{e_{s_u}/y_p\} \subseteq \{e_{s_h}/y_k\}),$$

Рассмотрим два подхода к выделению базовых множеств внутренних форм состояний. Во-первых, внутреннюю форму любого состояния S можно описать слабо связным ориентированным нечетким графом $s = (Y, e, met)$, где Y – конечное множество вершин (термов); $e = \{\mu_e(y_i, y_l)/(y_i, y_l)\}$, $(y_i, y_l) \in e$ – нечеткое множество дуг с функцией принадлежности $\mu_e(y_i, y_l)$, определяющей степень истинности отношения вершин y_i и y_l ; $met: e \rightarrow Q$ – функция, сопоставляющая каждой дуге графа метку $q \in Q$. Модель состояния описывается в виде тройки (s, W^*, λ) , где s – внутренняя форма состояния; W^* – множество оценок (свойств), определяющих внешнее содержание объекта; $\lambda: Y \rightarrow W^*$ – соответствие между множеством вершин графа и внешним содержанием состояния.

Согласно [2] выделение базовых множеств внутренних форм объектов осуществляется следующим образом. Для каждой вершины $y_i \in Y$ необходимо определить нечеткий образ $\Gamma(y_i) = \{\mu(e)/y_r\}$, где $\mu(e) = \mu_e(y_i, y_r)$; y_r – множество вершин, смежных y_i при нечетком соответствии $\Gamma(Y, Y, e)$.

Пусть существует функция $f: Y \rightarrow C$, где $C = \{C_1, C_2, \dots, C_l\}$ – семейство подмножеств, такое что

$$\begin{aligned} C_1 &= f_1(\Gamma(y_1)); \\ C_2 &= f_2(\Gamma(y_i), \Gamma(y_k)), i \neq k; \\ C_3 &= f_3(\Gamma(y_i), \Gamma(y_k), \Gamma(y_l)), i \neq k \neq l; \\ &\dots \\ C_l &= f_l(\Gamma(y_i), \dots, \Gamma(y_n)). \end{aligned}$$

Если C образовано посредством функции f_i , соответствующей операции пересечения « \cap », такой что

$$f_i(\Gamma(y_1), \dots, \Gamma(y_n)) = \min_{e \in e_y} \mu(e)/y_r,$$

где e_y – множество ребер инцидентных y_r , то C является полугруппой с операцией « \cap ».

Выделим в C непустое подмножество $I = \{\mu(e_s)/y_r^j\}$, $j \in \{1, 2, \dots, l\}$, где l – число элементов I ; e_s – множество ребер, инцидентных вершине y_r , которое обладает следующими свойствами:

- элементы подмножества I образованы непустым замыканием относительно операции « \cap » вне зависимости от ориентации дуг слабо связного графа s ;

- для любого элемента $c \in C$ и любого элемента $i \in I$, $c \cap i = i \cap c$ принадлежит I ;

- среди элементов I нет элементов с вершинами, которым инцидентны только выходящие дуги.

Подмножество I с указанными свойствами является базовым множеством графа s .

На I выделяем два подмножества: подмножество вершин $Y_1 = \{y_r^j\} \subset Y$ и подмножество ребер $e_1 \subset e$, инцидентных Y_1 . Очевидно, что Y_1 является множеством внешней устойчивости графа I . Поскольку I отлично от \emptyset , то для любого элемента $c \in C$ $C \cap I \neq \emptyset$ Так как любой $i \in I$ имеет вид $\mu(e)/y_r$, то удале-

ние e аналогично выполнению условия $c \cap I = \emptyset$. Это означает, что между вершинами графа $y_k \in Y_1$ и $Y_v \in Y \setminus Y_1$ не существует связей, что равносильно разрушению структуры состояния, представленного графом s . Окрестностью базового множества I называется подмножество вершин графа s , смежных вершинам множества Y_1 .

Второй подход основан на определении минимального ядра графа Y^c и выделении подмножества ребер $e^c \subset e$, инцидентных Y^c . При этом Y^c называется ядром графа $s = (Y, e, met)$, если оно является одновременно внутренне и внешне устойчивым множеством графа, т.е.

$$\forall y_i \in Y^c \quad Y^c \cap \Gamma(y_i) = \emptyset, \quad \forall y_i \notin Y^c \quad Y^c \cap \Gamma(y_i) \neq \emptyset.$$

Тогда $Y = Y_1 \cap Y_2$, где Y_1 – внешне устойчивое множество графа; Y_2 – внутренне устойчивое множество графа, т.е. любая вершина $y_i \notin Y^c$ связана по крайней мере с одной вершиной из Y^c ребром, начало которого лежит в $Y \setminus Y^c$ и при этом никакие две вершины из Y^c не являются смежными.

Процедура отыскания ядер графа основана на обобщении метода Магу для нечетких графов и подробно изложена в [3].

Пусть $s_h = (Y_h, e_h)$ и $s_{ц} = (Y_{ц}, e_{ц})$ – внутренние формы состояний S_h и $S_{ц}$, и для них выделены базовые множества $I_h, I_{ц}$. Тогда состояния S_h и $S_{ц}$ являются сходными, если для элемента $\mu_f = \mu(e_u)/y_p^f$ из $I_{ц}$ найдется элемент $\mu_j = \mu(e_h)/y_r^j$ из I_h , такой что $u_{G_1} = u_{G_2}$ (или наоборот) и среди дуг e_h нет таких, которые бы отличались по типу (входящие, выходящие) от дуг из $e_{ц}$.

Выделим в s_h и $s_{ц}$ подграфы $s_{h,1} = (Y_{h,1}, e_{h,1})$, $Y_{h,1} \subset Y_h$, и $s_{ц,1} = (Y_{ц,1}, e_{ц,1})$, $Y_{ц,1} \subset Y_{ц}$, и установим соответствие Ψ между вершинами $Y_{h,1}$ и $Y_{ц,1}$ относительно инцидентных им дуг $e_{h,1} = e_{ц,1}$ с учетом ориентации. Легко видеть, что $Y_{h,1}$ и $Y_{ц,1}$ образованы вершинами базовых множеств и их окрестностями. Аналогией между графами s_h и $s_{ц}$, сходными относительно своих базовых множеств, называется граф конъюнкции $A = (Y, e)$, где $e = e_{h,1} = e_{ц,1}$, а любая вершина $y \in Y$ образована парой вершин $y_i \in Y_{h,1}$, $y_j \in Y_{ц,1}$, между которыми определено соответствие Ψ . Таким образом, аналогия строится на основе операции обобще-

ния вершин базовых множеств и их окрестностей, а соответствие Ψ определяет изоморфное вложение графа s_{Π} в граф s_h (или наоборот).

В том случае, когда значение $\mu_e(y_i, y_j)$ характеризует степень доверия к высказыванию y_j при наличии факта y_i , для отражения фактического сходства степеней доверия изоморфных отношений $e_{h,1}$ и $e_{\Pi,1}$ (вычисления степени аналогии графов s_h и s_{Π}) применяется формула [2]:

$$\alpha_A(s_h, s_{\Pi}) = 1 - \sum_{k=1}^t \left(\left| \mu_{e_{h,k}}(y_i, y_j) - \mu_{e_{\Pi,k}}(y_p, y_l) \right| \right),$$

где $y_i, y_j \in Y_{h,1}$, $e_{h,k} \in e$, $k \in T = \{1, \dots, t\}$, а t – число изоморфных отношений, для всех $\left| \mu_{e_{h,k}}(y_i, y_j) - \mu_{e_{\Pi,k}}(y_p, y_l) \right| \neq 0$.

Формула показывает, на какую среднюю относительную величину отличаются степени доверия к отношениям $e_{h,1}$ и $e_{\Pi,1}$. Будем считать, что между графами s_h и s_{Π} существует аналогия, если $\alpha_A(s_h, s_{\Pi}) \in [0,6; 1]$.

4. Анализ нечеткой ситуационной сети

Основной задачей анализа НСС является построение возможных путей перехода из начального состояния в целевое состояние. При значительном числе состояний НСС желательно иметь автоматическую процедуру подобного анализа. Опишем НСС системой продукций $W = \{W_1, \dots, W_k, \dots, W_m\}$, где k -я продукция представляет собой выражение вида

$$W_k: S_i \Rightarrow S_j,$$

где $S_i, S_j \in S = \{S_1, \dots, S_p\}$ – нечеткие формулы; $\langle \Rightarrow \rangle$ – знак секвенции, в логическом смысле истолковываемый как знак логического следования S_j из истинного S_i [6]. При таком представлении НСС возможна организация логического вывода, позволяющего на основе исходных данных делать заключения относительно возможности перевода системы из одного состояния в другое. Иными словами, задача определения пути перехода из S_i в S_j сводится к задаче доказательства теоремы $S_i, \Gamma \Rightarrow S_j$ в исчислении секвенций, где S_i в S_j – предикаты, определяющие

начальное и целевое состояния; Γ – база знаний НСС, состоящая из нечетких формул, связывающих между собой состояния и управляющие воздействия. При доказательстве используются стандартные правила преобразования секвенций для бескванторных формул вида [6]. Логический вывод в нечетком исчислении секвенций основан на построении дерева, получаемого посредством последовательного применения таких правил. Для организации процедуры построения дерева вывода необходимо вначале построить исходную секвенцию. Исходная секвенция, как правило, имеет вид: $S_n, \Gamma \Rightarrow G, S_c$, где S_n – предикат, определяющий начальное состояние; Γ – база знаний в виде набора нечетких формул; S_c – предикат, определяющий целевое состояние НСС. Нечеткость формул базы знаний может определяться как нечеткостью предикатов, описывающих начальные состояния, так и нечеткостью предикатов, используемых для определения управляющих воздействий. В первом случае нечеткость может быть выражена оценкой нечеткого равенства между начальной ситуацией и той ситуацией, которая использовалась в качестве исходной ситуации при построении НСС. Второй случай связан с оценкой использования управляющего воздействия в конкретной ситуации. Отличие доказательства от стандартной процедуры заключается в изменении условий анализа аксиом при закрытии ветвей дерева вывода. При различных истинностях формул A_F и A_T некоторой конечной секвенции $A_F, \Gamma \Rightarrow G, A_T$ аксиома считается выполненной по A , но с ограничением истинности, равной минимуму истинностей A_F и A_T . Если все ветви дерева окажутся закрытыми, то доказательство перехода в целевое состояние является успешным при тех значениях истинности формул, по которым осуществлялось закрытие ветвей дерева нечеткого вывода.

В общем случае стратегия доказательства заключается в следующем. Бескванторную формулу, не содержащую операторов, назовем атомом, т.е. атом является нечетким предикатом или нечетким высказыванием (фактом). С каждым логическим оператором связано соответствующее правило преобразования. Исходная задача формулируется как теорема: доказать существование нечет-

кой формулы S при известных данных Q , где Q – множество нечетких атомов. Будем считать, что множество Q добавляется в базу знаний, а S попадает в рабочую область и сравнивается с заключениями нечетких продукций базы знаний. Таким образом, база знаний рассматривается как антицедент секвенции, а рабочая область – как сукцедент секвенции. Если в базе знаний не найдется заключения, совпадающего с S , то вывод считается неуспешным. В противном случае в базе знаний отыскиваются все продукции, правые части которых совпадают с S . Среди этих продукций выделяются такие, левые части которых содержат предикаты $q \subseteq Q$. Если таких продукций нет, то дальнейший анализ начинается с любой из выделенных продукций. Анализ заключается в декомпозиции продукции, в соответствии с правилом преобразования импликации. В результате декомпозиции формируются две секвенции, одна из которых закрывается по S , в соответствии с аксиомой исчисления, а вторая содержит антицедент в виде базы знаний и сукцедент, дополненный левой частью рассматриваемой продукции. Если эта секвенция является аксиомой, то вывод успешно завершен. Если секвенция не является аксиомой, а левая часть продукции представляет собой атом, не являющийся заключением никакой продукции из базы знаний, то выбор исходной продукции, правая часть которой совпала с S , считается неудачным, а созданная ветвь дерева решений – тупиковой. В этом случае выбирается другая продукция, левая часть которой совпадает с S . Если таких продукций не обнаружено, то вывод считается неуспешным. В противном случае левая часть продукции является формулой, к которой в зависимости от вида логического оператора применяется соответствующее правило преобразования, а дальнейший анализ осуществляется описанным выше способом.

Если левая часть продукции является атомом, то в базе знаний выделяется продукция, заключение которой совпадает с атомом. К этой продукции также применяется правило преобразования импликации. В результате опять получаем две секвенции, одна из которых закрывается по заключению продукции, а вторая анализируется в соответствии с вышеизложенной процедурой.

Рассмотренная стратегия доказательства теоремы определяет, по аналогии с анализом продукционной базы знаний, обратную цепочку логического вывода от цели к исходным данным. Таким же образом может быть сформулирована прямая стратегия вывода. В этом случае анализ начинается с выделения продукций в базе знаний, левые части которых совпадают с $q \subseteq Q$.

5. Заключение

Ситуационное моделирование с использованием НСС позволяет осуществить описание неопределенных бизнес-процессов и проектов, что характерно для многих реальных ситуаций. Методы построения НСС по сути являются процедурным подходом к моделированию и направлены на исследование разнообразные стратегий построения проектов с учетом их возможностных характеристик. На практике из-за того, что при построении моделей процессов и проектов изначально невозможно учесть все ограничения, очень часто приходится сталкиваться с необходимостью решении задач динамического моделирования в условиях неопределенности. В этих условиях для отражения изменяющейся и адаптируемой к внешней среде сущности организационной системы схемы бизнес-процессов должны постоянно актуализироваться в соответствии с изменениями, происходящими в процессе управления. Одним из инструментов является создание «сценариев» процессов или проектов на основе ситуационного моделирования и анализа полученных моделей.

Литература

1. АСТАНИН С.В., ЗАХАРЕВИЧ В.Г. *Обработка и представление знаний в информационно-советующих комплексах систем гибридного интеллекта*. – Таганрог: ТРТУ, 1997. – 136 с.
2. АСТАНИН С.В. *Правдоподобные рассуждения в системах принятия решений*. Ч.2. – Таганрог: ТРТУ, 2000. – 110 с.

3. БЕРШТЕЙН Л.С., БОЖЕНЮК А.В. Нечеткая раскраска и оценка степени изоморфизма нечетких графов // Известия академии наук. Теория и системы управления. – 2002. – №3. – С. 116–122.
4. БУРКОВ В.Н., ЗАЛОЖНЕВ А.Ю., НОВИКОВ Д.А. *Теория графов в управлении организационными системами.* – М.: Синтег, 2001. – 124 с.
5. МЕЛИХОВ А.Н., БЕРШТЕЙН Л.С., КОРОВИН С.Я. *Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой.* – М.: Наука, 1990. – 272 с.
6. ТАКЕУТИ Г. *Теория доказательств.* – М.: Мир, 1978. – 412 с.
7. ХАММЕР М., ЧАМПИ Д. *Реинжиниринг корпорации. Манифест революции в бизнесе.* – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2011. – 288 с.
8. BASU A., BLANNING R. *Metagraphs and Their Applications.* – New York: Springer, 2007. – 173 p.

USING FUZZY GRAPH MODELS FOR BUSINESS-PROCESS CONTROL

Sergey Astanin, State Pedagogical Institute, Taganrog, Doctor of Science, professor (astser@mail.ru).

Natalia Zhukovskaja, Russian New University, Taganrog, Ph.D (nasha-0207@yandex.ru).

Abstract: An approach is considered to model business processes and projects under uncertainty. We suggest the procedures for fuzzy situational network construction, which models possible strategies of business process (or project) implementation. Our approach also includes the procedures for the analysis of a strategy.

Keywords: situational modeling, fuzzy situational networks, fuzzy analogy, the analysis of a strategy.

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии А. К. Погодаевым