

УДК 004.942

Сагайда П. И.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И ПРОГРАММНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКИХ КОГНИТИВНЫХ КАРТ

Оптимизация деятельности предприятия (организации) как сложной организационно-технической системы или функционирования сложного объекта проектирования (изделия или технологического процесса) требует наличия адекватной модели. Однако для систем, в составе которых в качестве элементов входят объекты биологической, социальной, экономической природы, детерминированные модели, т. е. модели в виде систем уравнений или неравенств, построить практически невозможно. Да и для сложных технических систем, природа явлений в которых слабо изучена и которые не могут быть подвергнуты из-за больших возможных затрат полнофакторному эксперименту, также отсутствуют детерминированные, а иногда и вероятностные, модели.

В настоящее время возрастает роль имитационного моделирования сложных предметных областей (ПрО) и процессов, протекающих в экономических и социальных сферах и связанных с проектированием, производством и реализацией изделий и услуг. Востребованность такого вида моделирования обусловлена невозможностью учета множества материальных и информационных потоков, сложным взаимодействием таких потоков и отсутствием известных математических зависимостей между параметрами функционирования [1]. Доступными для исследования или анализа зачастую являются только модели знаний высокого уровня абстрагирования, которые можно представить в виде онтологий. Такие онтологии включают в себя множество понятий (концептов) и отношений (связей) между ними, и могут быть представлены в виде направленного графа с именованными вершинами и ребрами [2].

Известно, что онтологии как средство представления знаний о ПрО, строятся экспертным путем, процесс их построения недостаточно формализован, а результаты построения используются в основном как глоссарий (тезаурус) с возможностью различных операций над графом онтологии в ходе межонтологических преобразований [3].

Вместе с тем, для имитационного моделирования сложных процессов в организационно-технических системах и в обществе применяется метод, получивший название метода нечетких когнитивных карт (НКК) [4]. НКК – это семантическая сеть, в которой концепты ПрО связаны единственным видом связей (отношений): «Влияние на ресурс (степень) реализации концепта». После нагружения установленных в ходе построения НКК связей весовыми коэффициентами, а концептов – правилами преобразования стимулов, поступающих в них в результате реализации связей, НКК используется для моделирования процессов генерации ресурсов в концептах с использованием математического аппарата теории импульсных систем [5].

В сложившейся практике моделирования для каждой отдельно взятой задачи анализа (прогноза) строится новая НКК, произвольным образом, с внесением субъективной (возможно, искаженной) точки зрения эксперта на семантическое пространство ПрО. Требуется разработка и реализация более объективного подхода к построению и использованию НКК в ходе имитационного моделирования.

Целью работы является разработка информационной технологии построения НКК на основе базовой онтологии ПрО и последующего моделирования сложных объектов проектирования с использованием НКК.

На рис. 1 в нотации диаграммы классов нотации UML (Unified Modeling Language) [6] приведена классификация объектов и процессов ПрО «Онтологии и аспекты их разработки», которая позволяет представить виды разрабатываемых онтологий с точки зрения аспектов формализации знаний в них. Концепты разработанной классификации, участвующие в процессе моделирования работы ПрО с использованием НКК, выделены на рисунке более жирно.

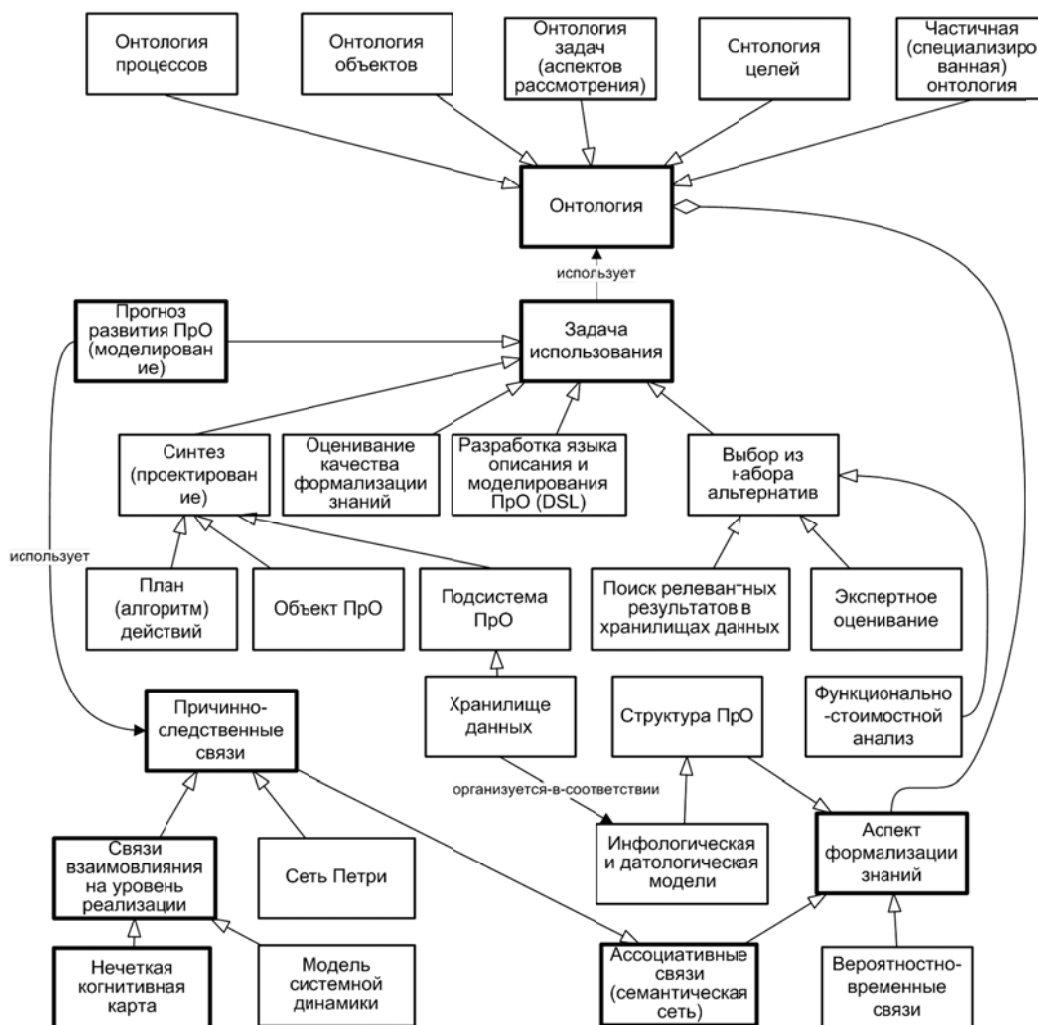


Рис. 1. Классификация объектов и процессов ПрО «Онтологии и аспекты их разработки» с выделенными концептами, участвующими в процессе моделирования работы ПрО с использованием НКК

В соответствии с таким вариантом представления, онтология, включающая ассоциативные связи между концептами ПрО, с точки зрения формализации знаний о ней, является семантической сетью. Если в семантической сети организован учет только причинно-следственных связей между концептами, представляющими предметно-ориентированные явления и процессы, то такую сеть можно использовать для моделирования развития ПрО. Такая специализированная онтология, включающая связи взаимовлияния и влияния на уровень реализации концептов, нагруженные оценками значений такого влияния, представляют собой НКК. В соответствии с изложенными соображениями, каждая онтология должна разрабатываться с учетом аспекта формализации знаний и задач ее будущего использования.

По результатам проведенных исследований предлагается следующая модель реализации этапов информационной технологии разработки и применения НКК. Обозначим

множество концептов, вводимых на этапе разработки онтологии ПрО, как $C = \{c_j\}$, $j = \overline{1, N}$. Отношения (связи) между концептами представим в виде множества $R = \{r_k\}$, $k = \overline{1, M}$, где $r_k = r_{nm} = \langle c_n, c_m \rangle$ – упорядоченная пара вступающих в отношение концептов, $n = \overline{1, N}$, $m = \overline{1, M}$. Соответственно вся онтология представлена двойкой $Ont = \langle C, R \rangle$ (задача интерпретации онтологии в данной модели не учитывается).

Известно [7], что все множество отношений в онтологии, как результата формализации знаний о перечне и поведении сущностей, явлений и процессов в ПС, можно классифицировать на три группы: таксономические (род – вид, синонимия и т. п.), композиционные (целое – часть, сущность – атрибут и т. п.) и проблемно-специфические («является источником», «участвует (обеспечивает)», «является средой реализации» и т. п.). Обозначим эти группы связей как R^{tax} , R^{comp} и R^{spec} соответственно, тогда $R = R^{tax} \cup R^{comp} \cup R^{spec}$.

Выполним над построенной онтологией преобразование $OM : Ont \rightarrow Ont^{FCM}$ так, как это показано на рис. 2, в ходе которого получим редуцированную онтологию следующим образом:

$$Ont^{FCM} = \langle C^{FCM}, R^{FCM} \rangle, \tag{1}$$

$$\text{где } C^{FCM} = \{ \forall c_i \forall c_p \mid \exists r_k = \langle c_i, c_p \rangle \in R^{spec} \vee \exists r_k = \langle c_p, c_i \rangle \in R^{spec}, i \in \overline{1, N}, p \in \overline{1, N} \};$$

$$R^{FCM} = \{ \forall r_k \mid r_k \in R^{spec}, k \in M^{spec}, M^{spec} \subseteq \{1, \dots, M\} \}.$$

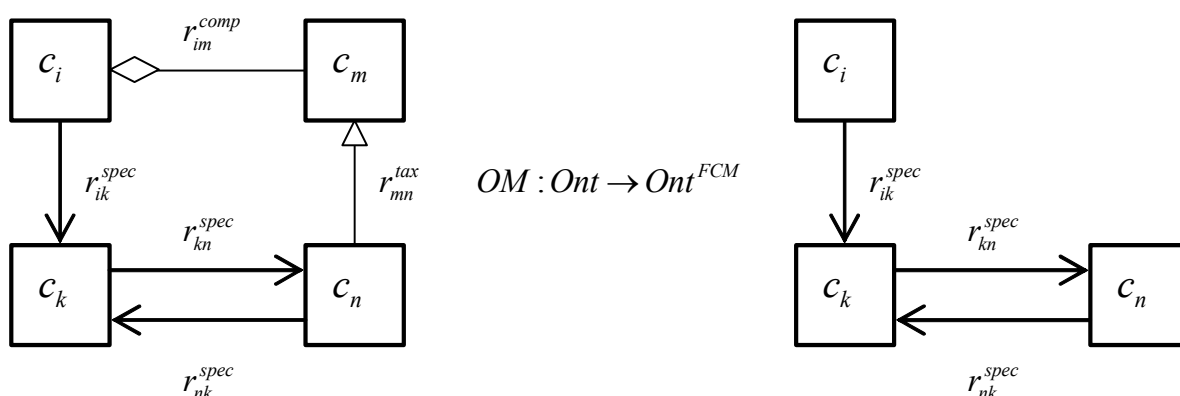


Рис. 2. Схема преобразования базовой онтологии при построении шаблона НКК

В ходе этого отображения все виды проблемно-специфических связей обобщаются единым синонимом «влияет на уровень (степень) реализации ресурса». В качестве концептов специализированной онтологии остаются только концепты, участвующие в этих связях и представляющие процессы или явления в ПрО.

Следующим этапом предлагаемой информационной технологии является нагружение связей, полученных в ходе отображения, весовыми коэффициентами взаимовлияния ресурсов участвующих в связи концептов и, возможно, трансформационными функциями для этих коэффициентов:

$$L_w : R^{FCM} \rightarrow R^{FCM|w}, \tag{2}$$

$$\text{где } R^{FCM|w} = \{ r_k^{FCM|w} \}, r_k^{FCM|w} = \langle c_i, c_p, w_k, f_k(w_k) \rangle;$$

$f_k(w_k)$ – трансформационная функция для коэффициента w_k .

Процедура реализации экспертного оценивания и получения оценок весовых коэффициентов может быть представлена в виде нахождения нечеткого интеграла по нечеткой мере G предпочтений экспертов [8]:

$$w_{eval} = \int h \circ G = \sup_{\alpha \in [0,1]} \min\{\alpha, G(F_\alpha(w))\}, \quad (3)$$

где $F_\alpha(w) = \{F_i | h(F_i, w) \geq \alpha\}$ – множество критериев сравнения, степень влияния которых на оценку варианта $w \in W$ превышает порог α ;

$h : F \times W \rightarrow [0,1]$ – оценочная функция.

Для сложных ПрО концепты, вошедшие в полученную онтологию, необходимо также нагрузить правилами композиции трансформационных функций влияния на каждый из концептов, следующим образом:

$$L_o : C^{FCM} \rightarrow C^{FCM|o}, \quad (4)$$

где $C^{FCM|o} = \{c_i^{FCM|o}\}$;

$$c_i^{FCM|o} = \left\langle c_i, \underset{j=1}{\overset{s}{o}} f_j(w_j) \right\rangle,$$

где s – количество связей, влияющих на данный концепт;

o – знак операции композиции.

На этом преобразование онтологии в шаблон для построения НКК (Fuzzy Cognitive Map – FCM) завершено. Следующим этапом предложенной ИТ является подготовка реализации НКК к имитационному моделированию для решения задачи анализа (прогноза) функционирования ПрО. Для этого задают исходный уровень реализации ресурсов в концептах НКК для конкретной задачи моделирования. Эта операция может быть представлена в виде:

$$L_x : C^{FCM|o} \rightarrow C^{FCM|o|x}, \quad (5)$$

где $C^{FCM|o|x} = \{c_i^{FCM|o|x}\}$, $c_i^{FCM|o|x} = \left\langle c_i, \underset{j=1}{\overset{s}{o}} f_j(w_j), x_i \right\rangle$;

x_i – уровень реализации ресурса.

Выполняемое в дальнейшем моделирование является итерационной процедурой, в ходе которой вычисляются новые значения ресурсов в концептах, в зависимости от параметров построенной НКК:

$$M : C^{FCM|o|x} \rightarrow C^{FCM|o|x}. \quad (6)$$

В общем виде один шаг такой процедуры можно представить, исходя из следующих соображений. Матрица смежности НКК представляет собой нечеткое отношение \tilde{R} четкого множества концептов НКК с самим собой. Множество значений текущих уровней ресурсов X в элементах этого множества C^{FCM} является нечетким множеством $\tilde{X}(t) = \langle X / C^{FCM} \rangle$

на этапе t . Тогда нечеткое множество $\tilde{X}(t+1)$ на следующем этапе моделирования по композиционному правилу нечеткого вывода с использованием, например, максиминной композиции, будет равно:

$$\tilde{X}(t+1) = \tilde{X}(t) \circ \tilde{R}. \quad (7)$$

Сложившейся практикой моделирования с использованием НКК является применение аппарата теории импульсных систем. Для упрощенного режима моделирования, когда $f(w) = aw$, $a = 1$, и композиционное правило для композиции взаимовлияний ресурсов концептов определяет операцию их сложения, матричное уравнение для нахождения значений ресурсов по результатам всех итераций может быть представлено в следующем виде [5]:

$$x(t) = x(0)^T (I_N + A + A^2 + \dots + A^k + \dots + A^t), \quad (8)$$

где $x(t)$ – вектор-столбец значений факторов модели на t -м шаге моделирования;

A – матрица взаимовлияния факторов (матрица смежности для НКК) размера $n \times n$;

I_N – единичная матрица размера $n \times n$, где n – количество концептов в НКК;

$x(0)$ – вектор значений начальных ресурсов концептов (уровней производительности генераторов материальных и информационных потоков, степеней реализации функций, интенсивности протекания процессов и явлений и т. п.) размером $1 \times n$.

Дополнительными режимами моделирования являются моделирование управляемого развития, когда в ряд концептов вносятся управляющие воздействия (начальные приращения ресурсов), а также решение обратной задачи – нахождение требуемых приращений ресурсов у управляемых концептов для достижения желаемого их уровня в ряде концептов области интереса НКК [9].

Моделирование управляемого развития производится с использованием следующего уравнения в матричном виде [10]:

$$x(t) = (I_N + A + A^2 + \dots + A^t) x(0)^T + (I_N + A + A^2 + \dots + A^{t-1}) B(u(0))^T, \quad (9)$$

где B – матрица размером $n \times m$, определяющая управляющие факторы в НКК;

$u(0)$ – вектор первоначальных управляющих воздействий.

Нечеткость в НКК обусловлена неопределенностью целей и ограничений функционирования моделируемых систем. Однако нечеткость в НКК также может быть использована в трансформационных функциях для весовых коэффициентов связей или в правилах преобразования стимулов в собственный ресурс концептов. В качестве причин, требующих такого использования, выступает необходимость учета неопределенностей, вносимых экспертами при построении НКК, и обработки такой неопределенности с помощью аппарата теории нечетких множеств.

Рассматривая конкретную Про (например, работу отдела кадров), можно сформулировать концепты различных страт (слоев) общей онтологии Про, расположить их соответствующим образом и определить отношения, в которые они вступают. Для рассматриваемого примера, в соответствии с предложенной методикой, сначала рассматривают концепты онтологии целей моделирования работы отдела кадров с использованием НКК. Определим следующие соподчиненные цели моделирования: «Снижение издержек производства» и «Повышение производительности труда». Первая из целей является более глобальной задачей, а вторая является ее частью и только она доступна на принятом уровне рассмотрения процесса функционирования предприятия.

Далее формируем задачу, решаемую в рамках достигаемых целей, которая находится в компетенции отдела кадров: «Задача анализа и прогнозирования развития персонала». Решение такой задачи должно обеспечивать достижение поставленных целей, и на этапе анализа инженерам по знаниям доступны лишь данные о процессе осуществления профессиональной деятельности работниками предприятия. Этот процесс осуществляется в рамках занятия определенных должностей и выполнения должностных обязанностей, ими определяемых.

Таким образом, в ходе онтологического моделирования определяются концепты онтологий объектов Про и онтологии процессов, при этом объекты участвуют в реализации процессов и не связаны с концептами более высокоуровневой страты – онтологии задач. Конкретные факты и прецеденты, отображаемые в онтологии ее интенциональной частью (экземплярами концептов и связей) не могут напрямую быть использованы для решения задач моделирования и прогнозирования развития.

Для моделирования с помощью НКК необходимо выделить концепты, которые являются составными частями онтологии свойств Про и представляют собой агрегированные сущности, описывающие ресурсы Про в общем виде. В данном случае в онтологическую

модель введены сущности, представляющие «Профессиональный уровень персонала», «Производительность труда», «Уровень травматизма и заболеваемости», «Уровень заработной платы», «Перспектива служебного роста». Все они характеризуют процесс «Профессиональная деятельность» персонала. Разработанная таким образом онтология представлена на рис. 3. На нем не приведены связи между концептами онтологии свойств, в том числе определяющие влияние этих концептов на уровень реализации друг друга.

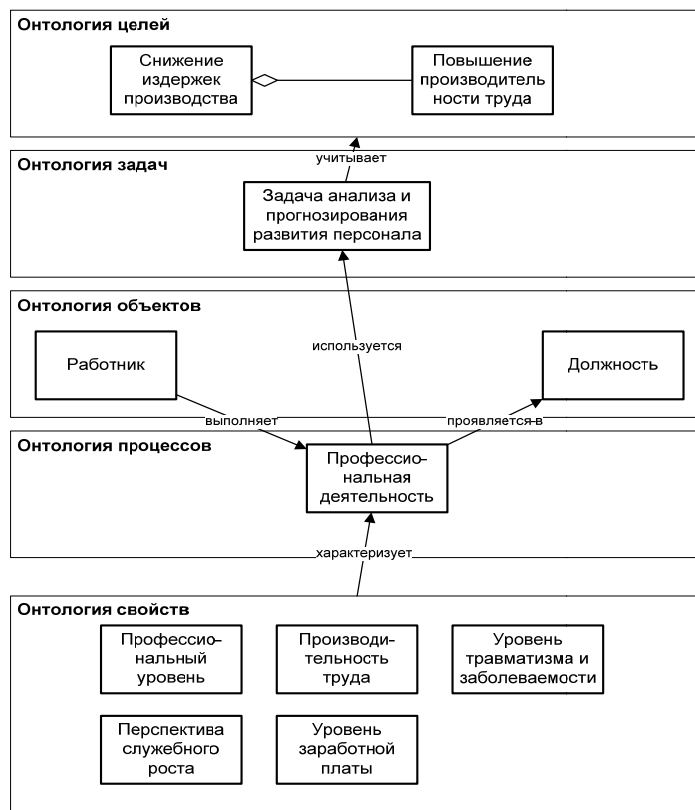


Рис. 3. Онтология ПрО «Работа отдела кадров», разработанная для отображения в НКК с применением предложенного выше подхода

Полученная из этой онтологии после описанных в формулах (1–5) преобразований НКК может быть использована для решения поставленной задачи моделирования. На рис. 4 приведена соответствующая НКК для моделирования развития персонала.



Рис. 4. НКК для моделирования развития персонала (показаны только знаки взаимовлияний концептов)

На основании полученных результатов теоретических исследований был разработан и реализован программно-методический комплекс (ПМК), позволяющий экспертам формализовать свои знания о функционировании сложных объектов проектирования в виде специализированных онтологий – НКК. Рассмотрим процесс информационного и логического проектирования ПМК путем построения набора диаграмм с использованием диаграммных методик UML [6].

Проектируемый ПМК должен дать возможность эксперту ввести основные концепты ПрО, указать величину их начального развития и тип, задать связи между концептами с указанием величины воздействия, получить сформированную НКК и на основании неё выполнить имитационное моделирование сложной ПрО, получить результаты моделирования в наглядной форме. Чтобы выполнять эти операции, эксперт должен иметь возможность составить список основных концептов ПрО и указать связи между ними. При вводе основных концептов ПрО, эксперт должен указать начальный уровень развития концепта, имя концепта, псевдоним концепта и указать тип концепта. Для создания новой связи концептов, ПМК должен предоставить эксперту возможность выбрать концепт-причину, концепт-следствие, а также указать величину и характер влияния. После ввода концептов, указания их величин начального развития, ввода связей концептов и указания их величин, ПМК должен предоставить эксперту возможность построить и визуализировать нечеткую когнитивную карту. Чтобы выполнить имитационное моделирование, необходимо решить задачу моделирования. Для ее решения эксперт должен задать количество периодов для моделирования, тип решаемой задачи (задача саморазвития, прямая задача или обратная задача). ПМК должен предоставить эксперту результаты моделирования в удобочитаемой наглядной форме.

Для реализации предложенных прецедентов использования был выбран язык программирования Java и разработана диаграмма классов программного комплекса с соответствующими функциональными возможностями, приведенная на рис. 5. Главное окно программы (MainWindow), которое наследуется от базового класса JFrame [11], библиотеки визуальных компонентов Swing, реализует основные функции пользовательского интерфейса. Хранением и операциями с концептами и связями занимается класс ConceptManagement, который позволяет получить концепты или связи концептов в виде коллекции или по индексу, а также занимается оповещением визуальных компонентов главного окна о произошедших изменениях с коллекциями, чтобы они могли вовремя обновить свои представления. Классы ConceptsConnectionsModel и ConceptModel являются наследниками класса TableModel и предназначены для предоставления модели данных визуальным компонентам главного окна программы (спискам). Эти классы используют класс ConceptManagement в своей работе для считывания списка концептов и связей.

Классы AddConceptDialog и AddConceptsConnectionDialog являются наследниками базового класса JDialog и представляют собой диалоговые окна, которые предъявляются пользователю для ввода данных о редактируемом концепте или связи между концептами. Класс Concept является представлением концепта НКК. Этот класс содержит поля-параметры концепта (имя, уровень начального развития, тип и т. д., а также методы для доступа к этим полям). Класс ConceptsConnection представляет собой связь концептов НКК. Он хранит в себе ссылки на концепты, которые связывает, а также величину и характер связи. Класс MatrixUtils предназначен для формирования матриц и векторов, а также для проведения над ними необходимых алгебраических вычислений (сложение, умножение, возведение в степень и т. п.). Матрицы и вектора формируются на основании данных о концептах ПрО и связях между ними, по ранее описанному алгоритму. Интерфейс Task используется для решения задач моделирования в своих реализациях – классах DirectTask (прямая задача), InverseTask (обратная задача), SelfdevelopmentTask (задача саморазвития). Класс ResultsWindow служит для предоставления пользователю ПМК (эксперту) результатов моделирования в наглядной форме (в виде графика и списка значений выбранных концептов).

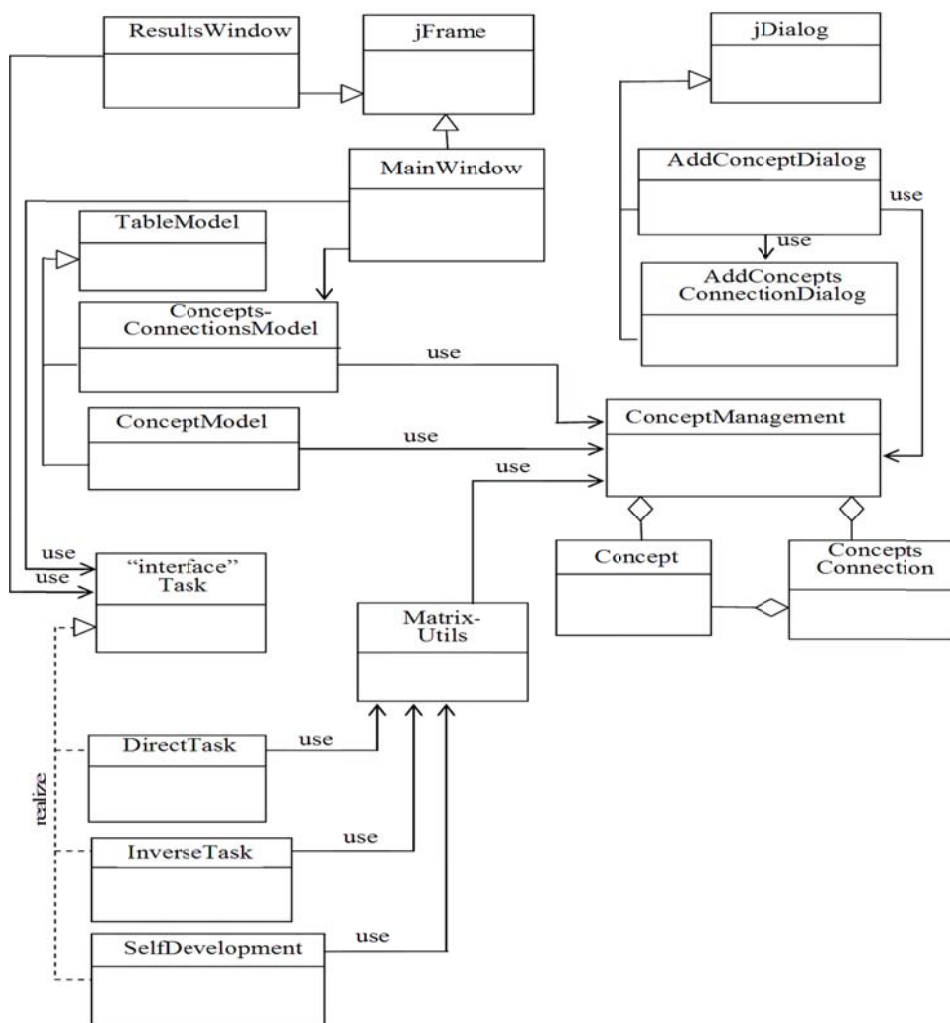


Рис. 5. Диаграмма классов ПМК для имитационного моделирования с помощью НКК

Результаты работы ПМК «Имитационное моделирование с помощью НКК» в виде фрагментов диалоговых окон с построенной НКК и визуализацией результатов расчетов и моделирования приведены на рис. 6.

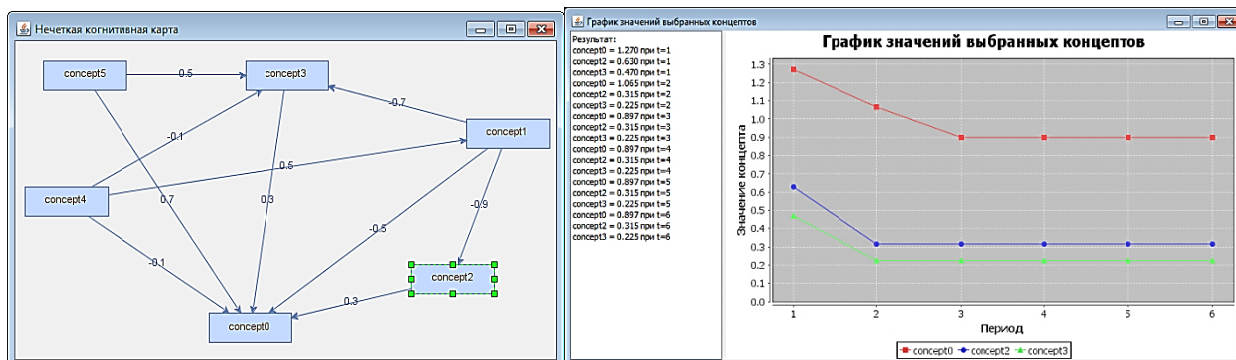


Рис. 6. Построенная нечеткая когнитивная карта и результат визуализации результатов расчета в ПМК «Имитационное моделирование с помощью НКК»

ВЫВОДЫ

Предложена информационная технология и ее формализованная модель, позволяющая выполнить генерацию нечеткой когнитивной карты для произвольной задачи прогноза работы сложных объектов проектирования на основе редуцированной базовой онтологии ПрО. При этом выделяются связи типа «Влияние на степень реализации концепта» и концепты, в них участвующие. Выделенные элементы онтологии нагружаются весовыми коэффициентами и трансформационными функциями связей, композиционными правилами концептов, в результате чего получают шаблон НКК. Такой шаблон согласует субъективные представления аналитика с базовой онтологией ПрО и позволяет использовать в ходе имитационного моделирования адекватную модель ПрО в виде НКК и получить релевантные результаты моделирования.

На основании предложенного онтологического подхода, сформулированной информационной технологии и рассмотренного алгоритмического обеспечения спроектирован и реализован ПМК, предоставляющий возможность экспертам формализовать свои знания о сложных объектах проектирования и выполнить имитационное моделирование их функционирования на основе нечетких когнитивных карт.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыжиков Ю. И. Имитационное моделирование. Теория и технология. / Ю. И. Рыжиков. – СПб. : КОРОНА принт, 2004. – 246 с.
2. Палагин А. В. Методика проектирования онтологии предметной области / А. В. Палагин, Н. Г. Петренко, К. С. Малахов // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. – 2011. – № 10. – С. 5–12.
3. Тарасов А. Ф. Применение онтологий для повышения интеллектуальности информационных систем / А. Ф. Тарасов, П. И. Сагайда // Комп'ютерні науки: освіта, наука, практика: матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв : Видавництво НУК, 2012. – С. 205–208.
4. Силов В. Б. Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке / В. Б. Силов. – М. : ИНПРО-РЕС, 1995. – 228 с.
5. Робертс Ф. С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам / Ф. С. Робертс. – М. : Наука, 1986. – 496 с.
6. Фаулер М. UML. Основы, 3-е издание / М. Фаулер. – Пер. с англ. – СПб : Символ Плюс, 2004. – 192 с.
7. Шалфеева Е. А. Классификация структурных свойств онтологий / Е. А. Шалфеева // Штучний інтелект. – 2005. – № 3. – С. 67–77.
8. Бочарников В. П. Fuzzy-технология: Математические основы. Практика моделирования в экономике / В. П. Бочарников. – СПб. : Наука, 2001. – 328 с.
9. Сагайда П. И. Информационная технология имитационного моделирования сложных предметных областей с использованием их онтологий / П. И. Сагайда, Ю. П. Гютюнник // Інформаційні технології в наукових дослідженнях і навчальному процесі: матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції, т. 2. – Луганськ : Видавництво ЛНУ, 2011. – С. 22–25.
10. Нечволода Л. В. Совершенствование методики проведения функционально-стоимостного анализа технологического оборудования на основе применения нечетких когнитивных карт / Л. В. Нечволода, Е. Н. Крикуненко, П. И. Сагайда // Научный Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 1 (9Е). – С. 107–113.
11. Шилдт Г. Java. Полное руководство / Г. Шилдт. – М. : ООО «И. Д. Вильямс», 2012. – 1104 с.