

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, ПОИСК, АНАЛИЗ И ФИЛЬТРАЦИЯ ИНФОРМАЦИИ

Горохов А. В.

ФОРМАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ (НА ПРИМЕРЕ СИНТЕЗА СИСТЕМНО-ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ)

Аннотация. Предложен подход к формализации и представлению коллективных экспертных знаний в виде концептуальных моделей, основанный на функционально-целевой технологии. Реализация концептуальной модели в виде базы знаний обеспечивает возможность использования экспертных знаний автономно при решении задач синтеза структуры имитационной модели. Механизм генерации имитационных моделей заключается в последовательном применении формальных правил базы знаний к ее декларативным знаниям. База знаний содержит три группы процедур вывода. Первая группа состоит из процедур вывода, обеспечивающих выбор из всех декларативных знаний базы необходимых для решения конкретной задачи (синтеза конкретной имитационной модели); вторая группа содержит процедуры вывода, генерирующие состав и структуру имитационной модели; третья группа процедур вывода формирует информационные связи синтезируемой модели. Применение функционально-целевого подхода на этапе формализации экспертных знаний обеспечивает адекватность структуры синтезируемой имитационной модели задачам предметной области, что позволяет существенно повысить эффективность использования экспертных знаний при моделировании и исследовании сложных систем.

Ключевые слова: экспертные знания, концептуальная модель, база знаний, формальный синтез, правила вывода, алгоритм, структура, имитационная модель, системная динамика, сложная система.

Разработана технология формального синтеза имитационных моделей сложных систем. Технология обеспечивает интеграцию коллективных экспертных знаний и представление их в виде концептуальной модели. Предложены формальные правила синтеза состава и структуры имитационной (системно-динамической) модели на основе концептуальной модели. Такой подход повышает корректность синтезируемых имитационных моделей сложных систем и сокращает сроки их разработки.

Введение

Синтез моделей сложных систем представляет собой итерационный процесс взаимодействия “человек — модель”, в ходе которого развивается как модель, так и моделирующий субъект. К созданию моделей сложных систем привлекаются коллективы экспертов, поэтому актуальной является задача интеграции и согласования их знаний. Знания специалистов о предметной области, как правило, существуют в виде некоторого описательного, чаще всего ментального, представления о составе и отношениях между компонентами предметной области. Эти представления должны быть отображены на формаль-

ную структуру модели определенного типа. Успешная реализация этого этапа требует либо от специалиста-предметника достаточно высокого уровня знаний по используемым методам моделирования, либо от специалиста в области моделирования достаточно глубокого понимания природы и закономерностей исследуемой предметной области. Достаточно полное представление о системе может быть сформировано только на основе коллективных знаний экспертов в различных предметных областях. Каждый эксперт обладает собственной ментальной моделью системы, которую он формулирует в некотором поле основных понятий, присущих его предметной области — здесь причины терминологической несогласованности, а порой и понятийной противоречивости. Противоречивость представляемых знаний может быть обусловлена и наличием альтернативных взглядов на свойства системы у экспертов одной предметной области. Качественный характер многих параметров исследуемых систем предопределяет нечеткость знаний и, как следствие, проблемы при их формализации.

Поэтому актуальна задача создания методов и средств формализации знаний о сложных системах, закономерностях и динамике протекающих в таких системах процессов. При этом нужно обеспечить возможность автоматизированного перехода от формальной модели знаний к соответствующим имитационным моделям.

Концептуальное моделирование сложных систем

В силу ограниченности рационального мышления человека в масштабах сложных систем, знания экспертов удобно представлять в виде древовидных структур. Такие модели дают возможность оперировать небольшим количеством объектов и связей на каждом уровне иерархии сложной системы. Причем количество элементов (понятий) может быть всегда примерно одним и тем же, изменяя степень их агрегирования. Одним из таких подходов к созданию концептуальной модели (КМ) является функционально-целевой подход (ФЦП), развитый для класса задач с древовидными моделями предметной области [1]. Исходная посылка ФЦП — решение проблем через формирование системы целей. Цель достигнута, если решена соответствующая задача. Решение задач обеспечивается соответствующими функциями синтезируемой системы. ФЦП обеспечивает структурный синтез систем, функции которых (т.е. поведение системы) обеспечивают решение соответствующих задач. Методами ФЦП синтезируется КМ предметной области в виде многоуровневой древовидной системы целей.

Согласно теореме о покрытии [1,2], система в целом должна строиться из таких подсистем, которые обеспечивают покрытие соответствующих подзадач основной целевой задачи системы. Декомпозиция целей КМ производится экспертами. Для экспертов обязательными являются: ограничение на структуру создаваемого фрагмента КМ — он должен быть древовидным; единая идентификация компонентов нижнего уровня КМ и глубина декомпозиции.

Глубина декомпозиции определяется экспертами по достижению примитивных целей (примитивов), то есть неделимых в пределах моделируемой системы. Каждый эксперт для каждого j -го примитива КМ определяет набор покрывающих действий P_j^i . После этого для каждого примитива создается единый набор действий, который задается как объединение этих множеств:

$$P_j = \bigcup_i P_j^i, i = \overline{1, m} \quad j = \overline{1, n}$$

здесь m — количество экспертов, n — число примитивов концептуальной модели.

Далее, полученные альтернативные варианты декомпозиции фрагментов КМ исследуются на непротиворечивость [2]. Два альтернативных варианта декомпозиции фрагмента КМ считаются непротиворечивыми, если равны соответствующие им подмножества примитивов. При возникновении противоречий в экспертных вариантах, декомпозиция данных вариантов повторяется. Окончательным вариантом декомпозиции компонента КМ является объединение всех вариантов декомпозиции, где из каждого класса альтернативных вариантов выбран один представитель, предпочтительный с точки зрения принятых критериев качества.

Таким образом, получена единая КМ сложной системы, объединяющая формализованные знания группы экспертов в виде одной или нескольких древовидных структур, что обеспечивает в дальнейшем формальный синтез моделей системной динамики.

Синтез моделей системной динамики

Концептуальная модель реализуется в виде базы знаний, состоящей из декларативных и процедурных знаний [3].

К декларативным знаниям базы знаний относятся:

- набор примитивов концептуальной модели — элементов последнего уровня декомпозиции (A);
- набор действий (P);
- набор элементарных объектов системы динамического моделирования ($T=L \cup F \cup V \cup C$, где L — множество уровней, F- множество потоков, V — множество переменных, C — множество связей);
- справочники и кодификаторы, содержащие текстовые знания экспертов об исследуемой предметной области.

Набор примитивов концептуальной модели включает в себя цели концептуальной модели, неделимые в пределах решаемой задачи. К ним относятся примитивы, соответствующие подсистемам концептуальной модели.

Набор действий создается на этапе формализации знаний экспертов о системе. Под действиями подразумеваются процессы, которые могут происходить с примитивами.

Справочники. Каждое действие характеризуется некоторой скоростью, которая зависит от соответствующих параметров. Скорость потока может зависеть от примитивов концептуальной модели, от других действий или от дополнительных переменных. Набор этих дополнительных переменных (Vk) создается на этапе формализации знаний экспертов о предметной области в виде концептуальной модели. Также в справочниках содержатся множества S_p — множество, определяющее зависимость примитива от действия и S_w - множество, определяющее функциональную зависимость для действий.

Процедурные знания базы знаний

К процедурным знаниям базы знаний относятся процедуры вывода, которые представляют собой отображения структур концептуальной модели (декларативные знания) в структуры системно-динамических моделей.

База знаний содержит три группы процедур вывода.

1. Процедуры вывода, определяющие для каждого примитива концептуальной модели покрывающие действия.
2. Процедуры вывода, определяющие состав и структуру (материальные связи) системно-динамической модели.
3. Процедуры вывода, определяющие информационные связи системно-динамической модели.

1) Процедуры вывода w_1 и w_2 определяют для каждого примитива концептуальной модели покрывающие действия.

1.а) w_1 задается как отображение множества примитивов концептуальной модели A на множество упорядоченных пар “примитив-действие” $A \times P$.

$w_1: A \rightarrow A \times P, (1)$

причем $\forall a_i \in A \exists p_j \in P: \langle a_i, p_j \rangle \in A \times P, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, k_1}$, здесь n — число примитивов, k_1 — число “отрицательных” действий.

Схема отображения w_1 представлена в базе знаний в виде матрицы $Y_1 (k_1 \times n)$, строки которой соответствуют примитивам концептуальной модели, а столбцы — “отрицательным” действиям. Значения элементов данной матрицы определяются наличием отношений между соответствующими примитивами концептуальной модели и действиями.

$$y1_{ij} = \begin{cases} 1, \exists s_{pa} \in S_p : s_{pa} = s(a_i, p_j); \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

отсюда $\forall a_i \in A, \exists Ap^i = \{ \langle a_i, p_j \rangle \mid y1_{ij} = 1 \}, p_j \in P$.

1.b) $w2$ задается как отображение множества примитивов концептуальной модели A на множество упорядоченных пар “действие-примитив” $P \times A$.

$$w2: A \rightarrow P \times A, (2)$$

причем $\forall a_i \in A \exists p_j \in P: \langle p_j, a_i \rangle \in P \times A, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, k2}$, здесь n — число примитивов, $k2$ — число “положительных” действий.

Схема отображения $w2$ представлена в базе знаний в виде матрицы $Y2 (k2 \times n)$, строки которой соответствуют примитивам концептуальной модели, а столбцы — “положительным” действиям. Значения элементов данной матрицы определяются наличием отношений между соответствующими примитивами концептуальной модели и действиями.

$$y2_{ij} = \begin{cases} 1, \exists s_{pa} \in S_p : s_{pa} = s(a_i, p_j); \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

отсюда $\forall a_i \in A, \exists Pa^i = \{ \langle p_j, a_i \rangle \mid y2_{ij} = 1 \}, p_j \in P$.

2) Процедуры вывода, определяющие состав и структуру системно-динамической модели. В данном случае составом модели является набор уровней, а структура определяется потоками, связанными с этими уровнями.

2.a) Процедура вывода $\psi1$, определяющий для каждого примитива элементарный объект системы динамического моделирования, задается как отображение множества примитивов A на множество уровней L , которое является подмножеством множества элементарных объектов системы динамического моделирования T .

$$\psi1: A \rightarrow L, L \subset T, (3)$$

причем $\forall a_i \in A, \psi1: a_i \rightarrow l_i, l_i \in L, i = \overline{1, n}$.

2.b) Процедура вывода $\psi2$, определяющий для каждого элемента множества пар вида “примитив-действие” или “действие-примитив”, которое получено в результате применения процедур первой группы, элементарный объект системы динамического моделирования, задается как отображение множества $W = (\cup Ap^i) \cup (\cup Pa^i)$ на множество потоков F , которое является подмножеством множества элементарных объектов системы динамического моделирования T .

$$\psi2: W \rightarrow F, F \subset T, (4)$$

причем $\forall w_j \in W, \psi2: w_j \rightarrow f_j, f_j \in F, j = \overline{1, m}$, здесь m — число элементов множества W ;

$$f_j = \begin{cases} f_j^+(l_i), \exists pa_j^i = \langle p_j, a_i \rangle; \\ f_j^-(l_i), \exists ap_j^i = \langle a_i, p_j \rangle; \\ f_j(l_i, l_k), (\exists ap_j^i = \langle a_i, p_j \rangle) \& (\exists pa_j^k = \langle p_j, a_k \rangle). \end{cases}$$

здесь $f_j^+(l_i)$ — входящий поток в уровень l_i , $f_j^-(l_i)$ — выходящий поток из уровня l_i , $f_j(l_i, l_k)$ — поток из уровня l_i в уровень l_k , $l_i = \psi1(a_i)$.

2.c) Процедура вывода $\psi3$, определяющий для каждого элемента множества “переменные концептуальной модели” элементарный объект системы динамического моделирования, задается как

отображение множества V_k на множество переменных V , которое является подмножеством множества элементарных объектов системы динамического моделирования T .

$$\psi_3: V_k \rightarrow V, V \subset T, (5)$$

причем $\forall v_k \in V_k, \psi_3: v_k \rightarrow v_i, v_i \in V, i = \overline{1, s}$, здесь s — число элементов множества V_k .

3) Процедуры вывода, определяющие информационные связи системно-динамической модели.

3.a) Процедура вывода, определяющий связи потоков, зависящих от уровней, задается как отображения множества пар W , полученных в результате применения процедур первой группы, на множество связей C , которое является подмножеством множества элементарных объектов системы динамического моделирования T .

$$r1: W \rightarrow C, C \subset T, W = (\cup A p^i) \cup (\cup P a^i), (6)$$

причем $r1: w_i \rightarrow r(f_i, l_j), i = \overline{1, m}$.

Схема отображения $R1$ представлена в базе знаний в виде матрицы $R1 (n \times m)$, строки которой соответствуют элементам множества W , а столбцы — примитивам концептуальной модели. Значения элементов данной матрицы определяются наличием отношений между соответствующими примитивами концептуальной модели и кортежами.

$$r1_{ij} = \begin{cases} 1, & \exists s_{wa} \in S1_w : s_{wa} = s(w_i, a_j); \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

отсюда $\forall w_i \in W, \exists r1^i = \{r(f_i, l_j) \mid r1_{ij} = 1\}, f_i = \psi_2(w_i), l_j = \psi_1(a_j)$.

3.b) Процедура вывода, определяющий связи потоков, зависящих от других потоков, задается как отображения множества пар W , полученных в результате применения процедур первой группы, на множество связей C , которое является подмножеством множества элементарных объектов системы динамического моделирования T .

$$r2: W \rightarrow C, C \subset T, W = (\cup A p^i) \cup (\cup P a^i), (7)$$

причем $r2: w_i \rightarrow r(f_i, f_j), i = \overline{1, m}$.

Схема отображения $R2$ представлена в базе знаний в виде квадратной матрицы $R2 (m \times m)$, строки и столбцы которой соответствуют элементам множества W . Значения элементов данной матрицы определяются наличием отношений между соответствующими действиями концептуальной модели.

$$r2_{ij} = \begin{cases} 1, & \exists s_{ww} \in S2_w : s_{ww} = s(w_i, w_j); \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

отсюда $\forall w_i \in W, \exists r2^i = \{r(f_i, f_j) \mid r2_{ij} = 1\}, f_i = \psi_2(w_i)$.

3.c) Процедура вывода, определяющий связи потоков, зависящих от вспомогательных переменных, задается как отображения множества пар W , полученных в результате применения процедур первой группы, на множество связей C , которое является подмножеством множества элементарных объектов системы динамического моделирования T .

$$r3: W \rightarrow C, C \subset T, W = (\cup A p^i) \cup (\cup P a^i), (8)$$

причем $r3: w_i \rightarrow r(f_i, v_j), i = \overline{1, m}$.

Схема отображения $R3$ представлена в базе знаний в виде матрицы $R3 (s \times m)$, строки которой соответствуют элементам множества W , а столбцы — элементам множества V_k . Значения элементов данной матрицы определяются наличием отношений между элементами этих множеств.

$$r3_{ij} = \begin{cases} 1, & \exists s_{wv} \in S3_w : s_{wv} = s(w_i, v_k); \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Отсюда $\forall w_i \in W, \exists r3^i = \{r(f_i, v_j) \mid r3_{ij} = 1\}, f_i = \psi_2(w_i), v_j = \psi_3(vk_j), v_j \in V \subset T$.

4.d) Процедура вывода, определяющая связи вспомогательных переменных, задается как отображения множества “переменных концептуальной модели” Vk на множество связей C , которое является подмножеством множества элементарных объектов системы динамического моделирования T .

$r4: Vk \rightarrow C, C \subset T$ (9)

причем $r4: vk_i \rightarrow r(f_i, v_j), i = \overline{1, s}$.

Схема отображения $r4$ представлена в базе знаний в виде матрицы $R4 (s \times r)$, строки которой соответствуют элементам множества Vk , а столбцы — элементам множества $D = A \cup W \cup Vk$. Значения элементов данной матрицы определяются наличием отношений между элементами этих множеств.

$$r4_{ij} = \begin{cases} 1, & \exists s_{vd} \in S4_v : s_{vd} = s(vk_i, d_j); \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Отсюда $\forall vk_i \in Vk, \exists r4^i = \{r(v_j, t_j) \mid r4_{ij} = 1\}, v_j \in V \subset T, t_j \in T \setminus C$.

Применение к соответствующим наборам декларативных знаний данных процедур обеспечивает формальный синтез состава и структуры системно-динамической модели, адекватной декларативным знаниям базы знаний, которая является реализацией концептуальной модели исследуемой предметной области. Последовательность применения процедур задается алгоритмами синтеза модели.

Генерация состава и структуры имитационной модели

Алгоритмы генерации состава и структуры имитационной модели построены на примере синтеза системно-динамических моделей.

Для генерации состава и структуры имитационной модели необходимо определить множество пар элементов, одним из которых является примитив, а другим — действие. Поскольку действие может быть направлено относительно примитива, то целесообразно данные пары представлять в виде кортежей.

Алгоритм генерации кортежей:

Шаг 1. Определения множества пар “примитив — действие”.

На вход процедуры вывода базы знаний $w1$ (1) подается поочередно каждый элемент множества A .

$\forall a_i \in A, w1: a_i \rightarrow \langle a_i, p_j \rangle, \langle a_i, p_j \rangle \in A \times P$.

В результате таких подстановок получаем n подмножеств множества пар “примитив-действие”, количество которых равно мощности множества A .

$Ap^1, Ap^2, \dots, Ap^n; n = |A|$.

Объединение полученных подмножеств дает множество пар “примитив-действие”.

$$\bigcup_i Ap_i = Ap, i = \overline{1, n}$$

Шаг 2. Определения множества пар “действие — примитив”.

На вход процедуры вывода базы знаний $w2$ (2) подается поочередно каждый элемент множества A .

$\forall a_i \in A, w2: a_i \rightarrow \langle p_j, a_i \rangle, \langle p_j, a_i \rangle \in P \times A$.

В результате таких подстановок получаем n подмножеств множества пар “действие — примитив”, количество которых равно мощности множества A .

$Pa^1, Pa^2, \dots, Pa^n; n = |A|$.

Объединение полученных подмножеств дает множество пар “действие-примитив”.

$$\bigcup_i Pa_i = Pa, i = \overline{1, n}$$

Шаг 3. Определение множества пар вида “примитив-действие” и “действие–примитив”. Данное множество образуется в результате объединения множеств A_p и P_a :

$$W = A_p \cup P_a.$$

Полученный таким образом набор кортежей однозначно определяет материальную структуру динамической модели.

С точки зрения системной динамики системы могут быть описаны в виде внутренних переменных системы: уровней, потоков, вспомогательных переменных. Алгоритм генерации состава и структуры системно-динамической модели:

Шаг 1. Определение уровней динамической модели.

На вход процедуры вывода базы знаний ψ_1 (3) подается поочередно каждый элемент множества A .

$$\forall a_i \in A, \psi_1: a_i \rightarrow l_i, l_i \in L \subset T, i = \overline{1, n}.$$

Шаг 2. Определение потоков системно-динамической модели.

Шаг 2.1. Из множества W выделяются четыре подмножества:

$$W1 = \{ \langle a_i, p_j \rangle : \text{не } \exists \langle p_i, a_k \rangle \in W \};$$

$$W2 = \{ \langle a_i, p_j \rangle : \exists \langle p_i, a_k \rangle \in W \};$$

$$W3 = \{ \langle p_i, a_j \rangle : \text{не } \exists \langle a_k, p_j \rangle \in W \};$$

$$W4 = \{ \langle p_i, a_j \rangle : \exists \langle a_k, p_j \rangle \in W \}.$$

Шаг 2.2. Определение выходящих потоков системно-динамической модели.

На вход процедуры вывода базы знаний ψ_2 (4) подается поочередно каждый элемент множества $W1$.

$$\forall w_j \in W1, \psi_2: w_j \rightarrow f_j, w_j = \langle a_i, p_s \rangle, f_j = f_s^-(l_i), j = \overline{1, |W1|},$$

$$f_s^-(l_i) \in F \subset T, l_i = \psi_1(a_i).$$

Шаг 2.3. Определение входящих потоков системно-динамической модели

На вход процедуры вывода базы знаний ψ_2 (4) подается поочередно каждый элемент множества $W3$.

$$\forall w_j \in W3, \psi_2: w_j \rightarrow f_j, w_j = \langle p_s, a_i \rangle, f_j = f_s^+(l_i), j = \overline{1, |W3|},$$

$$f_s^+(l_i) \in F \subset T, l_i = \psi_1(a_i)$$

Шаг 2.4. Определение потоков системно-динамической модели из одного уровня в другой.

На вход процедуры вывода базы знаний ψ_2 (4) подается поочередно каждый элемент множества $W2$.

$$\forall w_j \in W2, \psi_2: w_j \rightarrow f_j, w_j = \langle a_i, p_s \rangle, f_j = f_s(l_i, l_k), j = \overline{1, |W2|},$$

$$f_j(l_i, l_k) \in F \subset T, l_i = \psi_1(a_i), l_k = \psi_1(a_k), a_k: \langle p_s, a_k \rangle \in W4$$

Шаг 3. Определение вспомогательных переменных системно-динамической модели.

На вход процедуры вывода базы знаний ψ_3 (5) подается поочередно каждый элемент множества V_k .

$$\forall v_k \in V_k, \psi_3: v_k \rightarrow v_i, v_i \in V \subset T, i = \overline{1, |V_k|}.$$

Представленные в данном подразделе алгоритмы реализуют синтез состава и структуры системно-динамической модели путем последовательного применения формальных процедур над наборами декларативных знаний базы знаний.

Генерация информационных связей системно-динамической модели

Кроме структуры и состава системно-динамической модели необходимо определить информационные связи между элементами модели. Информационные связи реализуют петли обратной связи и временные задержки на системно-динамической модели.

Алгоритм генерации информационных связей системно-динамической модели:

Шаг 1. Генерация связей потоков зависящих от уровней.

На вход процедуры вывода базы знаний r_1 (6) подается поочередно каждый элемент множества W .

$$\forall w_i \in W, r_1: w_i \rightarrow r(f_i, l_j), f_i \in F \subset T, l_j \in L \subset T, r(f_i, l_j) \in C \subset T,$$

$$f_i = \psi_2(w_i), l_j = \psi_1(a_j).$$

Шаг 2. Генерация связей потоков зависящих от других потоков.

На вход процедуры вывода базы знаний r_2 (7) подается поочередно каждый элемент множества W .
 $\forall w_i \in W, r_2: w_i \rightarrow r(f_i, f_j), f_i, f_j \in F \subset T, r(f_i, f_j) \in C \subset T$
 $f_i = \psi_2(w_i)$.

Шаг 3. Генерация связей потоков зависящих от вспомогательных переменных.

На вход процедуры вывода базы знаний r_3 (8) подается поочередно каждый элемент множества W .
 $\forall w_i \in W, r_3: w_i \rightarrow r(f_i, v_j), f_i \in F \subset T, v_j \in V \subset T, r(f_i, v_j) \in C \subset T$
 $f_i = \psi_2(w_i), v_j = \psi_3(vk_j)$.

Шаг 4. Генерация связей вспомогательных переменных.

На вход процедуры вывода базы знаний r_4 (9) подается поочередно каждый элемент множества V_k .
 $\forall vk_i \in V_k, r_4: vk_i \rightarrow r(v_i, d_j), d_j \in T \setminus C, r(v_i, d_j) \in C \subset T$.

Представленные алгоритмы реализуют синтез информационных связей системно-динамической модели путем последовательного применения формальных процедур над наборами декларативных знаний базы знаний.

Заключение

Разработан метод концептуального моделирования и информационная технология его реализации. В рамках информационной технологии концептуального моделирования созданы процедуры автоматического отображения формальной концептуальной модели на различные модели реализации вычислительного эксперимента, в частности, на модели системной динамики.

Библиография

1. Игнат'ев М. Б., Путилов В. А., Смольков Г. Я. Модели и системы управления комплексными экспериментальными исследованиями. М., Наука, 1986, 232 с.
2. Путилов В. А., Горохов А. В. Системная динамика регионального развития. Мурманск: НИЦ "Пазори", 2002, 306 с.
3. Горохов А. В., Быстров В. В. Информационная технология концептуального синтеза динамических моделей сложных систем. Информационные технологии в региональном развитии, Выпуск 7. Апатиты, изд-во КНЦ РАН, 2007, с.69–77.

References (transliterated)

1. Ignat'ev M. B., Putilov V. A., Smol'kov G. Ya. Modeli i sistemy upravleniya kompleksnymi eksperimental'nymi issledovaniyami. M., Nauka, 1986, 232 s.
2. Putilov V. A., Gorokhov A. V. Sistemnaya dinamika regional'nogo razvitiya. Murmansk: NITs "Pazori", 2002, 306 s.
3. Gorokhov A. V., Bystrov V. V. Informatsionnaya tekhnologiya kontseptual'nogo sinteza dinamicheskikh modelei slozhnykh sistem. Informatsionnye tekhnologii v regional'nom razvitii, Vypusk 7. Apatity, izd-vo KNTs RAN, 2007, s.69–77.