

2. Муромцев Д.И. Онтологический инжиниринг знаний в системе Protégé. – СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2007. – 62с.

3. Анализ концептуальных моделей работы со знаниями как этап обоснования архитектуры системы управления знаниями / А.Ф. Тузовский, В.З. Ямпольский // Изв. ТПУ. 2004. №7. С. 111-116

The use of ontological approach in the management of the intellectual capital of the organization

Tarasov Vadim Germanovich, Graduate student

The article describes the development of an information system for the automation of maintenance and repair of measuring instruments and automation of heating automatics and measurement of thermal power plant of Norilsk. A feature of this system is to use an ontological approach to the development of subsystem intellectual support. According to the results of experimental use of the system, you can see and appreciate its features, cost-effectiveness and possible areas for further development.

Key words: Service and Equipment Repairing, Enterprise Resource Planning System, Knowledge Management System.

УДК519.711.3

ЭКСПЕРТНОЕ ПРОСТРАНСТВО ДЛЯ СИТУАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННО-ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

Александр Яковлевич Фридман, д.т.н., проф., ведущий научный сотрудник

Тел.: 8 (81555) 7-40-50, e-mail: fridman@iimm.kolasc.net.ru

Институт информатики и математического моделирования КНЦ РАН

<http://www.iimm.kolasc.net.ru>

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №№ 13-07-00318-а, 12-07-00689-а, 12-07-000550-а, 12-07-00302-а), Президиума РАН (проект 4.3 Программы № 16), ОНИТ РАН (проект 2.3 текущей Программы фундаментальных научных исследований).

Предложена метрика обобщённого пространства состояний, включающего как строковые, так и числовые переменные. Описано применение этой метрики в системе ситуационного моделирования статических и динамических характеристик промышленно-природных комплексов с учётом аспектов безопасности. Метрика допускает использование экспертных знаний о степени опасности различных состояний объекта моделирования.



А.Я. Фридман

Ключевые слова: динамический пространственный объект, ситуационное управление, концептуальная модель, ситуационное моделирование, принятие решений

В работах [1-3] представлена ситуационная система моделирования (ССМ), ориентированная на анализ и прогноз состояния промышленно-природных комплексов (ППК) на их иерархической ситуационной концептуальной модели (СКМ).

Однако даже при наличии модели самостоятельную проблему составляет выработка управленческих решений, предпочтительных для формирования желательного поведения объекта с учётом его текущего состояния, ограничений на доступные ресурсы и аспектов безопасности. Первым этапом решения сформулированной проблемы является формализация понятия пространства состояний [4], в котором функционирует ППК, и

разработки метрики этого пространства, обеспечивающей формирование адекватных решений по управлению ППК. С указанной целью далее введены и проанализированы основные определения, обеспечивающие организацию моделирования пространственных динамических систем, к каковым относятся ППК, в обобщённом пространстве состояний, включающем как шкалированные параметры (параметры со строковыми значениями), так и переменные, которые принимают числовые значения. Использованные обозначения соответствуют [1-3].

1. Введение в ситуационное моделирование

Промышленно-природными комплексами будем называть такие территории, экосистемы, технологии, параметры функционирования которых существенно зависят от пространственных характеристик их компонентов и от времени. Экспериментальные воздействия на ППК по многим причинам (ограниченные временные рамки, опасность необратимых изменений, высокая стоимость и др.) обычно невозможны или нежелательны, поэтому основным методом изучения и прогнозирования поведения ППК служит моделирование.

Ввиду принципиальной неполноты знаний об объектах класса ППК целесообразно не ограничиваться классическими аналитическими моделями, а предоставить средства для использования опыта экспертов. Для объединения в одной системе моделирования всех упомянутых форм представления знаний автором предложено использовать СКМ [2]. В СКМ декларируются элементы исследуемой предметной области и описываются отношения между ними, которые задают структуру и причинно-следственные связи, существенные в рамках проводимого исследования. При конструировании СКМ в неё закладываются допустимые альтернативные структуры исследуемого объекта, для чего при его декомпозиции используются отношения классификации. Сопоставление возможных альтернатив с целью поддержки принятия решения о выборе одной из структур реализации объекта исследования производится на основе развития ситуационного подхода [5] к проблеме исследования ППК на основе концептуальной модели [1].

Для предлагаемого подхода фундаментально важна возможность интегрирования в единую среду моделей компонентов объекта, построенных разными группами исследователей в разное время и, соответственно, имеющих различные динамические параметры (шаг дискретности, порядок модели и т.д.) и даже различные принципы внутренней организации (например, чисто логические, автоматные и аналитические модели). В ССМ равноправно обрабатываются результаты вычислений в специализированных программных модулях и данные встроенных экспертной (ЭС) и геоинформационной (ГИС) систем. За счёт этого применение СКМ обеспечивает автоматизацию всех этапов моделирования, широкое применение экспертных знаний, использование ГИС-технологии для графического представления составных частей объекта, постановки задачи и представления результатов моделирования, а также для выполнения пространственно-зависимых расчётов. ССМ предоставляет лицу, принимающему решения (ЛПР), алгоритмическую поддержку для обоснования его решений об изменении или сохранении структуры подчинённого ему объекта и в этом смысле является альтернативой экспертному совету.

Чтобы избежать вычислительных проблем, связанных с малыми изменениями данных, и обеспечить поддержку совместной расчётно-логической обработки информации, в ССМ результатами процедур обработки (исключение составляют данные, вычисляемые ГИС) могут быть только данные с дискретным конечным множеством значений (типа списков). Если значения некоторого данного есть строковые константы, то оно называется параметром (категория PAR), а имеющее числовые значения именуется переменной (категория VAR), и над ним можно выполнять определённые математические операции. Если результат вычислений представляет собой значение

переменной, то он округляется до ближайшего значения из списка допустимых значений. В дальнейшем, если сказанное относится к данным любого разрешённого в ССМ типа (и к переменным, и к параметрам), употребляется термин «данное» или «ресурс». Таким образом, множество имён *данных (ресурсов)* делится на подмножества имён *переменных* и *параметров*:

$$D ::= \langle Var, Par \rangle, \quad Var ::= \{var_i\}, \quad i = \overline{1, N_v}; \quad Par ::= \{par_j\}, \quad j = \overline{1, N_p}, \quad (1)$$

где N_v и N_p – мощности этих множеств.

Символом ::= здесь и далее обозначается равенство по определению. При необходимости используются также другие символы языка БНФ (металингвистических формул Бэкуса-Наура).

По сравнению с ближайшим прототипом [6] ресурсы элементов СКМ дополнительно атрибутированы списками значений. Это позволяет проводить анализ и расчёт ресурсов элементов модели, а также контролировать связи между элементами модели по каждому ресурсу, что повышает адекватность описываемых структур связей компонентов объекта, детальность исследования разрешимости при наличии разветвлённых связей между элементами модели и обеспечивает работу с временными рядами данных в имитационном режиме.

Объекты СКМ имеют три основные характеристики: имя, функциональный тип, который определяет структуру и функции объекта и используется в процессе анализа корректности СКМ, и имя суперобъекта, доминирующего данным объект (отсутствует для объекта верхнего уровня). По положению в дереве объектов и на карте выделяются три категории объектов:

- примитивы (категория LEAF), структурно неделимые с точки зрения глобальной цели моделирования;
- элементарные объекты (категория GISC), географически связанные с одним ГИС-элементом (полигоном, дугой или точкой какого-либо покрытия);
- составные объекты (категория COMP), состоящие из элементарных и/или составных объектов.

Структура объектов категории GISC в СКМ может быть достаточно сложной, но все их подобъекты имеют одну и ту же географическую привязку. Множество объектов имеет вид:

$$O = \{ o_{\alpha}^{\gamma} \} ::= \bigcup_{\alpha=1}^{N_L} O_{\alpha}, \quad (2)$$

где: $\alpha = \overline{1, N_L}$ – номер уровня дерева объектов, к которому относится данный объект (L – общее количество уровней декомпозиции);

$\beta_{\alpha} = \overline{1, N_{\alpha}}$ – порядковый номер объекта на его уровне декомпозиции;

$\gamma = \overline{1, N_{\alpha-1}}$ – порядковый номер суперобъекта, доминирующего данным на вышележащем уровне;

O_{α} – множество объектов, принадлежащих уровню с номером α .

Для обеспечения связности СКМ принимается, что существует единственный суперобъект, доминирующий все объекты первого уровня декомпозиции, то есть справедливо соотношение:

$$O_1 ::= \{ o_{\beta_1}^0 \}, \quad \beta_1 = \overline{1, N_1}. \quad (3)$$

Процессы в СКМ отображают преобразования ресурсов и реализуются различными способами в зависимости от присвоенной процессу одной из трех следующих категорий:

- внутренние процессы (категория INNER), все их входные и выходные данные относятся к одному объекту);

- внутриуровневые процессы (категория INTRA), связывающие объекты КМ, не подчиняющиеся друг другу;
- межуровневые процессы (категория INTER), описывающие передачу данных между объектом и подобъектами или между объектом и суперобъектом.

Основными характеристиками процессов являются: уникальное имя, характеристика исполнителя процесса и функциональный тип процесса, который определяет тип преобразований, им осуществляемых, и используется в процессе анализа корректности СКМ; дополнительно используются список входных и выходных данных и их допустимых граничных значений. Исполнитель процесса определяет его динамические свойства и способ реализации в компьютере. Исполнитель можно задать либо непосредственно (в виде разностного уравнения), либо косвенно – ссылкой на имя реализующего этот процесс программного модуля.

Схема концептуальной модели в ССМ имеет вид.

$$S_{CCM} ::= \langle O, P, D^{CM}, H, OP, PO, U \rangle, (4)$$

где: O – множество объектов СКМ, определенное в (2);

$P ::= \{p_n\}, n = \overline{1, N_p}$ – множество процессов СКМ;

$D^{CM} \subseteq D$ – множество данных концептуальной модели;

H – отношение иерархии объектов, которое с учетом (2) и (3) принимает вид:

$$H = \bigcup_{\alpha=1}^{N_L-1} H_{\alpha}, (5)$$

где: $H_{\alpha} \subseteq O_{\alpha-1} \times B'(O_{\alpha})$ – отношения иерархии для каждого из уровней дерева объек-

тов, причем $B'(O_{\alpha})$ есть разбиение множества O_{α} ;

$OP \subseteq O \times B(P)$ – отношение «объект – порождающие его выходные данные процессы», где

$B(P)$ – множество всех подмножеств множества P ;

$PO \subseteq P \times B(O)$ – отношение «процесс – создающие его входные данные объекты»;

$U ::= U_p \cup U_o$ – отношение, формализующее управление процессом вычислений на основе СКМ, имеет составляющие следующего вида:

$U_p \subseteq P \times B(Res)$ – отношение «процесс – управляющее данное»;

$U_o \subseteq O \times B(Res)$ – отношение «объект – управляющее данное».

Отношение «объект (процесс) – управляющее данное» ставит в соответствие некоторому объекту (процессу) модели данное, которое доопределяет этот объект при переходе к алгоритмической интерпретации.

Модель атрибутов включает описательные характеристики элементов СКМ и обозначается кортежем:

$$A_{CCM} ::= \langle \mathbb{N}, \mathbb{T}, \mathbb{a}, \mathbb{E}, \mathbb{T}_e, \mathbb{t}, \mathbb{t}_e, T_h, t_{ho} \rangle, (6)$$

где: $\mathbb{N} ::= \langle N_p, N_o, N_r \rangle$ и $\mathbb{T} ::= \langle T_p, T_o, T_r \rangle$ – множества имён и типов процессов, объектов и ресурсов соответственно;

$\mathbb{E} ::= \langle E_p, E_o, E_r \rangle$ и $\mathbb{T}_e ::= \langle T_{ep}, T_{eo}, T_{er} \rangle$ – множества имён и типов исполнителей процессов, объектов и ресурсов соответственно;

$\mathbb{n} ::= \langle n_p, n_o, n_r \rangle, \mathbb{t} ::= \langle t_p, t_o, t_r \rangle$ и $\mathbb{t}_e ::= \langle t_{ep}, t_{eo}, t_{er} \rangle$, где $n_p: P \rightarrow N_p; n_o: O \rightarrow N_o; n_r: D^{CM} \rightarrow N_r; t_p: P \rightarrow T_p; t_o: O \rightarrow T_o; t_r: D^{CM} \rightarrow T_r; t_{ep}: P \rightarrow T_{ep}; t_{eo}: O \rightarrow T_{eo}; t_{er}: D^{CM} \rightarrow T_{er}$ – функции, описывающие текущий набор элементов СКМ;

$T_h ::= \{ \&, \vee, * \} \cup \mathbb{N}$ (\mathbb{N} – множество натуральных чисел) – множество типов отношений иерархии объектов, причём в качестве отношения классификации используется строго дизъюнктивное «или»;

$t_{ho}: O \rightarrow T_h$ – функции, задающие отношения иерархии объектов.

После построения дерева объектов (2), (3) начинается спецификация ресурсов СКМ. В первую очередь должны быть описаны ресурсы, обеспечивающие взаимодействие объектов, для чего необходимо задать их функции качества, списки входных и выходных ресурсов (далее обозначены $\Phi(*)$, $list_in(*)$ и $list_out(*)$ соответственно). Необходимым условием функционирования модели является формирование всех вход-

ных ресурсов объектов, поэтому элементы множеств $list_in$ объектов-примитивов должны либо поступать в систему извне, либо непосредственно вычисляться в ГИС, либо принадлежать множествам $list_out$ объектов-примитивов (включая сам рассматриваемый объект). Исключения составляют настроечные параметры критериев качества объектов, которые поступают от их суперобъектов. Внешние данные могут либо поступать из базы данных ССМ (в этом случае им назначается тип исполнителя DB), либо вычисляться средствами ГИС (в этом случае им назначается тип исполнителя GISE и категория GIS), либо генерироваться некоторой явно заданной функцией времени или программным модулем, который имеет один входной параметр - время. В частности, таким образом удобно формировать возможные сценарии изменения входных ресурсов моделируемого объекта. В последнем случае данному назначается тип исполнителя GEN (от “генератор”) с указанием имени из множества E_T (6). Если входные ресурсы некоторого сценария формируются вручную, то им также может назначаться исполнитель DB. По умолчанию исполнителям ресурсов, порождаемых объектами СКМ, присваивается тип TMP (временные данные), в таком случае данные хранятся только в течение одного цикла проведения имитации. Если некоторый ресурс необходим для сопоставления нескольких вариантов расчёта, пользователь должен назначить ему тип CMP (от “compare” – сравнить).

Далее производится спецификация процессов, обеспечивающих порождение ресурсов объектов. При этом создаются отношения взаимодействия OP (4), в модель закладываются схемы агрегирования ресурсов и альтернативные варианты порождения ресурсов.

Конструирование СКМ заканчивается этапом описания внутренних процессов модели, на котором достигается связность СКМ по каждому ресурсу. Построение концептуальной модели считается завершённым, когда определены все компоненты структуры, декларированные в схеме СКМ (4) и модели атрибутов (6), что соответствует получению формальной модели, адекватной реальному объекту с точки зрения возможностей достижения глобальной цели. В то же время структура модели может допускать различную трактовку отношений, определённых в модели. Поэтому сформированная модель должна быть подвергнута формальному анализу для проверки её консистентности и разрешимости. В понятие *консистентности* модели обычно (см., например, [8]) включается её адекватность (наличие всех элементов и связей, необходимых для эксплуатации модели), связность (отсутствие элементов, структурно не относящихся к глобальной цели) и корректность (логическая непротиворечивость). Под *разрешимостью* в общем случае понимается достижимость некоторого подмножества объектов модели, которые определяются как целевые, из другого подмножества объектов, которые определяются как исходные. Разрешимость иерархических моделей, к которым относится и СКМ, может рассматриваться в двух основных аспектах: до начала расчётов она подразумевает согласованность и однозначность описания всех допустимых вариантов достижения глобальной цели на различных уровнях иерархии, а в процессе имитации разрешимость состоит в обеспечении выбора корректного фрагмента модели, описывающего изучаемую ситуацию. При анализе обоих аспектов концептуальная модель рассматривается как формальная система, для этого предложены простые волновые алгоритмы [9]. Возможность детального формального анализа СКМ относится, по мнению авторов, к существенным преимуществам иерархических концептуальных моделей по сравнению с большинством прототипов ССМ, в частности, с моделями системной динамики [10] и ситуационного управления [5].

Теперь покажем, как реализуются в ССМ идеи ситуационного управления [5].

2. Исследование ситуаций на модели ППК

Сопоставление альтернатив производится путем анализа ситуаций, которые могут возникнуть в СКМ. Базовой формой представления информации в ССМ является *факт*

о значении некоторой характеристики объекта, формируемый в виде:

$$\langle \text{имя} \rangle \langle \text{знак} \rangle \langle \text{подпись значений } (n) \rangle, \quad (7)$$

где: <имя> – уникальное имя данного; <знак> ::= = | ≠ – для параметров; <знак> ::= = | ≠ | ∈ | ∉ | ≥ | ≤ – для переменных; <подпись значений (n)> имеет длину n и принадлежит области значений функции, соответствующей имени данного (1).

Исходной ситуацией называется конечный список фактов формата (7), в котором имена данных принадлежат множествам (1) и не повторяются.

На основе анализа исходной ситуации и СКМ экспертная система (задавая при необходимости дополнительные вопросы пользователю) доопределяет исходную ситуацию до *полной ситуации*, которой соответствует связный фрагмент СКМ, возможно, включающий некоторые структурные альтернативы реализации ППК. Ситуация называется *полной*, поскольку соответствующий ей фрагмент модели содержит всю информацию, необходимую для исследования исходной ситуации. *Достаточная ситуация* получается из соответствующей ей полной ситуации путем выбора альтернатив, предпочтительных по заданным критериям качества (в ходе решения задачи классификации ситуаций).

Для классификации и сопоставления ситуаций в ССМ предложен обобщенный критерий вида (8), который обладает двумя следующими преимуществами, существенными для поставленной задачи:

- в явном виде задает требования суперэлемента к выходным характеристикам доминируемого элемента;
- позволяет легко сконструировать инварианты, описывающие процессы агрегирования обобщенных затрат от нижестоящих элементов к вышестоящим.

$$\Phi_{\text{ССМ}}^{(s)} ::= \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{a_i - a_{i0}}{\Delta a_i} \right)^s \right)^{1/s} ::= \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \delta a_i^s \right)^{1/s}, \quad (8)$$

где: s – четное натуральное число;

a_i – ресурсы из списка выходов данного элемента модели (одного из объектов или процессов СКМ, или ресурса, входящего в правую часть некоторого правила ЭС ССМ, или графического ресурса, вычисляемого с помощью ГИС);

a_{i0} и $\Delta a_i > 0$ – настроечные параметры, отражающие требования вышестоящего элемента к номинальному значению a_i допустимому отклонению от этого значения соответственно;

$$\delta a_i ::= \frac{a_i - a_{i0}}{\Delta a_i} \text{ – относительное отклонение фактического значения ресурса } a_i \text{ от его}$$

номинального значения a_{i0} .

Если считать a_i скалярными критериями качества работы элемента модели, номинальные значения которых определяются величинами a_{i0} , то (8) представляет собой обобщенный критерий с коэффициентами важности [7], обратно пропорциональными допустимым отклонениям скалярных критериев. Его значение равно единице в том случае, если значения всех его аргументов находятся на грани допусков:

$$\Phi_{\text{ССМ}}^{(s)} = 1, \text{ если } |a_i - a_{i0}| = \Delta a_i, i = \overline{1, m}, \quad (9)$$

и не превосходит единицы, если все аргументы находятся в пределах допусков.

Перечисленные свойства обеспечивают естественную нормировку сигналов и облегчают поиск элементов модели, чьи характеристики существенно отличаются от желаемых. Удельная величина изменения критерия (8) при изменении одного из его аргументов, задаваемая соотношением:

$$\delta \Phi_i^{(s)} ::= \frac{\partial \Phi^{(s)} / \partial a_i}{\Delta a_i} = m^{s-1} (\Phi^{(s)})^{s-1} \delta a_i^{s-1}, \quad (10)$$

характеризует относительную чувствительность критерия качества (8) к изменению этого аргумента. В предположении о равной важности всех ресурсов для достиже-

ния цели функционирования элемента СКМ удельная величина обобщенных затрат на каждый из аргументов критерия оценивается формулой:

$$\eta_i ::= \frac{1}{m} \delta \Phi_i^{(s)}. \quad (11)$$

Далее рассматривается самый простой из критериев вида (8) – квадратичный критерий $\Phi^{(2)}$. Для него из (8) – (10) следует, что при нахождении аргумента a_i в допустимых пределах величина η_i не превосходит единицы. Эту величину и предлагается использовать в качестве индикатора удельных собственных затрат некоторого элемента СКМ на выработку того или иного ресурса при сравнительном анализе различных структур реализации той или иной полной ситуации. Если этот элемент потребляет какие-либо ресурсы от других элементов модели, то для анализа общих затрат на получение ресурса к собственным затратам добавляются затраты на получение входных ресурсов. Тогда формула (11) примет вид:

$$\eta_i ::= \Phi^{(2)} \delta a_i + \frac{1}{m} \sum_{j=1}^n \eta_j, \quad (12)$$

где: n – количество (длина списка) входных ресурсов данного элемента модели;

η_j – рассчитанные аналогично (12) удельные затраты на получение входных ресурсов объекта, по критерию качества которого сравниваются достаточные ситуации.

Поскольку по смыслу задачи на этом объекте находится ЛПП, назовем его *объектом принятия решения* (ОПР). В качестве ОПР может быть выбран либо корневой объект фрагмента, построенного для исследуемой полной ситуации, либо любой суперобъект этого объекта, вплоть до глобального элемента СКМ.

Принцип классификации ситуаций в ССМ дается следующими определениями.

Определение 1. Две достаточные ситуации из одного и того же фрагмента СКМ при одном и том же ОПР относятся к одному классу ситуаций, если для них обеих минимальна величина удельных затрат (12) для одного и того же выходного ресурса a_i данного ОПР (назовем этот критерий доминирующим по сравнению с другими критериями). Для двух ситуаций из одного класса более предпочтительной является та достаточная ситуация, для которой величина (12) меньше.

Определение 2. Оптимальной достаточной ситуацией из заданного класса является достаточная ситуация с минимальным значением удельных затрат (12).

Таким образом, при решении задачи классификации ситуаций в ССМ обобщенный критерий качества используется лишь опосредованно: согласно (12), он является масштабным множителем для всех собственных затрат элемента модели по отношению к затратам на получение его входных ресурсов.

Дополнительный учет предпочтений ЛПП в ССМ можно осуществить, включая в алгоритмы классификации некоторые экспертные сравнения элементов модели между собой. В частности, удобно проводить сопоставление вариантов по аналогии с методом анализа иерархий Т. Саати [11], трактуя весовые функции объектов как относительные приоритеты представленных ими и подчиненными им в СКМ объектами вариантов структуры объекта. Тогда формула (12) принимает вид:

$$\eta_i ::= \gamma_i (\Phi^{(2)} \delta a_i + \frac{1}{m} \sum_{j=1}^n \eta_j), \quad (13)$$

где масштаб γ_j для i -го ресурса при j -той альтернативе его реализации вычисляется по формуле (14), (μ_j – относительные приоритеты альтернатив):

$$\gamma_{ij} = \frac{\min\{\mu_j\}}{\mu_j}, \quad \sum_j \mu_j ::= 1. \quad (14)$$

Поскольку достаточные ситуации по определению не содержат избыточности, то описанный выше метод вычисления абсолютных затрат в любом его варианте обеспечивает однозначный расчет собственных и абсолютных затрат на получение всех ресурсов фрагмента и классификацию достаточных ситуаций по признаку доминирования одного из скалярных критериев в затратах на выходе ОНР. Более того, условия (9) существенно упрощают поиск причины выхода параметров функционирования модели из допусков: для этого достаточно определить самый нижележащий объект, на выходе которого значения индикатора (11) (или (12), если это не листовый объект) значительно превышают единицу, в его работе и кроется источник недопустимого повышения затрат.

Для решения задач классификации и обобщения ситуаций в ССМ предусмотрен ряд программных средств, к которым относятся [1]:

аппарат синтеза и анализа типов ситуаций, в частности, оптимальных достаточных ситуаций, ориентированный на решение вопросов координации и согласования управляющих воздействий на различных уровнях модели ССМ;

инструментальные средства порождения и проверки гипотез о сравнительных характеристиках достаточных ситуаций в рамках вероятностной интерпретации этих гипотез с учетом влияния погрешностей исходных данных;

процедуры обобщения описаний ситуаций с учетом пространственно-временных отношений между элементами ситуаций, которые используют пространственно-временные функции (ПВФ), включаемые в предпосылки правил ЭС ССМ.

Все ПВФ имеют выход логического типа, то есть возвращают ответ «да» или «нет» в результате анализа входящего в них логического условия.

Разработаны две пространственные функции и одна временная функция, которая поддерживает выборку ретроспективных данных за некоторый промежуток времени, ее синтаксис имеет вид:

в_течение(<условие>, <начало>, <конец>, <доля>), (15)

где: <условие> имеет вид (7);

<начало> и <конец> задают соответственно начальный и конечный моменты интервала проверки (их отстояние в прошлое от текущего момента времени);

<доля> определяет минимальный допустимый процент элементов среди всех анализируемых, которые должны удовлетворять <условию>, чтобы функция (15) дала утвердительный ответ на запрос; этот параметр используется интерпретатором ПВФ.

Пространственные функции записываются в форме:

соседние(<условие>, <доля>), (16)

сходные(<условие>, <доля>, <параметры_сходства>), (17)

Параметры <условие> и <доля> имеют тот же смысл, что и в функции (15). Различие между видами пространственных функций заключается в критерии отбора элементов для совместного анализа: в функции (16) анализируются элементы, примыкающие к текущему геометрически, в функции (17) отбираются элементы, имеющие одинаковые с текущим элементом значения <параметров_сходства>, выбираемых из списка имён существующих параметров и переменных. Допускается однократная вложенность различных функций друг в друга, то есть запросы вида:

соседние(сходные(<условие>, <доля1>, <параметры_сходства>), <доля2>).

ПВФ могут использоваться в любом режиме работы ССМ, что позволяет учитывать связи между переменными модели во времени и пространстве.

Выше кратко изложены результаты разработки технологии ситуационного моделирования на базе специализированной концептуальной модели ППК. К основным преимуществам этой технологии относятся следующие.

1. Автоматизация всех этапов моделирования.

2. Широкое применение экспертных знаний.
3. Использование семантически значимых понятий предметной области для построения её формального описания.
4. Использование ГИС-технологии не только для графического представления составных частей объекта и результатов моделирования, но также для постановки задачи и выполнения пространственно-зависимых расчётов.
5. Поддержка современных сценарных подходов к моделированию.
6. Наличие средств детального формального анализа модели.
7. Развитый аппарат сопоставительного анализа ситуаций в статике и динамике.
8. Автоматический синтез исполнительных сред моделирования.
9. Использование единой инструментальной среды и методологии для моделирования как нормальных, так и критических режимов функционирования ППК.
10. Возможность интеграции знаний экспертов по различным аспектам функционирования ППК для обоснования принятия решений.

Проведённые исследования выявили перспективность изложенного подхода для анализа состояния и прогноза поведения сложных промышленно-природных комплексов. Разработанные методы и алгоритмы использованы при создании проблемно-ориентированных приложений ССМ, практическое применение которых показало, что указанный подход позволяет решать специфические задачи в различных предметных областях, таких, как оценка влияния техногенных воздействий на лесные массивы, оценка удароопасности горного массива, моделирование энергетической системы региона, моделирование задачи комплексного использования минерального сырья, моделирование гидротехнических комплексов и сооружений.

По мнению авторов, представленный подход может служить основой для разработки многоуровневых систем регионального управления, а также для создания подсистемы Интернета (ModellingWEB), обеспечивающей автоматизированный поиск и подключение к исследуемой модели других моделей, созданных специалистами в различных предметных областях.

3. Формализация пространства состояний объекта моделирования

Приведённые в предыдущем разделе соотношения обеспечивают статический сопоставительный анализ ситуаций и их экстраполяцию в имитационном режиме, но не позволяют реализовать управление моделируемым объектом во времени, для чего традиционно применяется концепция состояния объекта как временного среза траектории изменения его характеристик в некотором абстрактном многомерном пространстве [4]. Для решения задач динамического управления ППК необходимо ввести метрику в пространстве состояний, она и предлагается далее.

Поскольку, как отмечено выше, вычисление критерия (8) и удельных затрат (12) позволяет однозначно сопоставлять текущие варианты состояния ППК между собой, представляется естественным строить метрику пространства состояний на основе этого же критерия.

Если применение соотношения (8) в качестве метрики для числовых переменных (множество Var в (1)) проблем не вызывает, то его использование для подпространства строковых переменных (множество Par в (1)) требует некоторого ужесточения правил формирования списков допустимых значений таких переменных. Далее предлагается процедура метризации пространства строковых переменных, позволяющая сконструировать для них критерий, аналогичный (8) и удовлетворяющий ограничению (9).

Вначале необходимо выделить одно (любое, включая граничные) из допустимых значений как номинальное (идеальное для реализации управления) значение.

Затем следует упорядочить остальные допустимые значения по степени их отклонения от идеального значения (чем больше это отклонение для данного допустимого значения, тем дальше от идеального должно быть оно в списке), причём все значения,

помещённые в список до идеального, должны отличаться «направлением» отклонения от всех значений, находящихся в списке после идеального (рис. 1).

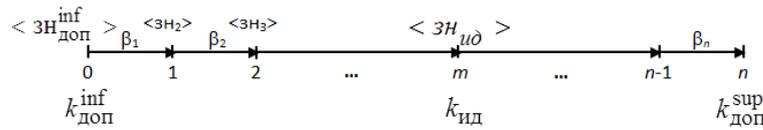


Рис. 1. Допустимые значения строкового параметра

Направление упорядочения (для конкретности примем, что это увеличение) показано на рис. 1 стрелками, имена значений изображены над линией, а абсолютная и символическая нумерация значений в списке допустимых значений - под ней. Например, параметр «рост» может получить идеальное значение «нормальный» или «средний», а остальными допустимыми значениями могут быть следующие: «выше среднего», «несколько выше среднего», «значительно выше среднего», «ниже среднего», «несколько ниже среднего». Упорядоченный согласно предлагаемой процедуре список допустимых значений параметра «рост» приведён на рис. 2.

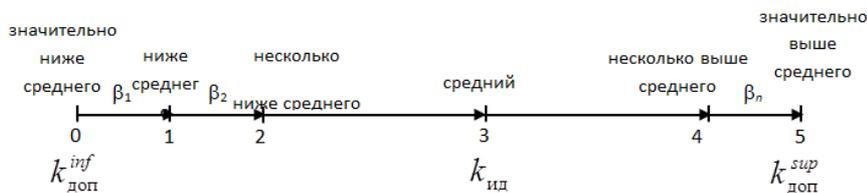


Рис. 2. Допустимые значения строкового параметра «рост»

В предположении о равноправии и «равноудалённости» соседних значений некоторого параметра друг от друга в качестве меры расстояния между двумя значениями этого параметра можно, по аналогии с расстоянием в теории ориентированных графов, выбрать длину маршрута между значениями, если рассматривать сами значения как вершины графа.

Из определения критерия (8) имеем, что граничные (минимальное и максимальное) допустимые значения числовой переменной достигаются, когда модуль относительной погрешности δa_i равен единице:

$$\delta a_i = \frac{a_i - a_{i0}}{\Delta a_i} = \pm 1, \Rightarrow \begin{cases} a_{i \max} = a_{i0} + \Delta a_i \\ a_{i \min} = a_{i0} - \Delta a_i \end{cases} \quad (18)$$

Из-за возможной асимметрии количества значений строковых параметров относительно идеального значения допустимые отклонения от него вправо и влево различны. Тогда условия нормировки (18) сохранятся, если определить допустимые отклонения параметра от идеального значения в виде:

$$\begin{aligned} \Delta a_i^{\text{inf}} &= k_{\text{ид}} - k_{\text{доп}}^{\text{inf}} = m; \\ \Delta a_i^{\text{sup}} &= k_{\text{доп}}^{\text{sup}} - k_{\text{ид}} \end{aligned}$$

а относительное отклонение фактического значения параметра от его номинального значения задать соотношением:

$$\delta a_i = \begin{cases} \frac{k - k_{\text{ид}}}{\Delta a_i^{\text{inf}}}; & k < k_{\text{ид}} \\ \frac{k - k_{\text{ид}}}{\Delta a_i^{\text{sup}}}; & k \geq k_{\text{ид}} \end{cases} \quad (19)$$

или для случая, когда индекс идеального значения есть m (см. рис. 1):

$$\delta a_i = \begin{cases} \frac{k - m}{\Delta a_i^{inf}}; & k < m \\ \frac{k - m}{\Delta a_i^{sup}}; & k \geq m \end{cases} \quad (20)$$

Если идеальное значение некоторого параметра совпадает с одним из его граничных значений, то для этого значения принимаем $\delta a_i = 0$.

С целью моделирования нештатных и аварийных ситуаций в ППК [3] нежелательные и недопустимые значения параметров должны «расширять» упорядоченный список допустимых значений в соответствующие стороны (рис. 3). Более жирной линией показаны подмножества недопустимых значений параметра. Без потери общности можно принять, что все внутренние значения параметра, выходящие за допуск, соответствуют нежелательным, но не критическим режимам функционирования ППК, а крайние значения – критические.

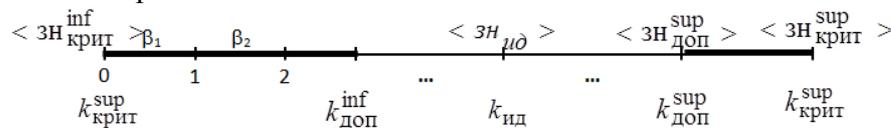


Рис. 3. Все возможные значения строкового параметра

Например, нежелательными значениями параметра «рост» (см. рис. 2) могут быть выбраны, с одной стороны, «гигант», а с другой – «карлик».

Если предположение о равноудалённости значений параметра неприемлемо, то вышеприведённые определения расстояния нетрудно обобщить, вводя положительные веса дуг между соседними значениями параметра (на рисунках выше обозначены символами β с индексами). Тогда аналогично получим:

$$\Delta a_i^{inf} = \sum_{k=1}^{k_{ид}} \beta_k; \quad (21)$$

$$\Delta a_i^{sup} = \sum_{k=k_{ид}+1}^{k_{доп}} \beta_k; \quad (22)$$

$$\delta a_i = \begin{cases} - \frac{\sum_{j=k}^{k_{ид}} \beta_j}{\Delta a_i^{inf}}; & k < k_{ид} \\ - \frac{\sum_{j=k}^{k_{ид}} \beta_j}{\Delta a_i^{sup}}; & k \geq k_{ид} \end{cases} \quad (23)$$

Очевидно, для соотношений (21) – (23) условие равенства единице модуля δa_i для граничных допустимых значений параметра также сохраняется.

Для отображения повышенной степени нежелательности и/или опасности некоторых значений параметров веса этих значений следует выбирать значительно больше единицы, тогда соответствующее состояние ППК будет отбраковано в ходе решения задачи классификации ситуаций [1].

После выполнения описанной выше модификации строковые параметры могут включаться в пространство состояний ППК наравне с числовыми переменными, поскольку их метрика имеет аналогичные свойства, что позволяет рассматривать интегральные характеристики поведения ППК в этом пространстве. Следует отметить, что и для числовых переменных может оказаться полезным переход от вычисления относительной погрешности по формуле (1) к формулам типа (19), (20), допускающим асим-

метрию диапазона допустимых значений относительно номинального (идеального) значения.

4. Характеристика траекторий поведения ППК в обобщенном пространстве состояний

Проведённая выше формализация даёт возможность ввести следующие определения, создающие основу для поиска наиболее приемлемых сценариев поведения ППК. Сценарий в ССМ представляет собой временную последовательность достаточных ситуаций, определяющую конкретный вариант моделирования.

Определение 3. Сценарий называется *допустимым* на заданном интервале времени, если не содержит критических значений элементов вектора состояния. В противном случае он называется *запрещённым*.

Определение 4. Сценарий называется *безопасным* на заданном интервале времени, если не содержит критических и опасных значений элементов вектора состояния. В противном случае он называется *опасным*.

Определение 5. Из двух опасных сценариев предпочтителен имеющий меньшую сумму обобщённых затрат (13) для моментов времени, когда эти затраты превосходят единицу.

Определение 4. Сценарий называется *оптимальным* на заданном интервале времени, если он имеет наименьшую сумму обобщённых затрат (13) на этом интервале.

Определения 3 – 5 могут быть использованы для анализа результатов моделирования сценариев поведения ППК, но неконструктивны при решении задач управления, когда траектория объекта должна приходить в целевую область (в общем случае – при учете заданных ограничений на векторы состояния и управления). В таких задачах необходимо оценивать отклонение текущей траектории объекта от оптимальной в заданных условиях. Эти отклонения также можно вычислять на основе обобщённых затрат (13), но данный вопрос требует отдельного рассмотрения.

5. Выводы

Введены и проанализированы основные определения, обеспечивающие организацию моделирования динамических систем в обобщённом пространстве состояний, включающем как шкалированные параметры (параметры со строковыми значениями), так и переменные, которые принимают числовые значения. Для выполнения совместной логико-аналитической обработки таких параметров и переменных значения последних рассматриваются в дискретном пространстве, формируемом экспертным путём.

В предложенной постановке задача моделирования нормальной работы состоит в поиске последовательности достаточных ситуаций, непосредственно выводимых одна из другой и гарантирующих нахождение всех элементов обобщённого вектора состояния в допустимых диапазонах. При этом необходимое условие приемлемого функционирования системы заключается в наличии непустых отображений из начальной ситуации в каждую последующую в рассматриваемом сценарии.

Моделирование опасных и недопустимых (чрезвычайных) ситуаций сводится к перебору возможных мероприятий (воздействий, управлений) с целью поиска такого воздействия, которое в наибольшей степени снижает опасность ситуации в целом. Показателем опасности ситуации может служить степень превышения единицы величиной обобщённых затрат либо степень их отличия для текущей ситуации от ближайшей допустимой.

Литература

1. Фридман А.Я., Фридман О.В., Зуенко А.А. Ситуационное моделирование природно-технических комплексов. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2010. – 436 с.

2. Фридман А.Я. Ситуационный подход к моделированию промышленно-природных комплексов и управлению их структурой // Идентификация систем и задачи управления: труды IV международной конференции (Москва, 25-28 января 2005 г.). – М.: ИПУ РАН, 2005. С. 1075-1108.
3. Фридман А.Я., Яковлев С.Ю. Ситуационный подход к синтезу логической модели надежности и безопасности промышленно-природных комплексов // Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах: труды Международной научной школы МА БР - 2003 (Санкт-Петербург, 20-23 августа, 2003г.). – СПб.: СПбГУАП, 2003. С. 375-381.
4. Деруссо П., Рой Р., Клоуз М. Пространство состояний в теории управления. – М.: Наука, 1970. – 620 с.
5. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
6. Путилов В.А., Фильчаков В.В. Фридман А.Я. CASE-технологии вычислительного эксперимента. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1994. Т.1 – 249 с. ; Т.2. – 169 с.
7. Салуквадзе М.Е. Задачи векторной оптимизации в теории управления. – Тбилиси: Мецниереба, 1975. – 202 с.
8. Mahajan R. and Sneiderman B. Visual and textual consistency checking tools for graphical user interfaces. // IEEE Transactions on Software Engineering. Nov 97. P. 722-735.
9. Инструментальная система поддержки вычислительного эксперимента / Олейник А.Г., Смагин А.В., Фридман А.Я., Фридман О.В. // Программные продукты и системы. 1999. № 2. С. 7-13.
10. Forrester Jay W. Industrial Dynamics – A Major Breakthrough for Decision Makers // Harvard Business Review. 1958. Vol. 36. No. 4. P. 37-66.
11. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.

Expertspaceforsituationalmodellingofindustry-naturalcomplexes

*Alexander Yakovlevich Fridman, Dr. Sci. (Tech.), leading scientific researcher
Institute for Informatics and Mathematical Modelling of RAS*

A metric is proposed for a generalized state space that incorporates both string and numerical variables. The metric is used for situational modelling of static and dynamic parameters of industry-natural complexes including safety dimensions. The metric provides application of expert knowledge regarding danger degrees for different states of the object under investigation.

Keywords: dynamic spatial object, situational control, conceptual model, situational modelling, decision making

УДК 612.822:577.359

РОЛЬ ФОНА В ИЗМЕНЕНИИ МЕЖИМПУЛЬСНЫХ ИНТЕРВАЛОВ НЕЙРОНОВ ПРИ СВЧ ОБЛУЧЕНИИ

Рогнеда Александровна Чиженкова, докт.мед.наук, вед.науч.сотр.

Тел.: 4967739196; e-mail: chizhenkova@mail.ru

Институт биофизики клетки РАН

http://www.icb.psn.ru

На бодрствующих необездвиженных кроликах исследованы импульсные потоки популяций корковых нейронов сенсомоторной коры до, во время и после одноминутного СВЧ облучения (длина волны 37,5 см, ППМ 0,2-0,3; 0,4; 0,5 и 40 мВт/см²). Изменения межспайковых интервалов определялись интенсивностью излучения и не зависели от исходной фоновой активности.

Ключевые слова: СВЧ облучение, кора больших полушарий, нейронная активность