

ОНТОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНЫХ ОБЛАСТЕЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2001 С.В. Смирнов

Институт проблем управления сложными системами РАН, г. Самара

Объектом исследования является фаза концептуализации при моделировании сложных систем, в результате которой конструируется онтология актуальной предметной области в объектно-ориентированной форме. Предлагается метод анализа экспериментальных данных, устанавливающий связь между классическим прикладным анализом данных и анализом формальных понятий. При этом модифицируются правила формирования начального протокола исследования (таблицы "объекты-свойства"), вводится способ измерения структурных отношений между изучаемыми объектами, рассматриваются различные аспекты автоматизации конструирования структуры классов объектов (понятий) предметной области. Статья завершается обзором нашего инструментария для поддержки онтологического анализа.

Введение

Научные исследования, связанные с анализом и управлением сложными системами (производственными, социальными, экологическими и др.), актуальны, несмотря на большое число работ в этом направлении. Отчасти это объясняется тем, что, по мнению академика Н.Н. Моисеева "идеи фон Бергланфи, несмотря на их широкую рекламу, не внесли каких-либо методологических и конструктивных методов в анализ сложных систем. Новые механизмы не были раскрыты...", а математические приемы исследования в целом опирались на традиционные методы анализа сложных систем [1]. Вместе с тем определенные возможности решения этих проблем появились благодаря новым информационным технологиям, развивающимся в русле научного направления, обозначаемого как искусственный интеллект [2]. Конкретно мы выделяем здесь *системы моделирования, базирующиеся на знаниях, и формальные онтологии*, с построением которых в настоящее время связывается организация системы знаний о различных предметных областях и их целевого повторного использования [3-6].

Применение *онтологического подхода* в задачах компьютерного моделирования сложных систем начинается с аналитической работы по выделению и объединению релевантных онтологических и функциональных аспектов моделируемой системы в соответ-

ствующей *онтологии*. Фундаментальным вопросом такого *онтологического анализа* [7] является "объективация", выделение процесса конструирования онтологии *предметной области* (ПрО) моделирования из зоны интуиции экспертов-аналитиков.

Современные методологии структурного анализа и проектирования CASE-инструментов [8], различные технологии инженерии знаний [4] в общем случае не предлагают систематической процедуры или формализма, позволяющего "вывести" структуру понятий и отношений ПрО из доступных о ней данных, в частности, экспериментальных данных, получаемых в результате широко понимаемого *измерения* объектов исследуемой реальности. В этом смысле конструктивный выход обнаруживается в относительно новой ветви теории решеток - *анализе формальных понятий* (АФП) [9]. Однако известные нам работы на эту тему (библиография имеется в [7]) по сути дела ограничиваются адаптацией результатов математической теории для построения таксономической модели классов объектов в ПрО, в меньшей степени исследуют вопросы "объективного" формирования необходимых для этого первичных *формальных контекстов* (ФК) исследуемой ПрО и совсем обходят проблему описания *структурных* отношений между объектами ПрО (что никак не менее важно, чем та же таксономия классов). Известно, что наибольший

опыт автоматического обнаружения скрытых закономерностей в первичном экспериментальном или статистическом материале накоплен в *прикладном анализе данных* [10]. Здесь исходная структура данных – *таблица "объект-свойство"* (ТОС), обобщает упоминавшийся ФК, но используемые подходы к решению задач (в том числе и задач таксономии) основываются на принципах, которые весьма далеки от отправных положений АФП. При этом неоспоримое достоинство ТОС состоит в том, что они давно стали "общепринятым" и однозначно понимаемым способом отображения свойств наблюдаемого мира.

В данной статье отражен опыт установления связи между классическим прикладным анализом данных и анализом формальных понятий. Во-первых, в качестве исходных данных для онтологического анализа ПрО предлагается использовать двумерную ТОС, обобщая процесс ее формирования и вводя специальный способ измерения структурных отношений между эмпирическими объектами ПрО. Далее описывается формальное преобразование исходной ТОС в ФК и анализируется пригодность полученного ФК для автоматического конструирования понятий и отношений ПрО, приводятся результаты статистического моделирования этого процесса. В заключение кратко очерчивается разработанный инструментарий для проведения онтологического анализа, и делаются общие выводы.

Исходные данные о предметной области

Согласно господствующей познавательной парадигме для абстрагирования любой ПрО первичными и атомарными признаются категории "*объектов*" и *отношений* между объектами.

Отсюда формально ПрО как "эмпирическая система с отношениями" есть двойка (D, R) , где D – множество объектов ПрО, R – множество отношений между объектами (достаточно ограничиться исследованием бинарных отношений), $D \neq \emptyset$, $R \neq \emptyset$. Принимается, что схожие в определенном смысле объекты ПрО образуют непересекающиеся

классы: $D = \cup_{i \in iX} D_i$, $D_i \cap D_j = \emptyset$, $i \neq j$, $i, j \in iX$ – непустое множество индексов, например, $iX = \{1, 2, \dots, p\}$; дополнительно можно указать на $P_D(x)$ – априори неизвестное распределение объектов по классам. Далее полагают, что межобъектные отношения проявляются вследствие наличия у объектов ПрО определяющих *имманентных свойств*; множество всех таких различных свойств в ПрО суть $Pr = \{pr_j\}_{j \in jX}$ где jX – непустое множество индексов, например, $jX = \{1, 2, \dots, q\}$. Закономерным итогом такого взгляда становится вывод, что исходным эмпирическим материалом для абстрактного представления ПрО служит ТОС.

В соответствии с традицией строки *эмпирической* ТОС соответствуют объектам, которые попали в поле зрения исследователя при зондировании ПрО. На генезис столбцов зафиксировав следующую точку зрения.

Состав свойств (столбцов) ТОС отражает априорную оснащенность исследователя *измерительными процедурами* (от чувственного восприятия до приборных измерений с обработкой наблюдений [11]). Всякая подобная процедура характеризуется, во-первых, указанием на множество возможных результатов ее применения к "захватываемому" для изучения объекту ПрО и, во-вторых, способом упорядочивания результатов измерений и правилами оперирования этими результатами. Можно говорить, что состав измерительных процедур отражает наличие у исследователя набора *РН априорных гипотез* (P -гипотез), каждая из которых предполагает существование определенного измеримого свойства у эмпирических объектов и, как следствие, определенных отношений между данными объектами. Таким образом, для построения ТОС исследователь должен располагать *измерительной системой с отношениями* $MS = \{(mp_j, Sst_j, Rst_j)\}_{j=1, \dots, s}$, где Sst_j – априори известное, или стандартное, непустое множество символов, $Rst_j = \{rst_{jk}\}_{k=1, \dots, u}$ – конечный набор бинарных отношений на символах Sst_j , а mp_j – априори доступная измерительная процедура: $mp_j: D \rightarrow Sst_j$.

Согласно теории измерений и следующему ей прикладному анализу данных, если $\exists x, y \in D : (mp_j(x), mp_j(y)) \in rst_{jk}$, то в ПрО

отмечается существование эмпирического отношения $r_{jk} \in R$, для "отображения" которого используются компонента $ms_j \in MS$. Применительно к ТОС это означает заполнение j -го столбца символами из Sst_j , в отношении rst_{jk} между которыми оказываются представленными проявления эмпирического отношения r_{jk} . В целом это означает констатацию состоятельности в исследуемой ПрО P -гипотезы $ph_j \in PH$, которой соответствует j -я компонента системы MS : $ph_j \sim ms_j$.

Утверждение 2.1. Традиционный прикладной анализ данных исходит из состоятельности всех априорных P -гипотез, т.е. каждое соответствие mp_j полагается всюду определенным.

В самом деле, все классические задачи анализа данных в общей формулировке являются исключительно задачами *предсказания элементов* ТОС [10] (например, пропущенного значения свойства), тогда как вопрос о *существовании свойства* у рассматриваемого объекта *не ставится*. Следовательно, ТОС представляет ПрО как *однородное поле объектов*. В этих условиях решение задач классификации, или таксономии, объектов ПрО возможно только после введения какого-либо *критерия отбора*, что эквивалентно *расширению* состава свойств в ТОС [10]. С нашей позиции, это означает введение новой P -гипотезы, формулирующей условия выделения классов объектов. Причем данная гипотеза, в свою очередь, полагается состоятельной для рассматриваемой ПрО в целом, т.е. однородность эмпирических объектов *принципиально сохраняется*. Кроме того, содержание подобных гипотез требует при означивании элементов вновь вводимого столбца ТОС *консолидации информации* обо всех объектах в ТОС (или подмножестве этих объектов в ходе динамической таксономии), а это означает решение качественно иной задачи – собственно *задачи анализа данных*, чем рассматриваемая нами *задача формирования исходных данных* о ПрО. Отмеченные обстоятельства, разумеется, не ставят под сомнение подобные методы решения задач таксономии, но стимулируют изменение подхода к формированию исходной ТОС, а затем и поиск альтернативного пути к конструированию струк-

туры классов эмпирических объектов.

Представляется реалистичным, что при формировании ТОС всякое измерение может дать *специальный результат "None"*: $None \notin \cup_{j=1, \dots, s} Sst_j$. Такой результат может свидетельствовать, например, о том, что анализируемый объект и измерительная процедура семантически не сочетаются (ср. "синяя температура" [11]; разумеется, поэтические образы, например, оксюмороны, выходят за рамки предпринимаемого нами анализа), либо о том, что измеряемая величина лежит за порогами чувствительности, вне динамического диапазона измерительного прибора [12]. Формально это означает указание на частичную определенность соответствия mp_j и полную у $mp_j^*: D \rightarrow Sst_j \cup None$, которое и следует принимать как рабочее для системы MS .

Выдача измерительной процедурой значения *None* означает несостоятельность соответствующей априорной P -гипотезы о ПрО. Эта несостоятельность может оказаться *"полной"* (у всех исследованных объектов ПрО данное свойство имеет значение *None*) либо *частичной* (по меньшей мере для одного из изученных объектов зафиксирован результат рассматриваемого измерения, отличный от *None*). Второй случай более информативен и прямо указывает на *неоднородность* эмпирических объектов, обнаруживает существование в ПрО *классов* объектов.

Утверждение 2.2. Система MS в рассматривавшемся до сих пор представлении непригодна для измерения структурных отношений между объектами исследуемой ПрО.

Действительно, *структурные отношения* проявляются в наличии у объектов ПрО свойств *ссылочного типа* [13]. Значениями таких свойств являются ссылки на собственно эмпирические объекты, а не элементы некоторого априори заданного множества символов. Другими словами, измерение таких свойств возможно, когда $\exists j \in \{1, 2, \dots, s\}$: $Sst_j = D$, а это невозможно в силу априорной неопределенности D . Более того, поскольку эмпирические объекты неоднородны, то существует априори неизвестная типология рассматриваемых объектных ссылок (в общем случае необходимо было бы иметь $\forall i \in iX$

$\exists j \in \{1, 2, \dots, s\} : Sst_j = D_j$), а у самих объектов следует ожидать различий в способности вступать в структурные отношения. Таким образом, априори в распоряжении исследователя остается единственно набор выражений, денотатами которых являются известные ему абстрактные взаимосвязи между объектами ("отец", "находиться в" и т.п.), что в структуре MS определяет лишь компоненты Rst_j .

В этой ситуации мы предлагаем при формировании ТОС фиксировать факты "одностороннего" участия эмпирического объекта в структурных отношениях, указываемых априорными гипотезами SH о наличии тех или иных абстрактных взаимосвязей между объектами ПрО (S -гипотезами, $SH \cap PH = \emptyset$).

Поставим в соответствие каждой S -гипотезе $sh_k \in SH$ две компоненты системы MS – $sh_k \sim (ms_j, ms_{j+1})$, такие, что $Sst_j = Sst_{j+1} = N^+ \cup None$, $Rst_j = \{ИмяОтношения\}$ и $Rst_{j+1} = \{\sim ИмяОтношения\}$. Денотат символа *ИмяОтношения* – бинарное отношение между объектами, о существовании которого в исследуемой ПрО говорит избранная S -гипотеза, а $\sim ИмяОтношения$ – биективный образ этого символа (при условии синтеза последнего по правилам написания идентификаторов). Измерительная процедура tr_j^* дает отличный от *None* результат только в том случае, когда исследуемый объект ПрО участвует в отношении *ИмяОтношения* в качестве 1-го аргумента, а доставляемое при этом положительное натуральное число показывает кратность именно такого участия изучаемого объекта в рассматриваемом отношении. Аналогично действует процедура tr_{j+1}^* , задача которой – регистрация данных об участии эмпирического объекта в отношении *ИмяОтношения* в качестве 2-го аргумента. Устанавливаемые подобным измерением способности объектов ПрО вступать в различные взаимосвязи резонно называть валентностями [14] соответствующих видов.

Концептуальная объектно-признаковая модель предметной области

Введенные дополнения к классическому пониманию этапа формирования исходных данных о ПрО, дают возможность путем простых преобразований полученной ТОС вы-

делить классы эмпирических объектов, отражающие *разнородность* этих объектов и по составу измеримых свойств (в общем случае к ним относят и функциональные способности объектов [15]), и по способностям вступать в структурные отношения.

Подлежащая обработке эмпирическая ТОС имеет размерность $r \times s$, где $r = |D^*|$ – объем выборки $D^* \subseteq D$, $s = |SH \cup PH|$ – размерность измерительной системы MS . Сначала путем замены *None*-значений нулями, а всех прочих – единицами исходная ТОС преобразуется в матрицу инцидентности "объекты-свойства". Содержащейся в этой матрице информации оказывается достаточно для построения концептуальной объектно-признаковой модели ПрО. Соответствующий алгоритм подробно описан в [7]; в целом он базируется на добавлении и удалении определенных строк и столбцов в матрице инцидентности для достижения целей из следующего набора:

- выделение классов объектов (путем сохранения одного экземпляра из каждого множества совпадающих строк);
- исключение из модели полностью несостоятельных P -гипотез (удаление "нулевых" столбцов);
- исключение из модели полностью несостоятельных S -гипотез (удаление соответствующих пар "нулевых" столбцов);
- констатация существования класса непознанных объектов (добавление специальной P -гипотезы и, следовательно, добавление нового специально конструируемого столбца);
- констатация существования некоторого особенного класса объектов (несмотря на то, что в выборке D^* объекты этого класса отсутствуют) в силу "одностороннего" подтверждения S -гипотезы (добавление новой специально конструируемой строки).

В результате подобных преобразований получаем матрицу инцидентности размерности $p \times q$, $1 \leq p \leq r + |SH|$, $1 \leq q \leq s + 1$. Она определяет соответствие $I \subseteq G \times M$, где G – множество эмпирически обнаруженных классов объектов (т.е. *первичных понятий* в спецификации ПрО), а M – множество признаков, соответствующих компонентам априори

доступной измерительной системы (включая, быть может, дополнительный компонент для неопознанных объектов); очевидно, что $G \neq \emptyset, M \neq \emptyset, I \neq \emptyset$.

Объектно-признаковая модель (G, M, I) реализует в описании ПрО три из четырех ключевых форм абстракции семантического моделирования [16]. Классификация воплощается в наличии и составе G . Агрегирование обнаруживает себя в том, что агрегатом является образ элемента $g \in G$ относительно I : $\{m \mid m \in M, gIm\}$. Ассоциации объектов ПрО отражаются семантикой подмножества M , составленного валентностями.

Указанные формы абстрагирования лежат в основе *реляционного подхода* к моделированию мира, нашедшего, например, широкое признание в теории и практике баз данных. Онтологический подход дополнительно актуализирует абстракцию *обобщения*. Посредством этой абстракции схожие классы объектно-признаковой модели связываются с родовым объектом более высокого уровня – суперклассом (*абстрактным классом*, или *понятием*), и рассматриваются как его частные (видовые) случаи. В этом смысле онтология ПрО представляется как *модель, описывающая структуру классов* (как "реальных", т.е. зафиксированных в объектно-признаковой модели ПрО, так и абстрактных, построенных путем обобщения спецификаций реальных классов или, образно говоря, "над" реальными классами).

С позиций применения абстракции обобщения объектно-признаковые модели изучаются в АФП, где определенная нами тройка (G, M, I) известна как *формальный контекст* - ФК, а G и M именуется соответственно множествами (*формальных*) *объектов* и (*формальных*) *атрибутов*.

Иерархия классов предметной области

АФП определяет [9], что для любого множества $X \subseteq G$ объектов множество $X' = \{m \mid m \in M, \forall g \in X: gIm\}$ является набором их *общих* атрибутов, а для $Y \subseteq M$ множество $Y' = \{g \mid g \in G, \forall m \in Y: gIm\}$ составляют объекты, которые обладают *всеми* атрибутами из Y . Пара (X, Y) , где $X \subseteq G, Y \subseteq M$, на-

зывается (*формальным*) *понятием* контекста $K = (G, M, I)$, если $X = Y', Y = X'$. X именуется *объемом*, а Y - *содержанием* понятия (X, Y) : объем включает все объекты, которые принадлежат понятию, а содержание образуют атрибуты, которые совместно характеризуют объекты понятия.

$$B(K) = B(G, M, I) = \{(X, Y) \mid X \subseteq G, Y \subseteq M, X = Y', Y = X'\}$$

обозначает множество всех понятий контекста K .

Таким образом, АФП предлагает формализацию того, что рассматривают в аналитической философии и логике, исследуя смысл имен (символов), и отражают в известной схеме, получившей название "семантического треугольника". Формально-математическое содержание АФП можно охарактеризовать как прикладной анализ *соответствия Галуа*, устанавливаемого отношением I между подмножествами множеств G и M . Интересующее нас конструирование структуры обобщающих понятий "над" объектно-признаковой моделью связано с изучением *отношения порядка* на множестве всех понятий данного ФК.

Согласно АФП и в полном соответствии с традиционной логико-философской трактовкой формальное понятие (X_1, Y_1) называется *подпонятием* (т.е. является менее общим) другого понятия, или *обобщения*, (X_2, Y_2) , - обозначается $(X_1, Y_1) \leq (X_2, Y_2)$, - если $X_1 \subseteq X_2$, или, эквивалентно, $Y_1 \supseteq Y_2$. Это отношение порядка задает на множестве всех понятий ФК замкнутую решетку $(B(K); \leq)$, называемую *решеткой понятий* [9]. Важно отметить, что минимальное понятие, содержащее объект $g \in G$ в своем объеме, есть $\gamma g = (\{g\}', \{g\}'')$, а $\mu m = (\{m\}', \{m\}'')$ – максимальное понятие включающее атрибут $m \in M$ в своем содержании.

Решетка понятий может быть визуализирована с помощью ациклического размеченного орграфа – *диаграммы Хассе*, узлы которого представляют понятия, а дуги, изображающие отношение порядка, направлены из каждого узла лишь к его "соседям снизу". Таким образом, пути, исходящие из узла-понятия ведут ко всем узлам-подпонятиям. $\forall g \in G$ узел диаграммы, представляющий

понятие γg , маркируется идентифицирующим g выражением (именем объекта) "снизу", а $\forall m \in M$ узел-понятие μm помечается именем атрибута m "сверху".

Обзор и сравнение различных алгоритмов построения множества всех понятий ФК и его диаграммы Хассе имеется в [17]. Оригинальная версия подобного алгоритма, согласованная с целями онтологического анализа ПрО, представлена в [18], а в [7] обоснованы следующие положения.

Утверждение 4.1. Диаграмма Хассе может быть формально преобразована в иерархию классов-понятий с механизмом наследования признаков-атрибутов, где каждый член иерархии описывается набором *отличительных*, а характеризуется совокупностью *отличительных* и *унаследованных* от предков признаков.

Утверждение 4.2. Иерархия классов, полученная на основе преобразования диаграммы Хассе, в общем случае отражает множественное наследование признаков.

При этом формально всякий класс определяется как тройка (X, Y, Ch) , где X – объекты класса, Y – совокупность отличительных и унаследованных признаков, а Ch – отличительные признаки класса. По построению имеем:

- $(X, Y) \in \mathbf{B}^*(\mathbf{K})$ ($\mathbf{B}^*(\mathbf{K}) = \mathbf{B}(\mathbf{K}) \setminus (\emptyset, M) \setminus (G, \emptyset)$, если $(G, \emptyset) \in \mathbf{B}(\mathbf{K})$, иначе $\mathbf{B}^*(\mathbf{K}) = \mathbf{B}(\mathbf{K}) \setminus (\emptyset, M)$), а $Ch \subset Y \cup \emptyset$;
- класс (X_2, Y_2, Ch_2) обобщает класс (X_1, Y_1, Ch_1) , если $(X_1, Y_1) \leq (X_2, Y_2)$;
- в части отличительных признаков описания классов дизъюнктивны, т.е. $Ch_i \cap Ch_j = \emptyset, i \neq j$;
- множество образованных классов (т.е. онтологию ПрО) составляет объединение двух непересекающихся множеств: $\{(X, Y, Ch) \mid (X, Y) \in \mathbf{B}^*(\mathbf{K}), Ch = \{m \mid m \in Y, (X, Y) = \mu m\}\}$ и $\{(\{g\}, \{g\}', \emptyset) \mid g \in G, \|\{g\}'\| > 1\}$.

Таким образом, определен метод преобразования концептуальной объектно-признаковой модели в онтологию ПрО.

Эффективность онтологического анализа

В рассмотренной выше интерпретации

результат онтологического анализа – концептуальная модель, описывающая структуру классов, - существенно зависит как от объема и представительности выборки D^* объектов ПрО, так и состава P - и S -гипотез, выдвигаемых аналитиком. Поэтому уместен вопрос об эффективности предложенных методов и алгоритмов в зависимости от их параметров и условий применения. Качественные оценки такого рода удалось получить путем статистического моделирования процесса построения онтологии.

Устанавливая критерии эффективности онтологического анализа, во-первых, отмечаем *полноту* вовлечения экспериментальных данных о ПрО, а, во-вторых, - *формально-алгоритмический характер* преобразования концептуальной объектно-признаковой модели в онтологию ПрО. Если первое замечание носит скорее общеметодологический характер, то второе указывает на возможность и достаточность использования в качестве показателей эффективности характеристики объектно-признаковой модели, т.е. значительно более простой конструкции, чем итоговая иерархическая структура онтологии ПрО. Тем самым удается избежать проблем со сложностью и неоднозначностью измерений на множестве символьных объектов типа иерархий (см., например, [10]).

С учетом сказанного в качестве критериев эффективности были выбраны три показателя:

- p_1 - количество идентифицированных в ПрО классов объектов (равно p – количеству строк матрицы инцидентности объектно-признаковой модели ПрО, если в выборке D^* не обнаружено ни одного неопознанного объекта, иначе – $p - 1$);
- p_2 - количество классов ПрО, которые не были идентифицированы (объекты каждого такого класса в результате анализа ошибочно отнесены к одному из "идентифицированных" классов; ошибка *первого рода*);
- U - количество классов ПрО, которые не были опознаны (т.е. все измерительные процедуры системы MS применительно к объектам этих классов выдавали исключительно результат *None*; ошибка *второго рода*).

Если допустить, что число различных

классов объектов в ПрО конечно и равно p_0 , то справедливо равенство $p_1 = p_0 - p_2 - U$, и, следовательно, в эксперименте достаточно было наблюдать за двумя из трех показателей.

Имитатором ПрО в экспериментах служили объектно-признаковые модели размерности $p_0 \times q_0$, где $q_0 > 1, p_0 \in (1, 2^{q_0})$, а плотность заполнения модели определяла величина $E_{p_0} \in (0, p_0]$ – среднее количество классов ПрО, объекты которых характеризуются отдельно взятым свойством ПрО. В экспериментах ТОС сразу имела вид матрицы инцидентности, что допустимо в силу формально-алгоритмического характера преобразования исходной ТОС к такому виду.

Имитация измерительной системы сводилась к случайному отбору q свойств ПрО, которые принимались как измеряемые свойства захватываемых объектов ПрО; $q \in (0, q_0]$ - диапазон варьирования этим "управляемым параметром" онтологического анализа.

В основной серии экспериментов исследуемый процесс имитировался без учета влияния представительности выборки D^* , что эквивалентно $r = |D^*| \rightarrow \infty$. Это означало использование в качестве исходной ТОС непосредственно объектно-признаковой модели, имитировавшей ПрО. На рис. приведен типичный пример наблюдавшейся зависимости оценок среднего исследовавшихся критериев (в процентах к p_0 ; в экспериментах точность оценок с достоверностью 0,95 была не хуже 5 %) от количества измеряемых свойств q при $p_0 = 60$ классах объектов в ПрО, $E_{p_0} = p_0 / 2$ и трех различных случаев количества свойств, характеризовавших ПрО: $q_0 \in \{30, 60, 120\}$. Как и во всех подобных экспериментах обнаруживается независимость исследуемых показателей от величины q_0 . Анализ этих фактов приводит к следующим важным качественным выводам:

- идентификация классов ПрО в большей степени зависит от количества, чем от состава имеющихся в распоряжении исследователя различных измерительных процедур;
- количество различных измерительных процедур, которые необходимы для различения

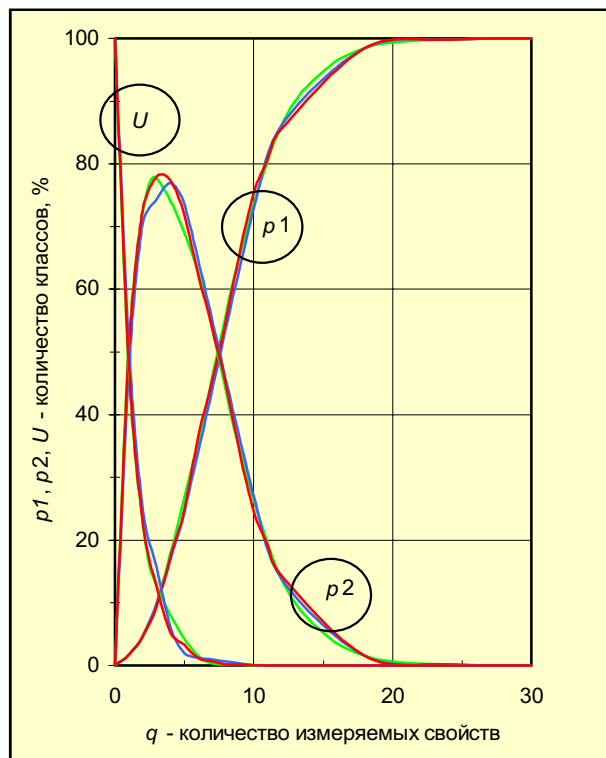


Рис. Зависимость среднего критериев эффективности онтологического анализа от количества измеряемых свойств предметной области

ния классов ПрО, не зависит от мощности множества признаков, характеризующих эту ПрО;

- выбор измерительных процедур (отбор принимаемых во внимание свойств ПрО) следует прежде всего связывать с целями анализа ПрО, т.е. субъективно понимаемыми "ценностью", "качеством" свойств ("свобода состава");
- "свобода состава" принимаемых во внимание свойств ПрО делает естественной множественность онтологий ПрО, по-разному описывающими одни и те же реальные классы объектов и поэтому отличающихся как учитываемыми отношениями между объектами, так и входящими в них абстрактными обобщающими понятиями.

В дополнительной серии экспериментов величина избранных критериев оценивалась в зависимости от объема выборки D^* и энтропии распределения $P_D(x)$ объектов ПрО по классам; результаты этой серии имели в целом предсказуемый характер и не внесли коррективов в представленную выше качественную картину.

Инструментальная поддержка

В очерченном выше объеме онтологический анализ поддержан в новой версии *Мастера схем* - одного из встроенных приложений объектно-ориентированной системы моделирования *gV* [6, 19]. Теперь это приложение располагает двумя свободно переключаемыми режимами функционирования.

В *режиме схем* приложение поддерживает прямое конструирование экспертом-аналитиком концептуальных схем ПрО (т.е. онтологий предметных областей моделирования в форме иерархий классов, включая их свойства, методы и структурные отношения) с автоматическим порождением объектно-ориентированных баз данных для размещения денотативных, или объектных моделей в ПрО [6]. В новой версии добавлена возможность *реконструкции* ФК по данной онтологии (т.е. функция *обратного проектирования*), что, в частности, позволило эффективно реализовать операцию *объединения концептуальных схем* - мощного инструмента интеграции знаний на этапе онтологического анализа ПрО [18].

В *режиме контекстов* выполняются методы анализа, описанные в данной статье: интерактивное формирование исходных сведений о ПрО в форме ТОС, автоматические преобразование ТОС в ФК и конструирование концептуальной схемы ПрО по ФК (*прямое проектирование*), симметрично режиму схем имеется принципиально важная операция *объединения контекстов*. Разумеется, пользователь освобожден от необходимости знать точную математическую семантику возникающих при этом структур и выполняемых операций. С инструментом его связывает графический интерфейс с привычным образом ТОС и ФК, панелями управления и совокупностью интерактивных форм для ввода/редактирования имен, значений и других описаний исходной информации о ПрО.

Таким образом, инструментальная поддержка онтологического анализа осуществлена с совмещением работы Мастера схем в двух различных ПрО: первая описывается рекурсивной "Схемой схем" [6, 20], вторая – схемой, основу которой составляет семантический треугольник. Работа с денотативной мо-

делью в одной из этих ПрО включает возможность автоматического порождения соответствующей денотативной модели в другой рабочей ПрО, что и составляет основное содержание автоматизации онтологического анализа.

Заключение

1) Аналитическая работа с целью выделения и объединения релевантных инфологических и функциональных аспектов предметной области моделирования в соответствующей формальной онтологии определена как онтологический анализ.

2) В предложенной интерпретации онтологический анализ вбирает в себя элементы методологий классического прикладного анализа данных и относительно новой ветви теории решеток - анализа формальных понятий. В работе приведены необходимые определения и очерчены основные алгоритмы такого подхода.

3) Результаты экспериментального исследования эффективности процедур онтологического анализа позволяют дать качественное объяснение основному феномену фазы концептуального анализа в задачах моделирования сложных систем - возможности формирования и сосуществования нескольких концептуальных моделей-онтологий для данной предметной области.

4) Предложенный в работе аналитический арсенал онтологического анализа получил адекватную компьютерную поддержку (в удобном и доступном в квалификационном смысле для непрограммирующих экспертов предметных областей) в одном из встроенных приложений общецелевой системы моделирования *gV*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мусеев Н.Н.* Тектология Богданова - современные перспективы // Вопросы философии. 1995. № 8.
2. *Поспелов Г.С.* Искусственный интеллект – основа новой информационной технологии. М.: Наука, 1988.
3. *Guarino N.* Formal ontology, conceptual analysis and knowledge representation // Int. J.

- of Human Computer Studies. V.43. 1995. №5/6.
4. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2000.
 5. Девятков В.В. Онтологии и проектирование систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2000. №1.
 6. Смирнов С.В. Онтологии в задачах моделирования сложных систем // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды II международной конф. Самара: СНЦ РАН, 2000.
 7. Смирнов С.В. Онтологический анализ: определения и алгоритмы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды III международной конф. Самара: СНЦ РАН, 2001.
 8. Калянов Г.Н. CASE структурный системный анализ (автоматизация и применение). М.: Лори, 1996.
 9. Wille R., Ganter B. Formale Begriffsanalyse. Springer-Verlag, 1996.
 10. Загоруйко Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. Новосибирск: Изд-во Института математики СО РАН, 1999.
 11. Рубаишкин В.Ш. Представление и анализ смысла в интеллектуальных информационных системах. М.: Наука, 1989.
 12. Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств. Л.: Энергия, 1968.
 13. Киндлер Е. Языки моделирования. М.: Энергия, 1985.
 14. Философский энциклопедический словарь. М.: Инфра-М, 1997.
 15. Кораблин М.А., Смирнов С.В. Наследование свойств в задачах объектно-ориентированного программирования на языке Модуль-2 // Программирование. 1990. №4.
 16. Замулин А.В. Типы данных в языках программирования и базах данных. Новосибирск: Наука, 1987.
 17. Кузнецов С.О., Обьедков С.А. Алгоритмы построения множества всех понятий формального контекста и его диаграммы Хассе // Известия академии наук РАН. Теория и системы управления. 2001. № 1.
 18. Виноградов И.Д., Смирнов С.В. Алгоритм объединения концептуальных схем на основе формального контекста // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды III международной конф. Самара: СНЦ РАН, 2001.
 19. Смирнов С.В. Среда моделирования для построения инженерных теорий // Известия Самарского научного центра РАН. 1999. №2.
 20. Смирнов С.В. Онтологическая относительность и технология компьютерного моделирования сложных систем // Известия Самарского научного центра РАН. Т.2. 2000. №1.

ONTOLOGICAL ANALYSIS OF MODELING DOMAINS

© 2001 S.V. Smirnov

Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences, Samara

This article describes a conceptualizations phase in systems modeling which result is ontology of the modeling domain in the object-oriented form. The offered data analysis method bridges the gap between a data mining and formal concept analysis. Formation of the initial protocol of research (table "objects-properties") at first is specified. In particular the special description of relations between objects is added. This table will automatically be transformed to a formal context. Then the class structure model with interclass relations can be identified during formal concept analysis. The article ends by review our toolkit for support of ontological analysis.

ОТКРЫТЫЕ МУЛЬТИАГЕНТНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРОЦЕССОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ

© 2001 П.О. Скобелев

Институт проблем управления сложными системами РАН, г. Самара
Маджента Девелопмент, г. Самара

В статье рассмотрены основные принципы построения открытых мультиагентных систем для поддержки процессов принятия решений, базирующиеся на механизмах самоорганизации и эволюции. Рассмотрены особенности применяемого холистического подхода к построению указанных систем, представлена структура разработанных инструментальных средств для их реализации, а также показаны примеры применения указанных систем в области управления предприятиями, логистики и электронной коммерции.

Введение

В последнее время задачи управления предприятиями становятся все сложнее и динамичнее, что отражает современные тенденции перехода от жесткого массового к гибкому индивидуальному производству, расширения производственной интеграции и кооперации, сокращения всего жизненного цикла разработки изделий и т.п. [1].

В этих условиях менеджерам и специалистам предприятий становится все труднее принимать качественные и эффективные решения, обеспечивающие предприятию успех на рынке [2]. И в первую очередь решений, связанных с оптимальным распределением имеющихся и, как правило, ограниченных ресурсов: финансовых, производственных, человеческих и т.д. На какой срок, в каком объеме и под какие проценты целесообразно взять кредит? Какова стоимость и сроки работ по данному проекту? Каков оптимальный объем заказа комплектующих изделий? Как распределить проекты по исполнителям и субподрядчикам? Какую цену установить на продукцию? Все эти решения, определяющие деятельность предприятия на значительный период времени, менеджерам приходится принимать в условиях постоянного изменяющегося окружения, действия множества "не"-факторов (неопределенности, неполноты знаний, недостоверности информации), на основе дополнительных сведений, получаемой от заказчиков и партнеров в ходе пе-

реговоров в процессе самого решения проблемы, при конкуренции и кооперации нескольких сторон с различными, и часто противоположными интересами и т.д.

При этом возможности применения традиционных подходов к принятию решений, базирующихся на методах системного анализа, имитационного моделирования, исследования операций, теории игр и ряда других, ставшими уже классическими методов, оказываются весьма ограничены [3]. Так в системном подходе любое сложное взаимодействие представляется через работу более простых и независимых подсистем, которые в случае рассмотрения организаций и людей часто оказываются взаимозависимыми друг от друга или, по крайней мере, существенно влияют друг на друга; в исследовании операций процесс принятия решений заключается в нахождении оптимальной стратегии поведения в заданных условиях, которые, однако, на самом деле все время меняются и пересматриваются; при имитационном моделировании формализованная модель объекта или процесса никак не может пополняться или уточняться "на ходу", любые изменения требуют остановки процесса моделирования, ручного внесения изменений в модель и перезапуска этого процесса; в теории игр правила поведения игроков также заранее определены и известны для всех игроков, им известны все участники и т.д.

Для решения этой проблемы становятся

необходимы качественно новые интеллектуальные программные системы для поддержки процессов принятия решений. При этом кардинально новой методической основой для создания указанных систем могут стать подходы в области синергетики, базирующиеся на изучении явления самоорганизации [4]. В отличие от системного подхода, стремящегося механистически разделить объект или процесс на независимые составные компоненты, в синергетике предметом рассмотрения становятся динамические совместные или кооперативные взаимодействия автономных частей системы, которые приводят к возникновению устойчивых пространственно-временных структур и состояний равновесия (аттракторов). В рамках самоорганизующихся структур возникают эффекты поддержания устойчивости и живучести их компонент, что приводит к состоянию гомеостаза всей системы в целом, равно как и различным эффектам нелинейности и нестационарности, явлениям хаоса и катастроф, после которых система имеет способность восстанавливаться и даже переходить в более устойчивые состояния.

Вместе с тем, как это ни странно, для сложных самоорганизующихся систем, функционирующих в изменчивом динамичном окружении, именно работа на границе хаоса оказывается наиболее эффективной [5].

Разработке и применению таких систем для поддержки процессов принятия решений (далее – принятия решений) и посвящена настоящая работа.

Мультиагентные системы для принятия решений

Один из возможных путей создания указанных систем связывается с мультиагентными системами (МАС), получивших стремительное развитие в последнее десятилетие [6-8]. Ключевым элементом этих систем становится автономный программный агент, способный воспринимать ситуацию, принимать решения и коммуницировать с другими агентами. Эти возможности радикально отличают МАС от существующих "жестко" организованных программных систем, обеспечивая им такое принципиально важное новое свой-

ство, как способность к самоорганизации. При этом отдельные автономные "части" программы впервые получают возможность самостоятельно принимать решения и договариваться о том, как должна решаться задача, эти "части" приобретают собственную активность и могут вступать в различные отношения между собой, инициировать диалог с пользователем в заранее не предписанные моменты времени и т.д.

Вместе с тем, перечисленных возможностей МАС оказывается недостаточно для построения систем рассматриваемого класса [9-10]. Дело в том, что действительно сложные самоорганизующиеся программные системы поддержки принятия решений должны быть построены как открытые системы, способные самостоятельно приобретать новые знания и изменять свою структуру и функции, развиваясь и адаптируясь вместе с предприятием к изменению условий во внешней среде. Таким образом, открытость рассматриваемых систем предполагает наличие развитых механизмов самоорганизации и эволюции, базирующихся на приобретении и использовании знаний. Для этого такие системы должны постоянно "жить" на сервере предприятия, непрерывно осуществлять мониторинг ситуации и участвовать в решении задач, а не быть запускаемыми от случая к случаю, быть связанными с конечными результатами деятельности, конкурировать между собой для его достижения и выживать в ходе "интеллектуального" естественного отбора. Кроме того, рассматриваемые системы должны позволять пользователю "на ходу" вводить новые знания и компоненты без какого-либо ее останова и перезапуска, и самостоятельно инициировать приобретение новых знаний. Наконец, такие системы сами должны накапливать историю, извлекать из нее новые знания и на этой основе изменять свое поведение с течением времени.

Взаимодействуя между собой, самоорганизующиеся и эволюционирующие системы стремятся достичь повышения эффективности своего функционирования и для этого изменяются сами – в свою очередь, изменяя среду окружения для всех участников взаимодействия, что приводит к появлению про-

цессов ко-эволюции между системами и средой и раскрывает смысл функционирования "на границе хаоса". Как следствие, неопределенность оказывается неперенным условием такого функционирования, поскольку невозможно предугадать заранее все изменения в таком динамичном окружении, что делает жизненно важным свободный обмен информацией между всеми участниками взаимодействия [5].

Следует заметить, что подобное понимание "открытости" выходит далеко за рамки классических представлений о работе современных систем поддержки принятия решений и оказывается тесно связанным с понятием эмерджентного интеллекта (возникающего самопроизвольно и спонтанно за счет динамического взаимодействия относительно простых составных частей), восходящим еще к работам М. Минского. Сходные идеи по созданию открытых самоорганизующихся систем, функционирование которых напоминает жизнь колоний пчел или муравьев, были выдвинуты биологом А.Кестлером, который ввел понятие "холона" - элемента, одновременно обладающего чертами и части, и целого, получившего в последствие применение в гибких производственных системах. В физике идеи самоорганизации в открытых системах, работающих на протоке энергии, оказались в фокусе работ И.Пригожина по исследованию механизмов возникновения порядка из хаоса. Очевидно, что такое понимание "открытости" полностью опровергает весьма распространенное мнение о том, что "все программные системы открыты" - только потому, что потенциально допускают изменение своего исходного текста разработчиком.

Вместе с тем, несмотря на всю привлекательность и перспективность подходов, связанных с созданием открытых МАС (ОМАС) с элементами самоорганизации и эволюции, их практическое применение на деле оказывается весьма сложной задачей. И не только потому, что даже простые МАС относятся к традиционно самым сложным сферам разработки программных систем, на стыке между системами искусственного интеллекта, параллельных вычислений, телекомму-

никаций, реального времени. Главная причина в том, что научные и методические основы разработки самоорганизующихся и эволюционирующих систем еще слишком мало исследованы и разработаны, и потому разработчики сталкиваются со значительными трудностями в подходах к проектированию как виртуальных сред для функционирования агентов и их сообществ, так и самих агентов в части разработки универсальных механизмов их памяти и мышления, языков представления знаний, сенсоров и исполняющих механизмов, способов и средств коммуникации и т.д. Как следствие, первые разработки МАС в настоящее время не являются открытыми в указанном смысле, ориентированы преимущественно на применения только в области относительно простых задач e-коммерции и поиска в Интернет, не учитывают принципы организации современных предприятий, не имеют развитых возможностей представления и использования соответствующих корпоративных знаний, сложны в разработке, не располагают необходимыми инструментальными системами, не обеспечивают большое число агентов и высокую скорость работы и т.д.

Перечисленные обстоятельства делают актуальной и практически значимой задачу разработки новых подходов, методов и средств создания ОМАС для поддержки процессов принятия решений. В будущем подобные системы могут быть использованы при принятии решений не только в управлении предприятиями, но и в задачах научных исследований, проектирования сложных технических объектов, моделирования коллективного поведения интеллектуальных роботов и многих других применениях.

Холистический подход к созданию ОМАС для принятия решений

Для создания ОМАС в работе [11] был предложен холистический подход, базирующийся на идеях холизма А.Кестлера. В соответствии с предлагаемым подходом агенты рассматриваются как некоторые автономные "целостности" (организмы), заботящиеся как о своем функционировании, так и развитии, а виртуальная организация агентов в МАС

представляется как виртуальный рынок, на котором взаимодействуют агенты, представляющие интересы и действующие от лица и по поручению не только людей (менеджеров и специалистов предприятия), но и любых других физических или абстрактных существ, от машин и механизмов, их узлов и деталей - до концепций и методов, формул и диаграмм, кластеров и других абстрактных объектов.

Простейшие варианты организации мультиагентного сообщества при решении задач по распределению ресурсов могут быть основаны на взаимодействии агентов заказов и агентов ресурсов, выполняющих поиск соответствия (четкий или нечеткий матчнинг) на рынке предприятия. Эти агенты, в обобщенном виде представляющие собой некоторые "возможности" и "потребности", ищут себе подходящие пары подобно тому, как делают это клетки мужских и женских особей или заряды разных знаков. При примерном совпадении, например, двух свойств из пяти устанавливается более мягкая связь, если же наблюдается более точное совпадение всех пяти свойств – устанавливается более жесткая связь. Установление и поддержание связи может требовать некоторых расходов, вследствие чего невостребованные связи могут с течением времени разрушаться и исчезать.

При этом агенты могут не только решать различные задачи и для этого обеспечивать свое функционирование, но и заботиться о своем развитии, т.е. изменении представляемых ими существ, будь-то указанные люди, машины или абстрактные поэты, или установлении новых связей между ними. Конкурируя и кооперируясь между собой при заключении "сделок" для совместного решения возникающих задач (для чего агенты могут использовать развитые экономические механизмы, включая договора на взаимные услуги, долевое участие в прибыли, инвестиции, налоги, счета и т.д.), агенты могут обеспечить системе новые возможности в самоорганизации для постоянного приспособления к изменяющейся ситуации. Более того, в прямой зависимости от успеха своей деятельности, агенты могут накапливать и приумножать прибыль (как, например, аген-

ты хорошо продаваемых товаров), тем самым расширяя свои возможности и используя эти возможности для собственного развития (а с ними и развития всей системы), или, наоборот, постепенно терять прибыль, разоряться, погибать и исчезать из системы, обеспечивая таким образом естественную эволюцию системы.

Одним из наиболее эффективных механизмов функционирования ОМАС становится такая модель виртуального сообщества агентов, в которой прибыль предприятия от принятых решений распределяется пропорционально фиксированному или динамически определяемому вкладу каждого из агентов, что позволяет агентам постоянно иметь "обратную связь" по отношению к принимаемым решениям, видеть и оценивать свой вклад в общую прибыль и непрерывно искать пути для поиска новых решений, повышения эффективности своей работы и, как следствие, улучшения работы предприятия в целом [12].

Метод компенсаций для принятия и пересмотра решений

Развитие рассмотренного подхода привело к созданию метода компенсаций, позволяющего агентам заказов и ресурсов пересматривать установленные ранее отношения и за счет этого существенно усилить механизмы самоорганизации и эволюции в системе. Суть метода состоит в том, что каждый из агентов, располагающий прибылью, может использовать эту прибыль для пересмотра ситуации на рынке в случае, когда ему не удается подыскать подходящий свободный ресурс. В этом случае он может использовать свой резерв для перебронирования уже занятых ресурсов – но только в том случае, если с этим согласится заказ, ранее забронировавший данный ресурс. Для этого ему предлагается некоторая компенсация, позволяющая покрыть затраты на первичное бронирование, забронировать для себя новый ресурс и еще получить компенсацию за "моральный ущерб", связанный с необходимостью искать новый ресурс, если конечно это оказывается возможно.

Рассмотрим применение метода на примере из электронной коммерции при прода-

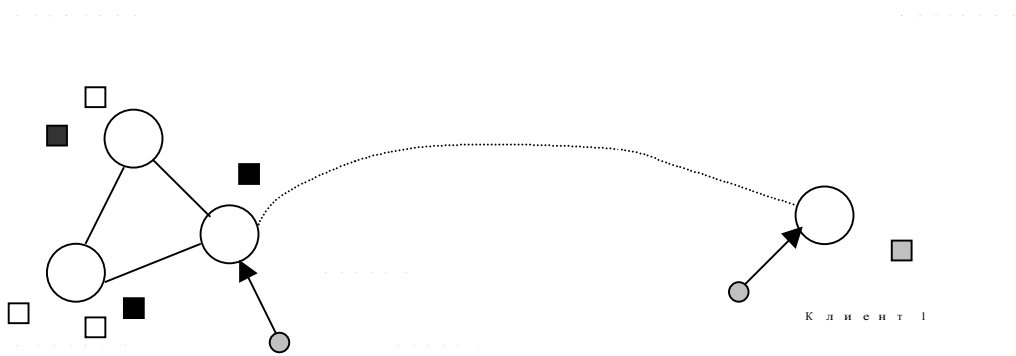


Рис. 1. Сеть дилеров, наличие заказов и автомобилей на складах (большие кружочки – дилеры, маленькие кружочки – заказы, маленькие квадратики – автомобили разного цвета, имеющиеся на складах или в пути к клиентам)

же автомобилей через Интернет-портал.

Пусть имеется сеть международная сеть дилеров в Германии и Бразилии, обладающих собственными складами и транспортными средствами доставки автомобилей. Каждый заказ, дилер, склад, транспортное средство и автомобиль имеют своих агентов, способных коммуницировать между собой.

Пусть в данный момент в сети имеется и исполняется заказ 1, связанный с поставкой автомобиля марки Мерседес красного цвета, с открытым верхом по цене 50 000 у.е. в один из городов в Бразилии. В текущий момент времени данный автомобиль уже оплачен и находится на заключительной стадии поставки в перевозчике (транспортном средстве) в 300-х метрах от дома покупателя, который заказал данный автомобиль месяц назад.

Предположим теперь, что к одному из дилеров в Германии приходит покупатель, который собирается через 2 недели жениться, и который хотел бы к своей свадьбе иметь именно такой автомобиль – но таких автомобилей в текущий момент времени нет более ни у одного дилера в Германии.

В этой ситуации агенты заказов и ресурсов попытаются найти варианты, которые устроят все заинтересованные лица. Если заказ 2 не находит ни одного свободного автомобиля, подходящего клиенту 2, он обращается к автомобилям, находящимся в процессе доставки потребителям, сразу обнаруживая автомобиль в Бразилии. Тогда этот заказ обращается к данному автомобилю с просьбой рассмотреть возможность его об-

ратной поставки в Германию. Для этого автомобилю придется обратиться к своему заказу 1, а тому – к владельцу автомобиля с предложением рассмотреть варианты.

Но сначала заказ 1 пытается выяснить у своего дилера, когда возможна будет поставка нового автомобиля с аналогичными параметрами. Предположим, это станет возможно только через 1 месяц, т.е. для первого клиента срок ожидания увеличивается в два раза. По самой простейшей стратегии переговоров агент заказа 1 тогда может потребовать от заказа 2 скидку в 50% в порядке компенсации за такое двойное удлинение ожидания для своего клиента. Однако для такого решения нужно получить одобрение от самого владельца, который может и не согласиться на предлагаемые условия.

Пусть хозяин автомобиля соглашается подождать еще месяц в силу своих жизненных планов. Тогда заказ 1 немедленно разбронирует автомобиль 1, стоимость которого для заказа 2 становится равной его начальной стоимости и будущей компенсации первому заказу и старому владельцу: $50\,000 + 25\,000 = 75\,000$ у.е. Теперь заказу 2 остается только предварительно договориться с авиакомпанией о возможности привезти этот автомобиль назад в Германию в течение 2-х недель. Предположим, что такое согласие получено и стоимость доставки автомобиля назад в Германию с учетом компенсаций другим грузам оказалась равна еще 40 000 у.е., т.е. полная стоимость автомобиля теперь станет $50\,000 + 25\,000 + 40\,000 = 115\,000$ у.е. Если дилерская наценка составляет 10% от стоимос-

ти заказа, то окончательная цена данного автомобиля для клиента составит $115\ 000 + 11\ 500 = 126\ 500$ у.е.

Именно эта цена и предлагается теперь клиенту 2, который в порядке обоснования может увидеть всю цепочку принятых решений. В зависимости от его решения поставка автомобиля будет мгновенно остановлена, грузовик развернется и поедет обратно в аэропорт, либо новые договоренности будут отменены.

Инструментальные средства для создания ОМАС для принятия решений

Для реализации разработанного подхода и практического создания прикладных ОМАС были разработаны инструментальные средства на платформе Windows NT, существенно упрощающие и ускоряющие процесс их разработки и делающие возможным создание новых приложений не только для прикладных программистов, но и для рядовых пользователей.

В отличие от известных мультиагентных систем, реализуемых, как правило, на основе Java-классов, в данной разработке изначально был взят курс на создание собственной среды разработки и функционирования агентов, способной гарантировать системе высокую производительность и большое число агентов, необходимое для промышленных применений, а также полный контроль на этапе исполнения.

Первая система MADAE: Multi-Agent Engine for Desktop Applications специализирована для построения мультиагентных десктопных ОМАС - приложений на базе локальных сетей. Эта система ориентирована на создание моделирующих систем, отличается возможностью низкоуровневого программирования простых агентов на уровне языка Object Pascal и обеспечивает высокую эффективность приложений. На основе этого инструмента были построены системы логистики, извлечения знаний, понимания текста.

Вторая система MA WAE: Multi-Agent Engine for Web-Based Applications, предназначена для построения ОМАС в сети Интернет. Эта система отличается высокой гибкостью

и возможностью работы в реальном времени и специализирована не только создания систем электронной коммерции, но и интегрированных Интернет-порталов, систем дистанционного обучения и других подобных мультипользовательских приложений. Эта система предоставляет пользователю интерактивные средства для создания онтологий и дает возможность создания библиотек расширений в C ++.

Для обеспечения возможностей пользователя по самостоятельному созданию прикладных мультиагентных систем, были также разработаны средства визуального конструирования и представления корпоративных баз знаний (онтологий), включающие конструктор и отладчик онтологий, а также интегратор знаний.

Результаты испытаний разработанных систем показали их высокую эффективность. Так в испытаниях десктопной версии инструмента на компьютере близкой к стандартной конфигурации под Windows NT система показала возможность поддержки до 500 000 агентов с предельной скоростью до 40 000 сообщений в секунду. Это существенно превышает характеристики существующих систем с агентами, построенными на основе Java-классов и, тем более, софтверов.

Первый опыт применения разработанных систем показал их широкие возможности и удобство использования даже для начинающих программистов. При этом полное освоение подхода и создание первых прототипов систем занимало всего лишь 1-2 месяца.

Примеры применения разработанного подхода

На основе разработанного подхода и инструментальных средств были созданы первые рабочие версии и действующие макеты-прототипы различных прикладных холистических ОМАС для поддержки принятия решений.

В системе для *управления деятельностью предприятия* [13] каждый сотрудник, все заказы, работы, продукты на складе, помещения, знания людей, материалы и все другие ресурсы имеют своих агентов. Все эти агенты принимают активное участие в перегово-

рах по планированию работ по проектам и их он-лайн перепланированию при изменениях ситуации, связанных с появлением нового проекта или отменой старого, появлением нового ресурса или выходом из строя какого-либо старого ресурса, задержкой при исполнении определенного вида работ, неподготовленностью ресурса и т.д.

Рассмотрим характер переговоров агентов работ при появлении новой работы. Пусть в первоначальный момент у некоторого сотрудника предприятия имелось три работы P1, P2 и P3 с дедлайнами, представленными на рис.2. Предположим теперь, что появляется новая работа P4, которая имеет дедлайн с самым ранним сроком, порождающим конфликт с работой P1. Агент работы P4 инициирует агента работы P1 и спрашивает его, может ли он уступить свою позицию в расписании человека? Агент работы P1 проверяет свой дедлайн и обнаруживает, что имеет запас и потенциально мог бы переместиться, но образуется конфликт с работой P2. Начинаются аналогичные переговоры между P1 и P2, если из онтологии известно, что эти работы независимые и результат P1 не поступает на вход P2. Как видно из рисунка, P2 не имеет запаса по дедлайну и в данном случае не может быть сдвинута на более поздний срок, но зато может быть поставлена на более ранний срок, где имеется подходящее временное окно. В результате быстро находится вариант, который разрешает конфликт между работами P4 и P1, и P4 обращается к пользователю с просьбой утвердить изменения в его расписании. Таким образом, сложившаяся на некоторый момент времени структура расписания при приходе новой работы частично (локально) разрушилась, после чего воссоз-

далась новая структура расписания, отражающая новый баланс интересов между всеми работами. При этом разрушение и восстановление данной структуры было осуществлено самими работами, в ходе переговоров и принятия решений на основе знаний о себе самих, включающих описания возможных последовательностей работ, их приоритетов, длительности и т.д.

Кроме того, агенты в настоящей системе могут заботиться о сохранности или развитии своего типа ресурса. Например, агент компьютера ищет ближайшее "окно" в работах своего хозяина и планирует работы по сохранению содержимого диска или его замене по истечению срока службы. Если же агент знаний обнаруживает, что его хозяин не смог в очередной раз получить работу по новому проекту по причине отсутствия необходимых умений в работе с некоторым пакетом программ, он находит первое свободное "окно" в его расписании и планирует работу по освоению этих знаний с целью поднять его конкурентоспособность на внутреннем рынке предприятия. Таким образом, рассмотренная система заставляет каждого сотрудника эволюционировать и, как следствие, эволюционирует и все предприятие в целом.

Аналогичные процессы самоорганизации и эволюции наблюдаются в разработанной системе автомобильной логистики [14], в которой сложившаяся сложная структура исполнения заказов неожиданно лавинообразно может начать разрушаться с приходом нового заказа, обладающего, казалось бы, небольшой прибылью (энергией) – после чего образовывалась структура совершенно новой конфигурации. При этом агент склада, наблюдая изменяющиеся потребности рынка, мог

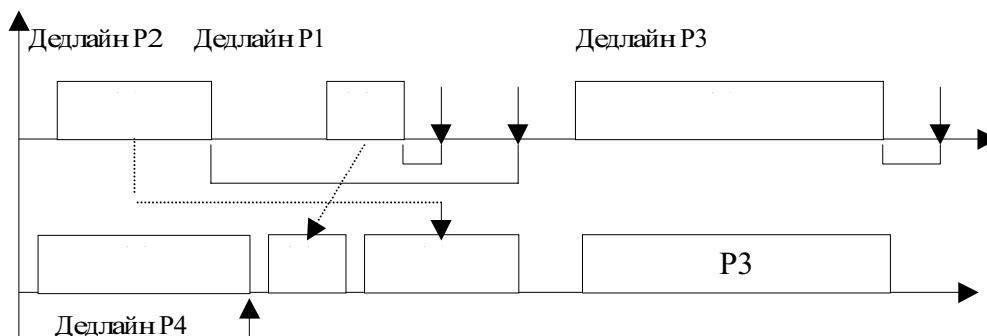


Рис. 2. Перепланирование работ при появлении новой работы

закупать наиболее популярные детали или принимать решения по сокращению или увеличению складских помещений, тем самым осуществляя постоянную адаптацию и эволюцию фабрики. В этой системе имеется также интересная возможность удаления любой детали или целого подразделения фабрики, вследствие чего план производства отнюдь не нарушается полностью, поскольку система находит альтернативные варианты изготовления продукции, постепенно "затягивает рану" и демонстрирует высокую живучесть.

Еще один пример построения самоорганизующихся и эволюционирующих систем связан с применением настоящего подхода в области *e-коммерции* [15], когда некоторые товары самостоятельно объединяются в группы для обеспечения кросс-продаж, когда, например, продажа телевизоров дополняется тумбочкой-подставкой в тон и аудиоплейером, продажа авиабилетов – бронированием отеля или билетами на музыкальный концерт и т.д. В этом случае, товары, которые постоянно проигрывают в конкурентной борьбе, постепенно разоряются, теряют возможность и выводятся из системы.

Наконец, интересно отметить, что рассмотренный способ принятия решений, связанный с динамическим перераспределением ресурсов, оказался применимым и в совершенно других сферах, напрямую не связанных с материальными ресурсами. Оказалось, что так может быть построено *агентство новостей* (распределение новостей по наиболее заинтересованным потребителям), *система извлечения знаний из данных* (распределение записей по близким по какому-либо критерию кластерам) и *даже система понимания текста* (распределение смыслов по словам предложения в зависимости от существующего контекста).

В результате, на основе разработанных методов и средств по заказам предприятий был создан ряд практических мультиагентных приложений, внедрение которых позволило добиться большей обоснованности и согласованности в принятии решений, высокой про-активности и глубокой индивидуализации в работе с клиентами и, тем самым, существенно повысить эффективность деятель-

ности предприятий.

Заключение

В настоящей работе рассмотрен холистический подход к созданию открытых мультиагентных систем, предназначенных для поддержки процессов принятия решений для современных предприятий.

Показано, что основные преимущества подхода связаны с использованием экономических механизмов самоорганизации и эволюции, которые становятся мощным фактором повышения эффективности предприятия и обеспечивают его стабильное развитие и процветание.

Рассмотрены также инструментальные средства для создания ОМАС и примеры первых практических приложений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bumtux B.A.* Согласованная инженерная деятельность. Состояние, проблемы, перспективы // Проблемы машиностроения и надежности машин. №1. 1997.
2. *Vittikh V.A., Skobelev P.O.* Developing of Multi-Agent System for the Decision Making Process for Companies with Networking Organisation // Proceedings of XVI IMACS World Congress on Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulations. Lausanne: August 21-25, 2000.
3. *Taran T.A.* Моделирование и поддержка принятия решений в когнитивных конфликтах // Известия академии наук. Теория и системы управления. 2001. № 4.
4. *Vittikh V.A., Skobelev P.O.* Multi-Agent Systems for Modelling of Self-organisation and Co-operation Processes // Proc. of XIII Intern. Conference on the Application of Artificial Intelligence in Engineering. Ireland:Galway, 1998.
5. *G.Rzevski.* Business: From Order to the Edge of Chaos // Труды 3-ей Международной конференции по проблемам управления и моделирования в сложных системах. Самара: СНЦ РАН, 2001.
6. *Tarasov B.B.* Агенты, многоагентные системы, виртуальные сообщества: стратегическое направление в информатике и искусственном интеллекте // Новости ис-

- кусственного интеллекта. 1998. №2.
7. *Городецкий В.И., Грушинский М.С., Хабалов А.В.* Многоагентные системы (обзор) // *Новости искусственного интеллекта*. 1998. №2.
 8. *Хорошевский В.Ф.* Методы и средства проектирования и реализации мультиагентных систем // *Материалы семинара "Проблемы искусственного интеллекта"* Самара: ИПУ РАН, 1999.
 9. *Виттих В.А.* Управление открытыми системами на основе интеграции знаний // *Автометрия*. 1999. №3.
 10. *Виттих В.А.* Эволюционное управление сложными системами // *Известия Самарского научного центра РАН*. Т.2. 2000. №1.
 11. *Скобелев П.О.* Холистический подход к созданию открытых мультиагентных систем // *Труды 3-ей Международной конференции по проблемам управления и моделирования в сложных системах*. Самара: СНЦ РАН, 2001.
 12. *Скобелев П.О.* Самоорганизация и эволюция в открытых мультиагентных системах для холонических предприятий // *Труды Международного конгресса "Искусственный интеллект в 21 веке"*. Т.1 М.: Физматлит, 2001.
 13. *Rzevski G.A., Skobelev P.O., Korablin M.A.* Multi-Agent Models of Networked Organisations // *Proc. of Intern. Workshop "New Models of Business: Managerial Aspects and Enabling Technology"*, School of Management of Saint Petersburg State University, Russia, June 28-29, 2001.
 14. *Ивкушкин К.В., Минаков И.А., Ржевский Г.А., Скобелев П.О.* Мультиагентная система для решения задач логистики // *Труды 7-ой Национальной конференции ИИ-2000*. Т.2. М.: 2000.
 15. *Батищев С.В., Лахин О.И., Минаков И.А., Ржевский Г.А., Скобелев П.О.* Разработка инструментальной системы для создания мультиагентных приложений в сети Интернет // *Известия Самарского научного центра РАН*. Т.3. 2001. №1.

**OPEN MULTI-AGENT SYSTEMS
FOR SUPPORT OF DECISION-MAKING PROCESSES
FOR COMPANY MANAGEMENT**

© 2001 P.O. Skobelev

Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences, Samara
Magenta Development Ltd, Samara

The article concerns the main principles of the development of open multi-agent systems for decision-making support, based on the mechanisms of self-organisation and evolution. Features of the holistic approach to the development of such systems are considered; the structure of the developed engines for their implementation is shown; examples of the application of these systems for project management, logistics and e-commerce are described.

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫХ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ

© 2001 Ю.Н. Лазарев¹, М.И. Гераськин²¹ Самарский научный центр РАН² Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассматривается задача формирования управления сложной системой, исходя из минимизации векторного критерия качества, при наличии ограничений на параметры состояния и вектор управления. Предложен подход к решению задачи с использованием аппроксимации множества Парето, на основе которого разработан алгоритм формирования управления. Обоснованы условия сходимости алгоритма.

Формулировка задачи

Рассматривается процесс функционирования управляемой системы при наличии ограничений на параметры состояния и вектор управления. Состояние системы в каждый момент времени определяется вектором управления u , принадлежащим допустимой области U :

$$u \in U. \quad (1)$$

На параметры состояния управляемой системы наложены ограничения

$$G_j[u] \leq 0, j = 1, \dots, J. \quad (2)$$

Целью функционирования системы является минимизация векторного критерия качества

$$R_k[u], k = 1, \dots, K. \quad (3)$$

Таким образом, для управляемой системы требуется определить вектор управления в соответствии с ограничениями (1) и (2)

$$u \in \tilde{U} = \{u \in U, G_j[u] \leq 0, j = 1, \dots, J\}, \quad (4)$$

минимизирующий векторный критерий (3).

Парето-оптимальные и минимаксно-оптимальные решения

В сформулированной задаче соотношения (2) и (3) задают отображение $\vartheta: \tilde{U} \rightarrow \Phi$, где Φ - область допустимых значений критериев, образуемая допустимыми значениями векторов $R_k[u]$ ($k = 1, \dots, K$) при управлениях, удовлетворяющих условиям (4). В дальнейшем используется множество индексов $K = \{k = 1, 2, \dots, K\}$.

Решение многокритериальной задачи приводит к формированию множества неуплощаемых по Парето (π -оптимальных) управлений u^* [1], принадлежащих множеству \tilde{U} . Множество Парето представляет собой совокупность управлений, определяемых из условия

$$\Pi = \left\{ \begin{array}{l} u^* \in \tilde{U} \mid \exists u \in \tilde{U} : R_k[u] \leq R_k[u^*], \\ k \in K, u \neq u^* \end{array} \right\}. \quad (5)$$

Управления, входящие в множество Парето, являются несравнимыми по векторному критерию, вследствие чего возникает проблема выбора единственного управления из множества Парето. Единственность решения задачи (1)-(4) может быть обеспечена с помощью принципа гарантированного результата (минимакса) [2], согласно которому оптимальным считается управление u^o из множества \tilde{U} , которое доставляет наилучшее значение наихудшему критерию качества:

$$u^o = \arg \min_{u \in \tilde{U}} \max_{k \in K} R_k[u]. \quad (6)$$

Важным свойством управления, сформированного в соответствии с принципом минимакса, является наличие наибольшей окрестности, внутри которой управление может варьироваться при необходимости парирования априорно неопределенных факторов.

Нормализация критериев

Критерии $R_k, k \in K$ имеют разный смысл и разные диапазоны изменения. Нор-

мализация критериев при управлении u выполняется по формуле:

$$\xi_k [u] = \frac{R_k [u] - R_k^{min}}{R_k^{max} - R_k^{min}}, k \in K, \quad (8)$$

где $\xi_k [u]$ - нормализованное значение k -го критерия; R_k^{min} - минимальное значение k -го критерия, полученное в результате решения однокритериальной задачи оптимизации без учета остальных критериев, достигаемое при управлении u_k^{min} ; R_k^{max} - максимальное значение k -го критерия, определяемое как наибольшее среди значений, соответствующих управлениям, при которых остальные $(K-1)$ критериев при тех же условиях достигают минимумов.

Для нормализованных критериев принцип минимакса определяется следующим образом [3]: задача (1)-(4) при равнозначных критериях решена, если найдено управление $u^0 \in \tilde{U}$, для которого

$$\xi^0 [u^0] = \min_{u \in \tilde{U}} \max_{k \in K} \xi_k [u]. \quad (9)$$

Аппроксимация множества Парето

Приближенно управление, оптимальное по критерию (9), может быть получено с использованием аппроксимации поверхности $\vartheta(\Pi)$, образованной сочетаниями критериев при π -оптимальных управлениях в K -мерном пространстве критериев. В соответствии со свойствами множества Парето [3] поверхность $\vartheta(\Pi)$ строго монотонна и представляет собой левую нижнюю границу множества Φ . Поверхность $\vartheta(\Pi)$ является выпуклой, если множество Φ выпукло. В этом случае поверхность $\vartheta(\Pi)$ может быть аппроксимирована гиперповерхностью.

В двухкритериальной задаче гиперболическая кривая (рис.), проходящая через точки аппроксимации $A'(\xi_1', \xi_2')$ и $A''(\xi_1'', \xi_2'')$, с центром в начале координат и асимптотами - координатными осями (в результате нормализации критериев) определяется уравнением

$$\xi_2 = a(\xi_1)^{-b} \quad (10)$$

с коэффициентами

$$b = \frac{\ln \xi_2'' - \ln \xi_2'}{\ln \xi_1' - \ln \xi_1''}, a = \xi_2' (\xi_1')^b. \quad (11)$$

В задаче с тремя критериями качества уравнение аппроксимирующей поверхности имеет вид

$$\xi_3 = a(\xi_1)^{b_1} (\xi_2)^{b_2},$$

и коэффициенты a, b_1, b_2 вычисляются по формулам

$$b_1 = \Delta_{b_1} / \Delta, b_2 = \Delta_{b_2} / \Delta, a = \xi_3^1 (\xi_1^1)^{b_1} (\xi_2^1)^{b_2},$$

где

$$\Delta = (\ln \xi_1^1 - \ln \xi_1^2)(\ln \xi_2^1 - \ln \xi_2^3) - (\ln \xi_1^1 - \ln \xi_1^3)(\ln \xi_2^1 - \ln \xi_2^2),$$

$$\Delta_{b_1} = (\ln \xi_3^2 - \ln \xi_3^1)(\ln \xi_2^1 - \ln \xi_2^3) - (\ln \xi_3^3 - \ln \xi_3^1)(\ln \xi_2^1 - \ln \xi_2^2),$$

$$\Delta_{b_2} = (\ln \xi_1^1 - \ln \xi_1^2)(\ln \xi_3^3 - \ln \xi_3^1) - (\ln \xi_1^1 - \ln \xi_1^3)(\ln \xi_3^2 - \ln \xi_3^1).$$

В общем случае K критериев уравнение аппроксимирующей гиперповерхности, проходящей через K точек аппроксимации $A^k(\xi_1^k, \xi_2^k, \dots, \xi_K^k), k \in K$, имеет вид

$$\xi_K = a(\xi_1)^{-b_1} (\xi_2)^{-b_2} \dots (\xi_{K-1})^{-b_{K-1}} \quad (12)$$

с коэффициентами $a, b_1, b_2, \dots, b_{K-1}$, получае-

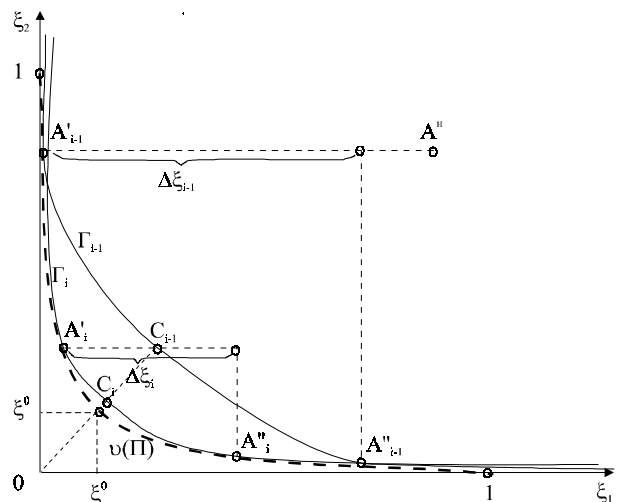


Рис. Формирование аппроксимирующих гипербол

мыми в результате решения системы уравнений

$$\xi_K^k = a(\xi_1^k)^{-b_1} (\xi_2^k)^{-b_2} \dots (\xi_{K-1}^k)^{-b_{K-1}}, k = 1, 2, \dots, K. (13)$$

Методика использования аппроксимирующих гиперповерхностей

С учетом свойства, сформулированного в [4], нормализованные критерии при минимаксно-оптимальном управлении равны между собой. В двумерном случае точка, образованная сочетанием критериев при этом управлении, принадлежит биссектрисе первого квадранта. Вследствие этого координаты вершин аппроксимирующих гипербола (точки C_i, C_{i-1} на рис.) соответствуют приближенным решениям двухкритериальной задачи.

Для формирования управления, являющегося приближенным решением многокритериальной задачи, необходимо

- определить K векторов управления, обеспечивающих сочетания критериев, при которых значения $(K-1)$ критериев фиксированы, а один критерий достигает минимума,
- определить коэффициенты аппроксимирующей поверхности путем решения системы (13),
- вычислить координаты вершины аппроксимирующей поверхности по формуле

$$\xi_1^C = \xi_2^C = \dots = \xi_K^C = \xi^C = (a)^{\frac{1}{b_1+b_2+\dots+b_{K-1}+1}}.$$

Сочетание критериев в вершине аппроксимирующей поверхности и соответствующий вектор управления представляют собой приближенное решение многокритериальной задачи.

Уточнение приближенного решения может быть выполнено с помощью итерационной процедуры минимизации максимального для данного приближения критерия при фиксированных значениях других критериев. Управление, полученное в результате скалярной минимизации, позволяет сформировать соответствующую аппроксимирующую гиперповерхность, координаты вершины которой являются опорным управлением на следующей итерации.

Сходимость итерационной процедуры обеспечивается за счет выбора шага i -й ите-

рации $\Delta \xi_i$ (рис.) таким образом, чтобы выполнялось условие

$$\left| \xi^{C_{i-1}} - \min_{k \in K} \xi_k^{A'_i} \right| < \Delta \xi_i < \Delta \xi_{i-1},$$

за счет чего вершина аппроксимирующей гиперповерхности на каждой итерации оказывается между точками аппроксимации A'_i и A''_i .

Шаг на i -й итерации предлагается вычислять по формуле

$$\Delta \xi_i = \frac{\Delta \xi_{i-1} + \left| \xi^{C_{i-1}} - \min_{k \in K} \xi_k^{A'_i} \right|}{2}.$$

Алгоритм решения двухкритериальной задачи

В случае $K=2$ аппроксимирующая кривая является гиперболой. С учетом нормализации (8) центр гиперболы принадлежит началу координат, так как асимптотами являются координатные оси. Линия $\vartheta(\Pi)$ π -оптимальных сочетаний критериев имеет вид, показанный на рис.

Предлагается следующий алгоритм формирования минимаксно-оптимального управления:

1) Решаются задачи скалярной минимизации критериев $R_k[u], k \in K$. Определяются управления u_k^{\min} и соответствующие им минимальные значения каждого критерия $R_k^{\min}, k \in K$ без учета остальных критериев.

2) Определяются максимальные значения каждого критерия

$$R_k^{\max} = \max_{n \in K, n \neq k} R_k[u_n^{\min}], k \in K;$$

3) Выбирается начальный закон управления $u^1 \in \tilde{U}$ среди $u_k^{\min}, k \in K$.

4) Задается начальное значение шага

$$\Delta \xi^1 < 1.$$

5) Определяется опорное управление, тождественное начальному $u_i = u^h$ при $i = 0$ (i - номер итерации), или полученному на предыдущей итерации $u_i = u_{i-1}^C$ при $i > 0$;

6) Определяется критерий с наибольшим нормализованным значением

$$\xi_{k'}^i = \max_{k \in K} \xi_k^i [u_i]$$

и фиксируется значение другого критерия $\bar{R}^k = R^k [u_i], k \neq k'$; область \tilde{U} дополняется ограничением

$$\tilde{U}' = \{u \in \tilde{U}, R^k [u] = \bar{R}^k, k \neq k'\};$$

7) Формируется управление $u_i^{k'}$, удовлетворяющее условию минимальности

$$\xi_{k'}^i [u_i^{k'}] = \min_{u \in \tilde{U}'} \xi_{k'}^i [u], k' \in K,$$

и вычисляются координаты точки $A_i'(\xi_{1i}', \xi_{2i}')$, принадлежащей множеству $\mathcal{G}(\Pi)$;

8) Определяется значение шага итерации $\Delta \xi_i = \Delta \xi^i$ при $i = 0$ или

$$\Delta \xi_i = \frac{\Delta \xi_{i-1} + \left| \xi_{i-1}^C - \min_{k \in K} \xi_k^{A_i'} \right|}{2}$$

при $i > 0$. Вычисляется значение критерия с номером k' , соответствующее этому приращению (8):

$$\bar{R}_{k'} = (\xi_k [u_{k'}^i] + \Delta \xi_i)(R_k^{\max} - R_k^{\min}) + R_k^{\min}.$$

Область \tilde{U} дополняется ограничением;

$$\tilde{U}'' = \{u \in \tilde{U}, R_{k'} [u] = \bar{R}_{k'}\}.$$

9) Формируется управление $u_i^{k''}$, удовлетворяющее условию минимальности

$$\xi_{k''}^i [u_i^{k''}] = \min_{u \in \tilde{U}''} \xi_{k''}^i [u], k'' \in K,$$

и вычисляются координаты точки $A_i''(\xi_{1i}'', \xi_{2i}'')$;

10) Вычисляются координаты вершины гиперболы

$$\xi_{1i}^C = \xi_{2i}^C = (a)^{\frac{1}{b+1}},$$

11) Формируется управление u_i^C , соответствующее точке $C_i(\xi_{1i}^C, \xi_{2i}^C)$ или ближайшей к ней точке, если $C_i \notin \Phi$; для этого по координатам точки C_i определяются значения исходных критериев

$$R_k^C = \xi_{ki}^C (R_k^{\max} - R_k^{\min}) + R_k^{\min}, k \in K$$

и находится управление u из условия принадлежности области

$$\tilde{U}^C = \{u \in \tilde{U}, R^k [u] = R_k^C, k \in K\},$$

если $C_i \in \Phi$, или, если $C_i \notin \Phi$, из условия

$$\min_{u \in \tilde{U}} \max_{k \in K} |R^k [u] - R_k^C|;$$

12) Проверяется условие окончания итераций $|\xi_{i-1}^C - \xi_i^C| \leq \varepsilon$. Если оно выполнено, то точка C_i считается приближенным минимаксно-оптимальным сочетанием критериев, а ее прообраз u_i^C - минимаксно-оптимальным управлением u^0 ; в противном случае вычисления повторяются, начиная с шага 5.

Алгоритм решения многокритериальной задачи в общем случае

В общем случае K критериев алгоритм имеет вид:

1) выбирается начальный закон управления $u^0 \in \tilde{U}$; задается начальное значение шага $\Delta \xi^i < 1$;

2) определяется опорное управление по правилу

$$u_i = \begin{cases} u_0 & \text{при } i = 0, \\ u_{i-1}^C & \text{при } i > 0; \end{cases}$$

3) формируется K управляющих зависимостей $u_i^k, k \in K$ путем последовательного решения K задач минимизации

$$\xi_k^i [u_k^i] = \min_{u \in \tilde{U}_{ki}} \max_{k \in K} \xi_k^i [u], k = 1, \dots, K,$$

$$\tilde{U}_{ki} = \{u \in \tilde{U}, R^k [u] = \bar{R}_0^k, k \neq \arg \max_{k \in K} \xi_k^i [u_{k-1}^i], k \in K\},$$

в каждой из которых

$$\bar{R}^k = \bar{\xi}_k^i (R_k^{\max} - R_k^{\min}) + R_k^{\min}, \bar{\xi}_k^i = \bar{\xi}_{k-1}^i + \Delta \xi_i,$$

где $\bar{\xi}_{k-1}^i$ - значение k -го критерия, полученное в результате предыдущей задачи. В каждой из K задач начальным приближением служит управление u_i при $k=1$, u_{k-1}^i при $k=2, 3, \dots, K$; при этом шаг итерации равен

$$\Delta \xi_i = \frac{\Delta \xi_{i-1} + \left| \xi_{i-1}^C - \min_{k \in K} \xi_k^{A_i'} \right|}{2};$$

4) вычисляются координаты точек $A_i^k (\xi_{1i}^k, \xi_{2i}^k, \dots, \xi_{Ki}^k), k \in K$, принадлежащих множеству $\mathcal{V}(P)$;

5) вычисляются координаты вершины гиперповерхности $C_i = (\xi_{1i}^C, \xi_{2i}^C, \dots, \xi_{Ki}^C)$

$\xi_{1i}^C = \xi_{2i}^C = \dots = \xi_{Ki}^C = \xi_i^C = (a)^{\frac{1}{b_1 + b_2 + \dots + b_{K-1} + 1}}$, где коэффициенты b_1, b_2, \dots, b_{K-1} определяются из решения системы

$$\xi_K^k = a(\xi_1^k)^{-b_1} (\xi_2^k)^{-b_2} \dots (\xi_{K-1}^k)^{-b_{K-1}}, k = 1, 2, \dots, K;$$

б) формируется управление u_i^C , соответствующее точке C_i или ближайшей к ней точке, если $C_i \notin \Phi$; для этого по координатам точки C_i определяются значения исходных критериев

$$R_k^C = \xi_{ki}^C (R_k^{max} - R_k^{min}) + R_k^{min}, k \in K$$

и находится управление u из условия принадлежности области

$$\tilde{U}^C = \{u \in \tilde{U}, R^k[u] = R_k^C, k \in K\},$$

если $C_i \in \Phi$, или, если $C_i \notin \Phi$, из условия

$$\min_{u \in \tilde{U}} \max_{k \in K} |R^k[u] - R_k^C|;$$

7) проверяется условие окончания итераций $|\xi_{i-1}^C - \xi_i^C| \leq \varepsilon$. Если оно выполнено, то точка C_i считается приближенным минимаксно-оптимальным сочетанием критериев, а ее прообраз u_i^C - минимаксно-оптимальным управлением u^0 ; в противном случае вычисления повторяются, начиная с шага 2.

Условия сходимости алгоритма

Алгоритм позволяет определить минимаксно-оптимальное сочетание критериев ξ^0 за конечное число итераций, то есть для заданной точности $\varepsilon > 0$ найдется такой номер i , что

$$|\xi^0 - \xi_i^C| \leq \varepsilon. \quad (14)$$

Для случая $K=2$ гиперболы, соответствующие

смежным итерациям, определяются уравнениями (рис.)

$$\Gamma_{i-1}: \xi_2 = f_{i-1}(\xi_1), \Gamma_i: \xi_2 = f_i(\xi_1).$$

Пусть приращение $\Delta \xi_i$ подбирается таким образом, что на каждой итерации точки A_i' и A_i'' лежат на гиперболе по разные стороны от точки C_i . В этом случае можно подобрать такое $\delta \in [0, 1]$, что

$$\xi_k^C = \delta \xi_k' + (1 - \delta) \xi_k'', 0 \leq \delta \leq 1, k = 1, 2.$$

Поскольку гипербола является выпуклой кривой, то из условия выпуклости

$$f(\delta \xi_k' + (1 - \delta) \xi_k'') \leq \delta f(\xi_k') + (1 - \delta) f(\xi_k''),$$

$$\text{для любого } \delta \in [0, 1]$$

вытекает, что

$$\begin{aligned} \xi_{2i}^C = f_i(\xi_{1i}^C) &= f_i(\delta \xi_1' + (1 - \delta) \xi_1'') \leq \delta f(\xi_1') + (1 - \delta) f(\xi_1'') = \\ &= \delta \xi_{2i-1}^C + (1 - \delta) f(\xi_1'') \end{aligned} \quad (15)$$

Так как по построению точки A_i'' верно неравенство

$$f(\xi_1'') = f_i(\xi_{1i-1}^C) \leq \xi_{2i-1}^C, \quad (16)$$

то при подстановке ξ_{2i-1}^C вместо $f(\xi_1'')$ неравенство (15) не изменит знака

$$\xi_{2i}^C = \delta \xi_{2i-1}^C + (1 - \delta) \xi_{2i-1}^C = \xi_{2i-1}^C. \quad (17)$$

С учетом того, что по свойству симметричности [5]

$$\xi_1^C = \xi_2^C = \xi^C, \quad (18)$$

из (17) следует невозрастание последовательности точек $\{\xi_i^C\}$

$$\xi_i^C \leq \xi_{i-1}^C. \quad (19)$$

С другой стороны, по свойству симметричности (18) и свойству минимальности

$$\xi_k^i [u_k^i] = \min_{u \in \tilde{U}} \xi_k^i [u], k \in K$$

сочетание критериев ξ^0 при минимаксно-оптимальном управлении u^0 ограничивает последовательность точек $\{\xi_i^C\}$ снизу:

$$\xi^O = \min_{u \in \tilde{U}} \xi_k, k = \arg \max_{k \in K} \xi_k.$$

Таким образом, существует предел

$$\lim_{i \rightarrow \infty} \xi_i^C = \xi^O,$$

а это означает, что начиная с некоторого номера i выполнится условие (14).

Заключение

Решение многокритериальной задачи на основе предложенного алгоритма сводится к последовательности скалярных оптимизационных задач и предусматривает:

а) формирование K Парето-оптимальных управлений;

б) построение в соответствии со значениями критериев при этих управлениях гиперболических поверхностей (кривые Γ_i, Γ_{i-1} на рис.), аппроксимирующих поверхность Парето в пределах малой окрестности опорного управления;

в) нахождение точки сочетания критериев, принадлежащей аппроксимирующей поверхности и имеющей равные нормализованные значения критериев, и формирование соответствующего управления.

Предложенный алгоритм позволяет определять минимаксно-оптимальное сочетание критериев ξ^O как в случае выпуклого к началу координат множества $\mathcal{D}(\Pi)$, так и в невыпуклом случае, поскольку на предпоследнем шаге в невыпуклом случае ищется точка, ближайшая к C в смысле

$$u = \arg \min_{u \in \tilde{U}} \max_{k \in K} |\xi_i^k [u] - \xi_i^C|.$$

Алгоритм, кроме того, позволяет учесть

приоритеты критериев, задаваемые коэффициентами важности β^k :

$$\sum_{k=1}^K \beta^k = 1, \beta^k > 0, k \in K.$$

В этом случае алгоритм применяется в неизменном виде, но нормализованные критерии подвергаются преобразованию:

$$\bar{\xi}^k = \beta^k \xi^k, k \in K.$$

Таким образом, предложенный алгоритм, формируя минимизирующую последовательность управлений, сводит решение многокритериальной задачи управления к последовательности решения скалярных задач оптимизации, для которых разработаны надежные численные методы решения, в частности, [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Подиновский В.В., Ногин В.Д.* Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука, 1982.
2. *Маишунин Ю.К.* Методы и модели векторной оптимизации. М.: Наука, 1986.
3. *Гуткин Л.С.* Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества. М.: Советское радио, 1975.
4. *Хоменюк В.В.* Элементы теории многоцелевой оптимизации. М.: Наука, 1983.
5. *Лазарев Ю.Н.* Численный метод формирования многоканального управления движением аэрокосмических аппаратов в атмосфере // Известия Самарского научного центра РАН. 1999. №1.

ALGORITHM OF SOLUTION OF MULTI CRITERION CONTROL PROBLEMS

© 2001 Yu.N. Lazarev¹, M.I. Geraskin²

¹ Samara Science Centre of Russian Academy of Sciences

² Samara State Aerospace University

The problem of forming of control by the complex system with vector quality criterion minimization and under constraints on the current parameters and control vector is considered. The method of solution of the problem with using Pareto area approximation is proposed. The algorithm of control forming on the base of the method is developed. The conditions of workability of the algorithm is proved.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПО СИСТЕМНЫМ КРИТЕРИЯМ КАЧЕСТВА

© 2001 М.Ю. Лившиц

Самарский государственный технический университет

Предлагается подход, ориентированный на оптимизацию типовых процессов технологической теплофизики (индукционный нагрев; химико-термическая обработка и т.п) по эксплуатационным критериям качества работы конкретной детали. Он рассматривается в качестве возможной альтернативы традиционной технологии, базирующейся на фиксированных технологических режимах.

Введение

Традиционные методы повышения технико-экономических показателей промышленных технологических процессов ориентированы на специфический характер производств, в которых они использовались в период доинформационных технологий. Так технологические процессы на предприятиях оборонного комплекса ориентированы на получение гарантированного качества безотносительно к затратам энергии, материалов и других ресурсов. Мелкосерийный характер производственных процессов, типичный для этих отраслей, обеспечивался созданием уникальных агрегатов под конкретные технологические операции, а немногочисленные разработки, связанные с их оптимизацией и адаптацией, имели ориентацию на повышение надежности и повторяемости промежуточных регламентированных технологическими инструкциями качественных технологических показателей: распределения температуры, концентрации упрочняющих элементов, толщины диффузионного слоя и т.п. в условиях неконтролируемых возмущений путем компенсации последних, либо удержания их на допустимом уровне. Это обстоятельство во многом определяет трудности модернизации оборонных производств, т.к. отсутствие гибкости технологических процессов требует капиталовложений на их перестройку, зачастую превышающих стоимость создания новых производств.

В то же время в отраслях, ориентированных на гражданские потребности, отсутствие реальной конкуренции и жесткий распре-

лительный характер потребления привели к созданию технологических процессов, ориентированных на массовое производство изделий, как правило, недостаточно высокого качества и высокой себестоимости. Работы по оптимизации процессов технологических процессов в этих отраслях были направлены на снижение затрат при сохранении и стабилизации усредненных, как правило, невысоких качественных показателей при массовом производстве.

Вступление в рыночные отношения при негарантированном сбыте, изменяющихся и повышенных требованиях потребителя для предприятий этих отраслей затруднительно. Выход на внешний рынок и внедрение международных стандартов качества (например, ИСО 9000), требующих "прозрачности" технологии для потребителя, вообще проблематичны без существенной переориентации целевых установок и технологической стратегии.

В качестве одной из мер для выхода из этой сложной ситуации автор предлагает создание гибких автоматизированных технологических модулей, позволяющих осуществлять комплексное оптимальное проектирование и управление технологическими процессами. Эффективность таких модулей в реальных производственных условиях обеспечивается системным подходом [1-4] к их созданию путем достаточно полного анализа жизненного цикла произведенных с помощью этих модулей изделий на основе декомпозиции глобального критерия оптимизации (интегративного системного свойства) технологических процессов.

Декомпозиция критерия

Разработанные в трудах [1-5] основные положения системного подхода позволяют наряду с получением оптимальных управляющих воздействий, регламентирующих соответствующие технологические режимы, определять оптимальные конструктивные параметры изделий и установок для их изготовления и обработки с позиций их дальнейшего оптимального функционирования при обеспечении предельных значений глобального критерия оптимальности как совокупного критерия, отражающего не только технико-экономические, технологические, но и эксплуатационные показатели.

Для получения конструктивных результатов для технологических систем предлагается в качестве интегративного системного свойства глобальный критерий оптимальности, который определяется системным анализом жизненного цикла изделия и включает в себя в качестве взаимосвязанных элементов проектирование; технологию изготовления и обработки и эксплуатацию изделия.

Базисом предлагаемого в работе метода построения взаимосвязанных иерархических структур проблемно-ориентированных математических моделей и адекватных постановок комплексных задач оптимального проектирования и управления процессами технологической теплофизики является иерархическая структура локальных критериев оптимальности, полученная путем декомпозиции заданного глобального критерия. (см. рис.). На верхнем уровне иерархии рассматривается экономический критерий оценки жизненного цикла изделия - приведённый доход J_r .

$$J_r = \sum_{j=1}^N [C_j(\bar{\alpha}_j, \bar{\beta}_j, \tau_{uj}) - B_j(\bar{\alpha}_j, \bar{\beta}_j, \tau_{uj}) - Z_{sj}(\bar{\alpha}_j, \bar{\beta}_j, \tau_{uj})] - K_{kj}(\bar{\alpha}_j, \bar{\beta}_j, \tau_{uj}) \cdot E_c. \quad (1)$$

Здесь B_j - годовой объем выпуска продукции j - вида при общем количестве N - видов продукции в номенклатуре, реализуемой по цене C_j ; Z_{sj} - суммарные эксплуатационные затраты на ее производство; K_k - капитальные затраты при нормативном сроке их окупаемости E_c ; $\bar{\alpha}_j$, $\bar{\beta}_j$ - обобщен-

ные параметры, характеризующие эксплуатационные качества изделия и затраты ресурсов на его изготовление; τ_{uj} - продолжительность производственного цикла. Декомпозиция глобального критерия J_r производится на основании анализа входящих в формулу (1) компонентов, который выявляет её экстремальный характер из-за сложного нелинейного характера ее зависимости от параметров.

Условия роста прибыли, определяющие структуру декомпозиции глобального критерия J_r , формулируются в общем случае как условие его положительного градиента по компонентам $\bar{\alpha}$, $\bar{\beta}$, τ_{uj}

$$\frac{\partial J_r}{\partial \bar{\alpha}} > 0; \frac{\partial J_r}{\partial \bar{\beta}} > 0; \frac{\partial J_r}{\partial \tau_{uj}^{-1}} > 0. \quad (2)$$

Удовлетворение условиям (2) является необходимым, но не исчерпывающим компонентом методики декомпозиции. Для достижения максимальной производительности технологической линии, участка из S установок при минимальных издержках, обеспечивающих максимальное значение критерия (1) необходимо в соответствии с системными свойствами целостности и структурируемости рассматривать функциональный срез, включающий в качестве элементов оборудование соответствующей технологической цепи и позволяющий выделить в ней "узкие" места.

При соблюдении последнего из неравенств (2) максимум функционала (1) для технологической цепи в j -м производственном цикле достигается при выполнении соотношения

$$\tau_{uj}^0 = \min_{\chi \in \Omega_{ji}} \max (\tau_{j+1}^0 + \tau_{jT1} \tau_{ji}^0 + \tau_{jT2} \tau_{j+1}^0 + \tau_{jT3})$$

$i = \overline{1, S}$, где τ_{uj}^0 - оптимальная продолжительность j -го производственного цикла, $\tau_{jT1}, \tau_{jT2}, \tau_{jT3}$ - фиксированное время подготовительно-вспомогательных работ, $\tau_{j,i-1}^0, \tau_{j,i}^0, \tau_{j,i+1}^0$ - минимально - возможная продолжительность предыдущей, исследуемой и последующей технологической операций как результат решения соответствующих

задач оптимального быстрогодействия. Эти задачи ставятся как задачи с подвижным правым концом траектории в области конечных состояний $\bar{\Omega}_{ji} \in \chi_{ji}(p, \tau_{j,i}^0)$, определяемой, в том числе и допустимыми для последующей технологической операции начальными состояниями.

При этом область $\bar{\Omega}_{ji} = \bar{\mathfrak{S}}_{ji} \cap \bar{G}_{j,i+1}$ является пересечением области $\bar{\mathfrak{S}}_{ji}$, достижимых состояний для данной i -ой технологической операции и области $\bar{G}_{j,i+1}$, допустимых по требованиям $i+1$ -ой технологической операции состояний. Решение последовательности оптимальных задач на множестве $\bar{\Omega}_{ji}$ для каждого i -го элемента технологической цепи, позволяет определить оптимальные множества конечных состояний в областях достижимости, а также выявить технологическое оборудование, которым целесообразно управлять по оптимальному по быстродействию алгоритму. Для последующего и предыдущего оборудования, имеющего резервный ресурс времени формулируется задача оптимизации эксплуатационных или ресурсных критериев при фиксированном времени.

Исследованы способы оценки погрешности отклонения результирующего состояния $\chi_{ij}(p, \tau^0)$ от заданного $\chi^*(p)$ определяющие метрику, а, следовательно, топологию множества $\bar{\Omega}_{ji}$, которые прямо следует из технологии, а следовательно определяет содержание математических моделей, отражающих связи критериев качества технологии и эксплуатационных критериев, полученных декомпозицией J_r . В большинстве известных автору работ в качестве такой метрики используется среднеквадратическое по объему v детали отклонение

$$\rho_{скв} = \left(\int_v (\chi_j(p, \tau^0) - \chi^*(p))^2 dv d\tau \right) \frac{1}{v_B},$$

где v_B - базовое значение объема, $p \in E^3$ - пространственная точка.

Такая метрика чрезвычайно удобна в

вычислительной практике, а порождаемые ею через соответствующие условия трансверсальности решения оптимальных задач могут быть использованы при параметрической идентификации и адаптации.

Однако требования к оценке вектора состояний промышленной технологии существенно отличаются от $\rho_{скв}$, прежде всего, из-за возможных значительных локальных отклонений от $\chi^*(p)$ в узкой пространственной области, к которым нечувствительна эта оценка. Такие отклонения типичны для интенсивных видов нагрева, в частности индукционного, для химико-термической обработки с фазовыми переходами, в частности азотирования, и для ряда других ответственных технологических процессов. Кроме того, большинство технологических процессов регламентируется абсолютными величинами допустимых отклонений технологических параметров от заданных, например, лимитируется температурная погрешность при нагреве различных деталей, показатели прочности и надежности, отклонения глубины упроченного слоя при ХТО и т.п. Поэтому в работе топология множества $\bar{\Omega}_{ji}$ задается чебышевской нормой:

$$\rho_{\infty} = \max_{p \in v} |\chi_j(p, \tau^0) - \chi^*(p)|.$$

Переходные режимы

В реальных процессах значительную часть производственного цикла занимают переходные режимы, связанные с запуском после перерыва, сменой темпа работы предыдущего и последующего оборудования, переходом от одной партии обрабатываемых изделий к другой и т.п. В установках для мелкосерийных производств, которые в рыночных экономических условиях занимают существенное место в производстве, доля этих переходных режимов зачастую не меньше, чем установившихся, а с учетом суммарных затрат на потери, связанных как с неустраняемым браком, так и с исправлением устраняемого брака (доцементация, передел и т.п.), а также с потерями производительности и простоями, оптимизация переходных режи-

мов не менее существенна, чем установившихся. Наиболее остро эта проблема встает в случае использования в технологической цепи установок непрерывного или полунепрерывного действия. В этом случае вывод технологической цепи на стационарный режим может занимать несколько рабочих смен и требовать нетривиальных технических решений, например использования "балластных" заготовок.

Декомпозиция глобального критерия оптимальности J_r для переходных режимов приводит его к виду:

$$J_{II} = a_1 \sum_{r=1}^{\bar{M}_1} |\tau_r^* - \tau^0| + a_2 \sum_{r=1}^{\bar{M}_1} \|\chi_r(p, \tau_{IIr}) - \chi^0(p, \tau^0)\| + a_3 \sum_{r=1}^{\bar{M}_1} Z_{gr},$$

где τ_r^* , τ_{IIr} и χ_r соответственно темп выдачи, конечный момент технологической операции и вектор состояний в переходном процессе, τ^0 , $\chi^0(p)$ - темп выдачи и результирующий вектор состояний в оптимальном стационарном режиме работы технологической цепочки; Z_{gr} - соответствующая часть эксплуатационных затрат Z_{gj} в (1); $\bar{M} \geq \bar{M}_1$ - общее число деталей в рассматриваемой партии, a_1 , a_2 , a_3 - весовые коэффициенты. Первое слагаемое учитывает суммарную потерю темпа выдачи изделий технологической цепочки в переходном режиме; второе - представляет собой соответствующую оценку отклонения вектора состояний $\chi_r(p, \tau_{IIr})$ в переходном режиме от его оптимального значения $\chi^0(p, \tau^0)$ в стационарном режиме; а третье слагаемое характеризует часть эксплуатационных затрат на возмещение переходного режима. В качестве предельных частных вариантов возможно условие выдачи в переходном режиме всех \bar{M}_1 заготовок с удовлетворительными условиями при допустимых экономических потерях за счет перевода второго и третьего слагаемых в состав ограничений $a_2 \approx a_3 \approx 0$. При

этом получаем задачу на минимум суммарной потери темпа в переходных режимах. Такая задача характерна для обработки ответственных дорогостоящих деталей. В случаях, когда изменение темпа работы оборудования невозможно или нецелесообразно $\alpha_1 = 0$ и $\alpha_2 = 0$, задача сводится к оптимизации в переходных режимах отклонений выходных кондиций заготовок от оптимальных, что естественно приводит к некоторому их ухудшению на время переходного режима. Возможны и компромиссные решения при $a_1 \neq 0$, $a_2 \neq 0$, $a_3 \neq 0$.

Математическое моделирование

Структурная декомпозиция глобального критерия оптимальности (1) порождает соответствующее "дерево целей" из совокупности локальных эксплуатационных и технологических критериев, которым соответствует "дерево моделей" (см. рис.). При этом соответствие моделей локальным критериям и определяет минимально допустимую сложность моделей. В соответствии с системным принципом иерархии и приоритетом целенаправленности математические модели в работе также построены на основе иерархического принципа на базе гомоморфизма моделей верхнего уровня по отношению к моделям нижнего уровня на основе агрегирования переменных состояния последних. Детализация описания возрастает по мере продвижения вниз по иерархическим ступеням на основе декомпозиции моделей верхнего уровня. При этом параллельно происходит декомпозиция глобального критерия (1). На каждой страте иерархической модели подсистемы формулируются в виде графа, в узлах которого размещены расчетные схемы - конструктивные математические модели - в агрегированных переменных. Такие графы отражают структуру подсистем и представляют собой структурные модели.

В постановке соответствующих задач оптимального управления и проектирования по локальным критериям оптимизации промышленных технологических процессов используются иерархические, структурные и

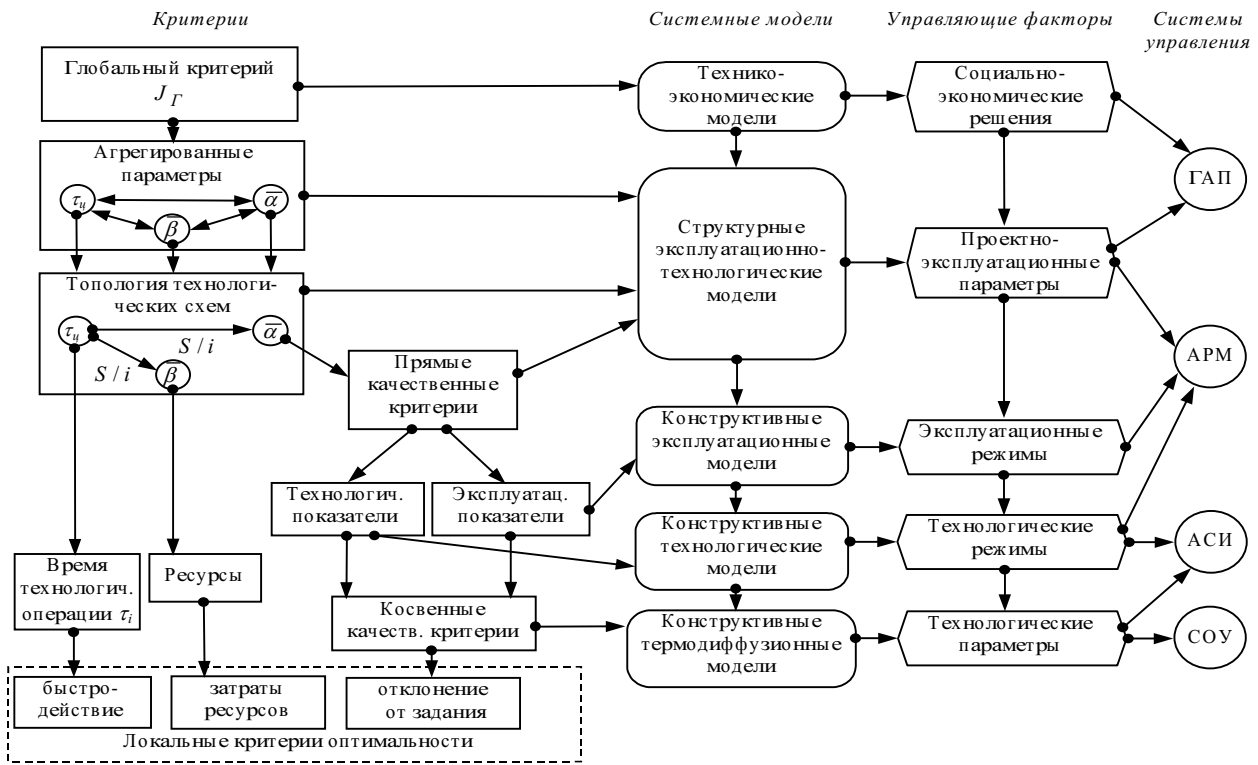


Рис. Взаимосвязанные иерархические структуры критериев, моделей и систем управления

конструктивные модели.

Следует отметить, что обычно удается выявить в группах моделей инвариантный базис. Так, например, конструктивные модели теплофизических процессов в большинстве промышленных технологий имеют общий термодинамический базис, что позволяет осуществить его вычленение с целью получения общих закономерностей оптимизации этих процессов.

Основу конструктивного математического описания таких технологических процессов промышленной теплофизики, как различные виды нагрева, термообработки, химико-термической обработки, пайки, фильтрации составляет неравновесная термодинамика, которая для основополагающих процессов тепло и массопереноса представлена как квазиравновесная в силу достаточно малой их интенсивности. Для обобщения математической формализации этих процессов использованы фундаментальные закономерности квазиравновесной термодинамики необратимых квазистатических процессов: линейный закон переноса и соотношения взаимности Онзагера, согласно которым γ -ый поток q_γ про-

порционален соответствующим термодинамическим силам $U_{\gamma k}$

$$q_\gamma = \sum_{k=1}^n L_{\gamma k} U_{\gamma k}, \quad \gamma = 1, 2, 3 \quad (3)$$

с соответствующими кинетическими коэффициентами $L_{\gamma k}$.

В рассматриваемых типах термодиффузионных задач в твердых изотропных телах потоки носят смысл потока теплоты ($\gamma = 1$), массы ($\gamma = 2$), электромагнитного поля ($\gamma = 3$) под действием обобщенных потенциальных сил, потенциалами которых является температура $U_{1k}(p, \tau) = T(p, \tau)$, концентрация $U_{2k}(p, \tau) = C(p, \tau)$ и напряженность магнитного поля $U_{3k}(p, \tau) = H_a(p, \tau)$. При этом пренебрегаем недиагональными коэффициентами $L_{\gamma k} = 0, \gamma \neq k$ увлечения, т.к. они при интенсивности рассматриваемых процессов незначительны (в 100 и более раз меньше эффекта прямого переноса). Тогда си-

стема (3) распадается на автономные уравнения теплопроводности Фурье для температурного поля:

$$\operatorname{div}(\lambda_a(\Gamma, C) \operatorname{grad} T) - c_a(\Gamma) \frac{\partial T}{\partial \tau} = F_{1a}(p, \tau), \quad (4)$$

дифференциального уравнения диффузии:

$$\operatorname{div}(D_a(\Gamma, C) \operatorname{grad} C) - \frac{\partial C}{\partial \tau} = F_{2a}(p, \tau), \quad (5)$$

и электромагнитного поля:

$$\operatorname{div}(\rho_a(\Gamma) \operatorname{grad} H_a) - \tilde{\eta}_a(H_a, T) \frac{\partial H_a}{\partial \tau} = F_{3a}(p, \tau), \quad (6)$$

где $\tilde{\eta}_a = H_a \frac{\partial \mu_a(H_a)}{\partial H_a} + \mu_a(H_a)$, λ_a , D_a

- коэффициенты теплопроводности и диффузии, ρ_a - удельное электрическое сопротивление, c_a - теплоемкость, μ_a - магнитная проницаемость. Конкретное определение краевых условий локальной удельной мощности источников (стоков) тепла $F_{1a}(p, \tau)$, вещества $F_{2a}(p, \tau)$ или электромагнитного поля $F_{3a}(p, \tau)$ в пространственной точке $p \in \bar{D}$; $\bar{D} = \operatorname{int} \bar{D} \cup S$ производится на основе материального и энергетического баланса в рассматриваемой пространственной области \bar{D} , ограниченной поверхностью S .

В соответствии с этим, обобщенная конструктивная математическая модель термодиффузионных процессов формулируется в виде:

$$\begin{aligned} \dot{\chi}_\tau(p_j, \tau) - L_j \operatorname{div}[k_j(\chi) \operatorname{grad} \chi(p_j, \tau)] = \\ = W(\chi, p_j, \tau), \\ \forall p_j \in \operatorname{int} \bar{D}_j \subset R^3, \forall \tau \in (0, \infty); \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_j(\chi) \dot{\xi}_\tau^{(j)} = B_{j-0}(\chi) \operatorname{grad} \chi(p_{j-0}) + \\ + C_{j+0}(\chi) \operatorname{grad} \chi(p_{j+0}) + \\ + D_j(\chi) [\pi(\chi, \tau, p_j) - \pi_u(\tau, p_j)], \\ \forall p_j \in \xi^{(j)}(\chi, \tau) \forall \tau \in (0, \infty); \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \chi(p_j, \tau) = \chi_0(p_j), \\ \forall \tau = 0, \forall p_j \in \bar{D}_j = \operatorname{int} \bar{D}_j \cup \xi^{(\pm 0)}; \quad (9) \end{aligned}$$

где

$$\dot{\chi}_\tau = \frac{\partial \chi}{\partial \tau}; \quad \dot{\xi}_\tau = \frac{\partial \xi}{\partial \tau};$$

$W(\chi, p, \tau) = (F_{1a}, F_{2a}, F_{3a})^T$; τ - время, $p_j(l, z, y)$ - точка ограниченной в общем случае подвижными границами

$$\xi^{(j)} \in \partial \bar{D}_j = \bar{D}_j \setminus \operatorname{int} \bar{D}_j, \quad \sum_{j=1}^J \bar{D}_j = \bar{D}$$

области \bar{D}_j трехмерного евклидова пространства с координатами

$$l, z, y, \longrightarrow j = \overline{1, J}$$

- номер соответствующей фазы состояния обрабатываемого материала, J - общее количество фаз, отличающихся своими физико-химическими свойствами. В качестве компонентов вектора χ в соответствии с вышеизложенным рассматриваются температура T , концентрация C и напряженность магнитного поля H , а матрицы коэффициентов

$$k_j(\chi), L_j(\chi), A_j(\chi), B_{j\pm 0}(\chi), C_{j\pm 0}, D_j(\chi)$$

имеют соответствующую размерность. Индексом $j \pm 0$ обозначены параметры состояния и коэффициенты в бесконечно малой окрестности границы $\xi^{(j)}$ j -ой области справа и слева от нее соответственно.

На основе системного метода построены взаимосвязанные иерархические структуры критериев оптимальности, проблемно-ориентированных математических моделей и

адекватных постановок комплексных задач оптимального проектирования и управления достаточно широким классом процессов технологической теплофизики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Берталанфи Л.* Общая теория систем. Критический обзор / Исследования по общей теории систем. М.: Прогресс, 1969.
2. Основы современной системотехники / Под ред. *М. Рабина*. М.: Мир, 1975.
3. *Дружинин В.В., Конторов Д.С.* Идея, алгоритм, решение: принятие решений и автоматизация. М.: Воениздат, 1972.
4. Исследование операций / Под ред. *Дж. Моудера, С. Элмаграби* М.: Мир, 1981.
5. *Бутковский А.Г.* Методы управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука, 1975.
6. *Livshitz M.Yu.* Optimal Control of Concooled Temperature, Electromagnetic and Concentration Fields of Electroheating Processes. Proceedings of the International Induction Heating Seminar Podua. May 13-15. 1998.

OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES BY SYSTEM CRITERIA OF QUALITY

© 2001 M.Yu. Livshits

Samara State Technical University

Approach is presented here which deal with technological heat and mass transfer typical processes (induction heating, therm-chemical treatment and so on) optimization on operation quality criteria. Suggested approach is considered as a possible alternative of prescribed technological modes traditional technology.

КЛАССИФИКАЦИЯ ОБРАЗОВ И ЕЕ СВЯЗЬ С ТОПОЛОГИЕЙ МНОГООБРАЗИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

© 2001 А.А. Юдашкин

Самарский государственный технический университет

Представлен новый метод построения классифицирующей динамической нейронной сети. Модель образована совокупностью переменных состояния, - параметров порядка, - каждая из которых отвечает отдельному запомненному прототипу. Переменные связаны посредством матрицы весов, определенной в соответствии с выбранным разбиением всего множества прототипов на подмножества (классы). Классы могут иметь ненулевые пересечения в том случае, когда один или несколько прототипов одновременно принадлежат различным подмножествам. Классификация сводится к конкуренции во времени между параметрами порядка из разных классов. Процесс рассматривается в пространстве состояний, где каждому подмножеству отвечает притягивающее многообразие определенной топологии.

Введение

Следует отметить, что одной из наиболее общих и сложных функций интеллекта является возможность производить классификацию. Ни одно устройство или живой организм не может быть признан "думающим", если он не способен классифицировать образы. Под термином "классификация" здесь понимается процесс, приводящий к выбору известной группы образов (класса), к которой новый объект может быть отнесен в соответствии с некоторым набором критериев принадлежности, возможно, не допускающих формализацию. Эти критерии могут включать в себя не только (или вообще не включать) условие внешнего сходства между новым образом и прототипами в классе, но и различные семантические признаки, например, "назначение" (деньги и продукты), "принципы движения" (автомобили и самолеты) и т.п.. При этом не существует достаточно широкого разнообразия моделей искусственных нейронных сетей, способных выполнять классификацию такого типа. Подавляющее большинство подходов, известных как самоорганизующиеся карты Кохонена [1, 2] и их различные модификации [3], а также квантизация векторов при обучении [1, 4, 5], часто используются при классификации, основанной на сходстве образов. В то же время, очевидно, что проблема получения произвольного правила классификации может быть ре-

шена только посредством топологических изменений классифицирующей модели [6-8]. Для демонстрации возможностей топологического подхода к проблеме синтеза произвольных правил классификации в данной работе используется модель "синергетической нейронной сети" Хакена [9], которая производит распознавание предъявленного образа различной природы посредством конкуренции между скалярными функциями времени, называемыми параметрами порядка. Каждый параметр порядка соответствует одному запомненному образу, и конкуренция сводится к затуханию функций времени, соответствующих всем запомненным образам, кроме одного, наиболее похожего на предъявляемый. Может быть показано, что определенная модификация связей между параметрами порядка так изменяет топологию нейронной сети, что возникает новое устойчивое многообразие вследствие "объединения" отдельных аттракторов, соответствующих запомненным образам. Геометрическая размерность любого из таких многообразий может быть любой, хотя ранее существовавшие аттракторы являлись устойчивыми узлами и, следовательно, имели нулевую размерность. Соответственно, каждое новое многообразие отвечает отдельному подмножеству всего набора запомненных образов, а начальная точка в пространстве параметров порядка будет притянута к многообразию выбранно-

го подмножества. Таким образом, можно говорить о классификации, выполняемой данной моделью. Принципиальным является то, что можно произвольно формировать многообразия в соответствии с набором правил классификации, причем необязательно использовать критерии сходства образов. Данная гибкая модель также позволяет включить один эталон в несколько различных классов, что практически невозможно в рамках альтернативных подходов.

Топология математической модели классификации

Для целей дальнейшего изложения кратко рассмотрим основы модели нейронной сети Хакена и ее развитие для реализации классификации. Каждый образ представлен N-мерным вектором с действительными компонентами; таким образом, $v_i (i=1,2,...,M)$ представляет запомненный образ (прототип), а предъявленный образ обозначен как $q(0)$, где 0 выражает начальный момент времени в процедуре распознавания. С течением времени $q(t)$ стремится к v_k , где k - номер прототипа, наиболее похожего на предъявляемый вектор. В [9] показано, что $q(t)$ может быть разложен в следующую линейную комбинацию:

$$q(t) = \sum_{i=1}^M d_i(t) v_i + \xi(t),$$

где $d_i(t)$ - параметр порядка, а $\xi(t)$ - дополнительная невязка, некоррелированная с каждым из v_i . Распознавание моделируется динамикой следующей системы связанных обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dd_i}{dt} = \lambda_i d_i - B d_i \sum_{j \neq i} d_j \sum_{k=1}^M g_{jk} d_k - C d_i \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M g_{jk} d_j d_k \quad (1)$$

с положительными константами B, C, λ_i . Начальные условия определены следующим выражением:

$$d_i(0) = G^{-1} v_i' q(0),$$

где $G = v'v$ и V - матрица, состоящая из стол-

бцов v_i . Результаты анализа устойчивости системы (1) демонстрируют зависимость существования и типов стационарных решений от соотношений между λ_i [10], однако это не рассматривается в данной работе. Здесь предполагается, что все λ_i равны Λ . При этом каждый запомненный образ v_i обладает парой аттракторов в пространстве параметров порядка, определенной точками с координатами

$$(0, \dots, 0, d_i = \pm \sqrt{\Lambda / C g_{ii}}, 0, \dots, 0).$$

Любая начальная точка будет притянута к одному из указанных аттракторов, а распознавание таким образом заканчивается в тот момент, когда остается только один ненулевой параметр порядка. В подобной модели с конкуренцией не существует ложных устойчивых состояний, а максимальное количество запоминаемых и воспроизводимых образов равно $N-1$, что существенно отличается от распространенных нейронных сетей Хопфилда.

Теперь вместо единственного параметра B в системе уравнений (1) рассмотрим случай, когда кроме связей, задаваемых матрицей G , имеется также новая матрица B с элементами:

$$b_{ij} = \begin{cases} B, & \text{if } i \in J^{(n)}, j \notin J^{(n)} \\ 0, & \text{if } j \in J^{(n)} \end{cases}.$$

Здесь $J^{(n)}$ - система индексов из подмножества натуральных чисел, и, кроме того, в предположении, что все множество запомненных образов Ω разбито на P подмножеств (классов) W_n в соответствии с условиями

$$\Omega = \bigcup_{n=1}^P W_n \text{ и } \bigcap_{n \in J^{(n)}} W_n = \emptyset,$$

полагаем $i \in J^{(n)} \Leftrightarrow v_i \in W_n$. Тогда система (1) может быть записана в форме:

$$\frac{dd_i}{dt} = \Lambda d_i - d_i \sum_{j \neq i} b_{ij} d_j \sum_{k=1}^M g_{jk} d_k - C d_i \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M g_{jk} d_j d_k \quad (2)$$

для всех $i=1,2,...,M$. Можно показать, что новая система (2) обладает стационарными решениями в форме эллиптических многообразий для любого класса W_n :

$$\begin{cases} \sum_{k \in J^{(n)}} d_k \sum_{i \in J^{(n)}} g_{ki} d_i - \Lambda / C = 0 \\ d_j = 0, \text{ if } j \notin J^{(n)} \end{cases} \quad (3)$$

В случае пересекающихся классов существуют также дополнительные стационарные решения, соответствующие каждому пересечению. Рассмотрим множество из s пересекающихся классов W_k , удовлетворяющее соотношению $U_{L^{(s)}} = \bigcap_{k \in L^{(s)}} W_k \neq \emptyset$ и набор $L^{(s)}$

индексов k в случае $v_k \in U_{L^{(s)}}$. Тогда стационарное решение системы (2), соответствующее $U_{L^{(s)}}$, определено посредством следующего выражения:

$$\begin{cases} \sum_{k \in L^{(s)}} d_k \sum_{i \in L^{(s)}} g_{ki} d_i - \Lambda / C = 0 \\ d_j = 0, \text{ if } j \notin L^{(s)} \end{cases} \quad (4)$$

Можно показать, что многообразия (3) состоят из непрерывно распределенных точек, обладающих устойчивостью типа "устойчивый узел" по отношению к фазовому пространству за вычетом касательной максимальной размерности к конкретной рассматриваемой точке многообразия (3). Каждая такая точка обладает нейтральной устойчивостью в линейном приближении в подпространстве, образованной касательной. Если рассматриваются пересекающиеся подмножества, то решение (4) образуется из точек, обладающих нейтральной устойчивостью в подпространстве, образованном объединением касательных ко всем пересекающимся в рассматриваемых точках многообразиям. Следовательно, в рассматриваемой модели с введенной матрицей B происходит конкуренция только между d_i , соответствующими образам v_i , принадлежащим к различным подмножествам. Это приводит к динамическому затуханию значений всех параметров порядка, за исключением принадлежащих к выбранному классу W_k (или нескольким, если они пересекаются), т.е. имеет место классификация предьявленного образа.

Случай трех образов

В данном разделе подробно рассматри-

вается случай $M=3$. Пусть три образа разбиты на два класса ($P=2$). Сначала остановимся на случае непересекающихся классов. Класс W_1 состоит из одного образа v_1 , а класс W_2 - из v_2 и v_3 . Тогда матрица B задается следующим образом:

$$B = \begin{pmatrix} 0 & B & B \\ B & 0 & 0 \\ B & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

где B - положительная константа. Система уравнений (2) принимает форму:

$$\begin{cases} \frac{dd_1}{dt} = \Lambda d_1 - B \sum_{j=2}^3 d_j \sum_{k=1}^3 g_{jk} d_k - C \sum_{j=1}^3 d_j \sum_{k=1}^3 g_{jk} d_k \\ \frac{dd_2}{dt} = \Lambda d_2 - B d_2 d_1 \sum_{k=1}^3 g_{1k} d_k - C \sum_{j=1}^3 d_j \sum_{k=1}^3 g_{jk} d_k \\ \frac{dd_3}{dt} = \Lambda d_3 - B d_3 d_1 \sum_{k=1}^3 g_{1k} d_k - C \sum_{j=1}^3 d_j \sum_{k=1}^3 g_{jk} d_k \end{cases} \quad (5)$$

Следуя подходу, описанному в разделе 1, исследуем два стационарных решения системы (5):

$$D_1 = \{d_1^2 = \Lambda / C g_{11}, d_2 = 0, d_3 = 0\},$$

$$D_{23} = \left\{ d_1 = 0, d_2, d_3 : \sum_{j=2}^3 d_j \sum_{k=2}^3 g_{jk} d_k - \Lambda / C = 0 \right\}$$

где решение D_1 должно соответствовать аттрактору класса W_1 , а D_{23} - аттрактору класса W_2 . Данное предположение может быть доказано после исследования собственных чисел матрицы линеаризации системы (5). Матрица линеаризации для решения D_1 имеет следующий вид:

$$L_1 = \begin{pmatrix} -2\Lambda & -(B/C + 2)\Lambda g_{12}/g_{11} & -(B/C + 2)\Lambda g_{13}/g_{11} \\ 0 & -\Lambda B / C & 0 \\ 0 & 0 & -\Lambda B / C \end{pmatrix}$$

Очевидно, что все ее собственные значения отрицательны, поэтому D_1 - аттрактор класса W_1 (многообразие размерности 0). Аналогично для D_{23} :

$$L_{23} = \begin{pmatrix} -\Lambda B / C & 0 & 0 \\ - (B + 2C) d_2 \sum_{k=2}^3 g_{1k} d_k & -2d_2 \sum_{k=2}^3 g_{2k} d_k & -2d_2 \sum_{k=2}^3 g_{3k} d_k \\ - (B + 2C) d_3 \sum_{k=2}^3 g_{1k} d_k & -2d_3 \sum_{k=2}^3 g_{2k} d_k & -2d_3 \sum_{k=2}^3 g_{3k} d_k \end{pmatrix}$$

Легко показать, что L_{23} имеет собствен-

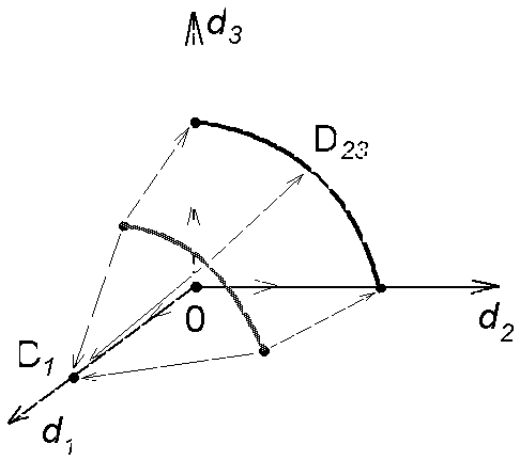


Рис. 1. Аттракторы двух классов для случая трех запомненных образов

ные значения $\{-\Lambda B / C, -2\Lambda, 0\}$, что отвечает стационарному решению в виде многообразия размерности 1. Каждая точка на многообразии D_{23} является аттрактором относительно дополнения D_{23} до трехмерного евклидова пространства и обладает нейтральной устойчивостью по отношению к остальным точкам данного многообразия.

На рис.1 приведен случай $M=3$ запомненных образов, распределенных между $P=2$ классами. Здесь показано одно стационарное решение вида эллиптического многообразия (аттрактор класса W_2) и точка (аттрактор класса W_1).

Здесь аттракторы классов W_1 и W_2 обозначены соответственно как D_1 и D_{23} для наборов индексов $J^{(1)}=\{1\}$ и $J^{(2)}=\{2,3\}$. Фазовые траектории заканчиваются либо в устойчивом узле D_1 , либо в одной из точек многообразия D_{23} . Таким образом, предъявленный образ либо идентифицируется как прототип v_1 , либо классифицируется в подмножество W_2 .

Иная ситуация имеет место, если W_1 и W_2 пересекаются. Пусть v_2 принадлежит обоим классам, причем v_1 принадлежит только W_1 , а v_3 принадлежит W_2 . Существуют два эллиптических многообразия, представляющих указанные классы:

$$D_{12} = \left\{ d_1 d_2 : \sum_{j=1}^2 d_j \sum_{k=1}^2 g_{jk} d_k - \Lambda / C = 0, d_3 = 0 \right\}$$

$$D_{23} = \left\{ d_1 = 0, d_2 d_3 : \sum_{j=2}^3 d_j \sum_{k=2}^3 g_{jk} d_k - \Lambda / C = 0 \right\}$$

Они пересекаются в точке $\{0, \pm\sqrt{\Lambda / Cg_{22}}, 0\}$, и матрица линеаризации, соответствующая пересечению, имеет два нулевых и одно отрицательное собственное значение. При этом классификация сводится к конкуренции между образами v_1 и v_3 в двумерном подпространстве.

Рассмотренные примеры хорошо иллюстрируют достоинства предложенной модели. Если классы не пересекаются, то начальная конфигурация считается принадлежащей к одному из них после завершения конкуренции между соответствующими группами параметров порядка. Каждый образ принадлежит своей категории, т.е. пространство образов точно разделено на области притяжения отдельных классов. Однако существует ряд реальных ситуаций, когда для нового образа невозможно указать только один класс. Например, если попытаться классифицировать велосипед с использованием категорий "машины", "игрушки" и "продукты", то следует отметить, что указанный объект может быть отнесен и к "машинам", и к "игрушкам" одновременно. Поэтому при запоминании образа велосипеда следует добавить его сразу в два класса. Предложенная модель позволяет это сделать. Тогда если затем будет предъявлен новый образ, похожий в том числе на велосипед, то сам прототип не будет участвовать в конкуренции между классами "игрушек" и "машин", соответственно, результат будет зависеть от остальных запомненных образов.

Матрица B может быть сформирована в соответствии с различными требованиями. Очевидно, что в данном случае совершенно необязательно объединять именно похожие образы в рамках одного класса, поскольку модель позволяет использовать любые формальные правила. Если предъявленный образ идентифицируется с одним из прототипов, выбирается весь соответствующий класс, т.е. для выполнения классификации достаточно того, чтобы новый образ был похож на хотя бы одного представителя класса.

Численное моделирование

Численные эксперименты были прове-

дены для $N=100$, $M=98$ и состояли из последовательных предъявлений произвольно выбираемых из набора прототипов, к которым были добавлены искажения. Качество классификации рассчитывалось как отношение числа успешной работы модели к общему числу предъявлений. Искажения представляли собой вектор шума η с нормальным распределением. Дисперсия шума σ_{η}^2 изменялась так, что уровень шума $\rho = \sigma_{\eta}^2 / \sigma_v^2$, где σ_v^2 - дисперсия прототипа, рос от 0 до 1. Эксперименты продемонстрировали ряд интересных особенностей модели. Во-первых, качество классификации Q зависит от разбиения исходного набора образов - величина Q убывала от 100% до 0% с уменьшением мощности выбранного класса. Во-вторых, среднее качество классификации было всегда выше, чем качество распознавания (определения уникального прототипа, похожего на предъявляемый образ) с теми же параметрами модели (около 95%). В-третьих, обнаружен немонотонный характер зависимости качества классификации от уровня шума; более того, существует интервал повышения уровня шума, на котором Q также растет, что можно видеть из рис.2.

Причина последнего эффекта лежит в некоторых топологических особенностях распределения начального состояния системы (2) и имеет достаточное сходство с соответствующими биологическими процессами. В частности, рассмотрим среднеквадратическое отклонение S начального состояния $d(0)$ от

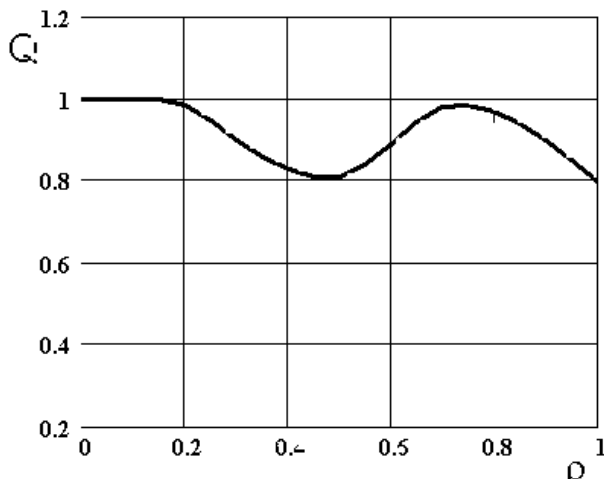


Рис. 2. Изменение качества классификации в зависимости от уровня шума

некоторого стационарного состояния $d_0 = \{1, 0, \dots, 0\}$ ($\Lambda=C=1$), отвечающего выбору v_0 . Тогда $q(0) = v_0 + \eta$ и S зависит от $d(0)$ как:

$$S^2 = [d_0 - d(0)]^T G [d_0 - d(0)] = \eta^T V G^{-1} V^T \eta$$

что может быть получено из определения нейронной сети Хакена [9]. Очевидно, что, если $M < N$, то квадратичная форма $S^2(\eta)$ является вырожденной и определяет гиперповерхность типа параболического цилиндра в пространстве, образованном S^2 и координатами вектора η . Поэтому для некоторой постоянной дисперсии шума σ_{η}^2 может быть найден диапазон $[0, \delta]$ возможных значений S^2 . Это приводит к немонотонному характеру изменения качества классификации с ростом уровня шума. Отсюда также следует, что использование уровня шума в качестве параметра, от которого зависит качество распознавания для динамических моделей нейронных сетей (в частности, сетей Хопфилда), строящихся с использованием квадратичных форм, вообще говоря, может не являться адекватным подходом к качеству модели и следует сформировать новые требования к процедуре тестирования.

Выводы

Мы рассмотрели новую схему синтеза синергетической нейронной сети, которая способна классифицировать предъявляемый образ. Здесь классификация происходит вследствие разделения фазового пространства на области притяжения многообразий, отвечающих различным наборам запомненных образов (классам). Процедура заключается в выборе одного из классов, к которому предъявляемая конфигурация может быть отнесена в соответствии с некоторым правилом. В процессе классификации все классы конкурируют друг с другом, результатом чего является ситуация, когда параметры порядка всех классов, кроме одного выбранного, релаксируют к нулю. Данная нейронная сеть обладает высоким качеством классификации, что было установлено численными экспериментами на границе памяти. Прототипы могут быть разделены на классы в соответствии с произвольными правилами, а не только по

признаку сходства. Более того, допустимо ассоциировать любой запоминаемый образ с более чем одним классом, т.е. задавать несколько семантических характеристик одному образу. Предложенный метод позволяет строить достаточно развитые нейронные сети с гибким обучением через построение матриц B и G и придавать им разнообразные свойства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kohonen T.* Self-Organizing Maps. Berlin: Springer-Verlag, 1995.
2. *Cho S.B.* Ensemble of structure-adaptive self-organizing maps for high performance classification // Information Sciences. Vol.23. 2000. №1.
3. *Bishop C., Svensen M., Williams C.* GTM: A Principled Alternative to the Self-Organizing Map // Advances in Neural Information Processing Systems. Vol.9. 1997.
4. *Ripley B.D.* Pattern Recognition and Neural Networks. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
5. *Baras J. S., Dey S.* Adaptive classification based on compressed data using learning vector quantization // Proc. of the 38th IEEE Conference on Decision and Control. Vol.4. 1999.
6. *Горбань А.Н., Россиев Д.А.* Нейронные сети на персональном компьютере. Новосибирск: Наука, 1996.
7. *Utsugi A.* Hyperparameter Selection for Self-Organizing Maps // Neural Computation. Vol.9. 1997. №3.
8. *Hole A.* Vapnik-Chervonenkis Generalization Bounds for Real Valued Neural Networks // Neural Computation. Vol.8. 1996. №6.
9. *Haken H.* Synergetic computers and cognition: A top-down approach to neural nets. Berlin: Springer-Verlag, 1991.
10. *Юдашкин А.А.* Бифуркации стационарных решений в синергетической нейронной сети и управление распознаванием образов // Автоматика и телемеханика. 1996. №1.

PATTERN CLASSIFICATION AND ITS RELATION WITH TOPOLOGY OF DYNAMICAL SYSTEMS MANIFOLDS

© 2001 A.A. Yudashkin

Samara State Technical University

A novel method of neural network for classification is presented. The neural network consists of order parameters each of those corresponds to a unique stored prototype. These parameters connected to each other by the matrix of weights which can be predetermined accordingly to the required partition of the whole set of prototypes into classes or subsets. The subsets may intersect if any prototype belongs to several classes. The classification performs via the temporal competition between subsets of order parameters. This leads to the representation of attractive manifolds in the phase space, when each manifold corresponds to a subset.