УДК 303.732

ЛИНГВО – КОМБИНАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОХО ФОРМАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМ

М. Б. Игнатьев,
д-р техн. наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП)

Рассматривается лингво-комбинаторное моделирование плохо формализованных систем, для которых существует лишь описание на естественном языке. Моделирование базируется на использовании ключевых слов, основных понятий, сложившихся в предметной области. Модель состоит из трех групп переменных – характеристик основных понятий, изменения этих характеристик и структурированной неопределенности в эквивалентных уравнениях, которая может быть использована для адаптации и управления. В качестве примеров рассматриваются модели города, организма и атмосферы.

This paper discusses utilization of a combinatorial simulation approach for a complex system modeling. When dealing with complex systems one has to consider that conditions and environment are not fully determined. In the course of this paper it is discussed how a poorly formalized system can be efficiently represented and modeled by combinatorial simulation. Practical applications are demonstrated on the examples of atoms, human organism, city and weather.

Построение лингво-комбинаторных моделей

Математические модели имеются лишь для небольшого числа реальных систем. Системы описываются, прежде всего, с помощью естественного языка. В настоящей работе предлагается способ перехода от описания на естественном языке к математическим уравнениям. Например, пусть имеется фраза

$$WORD_1 + WORD_2 + WORD_3. \qquad (1)$$

В этой фразе мы обозначаем слова и только подразумеваем их смысл. В сложившейся структуре естественного языка смысл не обозначается. Ввести понятие смысла можно в следующей форме

$$WORD_1 SENSE_1 + WORD_2 SENSE_2 + \\ + WORD_3 SENSE_3 = 0. \qquad (2)$$

Будем обозначать слова как A_i (от англ. Appearance), а смыслы – как E_i (от англ. Essence). Тогда уравнение (2) может быть представлено как

$$A_1E_1 + A_2E_2 + A_3E_3 = 0. \qquad (3)$$

Уравнения (2) и (3) являются моделями фразы (1). Если мы имеем математическое уравнение $F(x_1, x_2, x_3) = 0$, то можем получить форму (3) посредством дифференцирования этого уравнения. Тогда A_i будут частными производными, а E_i – производными по времени от переменных.

Эта модель является алгебраическим кольцом и мы можем разрешить уравнение (3) относительно A_i либо относительно E_i путем введения третьей группы переменных – произвольных коэффициентов U_s [1, 2, 3]:

$$\begin{aligned} A_1 &= U_1E_2 + U_2E_3; \\ A_2 &= -U_1E_1 + U_3E_3; \\ A_3 &= -U_2E_1 - U_3E_2 \end{aligned} \qquad (4)$$

или

$$\begin{aligned} E_1 &= U_1A_2 + U_2A_3; \\ E_2 &= -U_1A_1 + U_3A_3; \\ E_3 &= -U_2A_1 - U_3A_2, \end{aligned} \qquad (5)$$

где U_1, U_2, U_3 – произвольные коэффициенты, которые можно использовать для решения различных задач на многообразии (3). Например, если хотим достигнуть максимум по переменной x_3, то можем назначить произвольные коэффициенты $U_2 = -bA_1$, $U_3 = -bA_2$ и тогда получим

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= U_1A_2 - bA_1A_3; \\ \frac{dx_2}{dt} &= -U_1A_1 - bA_2A_3; \\ \frac{dx_3}{dt} &= b(A_1A_1 + A_2A_2). \end{aligned} \qquad (6)$$

Если $b > 0$, то переменная x_3 устойчиво стремится к максимуму, а для манипуляции траекторией остается коэффициент U_1.

В общем случае, при n переменных и m многообразий, ограничений, число произвольных коэффициентов S будет равно числу сочетаний из n по m+1 [1] (таблица):

$n\backslash m$	1	2	3	4	5	6	7	8
2	1							
3	3	1						
4	6	4	1					
5	10	10	5	1				
6	15	20	15	6	1			
7	21	35	35	21	7	1		
8	28	56	70	56	28	8	1	
9	36	84	126	126	84	36	9	1

$$S = C_n^{m+1},\ n > m. \qquad (7)$$

Число произвольных коэффициентов является мерой неопределенности и адаптивности. Лингво-комбинаторное моделирование заключается в том, что в конкретной предметной области выделяются ключевые слова, которые объединяются во фразы типа (1), на основе которых строятся эквивалентные системы уравнений с произвольными коэффициентами. В частном случае они могут быть дифференциальными уравнениями и при их исследовании может быть использован хорошо разработанный математический аппарат. Лингво-комбинаторное модели- рование включает все комбинации и все варианты решений и является полезным эвристическим приемом при изучении плохо формализованных систем [3–5].

Лингво-комбинаторное моделирование атомов

При построении лингво-комбинаторных моделей атомов будем исходить из ключевых базовых понятий, которые уже сложились в науке.

Рассмотрим в качестве примера атом водорода и в качестве ключевых слов возьмем слова «атом» (*Atom*), «протон» (*Proton*), «электрон» (*Electron*). Тогда фраза (1) будет иметь вид

$$Atom + Proton + Electron. \qquad (8)$$

В эквивалентных уравнениях (3), (4) и (5) A_1 – характеристика атома водорода; E_1 – изменение этой характеристики; A_2 – характеристика протона; E_2 – изменение этой характеристики; A_3 – характеристика электрона; E_3 – изменение этой характеристики. Для моделирования дейтерия используем ключевые слова «атом» (*Atom*), «протон» (*Proton*), «электрон» (*Electron*), «нейтрон» (*Neutron*):

$$Atom + Proton + Electron + Neutron \qquad (9)$$

и получим эквивалентные уравнения

$$\begin{aligned} E_1 &= U_1A_2 + U_2A_3 + U_3A_4; \\ E_2 &= -U_1A_2 + U_4A_3 + U_5A_4; \\ E_3 &= -U_2A_1 - U_4A_2 + U_6A_4; \\ E_4 &= -U_3A_1 - U_5A_2 - U_6A_3, \end{aligned} \qquad (10)$$

где U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6 – произвольные коэффициенты; A_1 – характеристика атома дейтерия; E_1 – изменение этой характеристики; A_2 – характеристика протона атома дейтерия; E_2 – изменение этой характеристики; A_3 – характеристика электрона атома дейтерия, E_3 – изменение этой характеристики; A_4 – характеристика нейтрона атома дейтерия; E_4 – изменение этой характеристики. В случае атомных реакций возможно превращение дейтерия в водород посредством трансформации уравнений (10) в уравнения (4).

Аналогичным образом возможно построение лингво-комбинаторных моделей всех известных элементов таблицы Менделеева и их изотопов и возможных новых элементов. Это еще один путь для компьютерного моделирования физико-химических реакций. При этом необходимо решать задачу верификации таких моделей применительно к конкретным системам.

Структурная стабильность, совокупность устойчивых связей объекта, обеспечивающих его целостность и тождественность самому себе, т. е. сохранение основных свойств при различных внешних и внутренних воздействиях, обеспечивается адаптационными возможностями атомных и молекулярных систем [6]. В представленных лингво-комбинаторных моделях адаптационные возможности систем определяются числом произвольных коэффициентов в структуре эквивалентных уравнений и наибольшая структурная стабильность достигается в зоне адаптационного максимума, который обнаруживается у различных систем с числом переменных больше шести [1, 2] (см. таблицу). Для удержания систем в зоне адаптационного максимума можно использовать различные методы – рост числа переменных, наложение и снятие ограничений, объединение систем в коллективы. Действительно, если имеем две системы

$$\begin{aligned} S_1 &= C_{n_1}^{m_1+1}; \\ S_2 &= C_{n_2}^{m_2+1}, \end{aligned} \qquad (11)$$

то путем наложения общих ограничений m_{col} получим коллектив

$$S_{col} = C_{n_1+n_2}^{m_1+m_2+m_{col}+1}. \qquad (12)$$

При этом в зависимости от конкретных параметров может быть $S_{col} > S_1 + S_2$, когда объединение в коллектив приводит к росту адаптационных возможностей, или $S_{col} < S_1 + S_2$, когда адаптационные возможности коллектива меньше суммы адаптационных возможностей исходных систем. Лингво-комбинаторное моделирование может явиться полезным инструментом при анализе и синтезе атомно-молекулярных систем.

Моделирование города

Если в качестве ключевых слов взять «население», «пассионарность», «территория», «производство», «экология и безопасность», «финансы», «внешние связи», то в соответствии с изложенной методикой уравнение города будет представлено следующим образом:

$$A_1E_1 + A_2E_2 + \ldots + A_7E_7 = 0; \qquad (13)$$

а эквивалентные уравнения будут иметь вид

$$
\begin{aligned}
E_1 &= U_1A_2 + U_2A_3 + U_3A_4 + U_4A_5 + U_5A_6 + U_6A_7;\\
E_2 &= U_1A_1 + U_7A_3 + U_8A_4 + U_9A_5 + U_{10}A_6 + U_{11}A_7;\\
E_3 &= -U_2A_1 - U_7A_2 + U_{12}A_4 + U_{13}A_5 + U_{14}A_6 + U_{15}A_7;\\
E_4 &= -U_3A_1 - U_8A_2 - U_{12}A_3 + U_{16}A_5 + U_{17}A_6 + U_{18}A_7;\\
E_5 &= -U_4A_1 - U_9A_2 - U_{13}A_3 - U_{16}A_4 + U_{19}A_6 + U_{20}A_7;\\
E_6 &= -U_5A_1 - U_{10}A_2 - U_{14}A_3 - U_{17}A_4 - U_{19}A_5 + U_{21}A_7;\\
E_7 &= -U_6A_1 - U_{11}A_2 - U_{15}A_3 - U_{18}A_4 - U_{20}A_5 - U_{21}A_6,
\end{aligned}
\tag{14}
$$

где A_1 – характеристика населения, которая включает в себя характеристики здоровья, образования, занятости; E_1 – изменение этой характеристики; A_2 – характеристика пассионарности, устремлений групп населения; E_2 – изменение этой характеристики; A_3 – характеристика территории, включая наземные и подземные постройки, этот блок может быть геоинформационной системой; E_3 – изменение этой характеристики; A_4 – характеристика производства, включая оценку различных видов деятельности (научной, производственной, транспортной, торговой и др.); E_4 – изменение этой характеристики; A_5 – характеристика экологии и безопасности; E_5 – изменение этой характеристики; A_6 – характеристика финансов, финансовых потоков и запасов в городе; E_6 – изменение этой характеристики; A_7 – характеристика внешних связей города, включая оценку входящих и выходящих потоков людей, энергии, материалов, информации, финансов; E_7 – изменение этой характеристики; $U_1, U_2, \ldots, U_{21}$ – произвольные коэффициенты, которые могут быть использованы для управления и решения различных задач на многообразии (13). Эта модель используется в системах для поддержки принятия решений городскими властями [4].

Модель ментальных процессов

Обычно ментальные процессы характеризуются ключевыми словами «восприятие», «внимание», «память», «мышление», «язык», «эмоции», «управление движениями». Тогда структура эквивалентных уравнений будет иметь вид (14), где A_1 – характеристика восприятия; E_1 – изменение этой характеристики; A_2 – характеристика внимания; E_2 – изменение этой характеристики; A_3 – характеристика памяти; E_3 – изменение этой характеристики; A_4 – характеристика мышления; E_4 – изменение этой характеристики; A_5 – характеристика языка; E_5 – изменение этой характеристики; A_6 – характеристика эмоций; E_6 – изменение этой характеристики; A_7 – характеристика управления движениями; E_7 – изменение этой характеристики. Уравнения (14) определяют взаимодействие между различными составляющими ментальных процессов в рамках нашей модели. Из этой модели вытекает необходимость в блоке управления для манипуляции произвольными коэффициентами. Этот блок управления можно считать аналогом высшей психической структуры – личности. Ментальные процессы являются частью целостного организма.

Моделирование организма

Организм человека – очень сложная система, которую можно рассматривать на уровне молекул, клеток, органов. Для лечащего врача важно рассмотрение организма прежде всего на уровне органов и при построении лингво-комбинаторной модели мы будем исходить из общепринятого набора органов – «органы движения», «органы пищеварения», «органы дыхания», «мочеполовые органы», «кроветворная и лимфатическая системы», «центральная нервная система», «периферийная нервная система», «железы внутренней секреции», «кожа и сенсорные системы». Уравнение организма будет содержать девять переменных

$$A_1E_1 + A_2E_2 + \ldots + A_9E_9 = 0, \tag{15}$$

а структура эквивалентных уравнений будет иметь следующий вид:

$$
\begin{aligned}
E_1 &= U_1A_2 + U_2A_3 + U_3A_4 + U_4A_5 +\\
&+ U_5A_6 + U_6A_7 + U_7A_8 + U_8A_9;\\
E_2 &= -U_1A_2 + U_9A_3 + U_{10}A_4 + U_{11}A_5 +\\
&+ U_{12}A_6 + U_{13}A_7 + U_{14}A_8 + U_{15}A_9;\\
E_3 &= -U_1A_1 - U_9A_2 + U_{16}A_4 + U_{17}A_5 +\\
&+ U_{18}A_6 + U_{19}A_7 + U_{20}A_8 + U_{21}A_9;\\
E_4 &= -U_3A_1 - U_{10}A_2 - U_{16}A_3 + U_{22}A_5 +\\
&+ U_{23}A_6 + U_{24}A_7 + U_{25}A_8 + U_{26}A_9;\\
E_5 &= -U_4A_1 - U_{11}A_2 - U_{17}A_3 - U_{22}A_4 +\\
&+ U_{27}A_6 + U_{28}A_7 + U_{29}A_8 + U_{30}A_9;\\
E_6 &= -U_5A_1 - U_{12}A_2 - U_{18}A_3 - U_{23}A_4 -\\
&- U_{27}A_5 + U_{31}A_7 + U_{32}A_8 + U_{33}A_9;\\
E_7 &= -U_6A_1 - U_{13}A_2 - U_{19}A_3 - U_{24}A_4 -\\
&- U_{28}A_5 - U_{31}A_6 + U_{34}A_8 + U_{35}A_9;\\
E_8 &= -U_7A_1 - U_{14}A_2 - U_{20}A_3 - U_{25}A_4 -\\
&- U_{29}A_5 - U_{32}A_6 - U_{34}A_7 + U_{36}A_9;\\
E_9 &= -U_8A_1 - U_{15}A_2 - U_{21}A_3 - U_{26}A_4 -\\
&- U_{30}A_5 - U_{33}A_6 - U_{35}A_7 - U_{36}A_8,
\end{aligned}
$$

где $U_1, U_2, \ldots, U_{36}$ – произвольные коэффициенты, которые могут быть использованы для настройки модели; A_1 – характеристика органов движения; E_1 – изменение этой характеристики и т. д. Эта модель используется в страховой медицине [3].

Моделирование атмосферы

В качестве ключевых слов можно взять метеорологические элементы – «температура», «давление воздуха», «влажность воздуха», «скорость ветра», «направление ветра», «облачность», «осадки», «видимость (прозрачность атмосферы)», «температура почвы», «температура поверхности воды» – 10 переменных. В структуре эквивалентных уравнений этой системы будет содержаться 45 произвольных коэффициентов:

$$
\begin{aligned}
E_1 &= U_1A_2 + U_2A_3 + U_3A_4 + U_4A_5 + U_5A_6 + \\
&+ U_6A_7 + U_7A_8 + U_8A_9 + U_9A_{10}; \\
E_2 &= - U_1A_1 + U_{10}A_3 + U_{11}A_4 + U_{12}A_5 + U_{13}A_6 + \\
&+ U_{14}A_7 + U_{15}A_8 + U_{16}A_9 + U_{17}A_{10}; \\
E_3 &= - U_2A_1 - U_{10}A_2 + U_{18}A_4 + U_{19}A_5 + U_{20}A_6 + \\
&+ U_{21}A_7 + U_{22}A_8 + U_{23}A_9 + U_{24}A_{10}; \\
E_4 &= - U_3A_1 - U_{11}A_2 - U_{18}A_3 + U_{25}A_5 + U_{26}A_6 + \\
&+ U_{27}A_7 + U_{28}A_8 + U_{29}A_9 + U_{30}A_{10}; \\
E_5 &= - U_4A_1 - U_{12}A_2 - U_{19}A_3 - U_{25}A_4 + U_{31}A_6 + \\
&+ U_{32}A_7 + U_{33}A_8 + U_{34}A_9 + U_{35}A_{10}; \\
E_6 &= - U_5A_1 - U_{13}A_2 - U_{20}A_3 - U_{26}A_4 - U_{31}A_5 + \\
&+ U_{36}A_7 + U_{37}A_8 + U_{38}A_9 + U_{39}A_{10}; \\
E_7 &= - U_6A_1 - U_{14}A_2 - U_{21}A_3 - U_{27}A_4 - U_{32}A_5 - \\
&- U_{36}A_6 + U_{40}A_8 + U_{41}A_9 + U_{42}A_{10}; \\
E_8 &= - U_7A_1 - U_{15}A_2 - U_{22}A_3 - U_{28}A_4 - U_{33}A_5 - \\
&- U_{37}A_6 - U_{40}A_7 + U_{43}A_9 + U_{44}A_{10}; \\
E_9 &= - U_8A_1 - U_{16}A_2 - U_{23}A_3 - U_{29}A_4 - U_{34}A_5 - \\
&- U_{38}A_6 - U_{41}A_7 - U_{43}A_8 + U_{45}A_{10}; \\
E_{10} &= - U_9A_1 - U_{17}A_2 - U_{24}A_3 - U_{30}A_4 - U_{35}A_5 - \\
&- U_{39}A_6 - U_{42}A_7 - U_{44}A_8 - U_{45}A_9.
\end{aligned}
$$

В этой системе уравнений A_1 – характеристика температуры воздуха; E_1 – изменение этой характеристики; A_2 – характеристика давления; E_2 – изменение этой характеристики и т. д. $U_1, U_2, \ldots, U_{45}$ – произвольные коэффициенты, наличие которых опре- деляет возможность управления характеристиками. Выявление возможности управления важно для подстройки модели и управления погодой.

Моделирование игр

Лингво-комбинаторный подход можно использовать и при моделировании игр, таких как шахматы и футбол. Рассмотрим простую футбольную ситуацию – два игрока и мяч, что можно описать как

Игрок 1 + *Игрок* 2 + *Мяч.*

Моделью этого выражения будет уравнение (3), где A_1 – характеристика игрока 1; E_1 – изменение этой характеристики; A_2 – характеристика игрока 2; E_2 – изменение этой характеристики; A_3 – характеристика мяча; E_3 – изменение этой характеристики.

Соответствующая эквивалентная система уравнений будет иметь вид (4), где, манипулируя произвольными коэффициентами, можно управлять поведением игроков и мяча. Если ввести новые переменные: A_4 – характеристика расстояния между игроком 1 и мячом; A_5 – характеристика расстояния между игроком 2 и мячом и их изменения, соответственно, то тогда вместо уравнения (4) получим уравнение

$$A_1E_1 + A_2E_2 + A_3E_3 + + A_4E_4 + A_5E_5 = 0 .$$

Разрешив его относительно изменений E, получим систему уравнений

$$
\begin{aligned}
E_1 &= U_1A_2 + U_2A_3 + U_3A_4 + U_4A_5; \\
E_2 &= - U_1A_1 + U_5A_3 + U_6A_4 + U_7A_5; \\
E_3 &= - U_2A_1 - U_5A_2 + U_8A_4 + U_9A_5; \\
E_4 &= - U_3A_1 - U_6A_2 - U_8A_3 + U_{10}A_5; \\
E_5 &= - U_4A_1 - U_7A_2 - U_9A_3 - U_{10}A_4,
\end{aligned}
$$

где $U_1, \ldots, U_{10}$ – произвольные коэффициенты, манипулируя которыми можно обеспечить сближение игроков с мячом. Аналогичным образом моделируется поведение двух команд по 11 игроков в каждой. Этот подход был использован при моделировании поведения игроков-роботов.

Заключение

Лингво-комбинаторное моделирование – это универсальный метод моделирования плохо формализованных систем в самых различных областях науки, техники, в различных сферах человеческой деятельности. При каждом конкретном применении этого метода необходимо осуществлять верификацию модели, проверять ее на соответствие поведению реального объекта. Наличие произвольных коэффициентов и возможность расширения модели, возможность включения новых переменных, новых ключевых слов позволяют настраивать модель для моделирования сложных реальных объектов.

Литература

1. **Игнатьев М. Б.** Голономные автоматические системы. – М.; Л.: Изд. АН СССР, 1963. – 204 с.
2. **Ignatiev M. B.** Simulation of Adaptational Maximum Phenomenon in Developing Systems. – Proceedings of The SIMTEC'93 – 1993 International Simulation Technology Conference. – San Francisco, USA, 1993. – P. 41–42.
3. **Ignatyev M. B., Makina D. M., Petrischev N. N. and oth.** Global model of organism for decision making support. Proceedings of the High Performance Computing Symposium – HPC 2000, Ed. A. Tentner, 2000 Advanced Simulation Technologies Conference, Washington D.C., USA, 2000 – P. 66–71.
4. **Ignatyev M. B.** Linguo-combinatorial method for complex systems simulation. Proceedings of the 6th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics. – Vol. XI, Computer science II, Orlando, USA, 2002 – P. 224–227.
5. **Ignatyev M. B., Pinigin G. I.** Linguo-combinatorial simulation of universe" XXV General Assembly of International Astronomical Union, Sydney, Australia, 2003 (www.astronomy2003.com)
6. **Бейдер Р.** Атомы в молекулах. – М.: Мир, 2001. – 465 с.