

УДК 621.513.8

В.С. Степашко

Концептуальные основы интеллектуального моделирования

Рассмотрены вопросы интеллектуализации средств моделирования сложных процессов и систем. В результате аналитического обзора подходов предложена усовершенствованная концепция интеллектуального моделирования на основе анализа и структуризации знаний в предметной области построения моделей.

Розглянуто питання інтелектуалізації засобів моделювання складних процесів та систем. В результаті аналітичного огляду підходів запропоновано удосконалену концепцію інтелектуального моделювання на основі аналізу і структуризації знань у предметній галузі побудови моделей.

Введение. Моделирование сложных процессов и систем, включая социально-экономические разного уровня (макрэкономика и социальные процессы на уровне государства, отраслевые, секторальные и региональные системы, микроэкономика предприятий и пр.), является необходимым условием эффективного решения задач управления и принятия решений. Построение адекватных прогнозирующих моделей необходимо во избежание нежелательного развития процессов в таких системах.

В современных процессах принятия управленческих решений наибольший эффект дает использование математических моделей, для построения которых имеется много методов и средств, однако они все еще не используются широко в практике управления. В последние десятилетия широко разрабатываются и применяются компьютерные системы управления и поддержки принятия решений, повышение уровня их интеллектуальности в том числе средствами моделирования, что является актуальной задачей.

В данной статье рассматриваются вопросы интеллектуализации средств моделирования сложных процессов и систем, и на основе анализа имеющихся подходов предложена усовершенствованная концепция интеллектуального моделирования, углубляющая, по мнению автора, существующую достаточно стереотипную точку зрения.

Обзор публикаций по интеллектуальному моделированию

Целенаправленный поиск журнальных и книжных источников, в названиях и текстах которых применяется термин *интеллектуальное моделирование* и его вариации, показал, что таких публикаций не много. В результате удалось найти только несколько статей украинских авторов [1–6] и примерно столько же из ближнего зарубежья [7–13] по данной тематике, в то время как в англоязычной литературе словосочетание *intelligent modeling* распространено несколько больше, например [14–21]. Это говорит, с одной стороны, о том, что такая тематика уже заявила о своем существовании и актуальности, а с другой – что понятие интеллектуального моделирования все еще не является устоявшимся, широко применяемым и общепризнанным.

В результате анализа подходов к разработке интеллектуальных методов и средств моделирования сложных процессов и систем, имеющих в указанных источниках, можно сделать однозначный вывод, что абсолютное большинство публикаций, оперирующих термином *интеллектуальное моделирование*, оправдывает его применение использованием искусственных нейросетей, эволюционных алгоритмов и других методов и средств вычислительного интеллекта. Отметим, что в последнее десятилетие это уже вполне сложившаяся и даже до-

минирующая терминологическая тенденция. Многие авторы, основываясь на том, что в области искусственного интеллекта сформировались специализированные группы методов и средств, называемые *интеллектуальным анализом данных* и его обобщение *вычислительный интеллект*, любые системы моделирования, управления и принятия решений называют *интеллектуальными* уже только ввиду использования, например, нейросетей (в абсолютном большинстве случаев), генетических алгоритмов или нечеткой логики.

Очевидно, что эту сложившуюся и даже стереотипную, но формально приемлемую, точку зрения следует принимать во внимание, однако при этом глубину ее обоснованности можно ставить под сомнение. Например, нейросети можно считать специфическими средствами для построения нелинейных входо-выходных моделей типа *черного ящика*, хотя и существенно снижающие требования к уровню знания «физики» объекта моделирования. При этом настроенная сеть является вычислителем ответной реакции выхода модели на входные сигналы, однако она не может раскрыть законы функционирования объекта и соответственно увеличить объем знаний для повышения уровня эффективности и интеллектуальности системы управления и принятия решений.

В то же время среди рассмотренных источников [1–21] имеется несколько публикаций, выходящих за рамки этой стереотипной тенденции, причем это как довольно давние, так и достаточно свежие статьи. А именно, в работах [7 и 14] акцентируется на том, что в системах моделирования и управления необходимы интеллектуальные средства интерфейса с пользователем. Это работы начала 1990-х годов. В статьях [5 и 9] интеллектуальность средств моделирования предложено обеспечивать реализацией знаний экспертов, опытных операторов и лиц, принимающих решения (ЛПР). Наконец, в публикациях [2, 6 и 15] утверждается, что для повышения уровня интеллектуальности моделирования целесообразно строить онтологические модели предметной области.

Итак, в результате краткого анализа упомянутых публикаций можно сделать вывод, что упрощенное, достаточно формальное понятие интеллектуальности современных компьютерных систем моделирования, управления и принятия решений можно значительно углубить, предположив использование в них следующих основных элементов:

- методов и средств вычислительного интеллекта;
- базу знаний предметной области;
- средств интеллектуального интерфейса.

Этот вывод, к которому автор пришел независимо от указанных публикаций, подтверждает целесообразность выдвижения более глубокой концепции интеллектуального моделирования, излагаемой в данной статье.

Обсуждение терминологии предметной области

Для адекватного объяснения предлагаемой концепции целесообразно проанализировать содержание некоторых релевантных терминов.

Основные этапы процесса моделирования. *Моделирование* в самом общем смысле – это процесс исследования объектов познания на их моделях [22]. При этом предполагается замещение исследуемого объекта (оригинала) его условным образом, описанием или другим объектом–моделью для познания свойств оригинала с помощью исследования его модели. Моделью может быть абстрактный, физический или другой объект, свойства которого в некотором смысле подобны свойствам исследуемого объекта. Однако такое понимание можно считать недостаточно полным – так как в современных условиях в большинстве случаев моделируются не только реально существующие «объекты познания», но и виртуальные, планируемые, проектируемые, изобретаемые и пр.

Из всего многообразия существующих и возможных видов моделирования – мысленного, образного, вербального, физического, натурального, абстрактного, схематического и других – в данной статье интересно прежде всего моделирование математическое и компьютер-

ное, как наиболее релевантные задачам управления и принятия решений.

Математическое моделирование – процесс построения и изучения математических моделей объектов. Этот термин охватывает большой круг задач с различными специализированными названиями: конструирование моделей, аппроксимация зависимостей, идентификация моделей (структурная и параметрическая), регрессионный анализ, распознавание, классификация, кластеризация, прогнозирование и др.

Компьютерное моделирование в узком смысле – это численное исследование математических моделей, в широком смысле – *имитационное моделирование*, т.е. построение комплексов моделей, отражающих структуру сложных систем, и проведение вычислительных экспериментов с целью изучения возможных режимов функционирования исследуемой системы в реальных условиях [23]. Имитационное моделирование предполагает предварительное применение методов системного анализа [24] для корректного и достаточно полного компьютерного представления изучаемой системы и окружающей ее среды.

Из сказанного можно сделать вывод, что под термином *моделирование* следует понимать не один, а три разных, но взаимосвязанных процесса:

- моделирование как некоторый *процесс построения* модели;
- моделирование как *процесс исследования* модели – аналитически или численно;
- моделирование как *процесс компьютерного изучения* модели сложной системы.

Обобщенный *жизненный цикл* процесса моделирования произвольного объекта или системы показан на рис. 1.

На рисунке указано, что в случае неудовлетворительной апробации или проверки адекватности по заданному критерию следует возвратиться на один из предыдущих этапов. При этом под термином *применение* построенной мо-

дели понимается реализация ее целевого назначения – в частности, для изучения и описания закономерностей функционирования объекта, распознавания его состояния, проверки его возможной реакции на внешние воздействия, прогнозирования его поведения, а также для управления и/или поддержки действий лица, принимающего решения (ЛПР).

Отметим, что *адекватной* наиболее естественно считать модель, обеспечивающую достижение цели моделирования – например, повышение эффективности решения задач управления и принятия решений. Модель, адекватная в указанном смысле, не обязательно должна быть «физической»: она может вообще никак не отражать внутреннюю структуру объекта и закономерности его функционирования – достаточно, чтобы она была *правдоподобной*, т.е. не противоречила данным измерений и априорной информации об объекте [25]. Например, в широком спектре приложений, в том числе в задачах управления [26], успешно применяются модели Бокса–Дженкинса для прогнозирования временных рядов без привязки к внутренней природе таких процессов.

Два основных подхода к построению моделей. Процесс математического моделирования (см. рис. 1) предполагает обязательное присутствие в нем как минимум трех основных составляющих:

- *объект* целевого моделирования, реальный или виртуальный;
- *субъект*, строящий модель (в том числе группа исследователей) с определенной целью – его часто называют также *модельер*;
- *модель*, создаваемая или созданная в соответствии с заданной целью.

Естественно, ведущая роль в этом процессе отведена именно субъекту, модельеру, который определяет цель моделирования, выполняет синтез модели, проверяет ее адекватность и принимает решение о применении построенной модели.

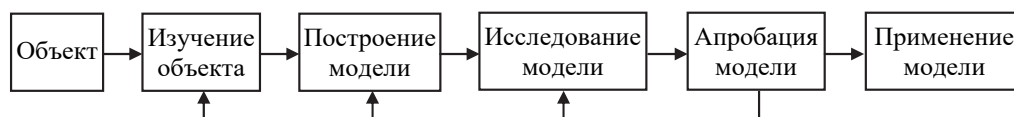


Рис. 1. Общее представление этапов процесса моделирования

Очевидно, что во всем процессе моделирования главным, наиболее трудоемким и требующим интеллектуальных усилий модельера является *этап построения модели* объекта – все остальные этапы могут быть достаточно рутинными. Известно, что для построения модели в распоряжении субъекта моделирования имеются *два основных подхода*, которые можно назвать противоположными: создание модели *на основе изучения законов и закономерностей* функционирования объекта; синтез модели *на основе анализа и обобщения данных* о поведении объекта, имеющих или полученных в результате опытов, статистических наблюдений, экспериментов.

В современной англоязычной литературе эти два подхода принято называть *theory-driven approach* (подход, *определяемый теорией*) и *data-driven approach* (подход, *определяемый данными*), с их весьма информативным сравнительным анализом можно ознакомиться в [27]. Коренное различие этих подходов можно представить в виде рис. 2, из которого понятно, почему первый из них характеризуется как *top-down approach* (подход сверху–вниз, или *нисходящий*), а второй – как *bottom-up approach* (подход снизу–вверх, или *восходящий*). Подход на основе теории целесообразно называть также *дедуктивным*, т.е. идущим от общих законов к частной модели, а подход на основе данных – *индуктивным* ввиду того, что получаемая модель обобщает частные результаты наблюдений.

Итак, *дедуктивным моделированием* будем называть процесс перехода от общих законов и закономерностей функционирования объекта к конкретной (частной) его модели, а *индуктивным моделированием* – соответственно процесс перехода от конкретных данных к обобщающей их модели, т.е. построенная модель может выступать и как частное (нисходящий процесс), и как общее (восходящий процесс)

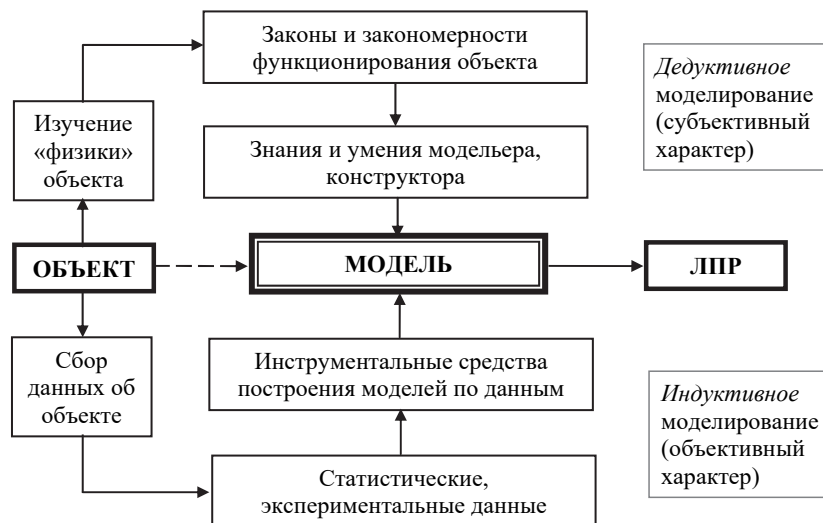


Рис. 2. Два различных подхода к построению моделей объектов

явление в зависимости от того, с применением какого подхода она получена. Отметим, что эти два подхода иногда называют также *теоретическим* и *эмпирическим* соответственно.

Несмотря на явную противоположность подходов дедуктивного и индуктивного моделирования, очевидно, что как научные методы они дополняют друг друга [27], причем там оба подхода, нисходящий и восходящий, относятся к области искусственного интеллекта (ИИ) на том основании, что первый сводится к разработке экспертных систем с применением логического вывода, а второй в настоящее время обеспечен широким арсеналом средств вычислительного интеллекта как составная часть ИИ. В этой же работе обсуждается существенное пересечение терминологии, методов и средств таких научных направлений индуктивного типа, как *вычислительный интеллект (computational intelligence)*, *интеллектуальный анализ данных (data mining)*, *машинное обучение (machine learning)* и *мягкие вычисления (soft computing)*.

Однако следует отметить также, что различие дедуктивного и индуктивного подходов к решению задач моделирования имеет и другую особенность. Первый из них носит ярко выраженный *субъективный характер*, поскольку качество построенной модели существенно определяется знаниями, умениями и интеллектом конкретного модельера. А второй подход но-

сит *объективный характер*, поскольку он более технологичный – в нем применяются хорошо апробированные инструментальные средства вычислительного интеллекта. Поэтому очевидно, что для одного и того же объекта две его модели, построенные по двум этим подходам, как правило, будут различными. Понятно, что более высокую продуктивность при решении таких задач будут иметь тот модельер или та группа исследователей, которые умеют гармонично и квалифицированно сочетать оба подхода.

С учетом сказанного, можно дать следующую самую общую характеристику интеллектуальности компьютерных систем моделирования (по аналогии с известным тестом Тьюринга): *интеллектуальное моделирование – это процесс построения моделей объектов с применением знаний и инструментальных средств, обеспечивающих достижение качества моделей на уровне квалифицированного конструктора моделей* (пользователя, модельера). Такое функциональное (хотя и неконструктивное) определение предполагает реализацию в системе моделирования знаний модельера или группы исследователей как об инструментальных средствах поддержки процесса моделирования, так и о предметной области объекта, а также о способах организации интерфейса с системой. Так, снова выходим на три основных элемента системы интеллектуального моделирования, указанные в качестве основного вывода в предыдущем разделе статьи.

Очевидно, что в рамках такого определения уровень интеллектуальности любой компьютерной системы моделирования, реализованной на основе знаний и умений эксперта (или их группы) в данной предметной области, может быть различным в зависимости от глубины этих знаний и от квалификации конструкторов системы. Поэтому можно ставить задачу определения некоторой шкалы уровня интеллектуальности и соответствующей меры на этой шкале – однако такая задача выходит за рамки данной статьи. При этом очевидно, что простой факт использования средств вычислительного интеллекта будет давать только неко-

торую часть баллов для продвижения по такой виртуальной шкале в сторону повышения уровня интеллектуальности.

О концепции интеллектуального моделирования

При обсуждении возможных подходов к интеллектуализации общего процесса моделирования (см. рис. 1) часто возникает вопрос: может ли моделирование в принципе быть не интеллектуальным? Ответить на него можно двумя утверждениями. Во-первых, как было отмечено ранее, под термином *моделирование* понимают три достаточно разных процесса – построение модели, ее аналитическое исследование и компьютерная реализация, – и только первый из них напрямую требует знаний, умений и интеллектуальных усилий от модельера, т.е. именно первый процесс или этап построения модели действительно всегда можно считать интеллектуальным, в то время как два других могут не соответствовать такой характеристике, поскольку имеют определенную независимость от первого и выполняются часто как самостоятельные и даже рутинные этапы моделирования.

Во-вторых, в современном понимании проблема интеллектуализации процесса моделирования подразумевает интеллектуальное поведение не модельера или исследователя, а соответствующей компьютерной системы с главным акцентом именно на этапе построения моделей. Поэтому для конструирования такой системы следует прежде всего определиться с концепцией интеллектуального моделирования, затем проанализировать в целом предметную область построения моделей с целью структуризации знаний об основных этапах моделирования, применяемых методах и условиях эффективности моделей, и после этого формулировать задание на конструирование соответствующей компьютерной системы. Отметим, что вопросы конструирования и реализации такой системы требуют отдельного рассмотрения и в данной статье не затрагиваются. Пример конструирования моделирующей системы информационной поддержки управленческих решений с применением современных средств

можно найти в [28], а общая методика объектно-ориентированного проектирования и программирования описана в [29].

При формировании концепции интеллектуального моделирования сложных процессов и систем необходимо учитывать общие условия, в которых возможно применение соответствующих методов и инструментальных средств. Целесообразно различать три основных варианта таких условий:

- автономное применение для построения моделей вне контура управления;
- встроенное использование в действующей системе управления;
- комплексное имитационное моделирование.

С учетом этого можно указать три основных уровня интеллектуализации таких систем: интеллектуальное офлайн-моделирование для построения моделей объектов по имеющимся данным; интеллектуальное онлайн-моделирование в составе действующей системы управления или принятия решений; комплексное интеллектуальное моделирование режимов работы сложной системы.

Эти разновидности или уровни процесса интеллектуального моделирования можно разделить так:

Автономное интеллектуальное моделирование (АИМ), или **ИМ-офлайн**, – это *статическая задача* интеллектуальной поддержки процесса построения моделей вне системы управления, т.е. по фиксированной базе или выборке данных. Соответствующая система (рис. 3) должна базироваться на инструментальных средствах индуктивного моделирования (вычислительного интеллекта), иметь базу данных и базу знаний, а также содержать средства интеллектуального интерфейса. Как видно из рисунка, предлагаемая система, кроме указанных трех основных элементов системы интеллектуального моделирования, должна содержать также базу данных, что очевидно.

Интеллектуальные ресурсы сосредоточены не только в базе знаний, но и в интерфейсе системы, обеспечивающем как интерактивную поддержку решений пользователя/модельера

на всех этапах процесса построения моделей, так и полностью автоматическое решение задач моделирования в случае необходимости.



Рис. 3. Основные структурные компоненты системы АИМ

Методология формирования содержательного наполнения этих четырех структурных элементов системы АИМ на основе формализованной структуризации знаний о некоторой предметной области, в том числе сферы индуктивного математического моделирования по статистическим данным, описано в следующем разделе статьи.

Встроенное интеллектуальное моделирование (ВИМ), или **ИМ-онлайн**, является *динамической задачей* автоматического или автоматизированного построения, корректировки и изменения моделей, правдоподобно описывающих поведение объектов в условиях неполноты и неопределенности априорной информации о свойствах моделируемых объектов и среды, в которой они функционируют, с точностью, достаточной для принятия эффективных решений ЛПР в условиях возможного изменения ситуаций. Соответствующая система, основные функции которой представлены на рис. 4, должна действовать в процессе работы моделируемого объекта (по изменяемой базе данных) и базироваться на априорных и накапливаемых знаниях об объекте и среде его функционирования. Она должна включать в себя как все элементы предыдущей системы (которые выполняют прежде всего функцию «Моделирование»), так и средства поддержки процесса построения и применения моделей в онлайн-режиме.

Отметим, что функциональные характеристики системы ВИМ, выполняемые циклически, в темпе поступления новых данных, фактически соответствуют полному циклу *задачи мониторинга*, понимаемого в широком смысле

[30]: *отслеживание* состояния объекта и окружающей среды (именно так в обыденном смысле понимают мониторинг); *оценивание* произошедших изменений; *анализ* причин этих изменений; *моделирование* состояния объекта и среды; *прогнозирование* тенденций развития контролируемых процессов. Если пять названных

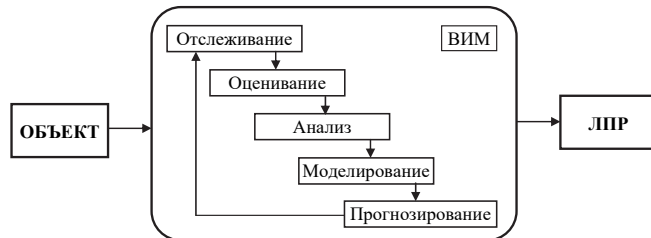


Рис. 4. Основные функции системы встроенного интеллектуального моделирования

функций дополнить еще двумя – *агрегирование* результатов выполнения этих функций и их *визуализация*, – получим перечень функциональных особенностей систем информационной поддержки управленческих решений СИПУР [31]. Эти функции агрегирования и визуализации существенны для предоставления ЛПР информации, необходимой для принятия эффективных решений, в максимально наглядной и удобной для восприятия и понимания форме.

Комплексное интеллектуальное моделирование (КИМ), или **ИМ-комплекс**, – это задача построения и использования программного комплекса имитационного моделирования работы сложной системы, в котором имеются средства, обеспечивающие интеллектуальное сопровождение процессов моделирования работы СППР в сложной системе с целью автоматического выявления как оптимальных режимов работы реальной системы, так и возможных неблагоприятных или критических сценариев. Соответствующая комплексная система должна содержать следующие основные подсистемы:

- информационную подсистему, функция которой – наблюдение и накопление данных;
- подсистему мониторинга – фактически онлайн-моделирование с целью информационной поддержки текущих решений ЛПР;
- подсистему СППР, в которой формируются целесообразные варианты возможных ре-

шений и оценивается их эффективность по определенным критериям.

Такой комплекс практически служит системой ситуационного моделирования и имеет все характеристики интеллектуальности, причем включает в себя два предыдущих уровня систем интеллектуального моделирования. Такая система обязательно должна иметь функцию накопления знаний об объекте моделирования и среде, а также о целесообразных вариантах принятия решений в различных изменяющихся ситуациях. Более глубокое представление структуры и функций такой системы выходит за рамки данной статьи. Можно отметить, что содержание статей [5 и 6], видимо, в основном соответствует именно этому третьему уровню задач.

МГУА как основа разработки средств интеллектуального моделирования. Сложность двух первых задач – автономного и встроенного моделирования, решаемых по данным наблюдений, – определяется принципиальным свойством этого класса задач: на практике они решаются *в условиях неопределенности и неполноты информации*, которые существенно влияют на качество решения. Все их разновидности можно отнести к двум основным группам:

- *неопределенности, относящиеся к данным*, т.е. к априорной информации о моделируемом объекте;
 - *структурная*, означающая неполное знание связей вход–выход и не позволяющая однозначно задать структуру модели;
 - *информационная* – данные часто небольшого объема, неполные и неточные, и обычно характеризуют не все множество факторов, влияющих на моделируемую (целевую) переменную;
 - *стохастическая* – в виде неизвестного характера и уровня шума в выборке данных;
- *неопределенности, относящиеся к средствам обработки данных*, т.е. к применяемой технологии моделирования:
 - *функциональная*, состоящая в выборе адекватного базисного набора функций или операторов, в котором ищется модель;
 - *параметрическая* – относящаяся к выбору метода решения задачи параметрической идентификации;

– *критериальная* – относительно выбора критерия решения основной задачи структурной идентификации;

– *методическая* – заранее неизвестно, какой метод моделирования целесообразно применить в конкретном случае;

– *технологическая* – неизвестно, какое программное средство выбрать среди имеющихся или разработать для решения конкретной задачи моделирования.

Эти аспекты отражают реальную сложность проблемы построения моделей в рамках индуктивного подхода и предполагают интеллектуализацию процесса ее решения. Существующие методы и средства вычислительного интеллекта в той или иной степени обладают свойством интеллектуальности. Одним из них является предложенный академиком А.Г. Ивахненко в 1968 г. [32, 33] метод группового учета аргументов (МГУА), в наиболее полном виде воплощающий сущность индуктивного подхода и активно развиваемый и в настоящее время [34].

МГУА – это метод синтеза моделей с автоматическим выбором структуры и параметров линейных, нелинейных, разностных и других моделей на основе короткой выборки данных в условиях неопределенности и неполноты исходной информации с целью выявления неизвестной закономерности функционирования исследуемого объекта или процесса, информация о которой неявно содержится в выборке данных.

МГУА отличается от других методов построения моделей активным применением принципов автоматической генерации индуктивно усложняемых вариантов, неокончателных решений и последовательной селекции по внешним критериям для построения моделей оптимальной сложности. Метод имеет оригинальную многорядную процедуру автоматической генерации структур моделей, которая имитирует процесс биологической селекции с попарным учетом последовательных признаков. Для сравнения и выбора лучших моделей применяются внешние критерии, основанные на делении выборки на две и более частей, при-

чем оценивание параметров и проверка качества моделей выполняется на разных подвыборках. Это позволяет обойтись без обременительных априорных предположений, поскольку деление выборки позволяет неявно (автоматически) учесть разные виды априорной неопределенности при построении модели.

Отметим, что в последние 20 лет типичную структуру МГУА начали называть также нейросетью, причем в англоязычной литературе классический многорядный алгоритм МГУА чаще всего называют *Polinomial Neural Network (PNN)*, т.е. Полиномиальная Нейронная Сеть (ПНС). При этом один из основных элементов итерационных алгоритмов МГУА, а именно полиномиальное частное описание от двух аргументов, рассматривается как элементарный нейрон ПНС МГУА. Оригинальность и эффективность нейросети из таких нейронов заключается в скорости процесса локальной настройки весов нейронов и автоматической глобальной оптимизации (т.е. *самоорганизации*) структуры сети (числа узлов и количества рядов или скрытых слоев).

Это означает, что популярная в последние годы проблема так называемого «глубокого обучения нейросетей» [35] была решена автором МГУА сразу же при создании своего метода: количество рядов/слоев нейросети МГУА наращивается до тех пор, пока уменьшается значение внешнего критерия, и прекращается при начале его возрастания. При этом автоматически решается также известная проблема «переобучения» сети – в данном методе эффект переобучения невозможен именно при разделении выборки на части. Другими словами, в алгоритмах МГУА разделение выборки неявно (автоматически) обеспечивает соблюдение известного принципа компромисса между сложностью модели и ее точностью при построении модели оптимальной сложности.

Это позволяет отнести МГУА к наиболее эффективным методам вычислительного интеллекта и положить его в основу разработки инструментальных средств интеллектуального моделирования.

Структуризация знаний в заданной предметной области

При разработке современных информационных технологий решения некоторого класса задач возникает необходимость определенных знаний в заданной области, например, с целью разработки структуры баз знаний и/или функционального и диалогового обеспечения интеллектуальных систем, в том числе систем моделирования сложных объектов и процессов. Для этого целесообразно проанализировать такие аспекты этой проблемы структуризации [36]:

- определение основных этапов процесса решения заданного класса задач;
- выделение основных методов решения таких задач и сравнение их функциональных возможностей;
- сравнительный анализ эффективности выделенных методов;
- анализ и обобщение опыта их применения для формирования необходимых правил предпочтительного выбора тех или иных методов.

Рассмотрим эти аспекты задачи структуризации.

Основные этапы решения класса задач определяем, исходя из следующей достаточно общей их формулировки.

Пусть имеется некоторое множество \mathfrak{Z} возможных решений в заданном классе задач K , и качество каждого решения $f \in \mathfrak{Z}$ характеризуется значением заданного критерия $C(f)$. Тогда лучшим (оптимальным) в смысле данного критерия является решение, соответствующее минимуму критерия. Поскольку \mathfrak{Z} – дискретное множество, имеем задачу дискретного (целочисленного) программирования. Очевидно, что для исчерпывающей формулировки задачи дополнительно следует указать необходимое количество p основных этапов E_1, \dots

... E_p решения этого класса задач, например: задать вид и объем исходной информации; указать класс базисных операторов, из которых формируются структуры решений множества \mathfrak{Z} ; определить способ ге-

нерации возможных решений в выбранном базисе; задать критерий $C(f)$ качества каждого из решений $f \in \mathfrak{Z}$ и метод его минимизации.

Такие этапы могут описывать произвольный процесс решения заданного класса задач K , причем в зависимости от априорной информации и цели решения те или иные этапы могут отсутствовать. Очевидно, что эти этапы должны быть положены в основу функциональной архитектуры соответствующей программной системы как основные элементы структуры базы знаний в этой области.

Пусть каким-либо образом (с помощью анализа литературы или опроса экспертов) отобрано некоторое множество методов M_1, \dots, M_q решения заданного класса задач K . Каждый из них решает задачу (1) и, соответственно, может быть охарактеризован определенным набором вариантов возможностей или возможных решений $A_i(M_j)$, $i = 1, \dots, p$, $j = 1, \dots, q$, предоставляемые на каждом из основных этапов процесса решения заданного класса задач. Таким образом, каждый из q методов можно описать таким количеством основных компонентов, которые соответствуют p основным этапам процесса решения класса задач.

С учетом таких основных компонентов можно корректно сравнить функциональные особенности заданного множества методов. С другой стороны, для отобранной совокупности методов, расчленив каждый из них на такие составляющие, можно создать объединенные подмножества возможных решений $A_i = \cup_{j=1, \dots, q} A_i(M_j)$ на каждом из p основных этапов процесса решения и анализировать эти множества как самостоятельные научные объекты (таблица). Отметим, что эти множества имеют тот же смысл, что и множества возможных неповторяющихся вариантов выбора на каждом из этапов процесса ре-

Общая структура вариантов решений на каждом из p этапов для q методов

Этапы процесса решения задач	Варианты возможных решений для q методов					Множества решений на этапах
	Метод M_1	...	Метод M_j	...	Метод M_q	
E_1	$A_1(M_1)$	...	$A_1(M_j)$	...	$A_1(M_q)$	A_1
...
E_i	$A_i(M_1)$	...	$A_i(M_j)$	...	$A_i(M_q)$	A_i
...
E_p	$A_p(M_1)$	...	$A_p(M_j)$	...	$A_p(M_q)$	A_p

шения задачи, т.е. указанное расчленение и обобщение методов дает оригинальный ключ к формированию функционального наполнения соответствующей программной системы.

Отметим также, что способ формирования этой таблицы имеет некоторую аналогию с идеями метода морфологического анализа заданной предметной области [37, 38], применимого прежде всего для решения творческих (интеллектуальных) задач.

Сравнение эффективности различных методов сводится главным образом к задачам сравнительного исследования эффективности используемых в них критериев качества возможных решений (например, критериев выбора моделей), как путем теоретического анализа, так и тестовых экспериментов.

Анализ опыта применения методов необходим для построения правил выбора лучших решений на каждом этапе общего процесса решения задачи, на основе которых разрабатывается структура интерактивного диалога. От уровня обоснованности таких правил и их разнообразия по отношению к условиям моделирования зависит интеллектуальный уровень диалога и соответственно системы в целом.

Изложенная общая идея структуризации знаний о процессе решения заданного класса задач может быть положена в основу разработки баз знаний и средств интеллектуального интерфейса для знание-ориентированных интеллектуальных программных систем, в том числе рассматриваемых здесь систем интеллектуального моделирования.

Структурированные знания, полученные в результате описанного анализа заданной предметной области, дают возможность в интерактивном или автоматическом режиме решать задачу синтеза наилучшего метода или алгоритма для каждой конкретной прикладной задачи моделирования. Более подробно задача вывода наилучшего алгоритма рассмотрена в [39, 40], в данном случае целесообразно привести наглядную иллюстрацию такого вывода [39], объясняющую его основную идею.

Пусть выполнен описанный выше анализ предметной области, в результате которого для

каждого из этапов p решения задачи получены множества альтернативных решений $A_i = \{a_{ij}\}$, $i = \overline{1, p}$. На каждом этапе должно быть принято одно из возможных решений. Очевидно, что полное множество возможных решений есть $A = A_1 \times A_2 \times A_3 \times \dots \times A_p$.

Если на каком-либо этапе выбирается какое-то одно решение $a_{ij} \in A_i$, то полное множество решений на каждом из последующих этапов распадается на допустимые и недопустимые подмножества, и с каждым этапом размерность допустимого подмножества последовательно уменьшается. Это показано на рис. 5 [39], который отражает сущность процесса последовательного выбора решений, хотя и не отражает всей его сложности.

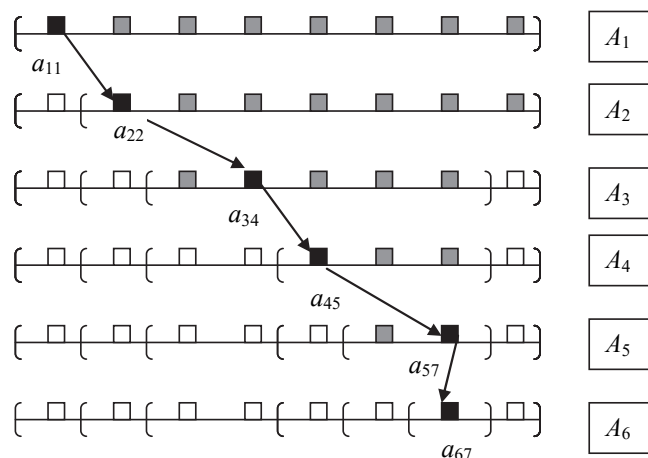


Рис. 5. Сужение множества допустимых решений на каждом этапе задачи (светлые квадраты – недопустимые решения, темные – допустимые)

Так, после достижения последнего этапа p получены, вообще говоря, определенные цепочки принятых решений, каждая из которых в совокупности представляет собой некоторый специализированный алгоритм решения конкретной задачи построения модели как результат последовательного синтеза в структурированном множестве возможных вариантов. В общем случае таких алгоритмов-цепочек может быть больше одного, и далее можно либо применить каждый из них для сравнительного решения конкретной задачи моделирования с целью выбора лучшего варианта принятия прикладных решений ЛПР, либо сразу выбрать из них лучший в некотором смысле – например,

алгоритм с минимальными вычислительными затратами.

Процедуру последовательного принятия решений можно применить для корректной организации процесса извлечения знаний из эксперта в виде правил перехода от этапа к этапу. Такие знания при их компьютерной реализации могут быть основой как для автоматического решения задач моделирования, так и для организации интеллектуального интерфейса с пользователем в процессе построения моделей.

Заключение. В результате анализа подходов к разработке интеллектуальных методов и средств моделирования сложных процессов и систем в современных публикациях, сделан вывод, что абсолютное большинство статей, оперирующих термином *интеллектуальное моделирование*, подразумевают под его применением формальное использование методов и средств вычислительного интеллекта. Такое упрощенное понятие интеллектуальности современных компьютерных систем моделирования, управления и принятия решений можно значительно углубить на основе знание-ориентированного подхода.

Выполнено содержательное обсуждение релевантной терминологии предметной области моделирования и предложено следующее достаточно общее определение: интеллектуальное моделирование – это процесс построения моделей объектов с применением знаний и инструментальных средств, обеспечивающих достижение качества моделей на уровне квалифицированного модельера–исследователя.

Установлено, что с учетом возможных условий применения соответствующих методов и инструментальных средств интеллектуального моделирования целесообразно рассматривать три основных уровня интеллектуализации таких средств:

- интеллектуальное офлайн-моделирование для построения моделей объектов по имеющимся данным;
- интеллектуальное онлайн-моделирование в составе действующей системы управления или принятия решений;

- комплексное интеллектуальное моделирование режимов работы сложной системы.

Даны необходимые комментарии, характеризующие эти три уровня соответственно автономного, встроенного и комплексного интеллектуального моделирования и показано, что в основу разработки соответствующих инструментальных средств целесообразно положить алгоритмы МГУА как эффективного метода вычислительного интеллекта.

В основу разработки соответствующих компьютерных средств моделирования должны быть положены результаты структуризации знаний в данной области с целью исследования структуры баз знаний, функционального обеспечения и средств интеллектуального интерфейса для знание-ориентированных систем интеллектуального моделирования.

1. Буров С.В. Система моделювання інтелектуальної мережі бізнес-процесів // Інформаційні системи та мережі. – Вісн. НУ «Львівська політехніка». – 2008. – № 610. – С. 34–39.
2. Литвин В.В. Моделювання інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень з використанням онтологічного підходу // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2011. – № 2 (25). – С. 93–101.
3. Зачко О.Б. Інтелектуальне моделювання параметрів продукту інфраструктурного проекту (на прикладі аеропорту «Львів») // Восточно-Европейський журнал передових технологій. – 2013. – № 10 (61). – Т. 1. – С. 92–94.
4. Корольов О.Л., Круліковський А.П. Інтелектуальні методи моделювання процесів управління проектами // Ученые записки Таврич. нац. ун-та им. В.И. Вернадского, Серия «Экономика и управление». – 2013. – № 26 (65). – Т. 1. – С. 73–86.
5. Тимашова Л., Витковски Т. Технологія інтелектуального виробничого моделювання віртуальних підприємств // Вестн. Нац. техн. ун-та «Харьковский политехнический институт». Серия Информатика и моделирование. – 2015. – № 32. – С. 136–147.
6. Валькман Ю.Р., Степашко П.В. На пути построения онтологии интеллектуального моделирования // Індуктивне моделювання складних систем. – 7. – К.: МННЦ ІТтаС НАНУ, 2015. – С. 101–115.
7. Меркурьев Ю.А., Тейланс А.А., Меркурьева Г.В. Інтелектуальне моделювання виробничих процесів // Программные продукты и системы. – 1991. – № 3. – С. 43–49.

8. *Гладкий С.Л., Степанов Н.А., Ясницкий Л.Н.* Интеллектуальное моделирование физических проблем. – М.: Изд-во Ин-та компьютерных исследований, 2006. – 200 с.
9. *Микони С.В., Киселёв И.С.* Интеллектуальное имитационное моделирование предпочтений экспертов на матрицах парных сравнений // Сб. докл. Всерос. науч.-практ. конф. «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2007. – Т. 1. – СПб: ФГУП ЦНИИТС, 2007. – С. 182–186.
10. *Новикова Е., Демидов Н.* Средства интеллектуального анализа и моделирования сложных процессов как ключевой инструмент ситуационного управления // *Connect*. Мир информационных технологий. – 2012. – № 3. – С. 84–89.
11. *Горбатков С.А., Раиштова О.Б., Солнцев А.М.* Интеллектуальное моделирование в задаче принятия решений в рамках налогового управления // *Вестн. Уфимск. гос. авиацион. техн. ун-та.* – 2013. – № 1 (54). – Т. 17. – С. 182–187.
12. *Полупанов Д.В., Хайруллина Н.А.* Интеллектуальное моделирование сегментации торговых центров на основе самоорганизующихся карт Кохонена // *Науковедение.* – 2014. – 1. – С. 1–15.
13. *Глушков С.В., Левченко Н.Г.* Интеллектуальное моделирование как инструмент повышения эффективности управления транспортно-логистическим процессом // *Тр. Междунар. науч.-техн. конф. Евразийского научного объединения,* 2014. – С. 1–5.
14. *Amarger R., Biegler J.L.T., Grossmann I.E.* An Intelligent Modelling Interface for Design Optimization. – Pittsburgh: Carnegie Mellon Univ., 1990. – 43 p.
15. *Intelligent Modelling of Virtual Worlds Using Domain Ontologies / W. Bille, B. Pellens, F. Kleinermann et al.* // *Proc. of the Workshop of Intelligent Comp. (WIC), held in conjunction with the MICAI 2004 conf., Mexico.* – Mexico City, 2004. – P. 272–279. – ISBN 968-489-024-9.
16. *Balic J., Cus F.* Intelligent modelling in manufacturing // *J. of Achievements in Materials and Manufacturing Engin.* – 2007. – 24. – Issue 1. – P. 340–349.
17. *Al-Shareef A.J., Abbod M.F.* Intelligent Modelling Techniques of Power Load Forecasting for the Western Area of Saudi Arabia // *J. of King Abdulaziz Univ.: Eng. Sci.* – 2010. – 21. – N 1. – P. 3–18.
18. *Computationally Intelligent Modelling and Control of Fluidized Bed Combustion Process / Ž.M. Čojbašić, V.D. Nikolić, I.T. Čirić et al.* // *Thermal Science.* – 2011. – 15, N 2. – P. 321–338.
19. *Advances in Intelligent Modelling and Simulation: Artificial Intelligence-Based Models and Techniques in Scalable Computing / Eds J. Kołodziej, S.U. Khan, T. Burczyński.* – Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. – 381 p.
20. *Sharma A., Yadava V., Judal K.B.* Intelligent Modelling and Multi-Objective Optimisation of Laser Beam Cutting of Nickel Based Superalloy Sheet // *Int. J. of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering (IJMMME).* – 2013. – N 3 (2). – P. 1–16.
21. *Simjanovska M., Gusev M., Madevska-Bogdanova A.* Intelligent modelling for predicting students' final grades // *Proc. of 37th Int. Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija,* 2014. – IEEE Publ., 2014. – P. 1216–1221. – ISBN: 978-953-233-081-6.
22. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Моделирование>
23. *Томашевський В.М.* Моделювання систем. – К.: Вид. група ВНУ, 2005. – 351 с.
24. *Згуровський М.З., Панкратова Н.Д.* Основи системного аналізу. – Там же, 2007. – 546 с.
25. *Льюнг Л.* Идентификация систем. Теория для пользователя. – М.: Наука, 1991. – 432 с.
26. *Каишьян Р.Л., Рао А.Р.* Построение динамических стохастических моделей по экспериментальным данным. – Там же, 1983. – 383 с.
27. *Manhart K.* Artificial Intelligence Modelling: Data Driven and Theory Driven Approaches // *Social Science Microsimulation / Ed. by K.G. Troitzsch, U. Mueller, G.N. Gilbert, J.E. Doran.* – Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 1996. – P. 416–431.
28. *Самойленко А.А.* Конструирование системы информационной поддержки управленческих решений // *УСиМ.* – 2014. – № 5. – С. 61–68.
29. *Об'єктно-орієнтоване моделювання при проектуванні вбудованих систем і систем реального часу.* Навч. посібник / В.В. Литвинов, С.В. Голуб, К.М. Григор'єв та ін. – Черкаси: Черкаський нац. ун-т ім. Б. Хмельницького, 2011. – 379 с. – ISBN 978-966-2545-15-9.
30. *Карнов В., Пугачова М., Степашко В.* Статистичний моніторинг соціально-економічних процесів як актуальне завдання державної статистики // *Статистика України.* – 2000. – № 2. – С. 33–40.
31. *Самойленко О.А., Степашко В.С.* Система інформаційної підтримки прийняття оперативних управлінських рішень // *Моделювання та керування станом еколого-економічних систем регіону.* Зб. наук. праць. – К.: МННЦ ІТтаС НАН та МОН України, 2008. – 4. – С. 211–219.
32. *Івахненко О.Г.* Метод групового урахування аргументів – конкурент методу стохастичної апроксимації // *Автоматика.* – 1968. – № 3. – С. 58–72.
33. *Івахненко А.Г.* Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. – Киев: Наук. думка, 1982. – 296 с.
34. *Степашко В.С.* Елементи теорії індуктивного моделювання / *Стан та перспективи розвитку інформатики в Україні.* Кол. авторів. – К.: Наук. думка, 2010. – С. 481–496.
35. https://en.wikipedia.org/wiki/Deep_learning
36. *Степашко В.С.* О задаче структуризации знаний эксперта в области моделирования по эмпириче-

- ским данным // Кибернетика и выч. техника. – 1991. – 92. – С. 80–83.
37. *Одрин В.М.* Метод морфологического анализа технических систем. – М.: ВНИИПИ, 1989. – 311 с.
38. *Шердеко Ю.Л.* Морфологический инструментарий творчества в системах поддержки принятия решений // Системи підтримки прийняття рішень. Теорія і практика. Зб. доп. наук.-практ. конф. – К.: ІПММС НАНУ, 2006. – С. 173–176.
39. *Степашко В.С., Зворыгина Т.Ф.* Об одном подходе к проблеме вывода решений в сложной задаче // УСиМ. – 2003. – № 6. – С. 82–87.
40. *Stepashko V.S., Zvorygina T.F.* Intelligent System Design for Knowledge Structure Models from Observed Data // Proc. of 17th Europ. Simul. Multiconf. ESM'2003, Nottingham, England, 9–11 June, 2003. – P. 603–612.

E-mail: stepashko@irtc.org.ua
© В.С. Степашко, 2016

UDC 621.513.8

V.S. Stepashko

Conceptual fundamentals of intelligent modeling

An analytical overview has been made on existing approaches to developing intelligent methods and tools for modeling complex processes and systems, including the support for the tasks of administrative decisions in various socio-economic sectors. It is concluded that the vast majority of the existing publications justify the implementation of the “intelligent modeling” simply by using the neural networks, evolutionary methods and other means of computational intelligence.

In contrast, in this study a new concept of intelligent modeling as the complex processes and systems is developed, according to which it is proposed to distinguish the three main aspects: the intelligent offline modeling with the characteristics of a complex system from statistical data; the intelligent online modeling as a part of a control or decision-making process in the real time; a systemic intelligent modeling. Three of these types or levels of the modeling process can be specified as:

- Intelligent modeling offline is a static task of the intellectual support of the process for building models out of the system control (from fixed base or data sample). It is shown that a proper system should be based on the inductive modeling tools, have a database and knowledge base as well as including tools of the intelligent interface. A methodology of their development is formulated based on a formalized structuring of knowledge about the subject area of the mathematical modeling from statistical data. The intelligence is focused here exactly in the interface.

- Intelligent modeling online is a dynamic task of construction, adjustment and restructuring models in the system operation process (from changeable database). The appropriate system should include all the elements of the previous system and the tools supporting the knowledge-driven process of automatic or automated building models that plausibly describe the behavior of the objects in the conditions of uncertainty and incomplete prior information about the properties of the simulated objects and environment in which they operate, with accuracy being sufficient to making effective decisions by DMP under conditions of permanent changing the situation.

- Systemic intelligent modeling should provide an intellectual support of processes of DSS modeling in a complex system to automatically detect optimal operating modes of a real system as well as the possible adverse or dangerous modes. The corresponding integrated system should contain the following key elements: information subsystem, which function is observing and the data storage; monitoring subsystem which is actually an online modeling; subsystem DSS which has formed the appropriate options for possible solutions and evaluated its effectiveness according to the certain criteria. This complex is practically a situational modeling system and has all the characteristics of intelligence. It includes two previous levels of the intelligent modeling. Such system has the necessarily accumulation function of knowledge about the object being modelled and the environment, as well as options for reasonable decisions in the changing situations.



Внимание !

**Оформление подписки для желающих
опубликовать статьи в нашем журнале обязательно.**

В розничную продажу журнал не поступает.

Подписной индекс 71008