

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА МОДЕЛЕЙ И ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Станислав Витальевич Микони, Борис Владимирович Соколов,
Рафаэль Мидхатович Юсупов (Санкт-Петербург)

Введение

В информационном обществе моделирование пронизывает все стороны человеческой деятельности. Объектами моделирования являются не только представители макро- и микромира, но и сама умственная деятельность (ментальный мир) человека. Данные объекты мы отнесем к классу сложных объектов (СЛО). Результаты моделирования, как и любого вида деятельности, могут в различной степени устраивать человека. В этом случае речь уже идёт о качестве моделей [1], а в конечном счёте, об эффективности моделирования СЛО. Этой проблеме не всегда уделяется должное внимание. В предлагаемом докладе указанная проблема рассматривается в контексте описания особенностей реализации процесса комплексного моделирования СЛО как управляемого технологического процесса.

Этапы моделирования

Для рассмотрения этапов моделирования будем использовать рис. 1, заимствованный из монографии [2]. Процесс моделирования субъект моделирования (в общем случае субъекты моделирования (СМ)) выполняет (выполняют) в следующей очерёдности:

- 1) В исследуемой предметной области выделяется объект моделирования;
- 2) Изучаются востребованные для анализа свойства объекта моделирования;
- 3) Создаётся модель объекта моделирования (либо полимодельный комплекс);
- 4) Выполняется планирование эксперимента;
- 5) Выполняется собственно моделирование;
- 6) Анализируются результаты моделирования;
- 7) Принимается решение по полученным результатам;
- 8) Если они устраивают СМ, то моделирование завершается, иначе модель объекта меняется в нужном направлении и осуществляется возврат к п. 4.

Приведённая последовательность этапов соответствует идее прототипирования программ. Прототипирование завершается при выполнении поставленной задачи и сопровождается оценением качества программного обеспечения. Рассмотрим проблемы обеспечения качества моделирования на всех его стадиях, начиная с роли самого СМ в этом процессе.



Рис. 1. Субъектно-объектная модель процесса моделирования

Роль субъекта моделирования

Роль субъекта моделирования в успехе моделирования подчёркивается его центральным расположением на рис. 1. В обязанности субъекта входит не только выполнение всех этапов моделирования, но и управление ими. И здесь залогом успеха моделирования выступает, прежде всего, квалификация его как субъекта принимающего управленческие решения, интерпретируя процесс комплексного моделирования как управленческий процесс, начиная с его способности правильно определить цели моделирования и, завершая организацией процессов адаптации и управляемой саморганизации созданных и развиваемых моделей СЛО. В том случае, когда в роли субъекта моделирования выступает коллектив людей, многое зависит не только от их профессионализма, но и от взаимопонимания и слаженности работы данного коллектива.

Современный этап научно-технического прогресса способствует комплексной автоматизации и интеллектуализации всех перечисленных процессов, связанных с организацией и проведением комплексного моделирования СЛО. Первоочередными объектами автоматизации являются наиболее легко формализуемые процессы. К ним относится, прежде всего, этап собственно моделирования – генерация воздействий, фиксация, обработка и представление результатов. Наиболее трудно формализуемым объектом автоматизации является этап создания модели. Однако по мере накопления опыта будет сформирована библиотека типовых моделей. Это позволит от создания модели перейти к её выбору и настройке на решаемую задачу моделирования.

Очевидно, что со временем автоматизация и интеллектуализация многих функций СМ перераспределит задачи обеспечения качества моделирования на средства автоматизации, а за СМ останется ответственность за их правильный выбор. Эта тенденция соответствует современной концепции социо-киберфизических систем взаимодействия человека с объектами искусственной природы [3].

Поскольку основной составляющей системы моделирования является модель объекта, успех моделирования определяется, в первую очередь, её качеством. Качество модели характеризуется совокупностью целевых (внешних) и собственных (внутренних) свойств модели СЛО. К целевым свойствам относятся моделируемые свойства объекта, правильный выбор которых, в первую очередь, определяет полезность модели. К собственным свойствам относятся свойства, присущие самой модели. Разделим их на элементарные и не элементарные свойства. Реальную модель будем рассматривать как комбинацию элементарных свойств.

Базис элементарных свойств модели

Предложения по формализованному описанию элементарных свойств модели, следующих из свойств модели на языке предикатов первого порядка, было рассмотрено в докладе на предыдущей конференции [4]. Здесь остановимся на универсальности этих свойств и их востребованности для оценивания качества модели [2]. Они характеризуют функцию, структуру модели и выполняемые ею операции. Как отдельные составляющие они образуют базис элементарных моделей, включающий соответственно функциональную (Ф-модель), структурную (С-модель) и операционную (О-модель) модели.

Ф-модель. Функция f , реализуемая Ф-моделью, может иметь любую сложность. Ф-модель определяет, лишь, способ задания соответствия между областями определения и значений функции. По этой причине она именуется «чёрным ящиком» – известно «что» получается, но неизвестно «как». Пользователь обычно и воспринимает объект использования как «чёрный ящик». Ему безразлично, как устроен объект. Важно, что можно получить на его выходах, задав входное воздействие.

В отношении вида обрабатываемой информации Ф-модели делятся на модели: *детерминированные* и *недетерминированные*, *непрерывные* и *дискретные*. К классу недетерминированных Ф-моделей относятся стохастические, нечеткие и интервальные модели, отражающие различные виды неопределенности. В Ф-модели применяются различные интерпретации функции. Тип функции выбирается в зависимости от природы отображаемой информации. Для отображения количественной информации применяются вычислительные функции, для качественной – логические, для словесной (вербальной) – лингвистические, для

образной – графические (граф, график, диаграмма). В искусственном интеллекте Φ -модель называют *реактивной*, поскольку она отражает только реакции объекта на внешние стимулы (условный рефлекс). В этом смысле Φ -модель представляет собой примитивную модель поведения (поведенческую модель).

Многофункциональная модель объединяет различные типы функций. Степень детальности представления функций объекта может быть различной, если одни функции раскрываются подробнее, чем другие. Например, микросхемы на материнской плате компьютера реализуют функции блочного, регистрового и вентильного уровней. Каждому уровню детальности соответствует свой сорт π переменных Φ -модели. Многоуровневый объект описывается многосортной Φ -моделью.

С-модель. Образным представлением С-модели является непредметно помеченный граф. Ориентированный граф G задаёт частичную упорядоченность событий. В отличие от него в неориентированном графе (неорграфе) не представляется возможным отделить входы от выходов, а, следовательно, и определить последовательность обработки информации (энергии, вещества).

Граф, помеченный переменными, отражает лишь взаимодействие элементов системы, но не характеризует тип этого взаимодействия, что делает его инвариантным по отношению к любым предметным областям. Таким образом, С-модель востребована для анализа структурного подобия между моделью и объектом-оригиналом.

Примерами С-модели, представленной орграфом, являются дерево целей и структурная схема алгоритма. Неориентированным графом описывается, например, топологическая структура компьютерной сети. Объект, характеризуемый несколькими свойствами (атрибутами), представляется звёздным графом.

Между собой сущности связываются рёбрами. Структурные модели такого вида положены в основу моделей реляционных баз данных, называемыми диаграммами «сущность-связь» (ER-диаграммы). Учитывая разные свойства вершин в диаграмме «сущность-связь», эта модель является неоднородной.

В программировании С-модель именуется структурой данных. ER-диаграмма, например, представляет собой умозрительную форму структуры данных. Для её машинного представления применяется унифицированный объектно-ориентированный язык моделирования UML (Unified Modeling Language).

О-модель. В отличие от Φ -модели операционная модель характеризует не правило, а *процесс* реализации функции. По имени известной функции можно установить результат отображения f . Его можно получить только в том случае, если Φ -модель *разрешима*. Этой проблеме, в частности, посвящена работа [5]. Применительно к численному решению задачи функция называется *вычислимой*, если существует вычисляющий её алгоритм. Он отвечает требованиям определённости, конечности числа шагов, массовости и результативности. Заметим, что в широком смысле под алгоритмом понимается набор правил, предназначенный для решения некоторой задачи.

С развитием параллельных вычислений алгоритм получил расширительное толкование как набор инструкций, описывающих порядок действий исполнителя для достижения некоторого результата [6]. Операционная модель (О-модель) параллельных вычислений определяет, например, процесс перемещения меток в такой дискретно-событийной СФ-модели, как сеть Петри. В искусственном интеллекте О-моделью описывается процесс логического вывода следствия.

В предметных областях О-модель определяется как «упорядоченная совокупность (система) взаимосвязанных действий, направленных на достижение определённой цели» [7]. Примерами О-модели в предметных областях являются инструкции и технологические карты. По существу, О-моделью обобщаются такие понятия, как метод, алгоритм, инструкция и т.п. Другими словами, О-модель, формализуя процедуры, относится к моделям *процедурного* типа.

Составная модель

Подобно химическим элементам таблицы Менделеева элементарные свойства моделей представляют лишь теоретический интерес. На практике используются составные модели и, прежде всего, структурно-функциональная модель (СФ-модель). Рассмотрим свойства этих моделей.

СФ-модель. Из трёх типов элементарных моделей решающая роль принадлежит Ф-модели. В [8] она именуется «чёрным ящиком». Ф-модель отвечает на первичный вопрос: «Как объект реагирует на внешние воздействия?». Однако для моделирования функционирования объекта этого знания недостаточно. В понятие чёрного ящика вкладывается неизвестность формальной модели функции ψ , осуществляющей отображение $\psi: X \rightarrow Y$. Необходимо знать, если не саму функцию ψ , то, хотя бы, приближение φ к ней, например, в виде многочлена или уравнения регрессии. Если функция φ найдена, то модель *чёрного* ящика переходит в модель *серого* ящика.

Связи между переменными известной функции φ отражают структуру модели, преобразуя исходную Ф-модель в структурно-функциональную модель или СФ-модель серого ящика. Однако структура серого ящика не подобна структуре белого ящика в силу различия реализаций функций φ и ψ . Оптимизация режима функционирования требует знания реальной СФ-модели моделируемого объекта. Под *белым* ящиком понимается известность реальной функции f , осуществляющей отображение $f: X \rightarrow Y$.

Итак, согласно своему названию, структурно-функциональная модель (СФ-модель) совмещает свойства структурной и функциональной моделей. СФ-модель представляет собой композицию Ф-моделей, связи между которыми описываются С-моделью. На связях С-модели формируются функции соотнесения и измерения. Функции соотнесения представляются помеченным, а функции измерения – взвешенным графом. Метка связи двух вершин графа представляет собой имя отношения, в котором находятся эти вершины. По степени отвлечённости от предмета рассмотрения отношения делятся на предметные и отвлечённые (абстрактные). Модели с предметными отношениями называют семантическими сетями. Примерами отвлечённых отношений являются: род-вид, целое-часть, класс-элемент, сущность-свойство, цель-средство, причина-следствие. По существу, семантическая сеть является разновидностью онтологической модели.

Разрешимая модель. Ф- и СФ-модели содержат информацию о том, *какие* свойства объекта-оригинала моделируются, а О-модель – *как* решить задачу моделирования. Согласно теории разрешимости ни Ф-модель, ни СФ-модель не результативны в отсутствие О-модели. Именно она используется в моделировании с целью получения результата и в этом смысле является связующим звеном между моделируемыми свойствами объекта и реализующей их системой моделирования. К моделям с отсутствующей О-моделью относятся, например, символы, формулы, слова, картины, схемы, диаграммы и пр.

Исходя из того, что для выполнения моделирования Ф-модель и СФ-модель должны содержать операционную составляющую в совокупности с О-моделью разрешимые модели обозначаются как ФО- СФО-модели.

Выполнимая модель. ФО- и СФО-модели, не подготовленные к выполнению в среде моделирования, относятся к классу описательных или *D*-моделей (от Descriptive). Они существуют, но не погружены в среду моделирования. Примером может являться знание человеком иностранного языка, но невозможность моментально воспользоваться им без должной практики. Для этого человеку нужно сделать «перезагрузку» мозга в нужную языковую среду и поупражняться в этой среде. Примером *D*-модели в программировании является исходный текст программы.

Описательная модель, погружённая в среду моделирования, т.е. представленная на её языке, относится к классу выполнимых или *E*-моделей (от Executable model). Примером *E*-модели является компилированная программа, готовая к выполнению. Соответствующие файлы имеют расширения языка программирования и выполнения (*.exe от executive). Выполняемая версия модели активна в породившей её системе моделирования.

Поскольку среда моделирования также описывается моделью, существует необходимость введения понятия модель среды моделирования. В широком смысле под ней будем понимать любую естественную или искусственную среду. Примером естественной среды моделирования является мозг человека, а искусственной среды – всё то, что им создано, например, программная система моделирования. Именно её и будем понимать в узком смысле под моделью среды моделирования («машинной» М-моделью). Она, в свою очередь, может быть выражена через модели, входящие в базис моделей и их комбинации.

Машинной формой О-модели (ОМ-моделью) является, например, структурированный запрос, запрограммированный на языке SQL (Structural Query Language). Примером выполнимой ФО-модели (ФОМ-моделью) служит модуль динамической библиотеки в программной системе. Примером выполнимой СФО-модели в объектно-ориентированном программировании (СФОМ-моделью) является класс, объединяющий структуру данных и операции над ними.

Преобразования модели

Разработка модели, как правило, осуществляется в следующей последовательности:

- 1) Составляется описание на естественном языке;
- 2) Описание структурируется в онтологическую модель, например, в концептуальную схему;
- 3) Выполняется переход с естественного языка (ЕЯ) на формальный;
- 4) Разрабатывается метод решения задачи;
- 5) Выполняется перевод модели с формального языка на язык пользователя выбранной среды моделирования;

Формируется модель, выполняемая на языке компьютера.

Согласно изложенной выше классификации общих моделей результатом выполнения пункта 1 является описательная Ф-модель, а результатом выполнения пункта 2 – описательная СФ-модель (ручная ДН-модель). В пункте 3 СФ-модель переводится с ЕЯ на формальный язык. Результатом выполнения пункта 4 является разрешимая СФО-модель. Результатом выполнения пункта 5 является машинная СФОМ-модель (DM-модель), представленная на языке пользователя выбранной среды моделирования. В пункте 6 DM-модель переводится автоматически компилятором системы в выполняемую модель (Е-модель). Обобщённо процесс преобразования модели и моделирования показан на рис. 2.

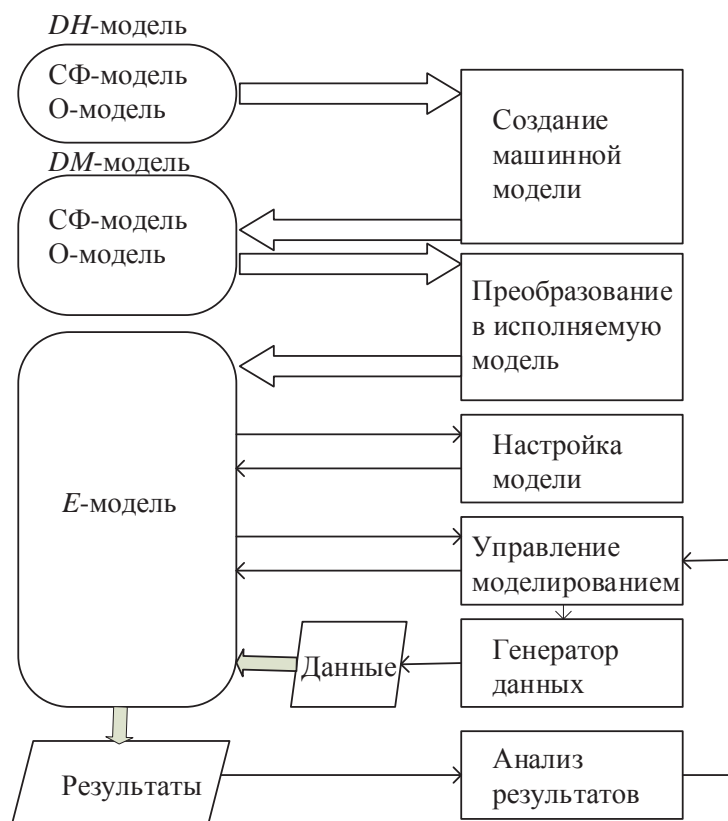


Рис. 2. Создание машинной модели СЛО и реализация процесса моделирования

Очевидно, что качество окончательной СФОМ-модели зависит от качества каждой предыдущей модели. Следовательно, качество модели нужно оценивать на каждом этапе её разработки. Особое внимание следует обратить на ручные этапы работы, поскольку качество выполнения автоматических этапов гарантируется изготовителем программы. Подход к оцениванию качества онтологической модели отдельно изложен в работе [9]. Рассмотрим собственные свойства модели, востребованные для оценивания её качества.

Неэлементарные свойства модели

Разделим неэлементарные свойства модели на две группы: *общие* свойства, присущие любой модели, и *сервисные* свойства, облегчающие работу с моделью. К общим свойствам модели относятся адекватность и сложность. К общим свойствам О-моделей дополнительно относятся *результативность* (сходимость), *достоверность* (точность), *устойчивость* (повторяемость результатов).

Адекватность модели. Адекватность модели оценивается относительно моделируемых свойств последнего, либо относительно тех целей моделирования, которые были сформулированы конечным пользователем.

Соответствие модели объекту моделирования основывается на их подобии (сходстве). Под подобием понимается взаимно-однозначное соответствие между исследуемым объектом и его моделью, при котором правила перехода от параметров модели к параметрам оригинала известны, а математическое описание допускает их преобразование к тождественному виду. Подобие характеризуется равенством безразмерных величин – коэффициентов подобия. В зависимости от моделируемых свойств объекта-оригинала различают следующие виды подобия [10]:

- 1) функциональное;
- 2) структурное;
- 3) динамическое;
- 4) вероятностное;
- 5) физическое;
- 6) геометрическое.

Первые три вида подобия отвечают элементарным свойствам модели. Под функциональным подобием понимается выполнение моделируемым объектом и его моделью сходственных функций при одинаковых на них воздействиях. Для реализации **функционального подобия** используется Ф-модель («стимул-реакция»). Примерами моделей, использующих принцип функционального подобия, являются нейросетевые модели в искусственном интеллекте и регрессионные модели в статистическом анализе.

Структурное подобие предполагает сходство структур объекта и его модели. В том случае, когда объектом исследования является структура сети, достаточным оказывается нахождение структурного подобия между сопоставляемыми моделями с применением С-моделей. Эта задача решается путём нахождения изоморфизма графов [4].

Структурно-функциональное подобие характеризуется сходством, как структуры, так и функций её элементов и описывается СФ-моделью объекта и модели. Оно имеет большое значение при моделировании сложных систем, представляемых полимодельными комплексами. Одной из задач моделирования этих систем является анализ взаимодействия их компонентов.

Под динамическим подобием понимается сходство последовательных изменений объекта и модели во времени. В гидродинамике, например, динамически подобными потоками называются такие потоки, у которых отношение постоянно для любой пары сходственных точек. Динамическое подобие может быть выражено через тождественность О-моделей.

Для уменьшения сложности модели реализуются не все виды подобия. Наиболее полным является подобие в структуре, функциях и в последовательных изменениях состояний, выражаемое через тождественность СФО-моделей. Модель, реализующая все виды подобия, представляет собой *копию* объекта.

Сложность модели. Сложность модели имеет количественную и качественную составляющие. Математически количественная составляющая выражается через число

переменных и связей между ними, а качественная составляющая – через типы переменных. Число переменных и связей между ними растёт с увеличением детализации модели. С увеличением числа переменных, связей между ними, а также их типов и увеличивается сложность модели. Сложность модели целесообразно оценивать ситуативно. При умозрительном моделировании сложной считается модель с размерностью, превышающей 7 ± 2 . При автоматизированном моделировании сложность модели определяется по отношению к вычислительной мощности системы моделирования, выражаемой через объём обрабатываемой информации и время обработки.

Сложность машинной исполнимой Е-модели характеризуется двумя показателями: объёмом занимаемой памяти и временем моделирования. Предварительное оценивание сложности осуществляется по описательным моделям: СФ-модели (объём памяти) и О-модели (вычислительная сложность¹).

Сервисные свойства. К сервисным свойствам, облегчающим работу с моделью, относятся те же свойства, которые придаются реальным объектам для удобства работы с ними, унификации, увеличения срока службы. К ним относятся: *робастность* (нечувствительность к выбросам), *развиваемость*, *адаптивность*, *универсальность*, *унификация*, *управляемость*, *наблюдаемость*, *интеллектуальность*. Для отладки модели используется её *чувствительность* к изменению параметров.

Оценивание качества модели и полимодельного комплекса

Множественность моделей обуславливается неоднозначным отношением «объект-модель». Иными словами, объект может моделироваться разными способами. Отсюда следует актуальность выбора наиболее предпочтительной модели для решения поставленной задачи.

Многомерность оценивания модели следует из того факта, что в общем случае моделированию подлежит более одного свойства объекта-оригинала. В обязательный набор свойств должны входить адекватность и сложность модели. Показатель адекватности представляется как разность между объектным $y_j(Ob)$ и модельным $y_j(M)$ значением j -го моделируемого показателя. Если значение моделируемого показателя неизвестно, то задаётся желаемое значение. Разность значений не должна превышать заданной величины ε коэффициента подобия. При многокритериальном оценивании эта величина формализуется в качестве ограничения сверху: $|y_j(Ob) - y_j(M)| \leq \varepsilon$.

Показатели сложности модели по памяти и вычислительная сложность подлежат минимизации. Таким образом, минимальную совокупность критериев образуют три критерия оценивания. Для получения количественного эквивалента качества (полезности) модели вычисляется средневзвешенная свёртка критериев. Распределение весовых коэффициентов, в сумме равных единице, задаётся экспертным путём исходя из важности свойств модели. Для получения всесторонней оценки качества модели перечень оцениваемых показателей дополняется показателями, характеризующими сервисные свойства модели. В соответствии с их смыслом они подлежат минимизации или максимизации.

Целостная оценка полимодельного комплекса (ПМК) вычисляется по значениям показателей его Ф-модели. Эти показатели существенно зависят от взаимодействия разнородных моделей, входящих в состав ПМК. Для обеспечения приемлемого качества рассматривается СФ-модель ПМК. В ней главное внимание уделяется взаимодействию модулей. Каждая связь между двумя разнородными моделями характеризуется достоверностью и скоростью передачи информации. На эти показатели влияет различие в языках представления моделей. В качестве обобщённой оценки взаимодействия двух моделей будем использовать сложность двухмодельного комплекса (сложность $2M$). При двусторонней пересылке информации она равна:

сложность $2M =$ сложность модели 1 + сложность модели 2 + сложность перевода (1, 2) + сложность перевода (2, 1).

¹ Вычислительная сложность характеризуется асимптотическими оценками.

При односторонней передаче информации в формуле исключается 3-е или 4-е слагаемое. Очевидно, что быстродействие ПМК ограничивается самой медленной связью между его входами и выходами (узкое звено ПМК). Выявление (диагностика) и ускорение такой связи позволяет улучшить качество ПМК. Согласованность различных классов моделей, описывающих СЛО, обеспечивается за счет введенных и конструктивно вычисляемых условий гоморфизма отношений (в общем случае – динамоморфизма отношений), с помощью которых гарантируется выполнимость и согласованность одних и тех же причинно-следственных связей, характеризующих поведение каждого конкретного СЛО и описываемых с использованием специфических формальных средств соответствующих моделей [3,13-16].

Рассматривая возможные конкретные пути согласования математических (аналитико-имитационных) моделей принятия решений с их логико-алгебраическими и логико-лингвистическими аналогами (моделями), построенными на основе ИИТ, мы будем, прежде всего, ориентироваться на результаты, полученные к настоящему времени в области гибридного моделирования (ГМ), которое является одной из разновидностей системного моделирования (СМ). Рассматривая указанный вид моделирования следует подчеркнуть, что оно в значительной мере базируется на комбинированном использовании таких современных информационных технологий как: технологии экспертных систем (ExpertSystems) или систем, основанных на знаниях (Knowledge-BasedSystems); технологии нечёткой логики (FuzzyLogic); технологии искусственных нейронных сетей (ArtificialNeuralNetworks); технологии вывода, основанного на прецедентах (CaseBasedReasoning, CBR); технологии естественно-языковых систем и онтологиях; технологии ассоциативной памяти; технологии когнитивного картирования и операционного кодирования; технологии эволюционного моделирования; технологии мультиагентного моделирования [17-18].

Имеющийся технологический разрыв между бионическим интеллектом искусственных нейронных сетей (ИНС) и интеллектом систем логического вывода в настоящее время уменьшают гибридными интеллектуальными технологиями (ГИТ), называемыми мягкими вычислениями [21], на основе создания fuzzy-neuro-genetic информационных технологий и инструментальных средств. Мягкие вычисления реализуются соответствующей мягкой интеллектуальной системой, в которой должны гармонично сочетаться технологии управления неопределённостью, технологии обучения и самоорганизации.

Типовая процедура функционирования указанной системы включает в себя [18]: преобразование входных параметров (ситуаций) в нечёткое представление; извлечение знаний, представленных в виде продукций ЕСЛИ-ТО из нечёткой обучающей выборки с помощью нейронной сети; оптимизацию структуры продукционных правил с помощью генетического алгоритма. Таким образом, за счёт комплексирования перечисленных ИИТ нечёткие нейронные сети обучаются как нейронные сети, но их результаты объясняются как в системах нечёткого вывода. Возможны также варианты обучения нейронных сетей корректировкой уже обученных сетей с использованием генетических алгоритмов (ГА) [17-18]. Достоинством такого взаимодействия ИИТ является то что в отличие от метода обратного распространения ошибки ГА мало чувствительны к архитектуре сети. В целом, по результатам исследований, выполненных в области гибридных интеллектуальных систем, предложено несколько направлений интеграции рассматриваемых методов и технологий, которые представлены в табл. 4.1. в работе [2].

Необходимо подчеркнуть [1-3,12], что рассматриваемая интеграция предлагаемых моделей, методов и технологий в рамках СМ осуществляется на *глубинном*, а не *внешнем* уровне, когда различные блоки системы реализуют какой-то один метод решения интеллектуальных задач и взаимодействуют между собой. Глубинный уровень объединения предполагает создание новых методов, использующих на конструктивном (формальном) уровне описания концепты и отношения объединяемых базовых методов.

Наряду с *первой особенностью системного* моделирования сложных объектов (СЛО), заключающейся в необходимости глубинного согласования используемых моделей, *вторая особенность* СМ СЛО состоит в обязательном оценивании корректности согласования разнотипных моделей, а также проведении предварительного анализа на существование решения поставленных задач моделирования. Необходимость исследования такого рода задач является

своего рода платой за полноту и адекватность описания различных свойств СЛО с использованием соответствующего полимодельного комплекса.

Эффективность моделирования

Окончательная оценка качества модели выставляется с учетом полученного от её использования эффекта, что согласуется с принципом «практика – критерий истины». Таким образом, органичной оценкой качества модели СЛО является её результативность. Результат моделирования оценивается точностью, либо достоверностью. Эти показатели зависят не только от модели, но и от среды моделирования. Поскольку выполнение любого процесса немислимо без затрат ресурсов, результативность конкретизируется показателями эффективности. Они позволяют соизмерять получаемые результаты моделирования СЛО с затраченными ресурсами, что согласуется с включением в определение этого понятия «показателей всех видов ресурсопотребления» [2]. Объединение всех этих подходов осуществляется в рамках предлагаемой авторами доклада системно-управленческой интерпретацией процессов комплексного моделирования СЛО.

При указанной интерпретации процесс моделирования определяется процессами взаимодействия субъектов, объекта-оригинала, объекта-модели, среды, которые конструктивно задаются с помощью бинарных отношений между перечисленными элементами [3,12]. Важно отметить, что все перечисленные элементы и отношения под действием объективных-субъективных, внешних-внутренних причин постоянно изменяются во времени. В этом случае мгновенно зафиксированное структурное состояние рассматриваемой четверки в докладе называется *ситуацией*, а ее изменение во времени — *развивающейся ситуацией (РС)*. При таком описании процесс субъектно-объектного моделирования СЛО можно интерпретировать как управляемый процесс (*как управление РС*). Цель такого процесса будет состоять в постоянном минимизации СМ «невязки», возникающей между объектом-оригиналом и моделью на всех этапах их жизненного цикла, путем постоянной «подстройки» (адаптации) модели под изменения, происходящие как в объекте-оригинале (в нашем случае СЛО), так и в окружающей и воздействующей на него внешней среде (например, путем изменения СМ целей функционирования и моделирования СЛО).

В этом случае уже целесообразно говорить о постановке и решении субъектом соответствующих классов задач проактивного управления структурной динамикой (ПУСД) РС. Ему в этом случае будет необходимо, во-первых, решить задачи формирования и реализации программ ПУСД РС (**1-й уровень управления**), включая и управление непосредственно СЛО, и, во-вторых, данному субъекту нужно организовать управление качеством соответствующих моделей СЛО, полимодельных комплексов (ПМК) и технологий системного моделирования (**2-й уровень управления**) для обеспечения достижения требуемых значений показателей качества и эффективности управления РС на 1-м уровне. В этом случае может также ставиться задача многокритериального оценивания, анализа и оптимизации программ оптимального синтеза как структуры ПМК и технологий системного моделирования СЛО, так и программ управления соответствующими процессами комплексного моделирования. При таком подходе весь существующий семантически емкий математический аппарат теории эффективности управления целенаправленными процессами может быть в полном объеме использован применительно к таким объектам управления как модель СЛО и процессы его моделирования. В докладе конструктивность данного подхода иллюстрируется применительно к задачам формирования требований к облику такого класса СЛО как автоматизированные системы управления космическими средствами (КСр).

Исследования проводились при финансовой поддержке гранта РФФИ №17-11-01254.

Выводы

Предложена классификация свойств моделей и ПМК, ориентированная на оценивание их качества.

В основу оценивания качества положены элементарные свойства, образующие базис моделей: Ф-, С-, и О-модель. Комбинации элементарных свойств в сочетании с формальным и машинным языком описания позволяют формализовать технологический процесс разработки модели и ПМК.

Собственные свойства моделей разделены на две группы, что облегчает отбор нужных свойств и экспертную оценку их важности для вычисления обобщенной оценки качества модели и ПМК.

Основываясь на анализе результатов моделирования как окончательной оценке модели и среды моделирования, предложено трактовать качество моделей и ПМК как потенциальную полезность модели и ПМК, а эффективность – как актуальную (реальную) их полезность.

Показана важная роль согласования взаимодействия разнородных моделей в полимодельном комплексе для обеспечения его эффективности.

Предложенная системно-управленческая интерпретация основных классов проблем и задач, решаемых в квалиметрии моделей и ПМК, представленная авторами доклада, имеет большие перспективы, т.к. опирается на фундаментальные и прикладные результаты, полученные к настоящему времени в междисциплинарной отрасли системных знаний, в том числе, в рамках таких ее базовых научных направлений как системология (общая теория систем), неокибернетика (общая теория управления), и информатика, гарантирующих выполнение таких базовых требований, предъявляемых к качеству решения задач рассматриваемого класса как полнота, замкнутость и непротиворечивость получаемых решений.

Литература

1. Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодальных комплексов // Известия РАН. Теория и системы управления, 2004, №6. – С. 5-16.
2. Микони С.В., Соколов Б.В. Юсупов Р.М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. –М.: РАН, 2018. – 314 с.
3. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. – М. : Наука, 2006. – 410 с.
4. Микони С.В. Формализованное описание общих свойств модели // Труды 8-й конференции ИММОД-2017. –СПб.: НП НОИМ. С. 138-144.
5. Хованский А. Г. Топологическая теория Галуа. Разрешимость и неразрешимость уравнений в конечном виде. –М.: Изд-во МЦНМО, 2008. – 296 с.
6. Воеводин В. В., Воеводин Вл. В. Параллельные вычисления. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 608 с.
7. Тарасенко Ф.П. Прикладной системный анализ: Наука и искусство решения проблем: учебник. – Томск, 2004. – 186 с.
8. Тарасенко Ф. П. Моделирование и феномен человека. Часть I. Моделирование – инфраструктура взаимодействия человека с реальностью. – М. : Научные технологии, 2012. – 136 с.
9. Микони С.В. О качестве онтологических моделей // Онтология проектирования. 2017. – Т. 7, №3 (25), –С. 347-360.
10. Майерс Г. Надежность программного обеспечения. – М. : Мир, 1980. – 359 с.
11. Петухов Г. Б., Якунин В. И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. – М. : АСТ, 2006. – 501 с.
12. Калинин В.Н., Резников Б.А. Теория систем и управление (структурно-математический подход) : учеб. пособие. – Л. : ВИКИ им. А. Ф. Можайского, 1978. – 417 с.
13. Савин Г. И. Системное моделирование сложных процессов. – М. : Фазис, 2000.

14. Прангишвили И. В. Системный подход и общесистемные закономерности. – М. : Синтег, 2000.
15. Технология системного моделирования / Е. Ф. Аврамчук, А. А. Вавилов, С. В. Емельянов [и др.] ; под общ. ред. С. В. Емельянова [и др.] – М. : Машиностроение ; Берлин : Техника, 1988.
16. Имитационное моделирование производственных систем / А. А. Вавилов, Д. Х. Имаев, В. И. Плескунин [и др.] – М. : Машиностроение ; Берлин : Ферлаг. Техник, 1983.
17. Рыбина Г. В., Рыбин В. М., Паронджанов С. С. [и др.] Имитационное моделирование внешнего мира при построении динамических интегрированных экспертных систем // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2014. – № 12. – Т. 12. – С. 3–15.
18. Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте // Сборник научных трудов VIII Международной научно-технической конференции (Коломна, 18–20 мая, 2015). – В 2 т. Т. 2. – М. : Физматлит, 2015. – 388 с. . Научный журнал № 1 (31) Т.1, 2016, с. 27–37