

Методология и технология комплексного моделирования сложных технических объектов в динамически изменяющихся условиях

М. Ю. Охтилев

Санкт-Петербургский институт информатики и
автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН)
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения (ГУАП)
oxt@mail.ru

А. С. Гниденко¹, В. В. Алферов²,
В. В. Салухов³, Д. И. Назаров⁴

Санкт-Петербургский институт информатики и
автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН)
¹deoliveira@mail.ru, ²komplekt@komplekt.gazprom.ru,
³vsaluhov@bk.ru, ⁴dmnazarov23@gmail.com

Аннотация. В докладе проанализированы основные проблемы и особенности комплексного моделирования сложных объектов, а также существующие и перспективные методологии и технологии реализации указанного вида моделирования. Приведены примеры практической реализации технологий комплексного моделирования применительно к задачам синтеза систем проактивного управления космическими аппаратами, а также многокритериального оценивания и анализа производственных планов судостроительных предприятий.

Ключевые слова: комплексное моделирование; сложные объекты; согласование моделей; имитационные системы; гибридное моделирование

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ограниченные возможности существующих средств моделирования сложных объектов (СЛО), в том числе, сложных технических объектов (СТО) привели к необходимости совместного использования традиционных и новых (интеллектуальных) моделей и соответствующих технологий моделирования, т.е. переходу к концепции комплексного (системного) моделирования [1, 7, 15]. Концепция и технологии КМ на первом этапе своего существования в нашей стране и за рубежом (70-80-е годы прошлого века) наиболее полно была реализованы в рамках так называемых имитационных систем (ИМС), в которых достигается глубокое сочетание имитационных и аналитических подходов к моделированию, всестороннее использование возможностей математики, ЭВМ и творческого мышления человека [1, 14, 19].

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации: СПб ГПУ (мероприятие 6.1.1), ИТМО (субсидия 074-U01), грантов РФФИ (№№ 16-07-00779, 16-08-00510, 16-08-01277, 16-29-09482-офи-м, 17-08-00797, 17-06-00108, 17-01-00139, 17-20-01214, 17-29-07073-офи-м, 18-07-01272, 18-08-01505), госзадания Министерства образования и науки РФ №2.3135.2017/4.6, в рамках бюджетной темы №№0073–2018–0003, Международного проекта ERASMUS+, Capacity building in higher education, № 73751-EPP-1-2016-1-DE-EPPKA2-CBHE-JP.

В настоящее время под **ИМС** понимается специальным образом организованный моделирующий комплекс, состоящий из следующих элементов: а) имитационной модели (ИМ) (иерархии имитационных моделей), отражающих определенную проблемную область; б) аналитических моделей (АМ) (иерархии аналитических моделей), дающих упрощенное (агрегированное) описание различных сторон моделируемых явлений; в) информационной подсистемы, включающей базу (банк) данных, а в перспективе базу знаний, основанную на идеях искусственного интеллекта; г) системы управления и сопряжения, обеспечивающей взаимодействие всех компонент системы и работу с пользователем (лицом, принимающем решения) в режиме интерактивного диалога [1, 15]. Рассмотрим основные особенности организации и проведения комплексного моделирования СЛО по сравнению с существующими традиционными подходами к моделированию.

II. ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ И ПРОВЕДЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Первая и, пожалуй, самая **главная особенность КМ** СЛО состоит в необходимости в процессе моделирования осуществлять согласование (координацию) на концептуальном, модельно-алгоритмическом, информационном и программном уровнях используемых моделей, методов и алгоритмов. При этом, в общем случае, наряду с собственно модельным согласованием при решении задач анализа и синтеза СЛО должно проводиться межмодельное и (или) внутримодельное согласование критериев функциональных показателей (показателей эффективности, показателей качества, целевых функций и т.п.), с помощью которых проводится сравнение и выбор альтернативных решений [10, 13, 22]. Говоря о таком широко распространенном виде КМ как аналитико-имитационное моделирование (АИМ), следует отметить, что выбор принципов, методов, моделей и алгоритмов согласования указанных моделей в каждом конкретном случае определяется целями проводимых исследований. Так, например, при решении одних задач АМ целесообразно

использовать (на алгоритмическом уровне) внутри ИМ для поиска допустимых вариантов изменения экзогенных переменных [11, 15].

В другом случае, наоборот, ИМ используют для уточнения релаксированных решений, полученных на АМ. Указанное включение одного класса моделей в качестве блока в состав другого класса моделей можно использовать при большой частоте численных реализаций сравнительно малоразмерных решаемых задач, которые ввиду отлаженности процедур не требуют участия ЛПР и осуществляются в автоматическом режиме.

В работе [19] приведены примеры реализации возможного варианта многокритериального аналитико-имитационного межмодельного согласования, осуществляемого путем задания множества Парето с помощью основополагающей большеразмерной многокритериальной модели дискретной оптимизации, сужения этого множества на основе машинного анализа его свойств и введения соответствующей информации в ходе интерактивной процедуры, выполняемой ЛПР, лицом, обосновывающим решения (ЛОР) с ЭВМ, а также на основе привлечения дополнительных математических моделей, обеспечивающих последующее уточнение и сужение множества Парето вплоть до принятия единственного решения. Паретовский принцип согласования при условии дополнения его положениями о сужении множества Парето создает наиболее благоприятные возможности для принятия всесторонне обоснованных решений, основывающихся на анализе поведения различных показателей эффективности внутри этого множества. При этом важное значение имеет правильная разработка стратегии сужения с привлечением компетентных специалистов и математических моделей: аналитических и имитационных.

В работе [23] предложен методологический подход снятия критериальной неопределенности при оценивании эффективности выполнения производственных планов судостроительных предприятий, вызванной многообразием лингвистически заданных показателей эффективности. Дополнительная ЛПР представлена продукционными моделями и обрабатывается с использованием параметрических нечетких мер и методами теории планирования эксперимента. Использование предлагаемого подхода позволяет полнее учитывать систему предпочтений ЛПР о критериях достижения поставленной цели, осуществлять вычисление комплексных оценок эффективности, гибко учитывающих достоинства и недостатки сравниваемых производственных планов.

Преимущества совместного использования АМ и ИМ при комплексном исследовании СлО проявляются не только на этапе планирования машинных экспериментов и их КМ, но и при обработке и анализе результатов машинных экспериментов. Так, например, если существует корреляционная связь между результатами моделирования на упрощенной АМ и точной ИМ, то в этом случае можно достичь значительного уменьшения числа реализаций ИМ для получения заданной точности

оценок эндогенных переменных. Поэтому в настоящее время интенсивно разрабатываются комбинированные (аналитико-имитационные) методы определения вероятностных характеристик систем.

Анализ показывает, что каждый из перечисленных вариантов методик организации КМ на основе АМ и ИМ свои преимущества и недостатки, а их выбор определяется спецификой конкретной предметной области, где функционирует СлО, ее ограничениями, а также поставленными целями исследований. Более подробный анализ вопросов согласования АИМ СлО проведен в работах [18, 22] в рамках развиваемой ее авторами теории оценивания качества моделей и полимодельных комплексов (квалиметрии моделей и полимодельных комплексов).

Говоря о возможных конкретных путях согласования математических (аналитико-имитационных) моделей принятия решений с их логико-алгебраическими и логико-лингвистическими аналогами (моделями), построенными на основе ИИТ, целесообразно ориентироваться на результаты, полученные к настоящему времени в области гибридного моделирования (ГМ), которое является одной из разновидностей КМ. Говоря об указанном виде моделирования следует подчеркнуть, что оно базируется на комбинированном использовании таких современных информационных технологий как: технологии экспертных систем (Expert Systems) или систем, основанных на знаниях (Knowledge-Based Systems); технологии нечеткой логики (Fuzzy Logic); технологии искусственных нейронных сетей (Artificial Neural Networks); технологии вывода, основанного на прецедентах (Case Based Reasoning, CBR); технологии естественно-языковых систем и онтологиях; технологии ассоциативной памяти; технологии когнитивного картирования и операционного кодирования; технологии эволюционного моделирования; технологии мультиагентного моделирования [5, 6, 8, 9].

Имеющийся технологический разрыв между бионическим интеллектом искусственных нейронных сетей (ИНС) и интеллектом систем логического вывода в настоящее время уменьшают на основе создания fuzzy-neuro-genetic информационных технологий и инструментальных средств. При этом наряду с гибридными интеллектуальными технологиями (ГИТ) широко используется зонтичный термин (от англ. *brella term*) «мягкие вычисления», который был введен в 1994 году профессором Л. Заде и интерпретируется следующей формулой: **Мягкие вычисления = нечеткие системы + нейронные сети + генетические алгоритмы.**

Данные мягкие вычисления реализуются соответствующей мягкой интеллектуальной системой, в которой должны гармонично сочетаться технологии управления неопределенностью, технологии обучения и самоорганизации. Типовая процедура функционирования указанной системы включает в себя [6, 8]: преобразование входных параметров (ситуаций) в нечеткое представление; извлечение знаний, представленных в виде продукций ЕСЛИ-ТО из нечеткой 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 корректировки уже обученных сетей с использованием генетических алгоритмов (ГА). 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. 1.

Необходимо подчеркнуть [5, 19], что рассматриваемая интеграция предлагаемых моделей, методов и технологий в рамках КМ 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.

Вторая особенность комплексного моделирования СЛО состоит в обязательном оценивании корректности согласования разнотипных моделей, а также проведении предварительного анализа существования решения соответствующих задач моделирования. Необходимость исследования такого рода задач является своего рода платой за полноту и адекватность представления СЛО полимодельным комплексом.

Завершая рассмотрение *основных особенностей комплексного моделирования* СЛО необходимо отметить еще одну из них, которая состоит в необходимости на всех этапах реализации данного вида моделирования широко использования *современных средств автоматизации моделирования*. В противном случае КМ станет невозможным из-за очень больших затрат времени, денежных средств и других ресурсов, которые нужно выделять каждый раз в случае отсутствия необходимых унифицированных средств автоматизации моделирования. К настоящему времени известны более 400 языков автоматизации моделирования и соответствующих систем автоматизации моделирования [18, 20, 21]. На прошедших конференциях ИММОД неоднократно обсуждались достоинства и недостатки многочисленных отечественных и зарубежных инструментальных средства и среды автоматизации моделирования (ИССАМ). Среди ИССАМ, наиболее часто обсуждаемых на прошедших конференциях ИММОД, следует указать — GPSS, AnyLogic, BPSim, PowerSim, Simplex, Modul Vision, Triad.Net, CERT, ESIML, Simulab, NetStar, Pilgrim, МОСТ, КОГНИТРОН и т.д.

Говоря о средствах автоматизации комплексного моделирования, следует указать, что они, к сожалению, либо ориентированы на решение узко специализированных классов прикладных задач при

широкой функциональности предоставляемых сервисов [14], либо являются достаточно универсальными средствами автоматизации моделирования, в которых координация разнотипных моделей, методов и алгоритмов анализа и синтеза СЛО осуществляется не на глубинном (модельно-алгоритмическом) уровне описания, а через ЛПР в интерактивном режиме на уровне программного и информационного обеспечения [20]. Говоря другими словами, в последнем случае проводится не интегративное, а коммуникативное взаимодействие, не обеспечивающее появление синергетических эффектов в виде появления новых знаний, получаемых при интегративном комплексном моделировании.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что для обеспечения требуемого уровня показателей адекватности, достоверности и точности моделирования СЛО необходимо базироваться на современной методологии и технологиях комплексного моделирования указанных объектов. При этом основное достоинство данного вида моделирования состоит в том, что за счет полимодельного (многомодельного) описания каждой конкретной исследуемой предметной области и соответствующего согласования разнотипных моделей, методов и алгоритмов анализа и синтеза СЛО на формализованном (глубинном) уровне описания удается, во-первых, взаимно компенсировать недостатки и ограничения, присущие каждому частному классу моделей, методов и алгоритмов, и, во-вторых, получить синергетический эффект от их интегративного использования, выражающийся в формировании новых знаний о СЛО и его поведении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Аврамчук Е.Ф., Вавилов А.А., Емельянов С.В. и др. Технология системного моделирования / Под общ. ред. С.В.Емельянова. И.: Машиностроение, 1988. 520 с.
- [2] Бешенков С.А., Ракитина Е.А. Моделирование и формализация. Методическое пособие. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. 336 с.
- [3] Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1968. 356 с.
- [4] Валькман Ю.Р. О проблеме “отчуждения” моделей исследуемых объектов от создателей в проектировании сложных изделий // Теория и системы управления. 1996. №3. С. 146–152.
- [5] Васильев С.Н. От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению // Теория и системы управления. 2001. № 1. С.5-22; № 2. С.5-21.
- [6] Власов С.А., Девятков В.В. Имитационное моделирование в России: прошлое, настоящее, будущее // Автоматизация в промышленности. 2005. №5. С. 63–65.
- [7] Горский Ю.М. Системно-информационный анализ процессов управления. Новосибирск: Наука, 1988. 200 с.
- [8] Имитационное моделирование производственных систем / А.А. Вавилов, Д.Х. Имаев, В.И. Плескунин и др. М.: Машиностроение; Берлин: Ферлаг Техник, 1983. 416 с.
- [9] Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте // Сборник научных трудов VIII-й Международной научно-технической конференции (Коломна, 18-20 мая, 2015). В 2-х томах. Т2. М.: Физматлит, 2015. 388 с.
- [10] Калашников В.В., Немчинов Б.В., Симонов В.М. Нить Ариадны в лабиринте моделирования. М.: Наука, 1993. 192 с.

- [11] Калинин В.Н., Соколов Б.В. Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами // Теория и системы управления. 1995. №1. С. 56–61.
- [12] Калинин В.Н., Резников Б.А. Теория систем и управления (структурно-математический подход). Л.: ВИКИ, 1987. 417 с.
- [13] Карпов Ю. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 400 с.
- [14] Краснощёков П.С., Морозов В.В., Федоров В.В. Декомпозиция в задачах проектирования // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1979. №2. С. 7–18.
- [15] Краснощёков П.С., Петров А.А. Принципы построения моделей. – М.: Фазис, 2000. 400 с.
- [16] Материалы 1-й, 2-й, 3-ей, 4-ой Всероссийской научно-практической конференции “Имитационное моделирование. Теория и практика”, т.т. 1-2. СПб.: ФГУП “ЦНИИ технологий судостроения”, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011, 2013 (www.simulation.su).
- [17] Надёжность и эффективность в технике: Справочник в 10-ти т. / Ред. совет: В.С. Авдусевский (пред.) и др. Т.3. Эффективность технических систем / Под общ. ред. В.Ф. Уткина, Ю.В. Крючкова. М.: Машиностроение, 1988. 328 с.
- [18] Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
- [19] Павловский Ю.А. Имитационные модели и системы. М.: Фазис, 2000. 132 с.
- [20] Савин Г.И. Системное моделирование сложных процессов. М.: Фазис, 2000. 276 с.
- [21] Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
- [22] Соколов Б. В., Юсупов Р.М. Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодельных комплексов // Теория и системы управления. 2004. № 6. С. 5–16.
- [23] Составная часть НИР «Разработка технологии имитационного моделирования производственных комплексов судостроительных предприятий» Шифр «Модель-С». Заказчик ОАО «Центр технологии судостроения и судоремонта». Исполнитель СПИИРАН. СПб.: СПИИРАН 2013 г. 146 с.
- [24] Шеннон Р. Имитационное моделирование – искусство и наука. М.: Мир, 1978. 418 с.
- [25] <http://www.liophant.org/scsc>
- [26] <http://www.scs.org>
- [27] <http://www.wintersim.org>