

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ: ЭВОЛЮЦИЯ ВЗГЛЯДОВ И КОНЦЕПЦИЙ, ПОЛИМОДЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ, ПРОБЛЕМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ

А.В. Алексеев, Б.В. Соколов (Санкт-Петербург)

Актуальность

Цифровая трансформация общества неразрывно связана с интенсивным развитием технологий моделирования управления сложными системами (СлС), процессами и их качеством. Лежащие в основе управления СлС процедуры мониторинга и контроля неразрывно связаны с созданием качественно новых моделей и «цифровых двойников», исключительно сложных по структуре и функциональным возможностям, без упреждающего исследования которых с использованием полимодельных комплексов принципиально невозможно прогнозирование их проектного качества, эффективности использования, обоснования перспектив развития.

Проблема

В этой связи представляет особый интерес и значимость решение проблемы цифрового сравнительного анализа и ранжирования методов и технологий моделирования, перспективных направлений их развития, эволюции взглядов и концепций, методов и полимодельных комплексов, обеспечивающих решение проблемы и его реализацию [1, 2].

Метод исследования

С этой целью методом квалиметрического SWOT-анализа (QSWOT) [3] систематизируем современные взгляды, соответствующие концепции и методы моделирования с учетом данных [4-7], количественно (в % сравнения) оценим в соответствии с методом квалиметрического SWOT-анализа [3] их позитивные и негативные, внешние (S, O) и внутренние (W, T) свойства, после чего выполним по гармоническому алгоритму агрегирования ранжирование показателей качества [2] соответствующих методов и технологий, реализующих эти методы.

Результаты

Принятые исходные данные и полученные результаты сведены в табл. 1. Результаты ранжирования (TOP-20) представлены на рис. 1.

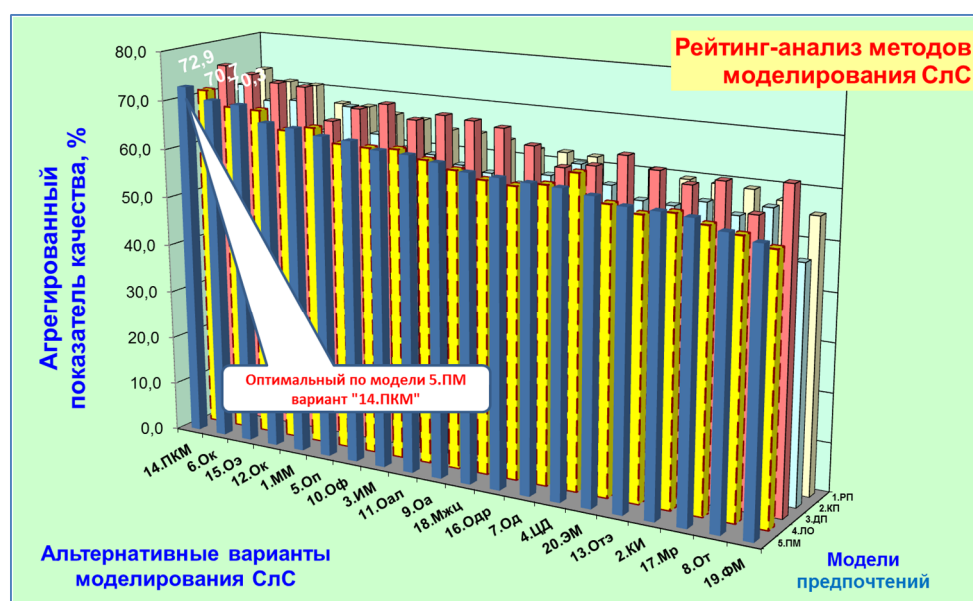


Рис. 1. Результаты ранжирования методов и технологий моделирования сложных объектов

Таблица 1. Сравнительный QSWOT-анализ технологий моделирования

Квалиметрический SWOT-анализ альтернативных вариантов развития (тенденций) методов моделирования слож. систем										
Название технологии моделирования (разработчик, время)	Сокращение	Сущность метода моделирования. В примечание - источник данных	ИКЗ свойства:		W Слабые (внутренние) стороны	O. Возможности развития с учетом внешних факторов	T. Угрозы развития с учетом внешних факторов	Q, %	Rq	8.пм
			S, %	W, %						
1. Математическое (символьное) моделирование	1.ММ	Широкий класс методов аналитического моделирования с использованием математических моделей. Семейство математических моделей представления процессов с их характеристиками на основе реализации технологий числового (цифрового) эксперимента с использованием компьютерных технологий.	Высокая доступность (минимальные ресурсные требования), универсальность, управляемость, повторяемость, интерпретируемость, воспроизводимость, учет любых условий, вариантное сравнение в равных условиях, возможность уточнения данных. Обеспечиваются: сходимость данных, аналоги закономерностей, адекватность алгоритмов, контроль и мониторинг качества, сокращение время, экономичность.	62	Проблематичность аналитического описания для сложных объектов. Обязательно требуется контроль качества моделей, верификация и оценка валидности результатов. Ограничения аппарата теории вероятности для организационно-технических объектов.	22	Невозможность использования в роботизированных системах управления дискретных алгоритмов. Инвариантность математического аппарата анализа, синтеза.	60	Невозможность моделирования целенаправленных процессов управления. Ограниченные возможности и перспектива моделирования сложных процессов.	30 66,8 5
2. Компьютерный инжиниринг	2.КИ	Семейство программ и программных пакетов, предназначенных для решения различных инженерных задач: расчётов, анализа и симуляции физических процессов.	Системы инженерного анализа (автоматизации инженерных расчётов) (CAE) применяются совместно с CAD-системами (гибридные CAD/CAE-системы).	53	Полнота класса моделей сильно зависит от его изученности.	45	Хорошие возможности визуализации больших потоков событий.	50	Ограниченное применение для целенаправленных процессов.	15 59,2 17
3. Имитационное моделирование	3.ИМ	Класс методов имитационного моделирования с использованием метода Монте-Карло с использованием компьютерных технологий.	Решение проблемы сложности объекта анализа.	50	Высокие ресурсные требования (стоимость, время разработки). Иностраный производитель.	40	Перспективно для аналогов многоагентных систем с однородным поведением агентов.	75	Применение ограничено для разнородных процессов и элементов СлС.	25 64,4 8
4. Моделирование цифровых двойников	4.ЦД	Семейство сложных мультисциплинарных математических моделей с высоким уровнем адекватности реальным материалам, реальным объектам, техническим и киберфизическим системам, физико-механическим процессам, описываемых 3D нестационарными нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных (определение Центра НТИ СПбПУ).	Высокий уровень адекватности реальным материалам порядка ~5%. Высокая воспроизводимость, накапливаемость результатов, возможность уточнения данных. Обеспечивается: сходимость данных, аналоги закономерностей, сокращение время.	60	Высокая сложность. Высокая ресурсные требования. Ограниченная доступность, целостность данных. Иностраный производитель. Медленное внедрение с 2000 - 2010 г.г.	50	Стабильное развитие и совершенствование продуктов с учетом достигаемого высокого уровня адекватности реальным процессам.	90	Проблемы технологической зависимости. Проблемы импортозамещения. Возможность появления санкций.	50 61,3 14
5. Оптимизация многопараметрическая процессов и систем	5.Оп	Семейство программ и программных пакетов на основе аналитического решения задачи обоснования параметров процесса и систем путем максимизации заданного функционала эффективности.	Аналитическое решение оптимизационной задачи.	43	Сложность построения оптимизационного функционала. Проблема обоснования исходных данных.	20	Возможность прозрачной интерпретации результатов.	65	Проблемы сложности построения аддитивской модели СлС	15 65,9 6
6. Оптимизация многокритериальная процессов и систем	6.Ок	Семейство программ и программных пакетов на основе аналитического решения задачи многокритериального описания процессов и систем путем максимизации заданного функционала эффективности.	Аналитическое решение оптимизационной задачи.	50	Сложность построения оптимизационного функционала. Проблема обоснования исходных данных.	20	Возможность прозрачной интерпретации результатов.	70	Проблемы сложности построения аддитивской модели СлС	10 70,7 2
7. Оптимизация междисциплинарная процессов и систем	7.Од	Семейство программ и программных пакетов на основе аналитического решения задачи междисциплинарного описания процессов и систем путем максимизации заданного функционала эффективности.	Аналитическое решение оптимизационной задачи.	47	Сложность построения оптимизационного функционала. Проблема обоснования исходных данных.	20	Возможность прозрачной интерпретации результатов.	60	Организационная сложность согласования условий моделирования.	35 61,5 13
8. Оптимизация топологическая процессов и систем	8.От	Семейство программ и программных пакетов на основе аналитического решения задачи обоснования структуры процессов и систем путем максимизации заданного функционала эффективности.	Аналитическое решение оптимизационной задачи.	39	Сложность построения оптимизационного функционала. Проблема обоснования исходных данных.	15	Возможность прозрачной интерпретации результатов.	55	Возможность прозрачной интерпретации результатов.	40 57,0 19
9. Оптимизация архитектурная (форм и размеров) систем	9.Оа	Семейство программ и программных пакетов на основе обоснования и оптимизации архитектурных решений процессов и систем путем максимизации заданного функционала эффективности.	Аналитическое решение оптимизационной задачи.	38	Аналитическое решение оптимизационной задачи.	33	Возможность прозрачной интерпретации результатов.	70	Возможность прозрачной интерпретации результатов.	10 63,3 10
10. Оптимизация функциональная (задачи и параметры)	10.Оф	Семейство программ и программных пакетов на основе обоснования и оптимизации функциональных решений процессов и систем путем максимизации заданного функционала эффективности.	Аналитическое решение оптимизационной задачи.	42	Аналитическое решение оптимизационной задачи.	30	Возможность прозрачной интерпретации результатов.	70	Возможность прозрачной интерпретации результатов.	10 65,6 7
11. Оптимизация алгоритмическая (процедуры и параметры)	11.Оал	Семейство программ и программных пакетов на основе обоснования и оптимизации алгоритмических решений процессов и систем путем максимизации заданного функционала эффективности.	Аналитическое решение оптимизационной задачи.	43	Аналитическое решение оптимизационной задачи.	38	Возможность прозрачной интерпретации результатов.	70	Возможность прозрачной интерпретации результатов.	10 64,2 9
12. Оптимизация комплексная (состав и параметры) систем	12.Ок	Семейство программ и программных пакетов на основе обоснования и оптимизации комплексных решений по процессам и системам путем максимизации заданного функционала эффективности.	Аналитическое решение оптимизационной задачи.	43	Аналитическое решение оптимизационной задачи.	28	Возможность прозрачной интерпретации результатов.	72	Возможность прозрачной интерпретации результатов.	8 67,3 4
13. Оптимизация технико-экономическая систем	13.Отэ	Семейство программ и программных пакетов на основе обоснования и оптимизации технико-экономических решений путем максимизации отношения "эффективность/стоимость".	Аналитическое решение оптимизационной задачи.	39	Аналитическое решение оптимизационной задачи.	35	Возможность прозрачной интерпретации результатов.	55	Возможность прозрачной интерпретации результатов.	10 59,3 16
14. Оптимизация качества систем	14.ПКМ	Полимоделный квалиметрический метод системной оптимизации, реализующий принципы агрегирования результатов оценки системных показателей качества на основе многомоделного оценивания, анализа, синтеза с мониторингом и прогнозированием динамики частных, групповых, модельных, комплексных и агрегированного показателей проектного качества СлС.	Инвариантность к специфике объектов анализа. Ресурсная доступность. Информационная прозрачность. Возможность формирования КБДЗ с оценкой системных показателей проектного качества и эффективности эксплуатации, конкурентной способности и перспективности развития.	60	Необходимость формирования многоуровневой системы критериев с оценкой критерияльных предпочтений Заказчика, формированием системы модельных предпочтений.	25	Возможность формирования КБДЗ с учетом специфики разнородных объектов информатизации, технологий развития. Прогнозирование системных показателей качества. Возможность системной оптимизации и прогнозирования. Низкие аппаратные требования при реализации.	70	Необходимость особого контроля доступности и целостности КБДЗ с целью предотвращения инцидентов информационной безопасности, рефлексивного управления.	10 72,9 1
15. Оптимизация эффективности эксплуатации систем	15.Оэ	Полимоделный квалиметрический метод системной оптимизации, реализующий аналогичные принципы агрегирования результатов оценки системных показателей качества, но на основе реальных параметров эксплуатации СлС.	Аналогичные п. 14 сильные стороны.	55	Аналогичные п. 14 слабые стороны.	23	Аналогичные п. 14 возможности развития.	65	Аналогичные п. 14 угрозы развития.	10 70,3 3

В условиях принятых ограничений и полученных оценок представленные данные показывают:

1. Наиболее перспективным направлением моделирования сложных систем следует считать оптимизацию качества сложных систем, в том числе в варианте полимодельного квалиметрического метода системной оптимизации («14.ПКМ» [2], рейтинг $R=1$, $АПК=72,9\%$) с использованием полимодельного метода квалиметрический системной оптимизации, реализующего принцип агрегирования показателей качества путем многомодельного оценивания, анализа, синтеза, мониторинга и прогнозирования динамики частных (ЧПК), групповых (ГПК), модельных (МПК), сводных (комплексных, СПК) и агрегированного (АПК) показателя проектного качества СлС [2].

Перспективность данного направления обусловлена инвариантностью метода к специфике объектов анализа, ресурсной доступностью, информационной «прозрачностью» используемых процедур, возможностью доступного формирования квалиметрических баз данных и знаний (КБДЗ) с оценкой системных показателей проектного качества и эффективности эксплуатации, конкурентной способности и перспективности развития, а также возможностью формирования КБДЗ с учетом специфики разнородных объектов информатизации, прогнозирования системных показателей качества, достаточно низкими аппаратными и программными требованиями.

Среди специфических свойств данного направления - необходимость формирования многоуровневой системы критериев с оценкой критериальных предпочтений Заказчика и формированием системы модельных предпочтений, а также необходимость контроля доступности и целостности КБДЗ как носителей особо важных системных сведений с целью предотвращения инцидентов информационной безопасности, рефлексивного управления.

Наконец, уровень $АПК=72,9\%$ указывает на возможность и перспективность дальнейшего совершенствования методов в этом направлении.

2. Другими перспективными направлениями развития методов моделирования СлС следует считать многокритериальную оптимизацию процессов и систем по критериям оценки и максимизации проектного качества («6.Ок», $R=2$, $АПК=70,7\%$, конкурентная способность по отношению к «14.ПКМ» $КС=70,7/72,9=97\%$) на основе использования семейства программ и программных пакетов аналитического решения задачи многомерного описания процессов и систем путем максимизации заданного функционала эффективности, а также оптимизацию эффективности эксплуатации систем («16.Оэ», $R=3$, $АПК=70,3\%$, $КС=70,3/72,9=96,4\%$) на основе, например, полимодельного квалиметрического метода системной оптимизации (ПКМ СО [2]), реализующего аналогичные принципы агрегирования результатов оценки системных показателей качества, но с использованием реальных параметров эксплуатации СлС в отличие от используемых в направлении «6.Ок» системных *показателей проектного качества* (АПК).

3. Результаты ранжирования других направлений и технологий моделирования в сочетании с данными табл. 1 (ТОР-10, рис. 1):

«12. Оптимизация комплексная (состав и параметры) систем (1.Ок)», $R=4$, $АПК=67,3\%$, $КС=66,8/72,9=92,4\%$.

«1. Математическое (символьное) моделирование (1.ММ)», $R=5$, $АПК=66,8\%$, $КС=66,8/72,9=91,7\%$.

«5. Оптимизация многопараметрическая процессов и систем (5.Оп)», $R=6$, $АПК=66,9\%$, $КС=90,4\%$.

«10. Оптимизация функциональная (задачи и параметры) систем (10.Оф)», R=7, АПК=65,6%, КС=90,0%.

«3. Имитационное моделирование (3.ИМ)», R=8, АПК=64,4%, КС=88,4%.

«11. Оптимизация алгоритмическая (процедуры и параметры) систем (11.Оал)», R=9, АПК=64,2%, КС=88,1%.

«9. Оптимизация архитектурная (форм и размеров) систем (Оа)», R=10, АПК=63,3%, КС=86,9%.

4. Отметим, что для средней погрешности задания исходных данных (табл. 1) порядка КВ=5% коэффициент вариации АПК составит в свете данных [2] порядка $KB_{APK} = (1...2) \%$, что говорит о достаточной устойчивости получаемых оценок АПК, а главным направлением повышения достоверности результатов моделирования качества методов (квалиметрии моделей) по-прежнему остается снижение погрешностей оценки и ввода исходных данных (ЧПК).

5. Приведенные результаты в целом подтверждают целесообразность приоритетного совершенствования СлС, в первую очередь, по системным показателям качества и эффективности.

6. Сформулированные результаты, представленные применительно к модели индексов критериальной значимости (ИКЗ, весовых коэффициентов, весов) «5.ПМ» (полимодельная), отличаются от результатов для других моделей ИКЗ, что отражено на рис.1. Выбор модели «5.ПМ» обоснован стремлением получить многоаспектные (полимодельные) оценки в отличие от моделей «1.РП» (равнопрочная, равновзвешенная), «2.КП» (краткосрочная перспектива), «3.ДП» (долгосрочная перспектива), «4.ЛО» (Лощманская оптимизация). Соответствующие значения ИКЗ по критериям S,W,O,T приведены в табл. 2 с учетом методов их обоснования, описанных в [1, 2, 4].

Таблица 2. Матрица ИКЗ для 5 моделей предпочтений

Модель	Значения ИКЗ моделей			
	S	W	O	T
1.РП	0,250	0,250	0,250	0,250
2.КП	0,350	0,350	0,150	0,150
3.ДП	0,150	0,150	0,350	0,350
4.ЛО	0,300	0,200	0,300	0,200
5.ПМ	0,250	0,230	0,270	0,250

7. Приведенная в табл. 1 по существу КБДЗ методов моделирования может служить базой для альтернативного сравнения, практической оценки и обоснования целесообразности использования новых методов и технологий *путем* их включения в КБДЗ.

Возможности

В целом приведенные методологии, оценки и результаты позволяют обеспечить целый ряд преимущественных возможностей анализа и синтеза СлС, включая цифровой анализ качества альтернативных методов исследования, обоснованный выбор наиболее перспективных из состава включенных в КБДЗ, формирование рекомендаций и развитие уже существующих методов по пути наращивания их качества, а также другие в контексте тенденций развития методов моделирования СлС, обобщенных и представленных в виде на рис. 2.

Выводы

Как следует из приведенных данных, моделирование сложных систем является мощным инструментом исследователей, а в условиях тенденции роста сложности объектов анализа становится по существу единственным средством обоснования путей их проектирования и развития.

При этом, выбор из многообразия доступных методов и средств моделирования должен, в первую очередь, обеспечивать наилучшее по системным показателям качества СлС достижение целей моделирования – возможность полимодельного исследования и оптимизацию моделей предлагаемых технических, технологических и организационных решений. Оптимизацию модельных решений на основе цифровизации системных свойств, верификации их показателей и контроля валидности, классификации и идентификации динамических образов и регламентов, интеллектуализации процессов целеполагания, гармоничного и эмерджентного развития сложных концептуальных, проектных, организационных и технологических систем.



Рис. 2. Тенденции развития методов моделирования СлС

Одним из дальнейших направлений исследований авторы видят целесообразным расширенное формирование квалиметрической базы данных и знаний с наращиванием системы критериев и уточнением оценок для ряда типовых практических задач. Это позволит повысить точность использования соответствующих рекомендаций, а авторам исследований обоснованно выбирать соответствующие методы и технологии.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при частичной финансовой поддержке Программы НТС Союзного государства «Интеграция-СГ» (проект «Интеграция-СГ-3.2.4.1») и в рамках бюджетной темы № 0073–2019–0004.

Литература

1. Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов: монография. М.: РАН, 2018. 314 с.
2. Алексеев А.В. Примеры реализации полимодельного квалиметрического метода системной оптимизации объектов морской техники и морской инфраструктуры /

Морские интеллектуальные технологии / Marine intellectual technologies, № 2 (52) том 3, 2021. С. 69-81/№ 2 (52) part 3, 2021. P. 69-81.

3. **Смольников А.В., Алексеев А.В.** Программа квалиметрического анализа и оценки конкурентноспособности технологических решений по информационной поддержке принятия решений судоводителем (QSWOT) - Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ (Реестр ФСИС) № 2013612929, 18.03.2013.
4. Комплексное моделирование сложных объектов: основные особенности и примеры практической реализации /М.Ю. Охтилев, А.Н. Павлов, А.М. Плотников, С.А. Потрясаев, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов / Доклад СПИИРАН. Санкт-Петербург, 2015. 22 с.
5. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности / Доклад СПб ПУ. – Санкт-Петербург, 2019.
6. 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.
7. **Кириянов Б.Ф., Кириянов Д.В.** Теории построения интегральных показателей качества систем на основе линейных математических моделей / Современные наукоемкие технологии. 2008. № 4. С. 59-60.