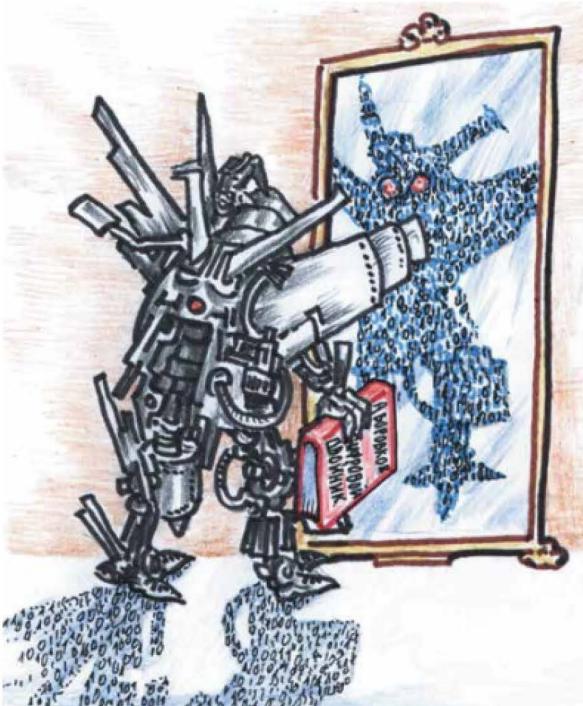


«УМНЫЕ» ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ –

ОСНОВА НОВОЙ ПАРАДИГМЫ ЦИФРОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЛОБАЛЬНО КОНКУРЕНТОСПОСОБНОЙ ПРОДУКЦИИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ



Разработка и производство в кратчайшие сроки глобально конкурентоспособной кастомизированной продукции нового поколения возможны сегодня с применением Цифровых, «Умных», Виртуальных «Фабрик Будущего» – систем комплексных технологических ре-

шений, имеющих принципиальную схему в виде триады «цифровое проектирование и моделирование & новые материалы & аддитивные технологии», в которой драйвером выступает новая парадигма цифрового проектирования и моделирования Smart Digital Twin –



Алексей Боровков

(Simulation & Optimization) Smart Big Data]-Driven Advanced (Design & Manufacturing).

В основе новой парадигмы цифрового проектирования и моделирования лежит использование сложных мультидисциплинарных математических моделей с высоким уровнем адекватности реальным материалам, конструкциям и физико-механическим процессам (включая технологические и производственные), описываемых уравнениями математической физики, в первую очередь, 3D нестационарными нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных.

Такие математические модели («умные» модели), агрегируют в себе все знания, которые применяются при проектировании, про-

Подготовили: Алексей Боровков, проректор по перспективным проектам СПбПУ, лидер - соруководитель рабочей группы «Технет» (передовые производственные технологии) Национальной технологической инициативы

Юрий Рябов, начальник отдела технологического и промышленного форсайта Инжинирингового центра «Центр компьютерного инженеринга» (CompMechLab®) СПбПУ

Валерия Марусева, специалист отдела технологического и промышленного форсайта Инжинирингового центра «Центр компьютерного инженеринга» (CompMechLab®) СПбПУ

изводстве и эксплуатации изделия / продукта / конструкции / машины / установки / технической или кибер-физической системы:

1. Фундаментальные законы и науки (математическая физика, теория колебаний, упругости, пластичности и т. д., механика разрушения, механика композиционных материалов и композитных структур, контактного взаимодействия, динамика и прочность машин, вычислительная механика, гидроаэродинамика, тепломассообмен, электромагнетизм, акустика, технологическая механика и др.).

2. Геометрические (CAD) и вычислительные конечно-элементные (CAE) полномасштабные модели реальных объектов и физико-механических процессов.

3. Полные данные о материалах, из которых изготавливается изделие, включая данные о поведении материалов при воздействии тепловых, электромагнитных и др. полей, скоростном деформировании, вибрационном, ударном, мало- и многоцикловом нагружении.

4. Информация об эксплуатационных режимах (нормальные условия эксплуатации, нарушения нормальных условий эксплуатации, аварийные ситуации и т.д.), включая информацию, которая обеспечивает заданное поведение конструкции в тех или иных ситуациях (так называемое программируемое поведение).

5. Данные о технологиях производства и сборки как отдельных элементов, так и конструкций в целом.

6. Прочие характеристики и параметры.

Такое агрегирование всех знаний, которые применяются при создании продукта, являет-

ся необходимым, но не достаточным условием для формирования «умных» моделей. Более важными представляются следующие ключевые компетенции, без которых формировать «умные» модели невозможно:

1. Кастомизация: «умная» модель всегда формируется из «best-in-class» технологий мирового уровня, при этом данная компетенция предполагает одновременно как способность мгновенно откликнуться на запрос Заказчика, который сам определяет круг используемых технологий, так и способность решить инженерно-технологическую проблему-вызов для Заказчика, которому неважно, за счет каких технологий это будет сделано.

2. Системный инжиниринг: в каждый момент времени необходимо держать в поле зрения всю систему и все ее взаимодействующие компоненты, чтобы не происходило ситуаций, когда улучшение характеристик одного компонента влечет ухудшение характеристик другого.

3. Многоуровневая матрица целевых показателей и ресурсных ограничений (временных, финансовых, технологических, производственных и т.д.): опыт решения сложных промышленных задач Инжиниринговым центром СПбПУ и ГК CompMechLab® по заказам компаний – мировых лидеров свидетельствует, что такая матрица содержит десятки тысяч (~ 40 000 ... ~ 60 000) целевых показателей и требований,



предъявляемых к продукту в целом, к его компонентам и деталям в отдельности, а также ресурсных ограничений.

4. Валидация «умных» моделей: в цифровую форму необходимо перевести результаты натурных испытаний, в первую очередь тех, которые проводились для доводки изделий в различных отраслях еще во времена СССР. Известно, например, что в авиакосмической отрасли потенциал физических и особенно математических моделей, которые лежат в основе большинства конструкций и интегрируют опыт и знания предыдущих поколений инженеров, практически исчерпан.

5. «Цифровая сертификация»: бизнес-процесс, целью которого является прохождение с первого раза всего комплекса натурных, сертификационных, рейтинговых и прочих испытаний. Разработка изделия в рамках этого бизнес-процесса с начала и до конца ведется на основе «best-in-class» технологий мирового уровня, системного инжиниринга, многоуровневой матрицы целевых показателей и ресурсных ограничений, валидации «умных» моделей и, самое главное, – выполнения десятков тысяч виртуальных испытаний для каждого компонента (узла, детали, механизма, сопряжения и т. д.), материалов и всей системы в целом. Это позволяет управлять и контролировать поведение буквально каждого кубического миллиметра конструкции на всех этапах жизненного цикла.

Продемонстрируем «цифровую сертификацию» на примере реализации проекта государственного значения «Кортеж» по созданию на единой модульной платформе отечественных автомобилей премиум-класса (лимузин, седан, внедорожник и микроавтобус) для перевозки и сопровождения первых лиц государства (головной исполнитель – ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», зона ответственности Инжинирингового центра СПбПУ – работы по проектированию и разработке цифровой рабочей конструкторской документации для

производства кузовов всех четырех автомобилей).

2 июня 2016 года состоялись натурные испытания на безопасность по программе Euro NCAP (краш-тесты) на независимом полигоне в Берлине, где седан проекта «Кортеж» с первой попытки получил высший балл – 5 звезд. Это подтвердило высочайший уровень адекватности разработанных «умных» моделей кузовов и проведенных виртуальных испытаний на безопасность реальным автомобилям и натурным экспериментам.

Достижение этого результата стало возможным благодаря тому, что при разработке было учтено огромное количество параметров. Известно, что виртуальный краш-тест автомобиля – быстропротекающий динамический процесс, длительность которого составляет порядка 200–250 мс.

Шаг интегрирования для численного решения задач составляет 1 мкс. Общее количество шагов интегрирования – более 200 000. Вся эта информация образует большие данные (Smart Big Data) «на входе» (более $2 \cdot 10^{12}$ параметров) «умной» модели. Проведенные виртуальные испытания дополняют этот массив – получаем Smart Big Data «на выходе»: при суперкомпьютерном моделировании процесса длительностью 200 мс на выходе получается массив данных, содержащий более 10^{14} параметров. В нескольких десятках миллионов узлов (~ $1\ldots3 \cdot 10^7$) узлов регулярно «считываются» более 50 параметров, таких как перемещения, скорости, ускорения, деформации, напряжения и др. В итоге получается $5 \cdot 10^8$ кривых, исчерпывающе описывающих поведение «умной» модели.

«Умная» модель за счет своей высокой адекватности благодаря, в первую очередь, Smart Big Data «на входе» и на «выходе», позволяет значительно «приблизиться» к реальному объекту – обеспечивает отличие между результатами виртуальных испытаний и натурных испытаний в пределах $\pm 5\%$. Именно такую высокоадекватную модель

можно назвать цифровым двойником объекта / продукта (Digital Twin, DT-1). Высокоадекватную «умную» модель с учетом особенностей технологии изготовления (например, «интеллектуальное» литье, «интеллектуальная» штамповка, учет предварительного напряженно-деформированного состояния и уточнения, коробления и т.д. деталей после технологических процессов) можно назвать цифровым двойником производства (Digital Twin, DT-2). Объединение цифрового двойника объекта / продукта (DT-1) и цифрового двойника производства (DT-2) в рамках единой цифровой модели на основе выполнения десятков тысяч виртуальных испытаний в процессе «цифровой сертификации» ведет к формированию «умного» цифрового двойника первого уровня (Smart Digital Twin, SDT-1).

Впоследствии, уже на этапе эксплуатации, SDT-1 на основе «умной» модели «порождает» «умную» цифровую тень (Smart Digital Shadow, SDS) за счет получения оперативной информации о функционировании конкретного объекта / продукта при помощи технологий промышленного Интернета и диагностики (Health Monitoring System, HMS). Эта дополнительная информация, полученная на этапе эксплуатации, повышает уровень адекватности («обучает») SDT-1 и позволяет дальнейшим моделировать с его помощью различные возможные и «непредвиденные» ситуации и эксплуатационные режимы (например, оценивать уровень возможных повреждений или остаточный ресурс). При этом, благодаря множеству проведенных в процессе «цифровой сертификации» виртуальных испытаний при создании SDT-1, есть четкое представление о расположении критических зон, в которых имеет смысл размещать те или иные датчики (акселерометры, тензорометры, датчики температуры, давления, скорости и т. д.). Это позволяет радикально сократить число самих датчиков и получаемый объем больших данных, отбирая самые необходимые

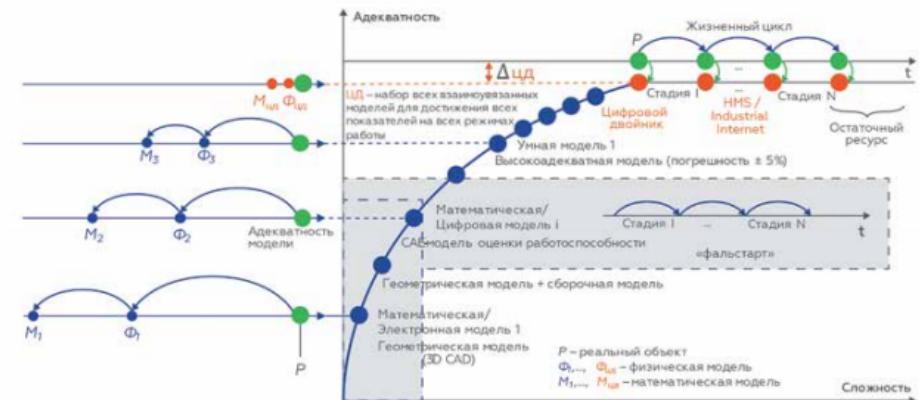


Рисунок 1. Традиционный и современный подход к построению физических и математических моделей

Источник: Центр НТИ СПбПУ

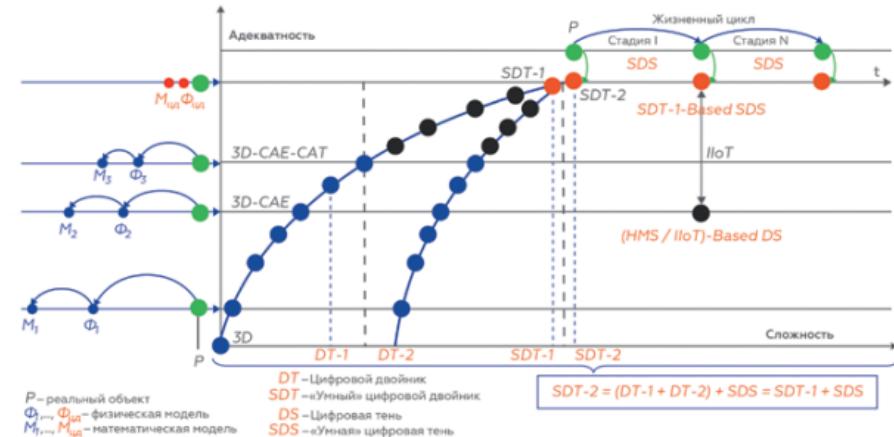


Рисунок 2. Семейство физических и математических моделей. Цифровой двойник, «умный» цифровой двойник, цифровая тень, «умная» цифровая тень

Источник: Центр НТИ СПбПУ

(фактически, вместо Big Data формируется Smart Big Data), а также увеличить скорость обработки данных и внесения необходимых изменений в SDT-1 для его трансформации в «умный» цифровой двойник второго уровня (SDT-2).

Таким образом, новая парадигма проектирования основана на разработке в процессе «цифровой сертификации» и применении семейства «умных» цифровых двойников (SDT-1, SDT-2, ...), формируемых в Topology, Topography, Sizing, Shaping и др.) на основе специальным образом

генерируемых «умных» больших данных (Smart Big Data) «на входе» и «на выходе».

В Инжиниринговом центре СПбПУ и ГК CompMechLab® весь процесс цифрового проектирования и моделирования, включая формирование многоуровневой матрицы целевых показателей и ресурсных ограничений, разработки «умных» моделей и цифровых двойников в процессе «цифровой сертификации» выполняется на основе специализированной CML-Цифровой платформы CML-Bench (разработка ГК CompMechLab®), которая в 2017 году была удостоена Национальной промышленной премии РФ «Индустрис», которая обеспечивает чрезвычайно высокую степень автоматизации процесса разработки на основе всех лучших передовых технологий мирового уровня («эко-



системы best-in-class технологий»), общая трудоемкость разработки и сопровождения которых превышает 1 000 000 человеко-лет, а стоимость разработки превышает 100 млрд долларов. Для одновременного удовлетворения в процессе проектирования десяткам тысяч целевых показателей и ресурсных ограничений применяется специаль-

но разработанная CML-Экспертная интеллектуальная система CML-AI (разработка CompMechLab®), которая, фактически, является системой «интеллектуальных помощников» и целенаправленным развитием в направлении применения искусственного интеллекта в наиболее сложном и творческом процессе – процессе проектирования.



Рисунок 3. Экосистема технологий, испытательный полигон (TestBed), CML-Цифровая платформа CML-Bench, CML-Экспертная интеллектуальная система CML-AI, Цифровые фабрики

Источник: Центр НТИ СПбПУ