



ЦИФРОВЫЕ
ДВОЙНИКИ

БОРЬБА
С ОСЛОЖНЕНИЯМИ

НГК РОССИИ
И МИРА

Нефтегаз.RU

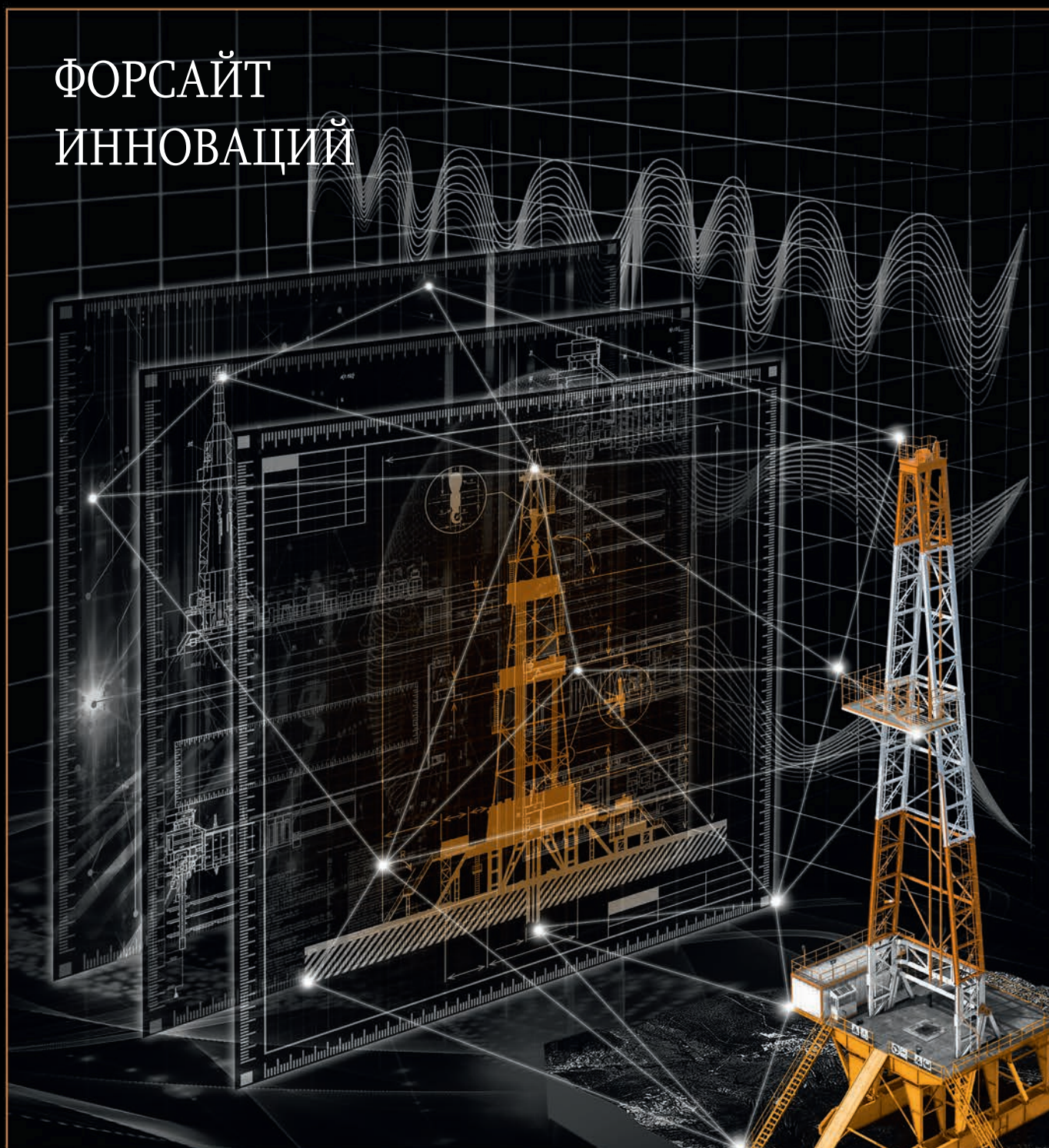
ДЕЛОВОЙ ЖУРНАЛ

ИНТЕРЕСНО О СЕРЬЕЗНОМ

ISSN 2410-3837

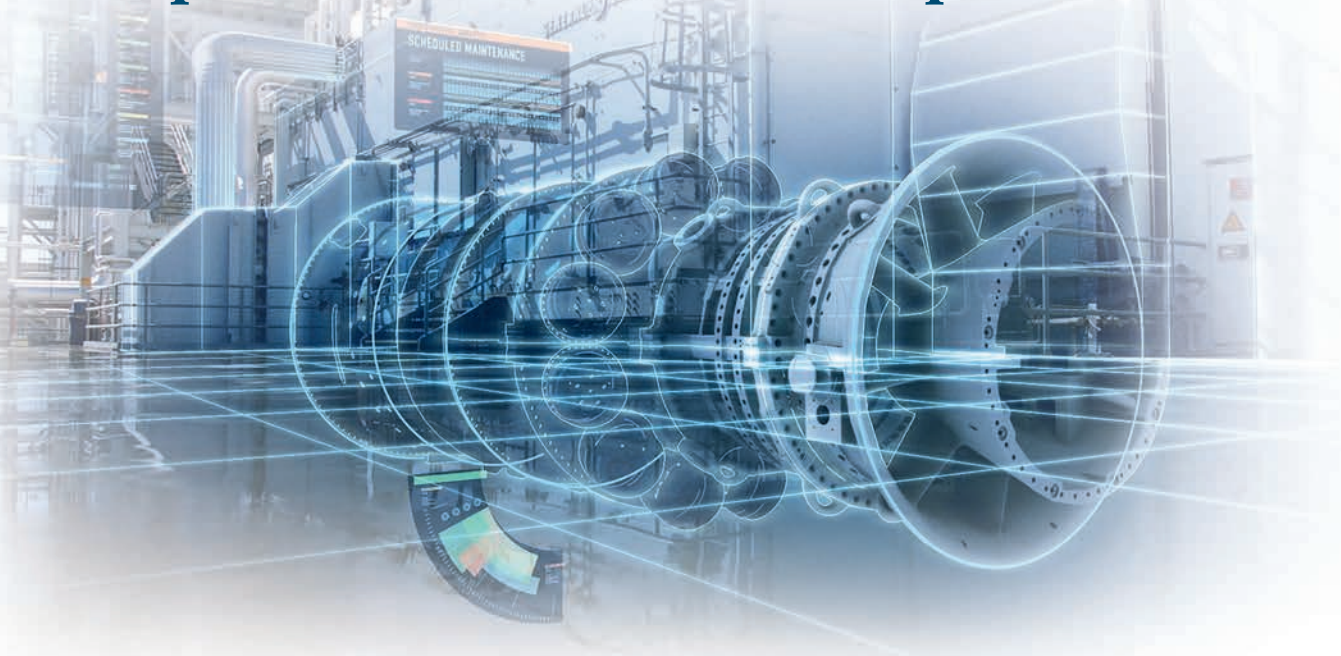
6 [102] 2020

ФОРСАЙТ
ИННОВАЦИЙ



Входит в перечень ВАК

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ в нефтегазовом машиностроении



В СТАТЬЕ¹ ПРЕДСТАВЛЕН ПОДХОД ЦЕНТРА КОМПЕТЕНЦИЙ НТИ СПбПУ «НОВЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» ПО РАЗРАБОТКЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ, ПРЕДЛОЖЕНО ОПРЕДЕЛЕНИЕ И КЛЮЧЕВЫЕ КОМПОНЕНТЫ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ, РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ ДЛЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. ПРИВЕДЕНЫ ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ НЕФТЕГАЗОВОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

THIS ARTICLE PRESENTS THE APPROACH OF THE NATIONAL TECHNOLOGY INITIATIVE CENTER FOR ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGIES OF PETER THE GREAT ST. PETERSBURG POLYTECHNIC UNIVERSITY TO DIGITAL TWINS DEVELOPMENT, THE DEFINITION AND THE KEY COMPONENTS OF DIGITAL TWINS FOR THE HIGH-TECH MANUFACTURING INDUSTRY. THE AUTHORS ILLUSTRATE THEIR APPROACH BY GIVING EXAMPLES OF THE DIGITAL TWINS TECHNOLOGY APPLICATION FOR THE DEVELOPMENT OF STATE-OF-THE-ART PRODUCTS IN THE OIL AND GAS MACHINERY MANUFACTURING INDUSTRY

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цифровые двойники, цифровые тени, «умные» цифровые двойники, «умные» цифровые тени, модельно-ориентированный системный инжиниринг.

Боровков Алексей Иванович

проректор по перспективным проектам СПбПУ,
руководитель Центра компетенций
НТИ СПбПУ «Новые производственные технологии»,
руководитель Инжинирингового центра
(ComrMechLab®) СПбПУ,
к.т.н.

Рябов Юрий Александрович

начальник отдела технологического
и промышленного форсайта Инжинирингового
центра (ComrMechLab®) СПбПУ,
к.полит.н.

Гамзикова Анна Анатольевна

главный специалист отдела технологического
и промышленного форсайта Инжинирингового
центра (ComrMechLab®) СПбПУ

Глобальная цифровая трансформация – реальность, в полной мере определяющая развитие высокотехнологичных компаний и глобальных рынков. Цифровая трансформация в промышленности чаще всего ассоциируется с переходом к киберфизическим системам благодаря использованию технологий цифровых двойников, промышленного интернета, больших данных, искусственного интеллекта, машинного обучения и др.

Цифровые двойники позволяют компаниям создавать в кратчайшие сроки глобально конкурентоспособную продукцию нового поколения и управлять изменениями на всех последующих стадиях жизненного цикла. Однако разработка

¹ Настоящая статья подготовлена на основе краткого доклада «Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности» (сентябрь 2019 года) [1].

цифровых двойников требует применения новых подходов и технологий, включающих в себя цифровые платформы, многоуровневые матрицы целевых показателей и ограничений, виртуальные испытания, виртуальные стенды и виртуальные полигоны, и, конечно, инженерные компетенции мирового уровня.

Цифровой двойник: ключевые компоненты

Согласно определению Центра компетенций НТИ СПбПУ «Новые производственные технологии», цифровой двойник – это комплексная технология, процесс проектирования, в основе которого лежит разработка и применение семейства сложных мультидисциплинарных математических моделей, описываемых 3D нестационарными нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных, с высоким уровнем адекватности поведению в различных условиях эксплуатации реальных материалов, объектов, систем, машин, конструкций и т.д., а также разнообразным технологическим процессам, с помощью которых создаются реальные материалы и реальные объекты, изделия, продукты и т.д. Кроме того, конечно, цифровой двойник – это технология (процесс) создания глобально конкурентоспособной продукции, интегрирующая следующие необходимые ключевые компоненты:

1. Best-in-class («лучшие в классе») технологии мирового уровня, из которых путем комплексирования формируется цепочка создания глобально конкурентоспособной продукции, которую представим формулой, используя (для простоты) для операции комплексирования знак операции суммирования:

$$P_{best-in-class}^{WL} = \sum_{i=1}^n \alpha_i T_i^{WL} \quad (1)$$

где $P_{best-in-class}^{WL}$ – best-in-class глобально конкурентоспособная продукция (Product) мирового уровня (WL – World Level),

T_i^{WL} – i -ая best-in-class технология мирового уровня, α_i – весовой коэффициент, определяющий вклад i -ой best-in-class технологии мирового уровня в разработку глобально конкурентоспособной продукции, причем

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \quad (2)$$

Следует отметить, что как только в сумме появится (будет применена) технология, не отвечающая мировому уровню, которая не является лучшей для решения рассматриваемого класса задач, то и общий уровень продукции, измеряемый по тем или иным характеристикам, снизится – достаточно вспомнить общие концепции о «слабых звеньях в цепи» и «узких местах».

2. Модельно-ориентированный системный инжиниринг 2.0 (Model Based System Engineering 2.0, MBSE 2.0) – междисциплинарный, межатраслевой подход, используемый для разработки и применения сложных инновационных изделий и систем. Данный подход использует приемы высокотехнологичного унифицированного моделирования и проектирования, организации и управления деятельностью по созданию и применению высокотехнологичных объектов.

MBSE 2.0 предназначен для системного проектирования сложных объектов, причем объекты рассматриваются как системы (технические системы, киберфизические системы и т. д.), состоящие из подсистем и большого количества взаимодействующих между собой компонентов, более того, эти системы рассматриваются на протяжении всего жизненного цикла.

Модельно-ориентированный системный инжиниринг позволяет в каждый момент времени в процессе разработки «держать в поле зрения» всю систему и все ее взаимодействующие между собой (или – «друг с другом») подсистемы / компоненты / узлы / , чтобы не проходили незамеченными ситуации, когда в процессе разработки

- улучшение одних характеристик влечет значительное ухудшение других, не менее важных, характеристик,

или для всей системы в целом

- улучшение характеристик одной подсистемы / компонента и т.д. влечет ухудшение характеристик другой подсистемы / компонента и т.д.

или для тех или иных эксплуатационных режимов

- улучшение характеристик на одном режиме работы влечет ухудшение характеристик на другом режиме.

Это особенно важно, поскольку известно, что в конечном итоге уровень конкурентоспособности изделия/системы определяется его наиболее «слабыми» компонентами.

3. Многоуровневая матрица M_{DT} требований / целевых показателей и ресурсов (временных, финансовых, технологических, производственных, экологических и т. д.) ограничений – ключевой элемент технологии разработки цифрового двойника.

Матрица целевых показателей M_{DT} предназначена для обеспечения рациональной «балансировки» большого количества (несколько тысяч или десятков тысяч) целевых характеристик как объекта в целом, так и его компонентов в отдельности, которые, как правило, «конфликтуют» между собой

- как на одном уровне, так и на разных уровнях описания системы,

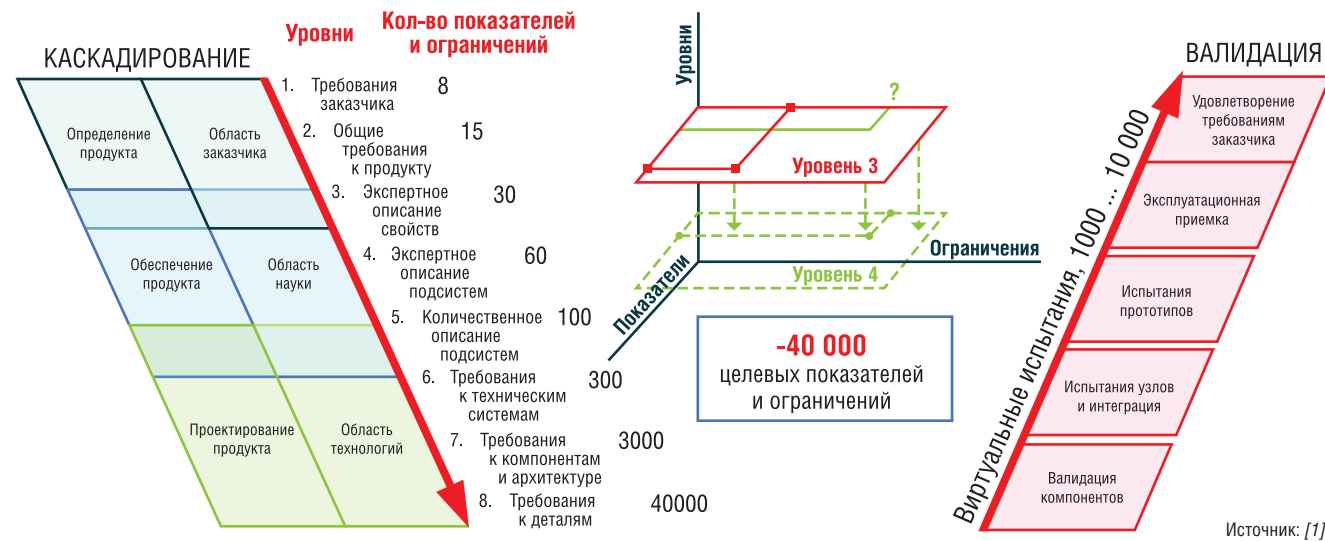
- как на одном этапе, так и на разных этапах жизненного цикла,

более того, нужно не только достичь целевых характеристик, но и удовлетворить множеству ресурсных ограничений.

Матрица целевых показателей M_{DT} должна обеспечивать возможность не только отслеживать взаимное влияние компонентов или нарушение тех или иных ограничений, но и позволять в кратчайшие сроки вносить необходимые изменения и уточнения – осуществлять оперативное «управление требованиями и изменениями» в процессе реализации проекта.

Более того, матрица M_{DT} должна позволять обосновывать смягчение первоначально чрезмерно жестких требований, заложенных на основе «линейной экстраполяции» опыта решения задач предыдущего поколения, так как в некоторых случаях достижение этих сверхжестких требований может

РИС. 1. Матрица требований/целевых показателей и ресурсных ограничений



занимать слишком много времени, стоить слишком дорого, при этом какого-либо эффекта по улучшению целевых характеристик можно и не добиться («эффект насыщения»).

По мере каскадирования и декомпозиции требований / целевых показателей и ограничений происходит наполнение и последовательное формирование матрицы целевых показателей

$$\{ M_{DT} : M_{DT}^{(0)}, M_{DT}^{(1)}, \dots, M_{DT}^{(Nm)} \}$$

– как правило, «сверху-вниз», в соответствии с концепцией «нисходящего проектирования» (см. рис. 1).

Последующая итерационная рациональная «балансировка» основана на повышении адекватности описания объекта / системы / машины / конструкции / ... на разных этапах жизненного цикла семейством взаимосвязанных мультидисциплинарных математических моделей –

$$\{ MM : MM^{(1)}, MM^{(2)}, \dots, MM^{(Nmm)} \}$$

В результате, после проведения физических / натуральных / и т.д. испытаний и достижения высокого уровня соответствия данным испытаний, мы получаем гиперматрицу $M_{DT}^{(*)}$, которая соответствует цифровому двойнику объекта / системы / машины / конструкции / и т.д., и для которой характерны балансировка конфликтующих целевых показателей и удовлетворение ресурсным ограничениям.

Для разработки полноценного цифрового двойника на основе семейства мультидисциплинарных математических моделей высокого уровня адекватности принципиально важным и обязательным является этап валидации (Validation) – процесс определения степени соответствия (уровня адекватности) математических / численных / компьютерных / моделей реальным объектам / системам / машинам / конструкциям / и реальным физико-механическим / технологическим / процессам на основе достоверных данных физических / натуральных испытаний.

4. «Виртуальные испытания» & «Виртуальные стенды» & «Виртуальные полигоны». В процессе разработки полномасштабного цифрового двойника сложных объектов / систем / машин / конструкций /, необходимо выполнить, как правило, десятки тысяч виртуальных испытаний (фактически «вычислительных экспериментов») материалов, узлов, компонентов, подсистем и систем, причем, как показывает опыт, количество виртуальных испытаний примерно соответствует количеству требований/целевых показателей и ограничений, представленных в матрице $M_{DT}^{(Nm)}$.

Для проведения виртуальных испытаний

$$\{ VI : VI^{(1)}, VI^{(2)}, \dots, VI^{(Nvi)} \}$$

и получения достоверных результатов необходимы разработка и применение высокоадекватных виртуальных аналогов всего применяемого испытательного оборудования, испытательных стендов и полигонов, которые применяются при проведении физических и натуральных испытаний:

семейства виртуальных испытательных стендов

$$\{ VIS : VIS^{(1)}, VIS^{(2)}, \dots, VIS^{(Nvis)} \}$$

и виртуальных испытательных полигонов

$$\{ VIP : VIP^{(1)}, VIP^{(2)}, \dots, VIP^{(Nvip)} \}$$

Полученное в результате применения всех вышеперечисленных подходов, методов и технологий семейство высокоадекватных мультидисциплинарных математических моделей

$$\{ MM : MM^{(1)}, MM^{(2)}, \dots, MM^{(Nmm)} \}$$

позволяет обеспечить отличие между результатами виртуальных испытаний и физических / натуральных испытаний в пределах $\pm 5\%$ или меньше.

Таким образом, цифровой двойник объекта / продукта / изделия / системы / машины / конструкции (Digital Twin, DT-1) содержит следующие компоненты:

- DT-1.1. Семейство best-in-class технологий мирового уровня T_i^{WZ} $i = 1, n$;

- DT-1.2. Семейство матриц целевых показателей/ требований и ресурсных ограничений $\{ M_{DT} : M_{DT}^{(0)}, M_{DT}^{(1)}, \dots, M_{DT}^{(Nm)} \}$;
- DT-1.3. Семейство взаимосвязанных высокоадекватных валидированных мультидисциплинарных математических моделей $\{ MM : MM^{(1)}, MM^{(2)}, \dots, MM^{(Nmm)} \}$;
- DT-1.4. Множество виртуальных испытаний $\{ VI : VI^{(1)}, VI^{(2)}, \dots, VI^{(Nvi)} \}$;
- DT-1.5. Множество виртуальных стендов $\{ VIS : VIS^{(1)}, VIS^{(2)}, \dots, VIS^{(Nvis)} \}$;
- DT-1.6. Множество виртуальных полигонов $\{ VIP : VIP^{(1)}, VIP^{(2)}, \dots, VIP^{(Nvip)} \}$.

Все эти компоненты участвуют в процессе разработки цифрового двойника и **необходимы для обеспечения**

- **рационального выбора весовых коэффициентов** α_i (2), определяющих вклад i -ой best-in-class технологии мирового уровня T_i^{WZ} в разработку цифрового двойника объекта / продукта / изделия / системы / машины / конструкции / ...;
- **балансировки (глобальной** (для всей системы) **и локальной** (для подсистем, компонентов, деталей) конфликтующих между собой требований/целевых показателей и ресурсных ограничений,

то есть для получения сбалансированной гиперматрицы требований / целевых показателей и ресурсных ограничений $M_{DT}^{(*)}$.

Цифровой двойник – основа новой парадигмы цифрового проектирования и моделирования

Именно такое комплексное определение позволяет говорить о новой парадигме проектирования, которая делает процесс проектирования полностью прозрачным, принятие решений – обоснованным (например, на основе сотен / тысяч / десятков тысяч виртуальных испытаний) и полностью задокументированным, при этом значительно снижая многочисленные и разнообразные коммуникационные и транзакционные издержки.

Более того, новый процесс проектирования, как правило, одновременно происходит по нескольким, в некоторых случаях – по десяткам траекторий проектирования

$$\{ T : T^{(1)}, T^{(2)}, \dots, T^{(Nt)} \},$$

причем, и это принципиально важно:

- процесс проектирования по нескольким траекториям происходит без увеличения длительности и стоимости выполнения проекта, обеспечивая его эволюцию как непрерывного процесса прохождения множества «ворот качества» (Quality Gates) для каждой из траекторий проектирования;
- из всего множества траекторий $\{ T^{(i)}, i = 1, N_t \}$ проектирования несколько траекторий формируют

подмножество траекторий $\{ T^{*(j)}, j = 1, N_{*T} \}$, каждая из которых приводит к результату, удовлетворяющему требованиям технического задания. Соответственно, возникает важный вопрос – «Какие же из решений, принадлежащих подмножеству $\{ T^{*(j)} \}$ следует «материализовать», то есть взять за основу для реализации / изготовления?». Именно такой подход позволяет в дальнейшем серьезно задуматься об изменении / усовершенствовании бизнес-модели, выводя на рынок, в зависимости от конъюнктуры рынка, необходимые решения, оставляя другие, лучшие, решения и отвечающие им цифровые двойники «в засаде».

Во многих случаях большой вклад в повышение уровня адекватности математических моделей вносит учет данных, информации и знаний о технологических процессах изготовления деталей / узлов / компонентов. Например, это могут быть такие процессы, как литье металлических изделий, штамповка, сварка, сборка. Фактически важен учет «предварительного» напряженно-деформированного состояния, утонения, коробления и т. д. деталей после технологических процессов; наконец, изготовление композиционных материалов и формирование композитных структур, например, методом вакуумной инфузии.

Соответственно, семейство высокоадекватных мультидисциплинарных математических моделей технологических процессов, применяемых для изготовления продукции

$$\{ MM_T : MM_T^{(1)}, MM_T^{(2)}, \dots, MM_T^{(Nmm-T)} \};$$

а также сопутствующих виртуальных испытаний

$$\{ VI_T : VI_T^{(1)}, VI_T^{(2)}, \dots, VI_T^{(Nvi-T)} \};$$

виртуальных стендов

$$\{ VIS_T : VIS_T^{(1)}, VIS_T^{(2)}, \dots, VIS_T^{(Nvis-T)} \};$$

виртуальных полигонов

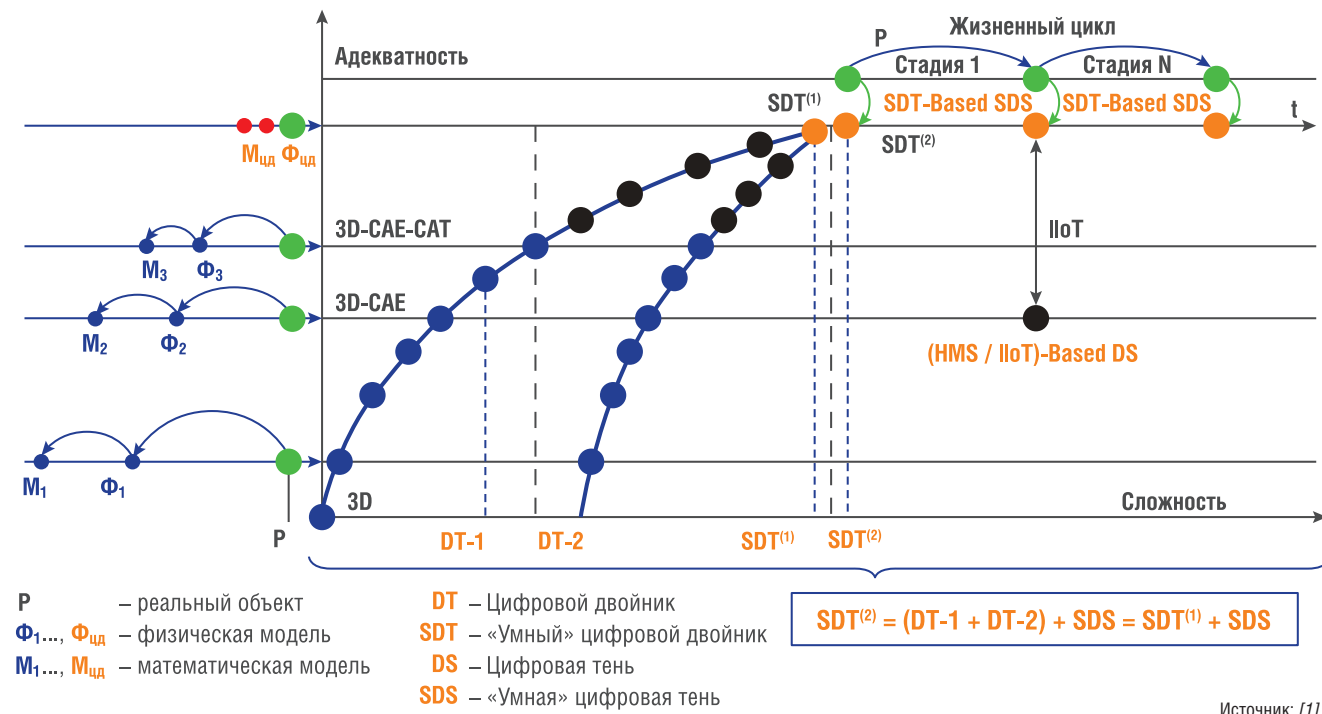
$$\{ VIP_T : VIP_T^{(1)}, VIP_T^{(2)}, \dots, VIP_T^{(Nvip-T)} \};$$

Центр НТИ СПбПУ называет цифровым двойником технологических процессов (Digital Twin, DT-2).

Комплексирование цифрового двойника объекта / системы / машины / конструкции (DT-1) и цифрового двойника технологических процессов (DT-2) в рамках единой полномасштабной цифровой модели позволяет



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



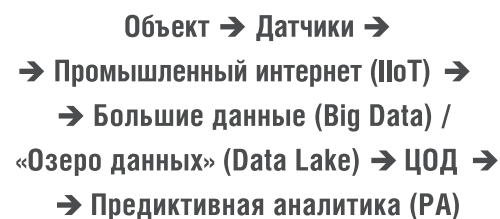
сформировать «умный» цифровой двойник 1-го уровня (Smart Digital Twin, SDT⁽¹⁾), который обладает «генетической памятью», то есть «знает» и «помнит», как его «изготавливали» и в какой последовательности его «собирали».

Применение SDT⁽¹⁾ позволяет организовать процесс «цифровой сертификации» – специализированный бизнес-процесс, основанный на тысячах / десятках тысяч виртуальных испытаний как отдельных компонентов, так и всей системы в целом, целью которого является прохождение с первого раза всего комплекса натуральных, сертификационных, рейтинговых и прочих испытаний.

Подчеркнем, что DT-1 и еще в большей степени «умный» цифровой двойник SDT дают четкое представление о расположении критических зон в конструкции, в которых имеет смысл размещать те или иные датчики (акселерометры, тензометры, датчики температуры, давления и т. д.), то есть отвечают на важные вопросы: «Где измерять?» и «Что измерять?» и позволяют сформировать «умные» большие данные (Smart Big Data) и «умную» цифровую тень (Smart Digital Shadow, SDS) в отличие от Big Data и цифровой тени (Digital Shadow, DS) [2].

Конечно, цифровые двойники нужно отличать от цифровых теней производственного процесса или эксплуатируемого продукта, которые представляют собой системы связей и зависимостей, описывающих поведение реального объекта/продукта, как правило, в нормальных условиях работы и содержащихся в избыточных больших данных (Big Data), которые получают с реального объекта/продукта при помощи технологий промышленного интернета. Понятно, что для формирования цифровых теней используется предиктивная аналитика, которая позволяет выявить и установить связи и зависимости тех или иных характеристик эксплуатируемого объекта.

Формирование цифровых теней обеспечивается за счет реализации алгоритма:



Цифровые тени давно используются в разных индустриях по всему миру, обычно для мониторинга технического состояния эксплуатируемого объекта. В силу большого количества датчиков, установленных на физическом объекте, цифровая тень может предупредить о «штатном износе» узлов и агрегатов, но, как правило, не способна предсказать аварийную ситуацию, которая зачастую зависит от неблагоприятного сочетания многих факторов [3], особенно, в случае ее стремительного развития.

В то же время использование «умных» цифровых двойников и «умных» цифровых теней позволяет:

- радикально сократить число требуемых датчиков и получаемый объем больших данных (поточных данных);
- значительно сократить или полностью исключить «мусорные данные», формируя «содержательные данные» – полные и достоверные данные, отличающиеся информационной насыщенностью, что является характерным признаком внутреннего обогащения данных;
- увеличить скорость обработки данных и внесения необходимых изменений в SDT⁽¹⁾ для его трансформации в «умный» цифровой двойник второго уровня SDT⁽²⁾.

В дальнейшем, по мере эксплуатации объекта / системы / машины / конструкции ... происходит постоянное «обучение» цифрового двойника

- как в соответствии с изменениями, происходящими на протяжении жизненного цикла реального объекта (например, «умный» цифровой двойник объекта / конструкции / сооружения «становится в процессе эксплуатации еще умнее», если он учитывает особенности произведенных ремонтов, которые, безусловно, изменят остаточный ресурс объекта / конструкции / сооружения),
- так и по результатам математического моделирования (виртуальных испытаний) ситуаций, в которых реальный объект не эксплуатировался или испытания провести невозможно, в первую очередь, в соответствии с соображениями безопасности или чрезмерной дороговизны (см. рис. 2).

В итоге формируется семейство цифровых двойников:

$$\{ DT-1, DT-2, SDT^{(1)}, SDT^{(2)}, \dots, SDT^{(N_{sd})} \}.$$

Дополнительная информация, полученная на этапе эксплуатации, а затем учтенная в цифровом двойнике, естественно, повышает уровень адекватности цифрового двойника – «обучает» SDT, и позволяет в дальнейшем моделировать с его помощью различные возможные и «непредвиденные» ситуации и эксплуатационные режимы. Например, позволяет оценивать уровень возможных повреждений, накопление и развитие повреждений, оценивать фактически выработанный ресурс и оценивать остаточный ресурс, осуществлять планирование и управление обслуживанием и ремонтами высокотехнологичного оборудования. Кроме того, цифровые двойники и цифровые тени позволяют управлять изменениями на всех последующих стадиях жизненного цикла.

Опыт применения цифровых двойников в нефтегазовом машиностроении

Одним из ярких примеров применения технологии цифровых двойников может служить совместный проект компаний «Политех-Инжиниринг» (дочерняя компания СПбПУ и высокотехнологичной инжиниринговой компании CompMechLab®, являющейся стратегическим партнером Центра НТИ СПбПУ) и НПО «Центротех» (входит в состав топливной компании «ТВЭЛ» госкорпорации «Росатом») по разработке цифрового двойника (DT-1) вибростата для системы очистки бурового раствора.

Топливная компания «Росатома» «ТВЭЛ» начала разработку системы очистки бурового раствора по заказу Уралмашзавода в 2014 году. В начале 2016 года был создан опытный образец, но он не отвечал всем параметрам технического задания. Приведем слова Натальи Никипеловой, президента компании «ТВЭЛ»: «Основной элемент этой конструкции – вибростат, но при его ускорении до 7g (целевое значение в ТЗ) конструкция разрушалась. Фиаско постигло и другие опытные образцы, на испытания которых ушел еще год» (цитата по статье корпоративного издания «Страна Росатом» [4]).

В апреле 2018 года к решению проблемы были привлечены специалисты компании «Политех-Инжиниринг». В рамках первого этапа совместного проекта компаний «Политех-Инжиниринг» и НПО «Центротех» был разработан полный цифровой двойник исходной конструкции, а также виртуальные испытательные полигоны. Высокую адекватность цифрового двойника вибростата подтвердили натурные эксперименты.

На втором этапе была сформирована многоуровневая гиперматрица требований / целевых показателей и ресурсных ограничений. За два месяца благодаря цифровой платформе CML-Bench™ было сгенерировано более 300 вариантов конструкции (5 вариантов в день).

На третьем этапе были получены множества решений, удовлетворявшие требованиям технического задания (7 g) и даже его превосходившие. Решения были сформированы под конкретное заданное производство и под заданную стоимость. Заказчиком был выбран вариант на 8,8 g [5].

Таким образом, всего через пять месяцев от старта работ была разработана принципиально новая конструкция вибростата для буровой установки, которая позволила существенно превзойти показатели изделия по сравнению с конкурентами. Были значительно улучшены основные характеристики конструкции: коэффициент перегрузки увеличен до 8,8 g, масса снижена. Практически мгновенно, за месяц, без каких-либо проблем, произошла «материализация цифрового двойника»: изделие было изготовлено, прошло межведомственные испытания и выпущено на рынок.

Приведем слова из интервью КМРPG Екатерины Солнцевой, директора по цифровизации госкорпорации «Росатом» [5], а также слова Натальи Никипеловой, президента компании «ТВЭЛ» из статьи в издании «Страна Росатом» [4]:

Екатерина Солнцева: «Совместно с питерским Политехом за три месяца сделали цифровую модель. Через пять месяцев от старта работ вышли на 8,8 g, что подтвердилось с первого же натурального испытания. И это тоже отдельная история, потому что уменьшение натуральных испытаний – это отдельная существенная экономия. Такой вот яркий пример применения цифровых технологий, который показывает, что можно не только что-то сделать быстрее и лучше, а можно сделать то, что ты раньше делать просто не мог» [5].

Наталья Никипелова: «Изготовили опытный образец, который превзошел зарубежные аналоги. Конструкция не разрушается даже при виброускорении до 10 g. В итоге ТВЭЛ не только не потерял клиента, но и получил заказы от других компаний. Причем на выполнение работ с использованием цифрового двойника ушло всего несколько месяцев. Мы решили тиражировать этот опыт, создав у себя инжиниринговый центр, в основе которого будет лежать новый, цифровой подход» [4].

Важно отметить, что успех полученных в рамках проекта результатов опирается, в том числе, и на опыт решения других задач-вызовов как для нефтегазовой промышленности, так и для других высокотехнологичных отраслей (о значимости междисциплинарных подходов см. [6]).

Среди значимых проектов для нефтегазового машиностроения, выполненных экспертами Центра НТИ СПбПУ и Инжинирингового центра (CompMechLab®) СПбПУ можно выделить выполненные работы в интересах ЗАО «Нефтехимпроект»:

1. «Многовариантные расчеты пространственного теплового и термонапряженного состояния установки каталитического крекинга для различных режимов работы реактора и регенератора. Выбор толщин элементов конструкций, оценка статической и циклической прочности» [см. подробнее: 7]. В рамках данного проекта были разработаны высокоадекватные «умные» модели, на основе которых был проведен анализ 3D термонапряженного состояния элементов установки для различных режимов работы, и определены допустимые толщины, удовлетворяющие критериям прочности в соответствии с ГОСТ и атомными нормами; определены конструктивные и технологические параметры, позволившие снизить уровень напряжений, возникающих в наиболее опасных с точки зрения прочности элементах конструкции; подготовлена техническая документация, необходимая для производства различных модификаций установки каталитического крекинга.
2. «Расчетные исследования вибрационного состояния обвязывающих трубопроводов установки каталитического риформинга с учетом пульсации потока рабочей среды и нестационарного воздействия от компрессоров» [см. подробнее: 8]. В рамках данного проекта были разработаны высокоадекватные «умные» модели обвязывающих трубопроводов, компрессоров и сепараторов, на основе которых были выполнены расчетные исследования пространственного вибрационного состояния обвязывающих трубопроводов установки каталитического риформинга на различных режимах работы компрессорных агрегатов.

Заключение

Технологии цифровых двойников применяются высокотехнологичными компаниями на всех стадиях жизненного цикла, поставляя информацию

об эксплуатации и надежности активов / продукции и давая представление о том, как можно улучшить их характеристики. Особенно эффективным является применение данной технологии на стадии НИОКР, где специально организованный процесс проектирования на основе многоуровневой гиперматрицы требований / целевых показателей и ресурсных ограничений обеспечивает значительное снижение времени и затрат на разработку, а также значительное снижение объемов натурных испытаний и доведение этих объемов до минимально допустимого и необходимого. ●

Литература

1. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности. Краткий доклад (сентябрь 2019 года) / А.И. Боровков, А.А. Гамзиков, К.В. Кукушкин, Ю.А. Рябов. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – 62 с.
2. Боровков А.И., Рябов Ю.А. Определение, разработка и применение цифровых двойников: подход Центра компетенций НТИ СПбПУ «Новые производственные технологии» // Цифровая подстанция. – 2019. – № 12. – С. 20–25. – URL: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/12_december/09/cifrovye_dvynii.pdf
3. Григоренко А. Прыжок в пространство возможностей // Новый оборонный заказ. Стратегии. – 2020. – № 2 (61). – URL: <https://dfnc.ru/arhiv-zhurnalov/2020-2-61/pryzhok-v-prostranstvo-vozmozhnostej/>
4. Быстрова Д. Без «цифры» «Росатом» не сможет закрепить за собой глобальное лидерство. – URL: <http://strana-rosatom.ru/2018/12/17/ускорение-цифры/>
5. Солнцева Е. «Главный принцип защиты от кибер-рисков – никогда и никому не говорить, как ты это делаешь». – URL: <https://mustread.kpmg.ru/interviews/glavnyy-printsip-zashchity-ot-kiber-riskov-nikogda-i-nikomue-govorit-kak-ty-eto-delaesh/>
6. Компьютерный инжиниринг: учеб. пособие / А.И. Боровков, С.Ф. Бурдаков, О.И. Клявин, М.П. Мельникова, А.А. Михайлов, А.С. Немов, В.А. Пальмов, Е.Н. Силина. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 93 с.
7. Конечно-элементные расчеты пространственного теплового и термонапряженного состояния установки каталитического крекинга для различных режимов работы реактора и регенератора. Выбор толщин элементов конструкций, оценка статической и циклической прочности. Подготовка технической документации (2007 г.). – URL: <http://fea.ru/project/80>
8. Конечно-элементное моделирование и исследование вибрационного состояния обвязывающих трубопроводов установки каталитического риформинга с учетом пульсации потока рабочей среды и нестационарного воздействия от компрессоров (2005 г.). – URL: <http://fea.ru/project/81>

KEYWORDS: Digital Twins, Digital Shadows, Smart Digital Twins, Smart Digital Shadows, Model-Based Systems Engineering.



Неделя нефтепереработки, газа и нефтехимии в Москве 2020

ИНТЕРКОНТИНЕНТАЛЬ МОСКВА ТВЕРСКАЯ

ОРГАНИЗАТОР



Euro Petroleum Consultants



В состав
Недели входят:

RRTC

20-я Конференция и выставка по технологиям переработки
России и стран СНГ
21-22 сентября

Russia & CIS BBTC

14-я Конференция России и стран СНГ по технологиям переработки
нефтяных остатков
22-23 сентября

GPTC

Нефтегазохимия – технологическая конференция и выставка
России и стран СНГ
24-25 сентября

Приглашаем всех, кто заинтересован выступить с докладом или принять участие в любой из конференций в качестве спонсора или участника выставок.