

ОПЫТ АО «ОДК» ПО ВНЕДРЕНИЮ ТЕХНОЛОГИЙ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПРИ СОЗДАНИИ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2023

- К. А. Виноградов** кандидат технических наук, заместитель начальника ОКБ-1 по расчётно-исследовательским работам; ПАО «ОДК-Сатурн», г. Рыбинск; kirill.vinogradov@uec-saturn.ru
- А. С. Никулин** руководитель направления; АО «Объединённая двигателестроительная корпорация», г. Москва; a.nikulin@uecrus.com
- Ю. Н. Шмотин** доктор технических наук, генеральный конструктор; АО «Объединённая двигателестроительная корпорация», г. Москва; y.shmotin@uecrus.com

Рассмотрены предпосылки формирования, основные принципы и подходы применяемой в АО «ОДК» технологии проектирования газотурбинных двигателей на основе концепции «цифрового двойника». Зафиксированы составные части технологии «цифрового двойника», три типа компьютерных моделей, включаемых в периметр цифрового двойника: модели «как спроектировано», «как изготовлено», «как испытано», а также отмечена необходимость и приведено краткое описание процесса построения автоматизированных расчётных цепочек.

Газотурбинный двигатель; цифровой двойник; математическое моделирование; предиктивная аналитика

Цитирование: Виноградов К.А., Никулин А.С., Шмотин Ю.Н. Опыт АО «ОДК» по внедрению технологий цифрового двойника при создании газотурбинных двигателей // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 4. С. 25-36. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-4-25-36

Непрерывный рост параметров цикла разработки, ужесточение требований заказчика, а также сокращение требуемых сроков разработки современных газотурбинных двигателей (ГТД) для сохранения конкурентоспособности на мировом рынке обуславливают необходимость оперативного развития и внедрения новых подходов к процессам управления жизненным циклом ГТД (проектирование, производство, эксплуатация), рис. 1.



Рис. 1. Предпосылки изменения подходов к проектированию газотурбинного двигателя

При этом газотурбинный двигатель является одним из самых сложных и наукоёмких изделий машиностроения, узлы «горячей» части которого работают в условиях предельных механических нагрузок, высоких температур (>2000 К) с необходимостью обеспечения высоких ресурсных показателей.

Повышение требований, предъявляемых к характеристикам газотурбинного двигателя, и ужесточение ограничений приводит к усложнению их конструкции и условий эксплуатации. По этой причине процесс испытаний и сертификации ГТД становится все более трудозатратным и длительным, что в случае неудовлетворительных результатов может привести к срыву сроков выхода изделия на рынок. Поэтому важной задачей является снижение времени доводки и сертификации ГТД, а также повышение вероятности получения требуемых характеристик двигателя в ходе его испытаний и эксплуатации.

На сегодняшний день требуемые сроки создания новых изделий газотурбинной техники ставят перед АО «ОДК» задачу обеспечения разработки, производства и сертификации ГТД за 4 года, что более чем в три раза меньше времени разработки ГТД в 70-80-е годы 20 века. Также важным является тот факт, что разработка современных ГТД осуществляется в рамках широкой кооперации как между предприятиями АО «ОДК», так и с участием соисполнителей третьего и последующих уровней. В этой связи особую важность приобретает использование цифровых технологий и цифровая трансформация процесса проектирования и разработки ГТД.

В настоящее время в связи с развитием средств суперкомпьютерных вычислений, совершенствованием математических методов и CAE/PDM систем популярность приобретает подход к проектированию на основе концепции «Цифрового двойника» (ЦД) [1 – 5].

На предприятиях АО «ОДК», начиная с 1990-х годов, накоплен значительный опыт по апробации и использованию цифровых технологий как для процесса проектирования и инженерных расчётов, так и для управления смежными процессами (технология управления конфигурацией, процессы серийного производства и послепродажного обслуживания), рис. 2.



Рис. 2. Опыт внедрения цифровых технологий в АО «ОДК»

Цифровой двойник – это система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием и его составными частями [10]. Цифровая модель изделия состоит из взаимосвязанных компьютерных моделей разного уровня детализации (0D, 1D, 2D, 3D). Цифровой двойник может быть рассмотрен как объект и как технология проектирования [7]. Основные свойства и характеристики данных аспектов ЦД приведены на рис. 3.



Рис. 3. Основные свойства и характеристики цифрового двойника как объекта и как технологии

При использовании данных предиктивной аналитики и виртуального прототипа реального физического изделия, механического или технологического процесса, который полностью повторяет поведение физического прообраза, включая все внутренние процессы, условия эксплуатации, техническое состояние и наработку конкретного экземпляра изделия, возможно получение «цифровой тени» [8] исследуемого ГТД или его узла.

К цифровому двойнику как к технологии предъявляется большое количество требований: двойник должен содержать в себе данные основных этапов жизненного цикла изделия (таких, как проектирование, производство, испытания, эксплуатация), располагаться в едином информационном пространстве, обеспечивающем коллективную работу специалистов над одним изделием с разным уровнем доступа. Также важным является обеспечение потребного уровня точности и соответствия используемых математических моделей реальным физическим объектам. По полученному в АО «ОДК» опыту в ходе разработки технологии создания цифрового двойника на сегодняшний день цифровой двойник и входящие в него компьютерные модели должны в среднем обеспечивать уровень погрешности вычислений, не превосходящий погрешность экспериментальных исследований, даже для наиболее сложнопрогнозируемых параметров реального объекта и происходящих в нём физических процессов (например, результаты связанных физических процессов (горение), величины осевых сил и т. д.). При этом цифровой двойник должен позволять отслеживать историю создания и развития изделия и его компонентов на протяжении всего жизненного цикла.

Ожидаемыми результатами внедрения данного подхода к управлению жизненным циклом изделия является увеличение скорости принятия технических решений, сокращение сроков разработки новых изделий на 30% (рис. 4), достижение требований Технического задания с первого опытного экземпляра, внедрение и широкое распространение безбарьерной среды для работы инженеров и проектировщиков, а также

снижение затрат на поздних этапах опытно-конструкторских работ, например при разработке семейства ГТД на базе унифицированного газогенератора или модификации существующего ГТД под изменившиеся требования заказчика [6].



Рис. 4. Трансформация системы разработки при использовании концепции цифрового двойника

Существенным отличием применения концепции цифрового двойника является изменение основного руководящего документа для разработки двигателя. Классическая форма Технического задания в новой системе работ становится матрицей целевых показателей и ограничений. Этот документ имеет несколько уровней требований, имеющих следующую градацию: от требований, предъявляемых к двигателю в целом, до требований к основным узлам, системам и отдельным деталям.

Важно отметить, что общее число требований, предъявляемых к газотурбинному двигателю, может достигать нескольких тысяч. Например, при разработке морского ГТД с использованием технологии ЦД было суммарно создано порядка 1200 требований к изделию. При этом выполнение требований по отдельным узлам и компонентам не гарантирует выполнение требований верхнего уровня, предъявляемых к силовой установке в целом. При работе над морским ГТД были выявлены противоречия в требованиях к изделию, требующие адаптации конструкции на последующих этапах опытно-конструкторских работ. При этом именно концепция «Цифрового двойника» позволяет обеспечить системный подход к разработке ГТД, взаимную увязку требований различного уровня, нахождения наилучшего сочетания конструктивных параметров узлов из имеющегося набора вариантов их исполнения и взаимодействия [9].

На рис. 5 представлены основные стадии формирования цифрового двойника в соответствии с основными этапами разработки ГТД. По мере прохождения основных этапов создания двигателя меняется и расширяется качественный состав моделей, входящих в цифровой двойник. От быстрых моделей низкого уровня точности, позволяющих с высокой скоростью оценивать основные характеристики различных конструктивных обликов и вариантов исполнения ГТД на начальных этапах проектирования (как правило термодинамические, упрощенные тепловые и прочностные модели двигателя на этапе аванпроекта) до высокодетализированных численных компьютерных моделей, позволяющих предсказывать характеристики узлов ГТД на любом режиме работы двигателя с высокой точностью и соответствием реальному изделию, но требующим огромных вычислительных и временных затрат на этапах изготовления опытных образцов и испытаний двигателя (нестационарные расчёты лопаточных машин, модели сопряженного теплообмена и горения с учётом химической кинетики и т. д.).

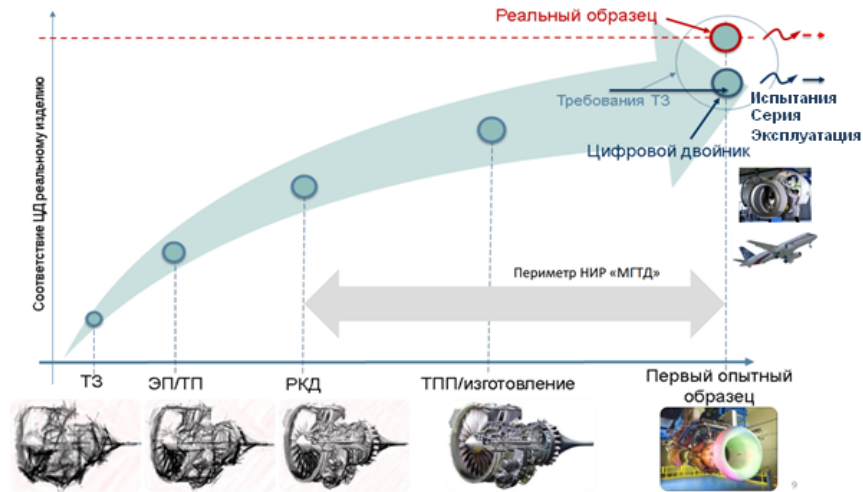


Рис. 5. Стадии формирования цифрового двойника.

ТЗ – техническое задание; ЭП/ТП – эскизный проект/технический проект; РКД – рабочая конструкторская документация; ТПП/изготовление – технологический процесс производства/изготовление

Применение подобных подходов позволяет определить эффективный конструктивный облик ГТД в соответствии с требованиями технического задания и получить характеристики, близкие к потребным уже на первых опытных образцах изделия.

На сегодняшний день существует ряд нормативных документов, описывающих понятия и особенности математического и компьютерного моделирования на уровне национальных стандартов Российской Федерации. До последнего времени вопросы, связанные с цифровыми двойниками изделий, оставались вне стандартизации и правового поля. Однако в 2021 году был выпущен национальный стандарт РФ «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий», ГОСТ 57700.37-2021 [10]. В нём описаны основные термины и определения, сформулированы принципиальные цели и задачи при создании цифровых двойников, приведены общие требования к разработке ЦД, даны рекомендации по применению программно-технологических платформ цифровых двойников и подчеркнута необходимость создания многоуровневой системы требований.

В последние несколько лет на предприятиях АО «ОДК» запущены, ведутся и уже выполнены значительное количество проектов, находящихся в контуре создания цифровых двойников. Среди них находятся как проекты, связанные с непосредственной разработкой изделий, так и внутренние проекты организационной трансформации предприятий корпорации. Основные проекты, связанные с разработкой изделий с учётом элементов технологии цифрового двойника, приведены на рис. 6.

В рамках данных проектов выполняется разработка матрицы требований в обеспечение проведения комплексного моделирования изделия и процесса его виртуальной доводки, формируется комплекс взаимосвязанных математических моделей с учётом реальной геометрии деталей и сборочных единиц (ДСЕ), входящих в состав двигателя, для сокращения сроков натурных испытаний.

Отдельным направлением является разработка технологии создания цифровых двойников путём разработки универсальной цифровой платформы по разработке и применению цифровых двойников. В её рамках разрабатываются требования к отдельным модулям и элементам платформы, ведётся их тестирование и опытная эксплуатация. В рамках работ на основе отечественного программного обеспечения (цифровая платформа CML-Bench и ПК pSeven Enterprise) разработана технология создания цифрового двойника морского ГТД и редуктора, позволяющая снизить сроки и стоимость создания новых изделий и модификаций.



Рис. 6. Основные проекты по разработке изделий с учётом элементов технологии цифрового двойника

В рамках внутренних проектов организационной трансформации корпорации ведется разработка универсальной методологии и нормативных документов по формированию цифровых двойников, разработаны правила и нормы формирования матриц требований к изделию, его подсистемам и узлам, правила унификации используемого и вновь внедряемого инженерного программного обеспечения, разрабатывается валидационный базис для оценки достаточности функционала инженерного программного обеспечения. При этом разрабатываемый валидационный базис также погружен в цифровую программно-технологическую платформу.

Результатами выполняемых комплексных проектов по разработке отдельных элементов технологии цифровых двойников, а также проектов организационной трансформации в том числе становится нормативная база корпорации, включающая в себя стандарты и инструкции. Так, в 2022 году разработан внутренний нормативный документ, в котором сформулированы и закреплены основные термины и определения, цели и задачи создания цифровых двойников ГТД, признаки наличия цифрового двойника изделия (ЦДИ), общие требования к разработке ЦДИ и принципы построения цифровых двойников газотурбинных двигателей. В ходе работ над документом были глубоко проработаны и раскрыты применительно к двигателестроительной отрасли требования ГОСТ Р 57700.37-2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» [10] в части места ЦД в процессе проектирования, особенностей его применения и необходимых организационных изменениях (введение ролей инженера по требованиям, выпуск инструкции по работе в цифровой платформе и т. д.).

Таким образом, АО «ОДК» – одна из первых государственных корпораций в РФ, где сформулированы и стандартизированы принципы и подходы к проектированию сложных технических систем на основе концепции «Цифрового двойника».

Необходимо отметить, что технологии цифрового двойника неразрывно связаны с другими элементами цифровой трансформации производственных и инженерных процессов, их объединением с другими элементами цифровой экосистемы, такими как технологии интернета вещей, умной фабрики, дополненной реальности, искусственного интеллекта, машинного обучения и промышленной робототехники (рис. 7) [11].

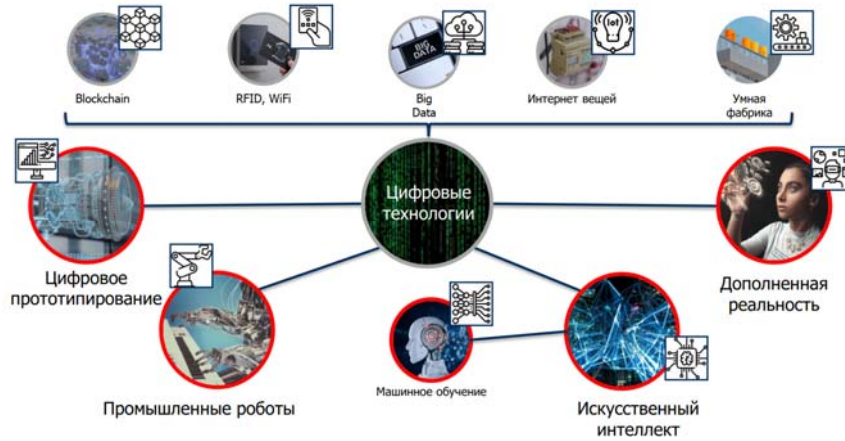


Рис. 7. Взаимосвязь элементов технологии цифрового двойника изделия с экосистемой цифровых технологий

Главным процессом, происходящим в рамках концепции «Цифрового двойника», является взаимодействие предъявляемых требований и расчётных моделей, подтверждающих эти требования. Этот процесс является многоуровневым и повторяется как для конкретных ДСЕ, так и для узла, системы и двигателя в целом. При этом элементы цифрового двойника на всех уровнях и этапах проходят постоянную валидацию по имеющимся данным испытаний, при необходимости выполняется корректировка.

На рис. 8 представлена схема взаимодействия расчётных моделей и предъявляемых требований, описанная выше. Основными составляющими цифрового двойника являются цифровые модели, описывающие геометрические характеристики конструкции (CAD), физические процессы, происходящие в элементах, узлах и системах ГТД (CAE), модели используемых технологических процессов (CAM). Модели технологических процессов также обеспечивают учёт фактических данных производства в геометрических характеристиках ДСЕ, заложенных в расчёты. Отдельной частью цифрового двойника являются модели обработки больших объёмов данных испытаний и эксплуатации, объединённые с модулем предиктивной аналитики и прогнозирования технического состояния ГТД.

Важно отметить, что использование в цифровом двойнике расчётных моделей высокого уровня детализации (например, трёхмерные нестационарные аэродинамические расчёты лопаточных машин), требующих существенных временных затрат, является ограниченным.

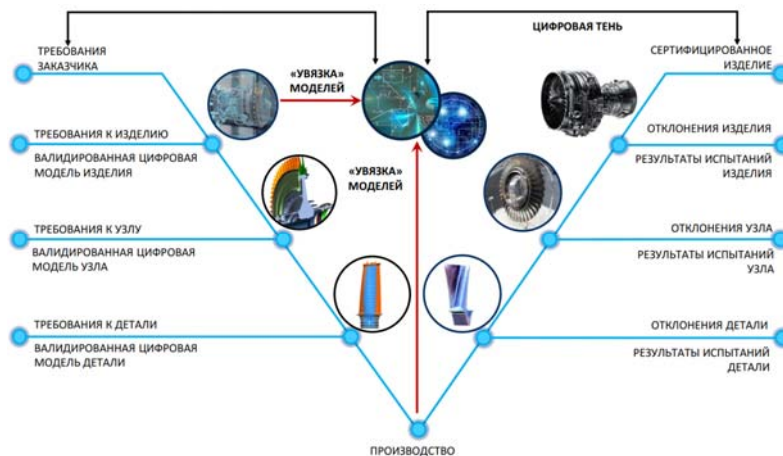


Рис. 8. Схема взаимодействия расчётных моделей и требований к газотурбинным двигателям на различных уровнях систем

На рис. 9 приведён пример взаимодействия расчётных моделей в составе цифрового двойника ГТД для 3D расчётных моделей компрессора. Видно, что основными интегральными моделями, формирующими облик ЦД, являются одномерная термодинамическая модель ГТД и двухмерная тепловая и прочностная модели ГТД с высокой скоростью работы и возможностью корректного описания основных особенностей работы изделия.



Рис. 9. Пример взаимодействия расчётных моделей в составе цифрового двойника ГТД (НА – направляющий аппарат, ВУ – выходное устройство, ГУ – граничные условия)

При сохранении структуры взаимодействия моделей сами расчётные модели могут существенно отличаться и решать различные задачи. В описываемой методологии проектирования принципиально выделяются три варианта исполнения самих расчётных моделей: «как спроектировано», «как изготовлено» и «как испытано».

Цифровой двойник на основе набора компьютерных моделей «как спроектировано» позволяет дать заключение о готовности изделия к производству и достижимости требований спроектированной конструкции.

Набор моделей «как изготовлено» уже учитывает особенности отдельных экземпляров, производственные отклонения, монтажные зазоры и позволяет дать заключение о готовности конкретного образца изделия к испытаниям, а также подготовить «быстрые» математические модели для реализации систем предиктивной и прескриптивной диагностики гибридного типа.

Цифровой двойник «как испытано» позволяет выполнить виртуальные испытания с учётом всех условий реальных испытаний, особенностей опытного образца с конкретным серийным номером и влияния на характеристики изделия средств измерения (препарирования) и вывода информации, а также провести тонкую настройку всех расчётных моделей в том числе с учётом фактического состояния материальной части после испытаний.

На основе выполняемых расчётов становится возможным объективно оценить величину отклонений параметров от требований ТЗ и выделить соответствующие факторы влияния. На рис. 10 приведены три области величин отклонения параметров от заданных требований: факторы, известные на этапе проектирования (изменение режима работы изделия в стендовых условиях, влияние препарирования и т.д.), факторы, возникшие на этапе изготовления опытного образца (производственные отклонения, особенности сборки), а также непредвиденные факторы (критические ошибки в проектировании или измерениях, не выявленные заранее производственные отклонения).

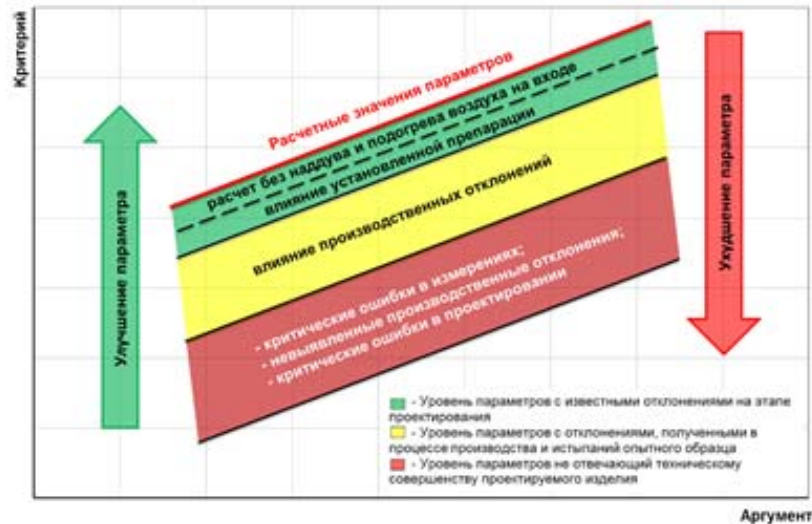


Рис. 10. Ранжирование величин отклонения параметров изделия и его узлов от заданных требований

Применение подобного подхода к созданию компьютерных моделей позволяет с высокой степенью достоверности прогнозировать результаты испытаний опытных образцов, анализировать полученные данные и принимать обоснованные технические и организационные решения по конструктивному облику ГТД и ходу выполнения работ.

Именно на основе комплекса данных уточнённых и взаимосвязанных расчётных моделей и может быть в дальнейшем сформирован цифровой двойник конкретного экземпляра ГТД, содержащий в себе особенности изготовления, сборки и испытаний данного объекта с конкретным серийным номером. Разработка цифровых двойников с подобным уровнем детализации целесообразна в первую очередь для опытных образцов, проходящих испытания и подтверждающих параметры ГТД.

Необходимо отметить важность обеспечения автоматизации взаимодействия основных расчётных моделей между собой в рамках технологии цифрового двойника. Все основные расчётные процессы должны быть объединены в автоматизированные расчётные цепочки для обеспечения оперативного уточнения и обновления характеристик узлов и систем ГТД в целом при корректировке требований, изменении внешних условий работы, или обновлении конструкции в рамках процесса доводки. Для этого должны применяться специализированные программные продукты, такие как pSeven Enterprise. Пример построения автоматизированных расчётных цепочек для узла ГТД (турбины низкого давления) приведён на рис. 11.

Изменение подхода к проектированию на основе концепции «Цифрового двойника» актуализирует ряд важных проблем, решение которых необходимо для достижения максимального синергетического эффекта от применения цифровых технологий к процессам создания таких сложных технических систем, как ГТД.

К таким проблемам можно отнести:

- дефицит инженерного персонала (внедрение технологий цифрового проектирования и сертификации ведёт к кратному увеличению потребных объёмов математического моделирования, для чего необходимы квалифицированные инженеры с ИТ-компетенциями и навыками системного анализа;
- отсутствие законченной нормативной базы (текущий уровень стандартизации процессов цифрового проектирования затрудняет легальное использование ЦДИ как составной части ОКР или инструмент сертификации);
- недостаточный функционал отечественного программного обеспечения (текущие функции не позволяют осуществлять построение высокоточных комплексных ма-

тематических моделей и управление ими, однако необходимо отметить значительные усилия в данной области в рамках программ импортозамещения инженерного программного обеспечения как со стороны промышленности, так и со стороны разработчиков программного обеспечения).

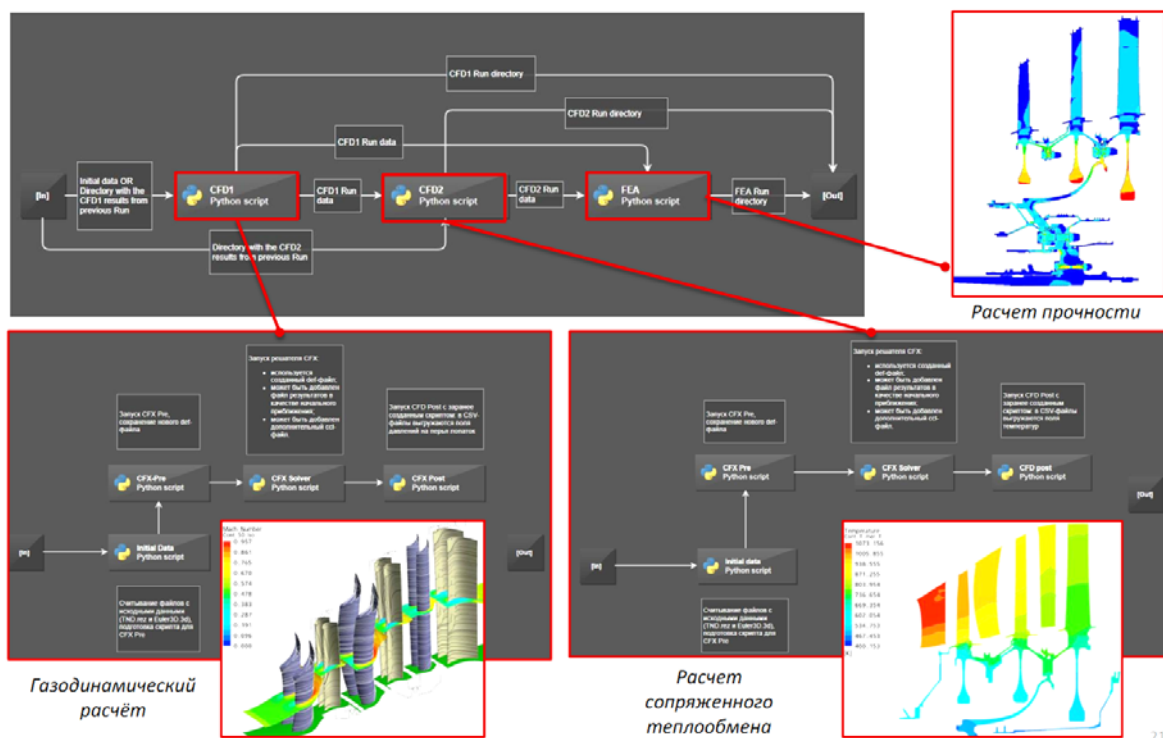


Рис. 11. Пример построения автоматизированных расчётных цепочек для узла турбины низкого давления

Таким образом, в АО «ОДК» на сегодняшний день сформирована методология создания и применения цифровых двойников ГТД, зафиксированы и формализованы в рамках нормативной документации основные процедуры её использования и применения. В рамках нескольких проектов ведётся активное применение методологии на практике. Параллельно в рамках НИОКР ведутся работы по расширению методологии, доработке инструментов проектирования и её отдельных элементов.

Применение методологии «Цифрового двойника» как подхода к проектированию обеспечивает процесс управления жизненным циклом ГТД и проведение «виртуальных испытаний», что сокращает сроки разработки, минимизирует неточности на всех этапах проектирования и разработки, снижает риски технических ошибок проектирования, а также ведёт к существенному снижению затрат, что подтверждается текущим опытом, имеющимся на предприятиях АО «ОДК».

В ближайшие годы основными целями корпорации в области развития методологии является расширение границ её применения на все основные вновь проектируемые изделия АО «ОДК» с соответствующим инфраструктурным и ресурсным обеспечением, дальнейшее развитие и совершенствование элементов технологии ЦД, а также более тесная интеграция с объектами применения ГТД для организации эффективного управления жизненным циклом в рамках этапа эксплуатации, что также ведёт к существенному снижению затрат и возможности обеспечения эксплуатации объектов по техническому состоянию.

Библиографический список

1. Шаманский Д. Технологии проектирования, технологии производства, технологии мышления: интервью А.И. Боровкова для журнала «Иновации» // Иновации. 2017. № 11 (229). С. 6-14.
2. Боровков А.И., Гамзикова А.А., Кукушкин К.В., Рябов Ю.А. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности: экспертно-аналитический доклад. М.: ИЦ «Технет» НТИ, 2019. 58 с.
3. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication. LLC, 2014. 7 p.
4. Grieves M. Virtually perfect: Driving innovative and lean products through product lifecycle management. Space Coast Press, 2011. 370 p.
5. Grieves M.W. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprise // International Journal of Product Development. 2005. V. 2, Iss. 1-2. P. 71-84. DOI: 10.1504/ijpd.2005.006669
6. Виноградов К.А. Методология управления жизненным циклом ГТД на основе концепции «цифрового двойника» // Трамплин к успеху. 2021. № 16. С. 30-31.
7. Коваль С.Н., Бадерников А.В., Шмотин Ю.Н., Пятунин К.Р. Использование технологии цифрового двойника при разработке газотурбинных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28, № 3. С. 139-145. DOI: 10.34759/vst-2021-2-139-145
8. Боровков А.И., Рябов Ю.А., Марусева В.М. Новая парадигма цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения // Цифровое производство: методы, экосистемы, технологии. С. 24-44. http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2018/04_april/12/cifrovoye-proizvodstvo-032018.pdf
9. Сальников А.В., Гордин М.В., Шмотин Ю.Н., Никулин А.С., Макаров П.В., Французов М.С. Цифровые двойники – платформа для управления жизненным циклом авиационных двигателей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2022. № 4 (745). С. 60-72. DOI: 10.18698/0536-1044-2022-4-60-72
10. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 10 с.
11. Боровков А.И., Лысенко Л.В., Биленко П.Н., Верховский Н.С., Фельдман М.О., Лысенко С.Л., Завалеев И.С., Фокин С.Н., Рябов Ю.А., Марусева В.М., Красинский С.И., Парыгин А.В., Демин П.В., Третьяков А.Б. Цифровое производство: методы, экосистемы, технологии. http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11_november/17/tsifrovoye_proizvodstvo_112017.pdf

JSC “ODK” EXPERIENCE IN IMPLEMENTING DIGITAL TWIN TECHNOLOGIES IN THE DESIGN OF GAS TURBINE ENGINES

© 2023

- | | |
|-------------------------|---|
| K. A. Vinogradov | Candidate of Science (Engineering), Deputy Head of Design and Research OKB-1; PJSC United Engine Corporation “Saturn”, Rybinsk, Russian Federation;
kirill.vinogradov@uec-saturn.ru |
| A. S. Nikulin | Head of Department; JSC United Engine Corporation, Moscow, Russian Federation;
a.nikulin@uecrus.com |
| Yu. N. Shmotin | Doctor of Science (Engineering), General Designer; JSC United Engine Corporation, Moscow, Russian Federation;
y.shmotin@uecrus.com |

The prerequisites for the formation, basic principles and approaches of the GTE design technology used in JSC “UEC” based on the concept of “digital twin” are considered. The components of the DT technology are fixed, three types of computer models included in the perimeter of the digital twin: models “as designed”, “as manufactured”, “as tested”, are considered. The necessity for constructing automated computational chains is noted and a brief description of the process is given.

Gas turbine engine; digital twin; mathematical modeling; predictive analytics

Citation: Vinogradov K.A., Nikulin A.S., Shmotin Yu.N. JSC “ODK” experience in implementing digital twin technologies in the design of gas turbine engines. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2023. V. 22, no. 4. P. 25-36. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-4-25-36

References

1. Shamanskiy D. Design technologies, production technologies, thinking technologies: Interview with A.I. Borovkova for the journal Innovations. *Innovations*. 2017. No. 11 (229). P. 6-14. (In Russ.)
2. Borovkov A.I., Gamzikova A.A., Kukushkin K.V., Ryabov Yu.A. *Tsifrovye dvoiiniki v vysokotekhnologichnoii promyshlennosti: ekspertno-analiticheskiy doklad* [Digital twins in high-tech industry]. Moscow: ITs «Tekhnet» NTI Publ., 2019. 58 p.
3. Grieves M. *Digital Twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication*. LLC, 2014. 7 p.
4. Grieves M. *Virtually perfect: Driving innovative and lean products through product lifecycle management*. Space Coast Press, 2011. 370 p.
5. Grieves M.W. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprise. *International Journal of Product Development*. 2005. V. 2, Iss. 1-2. P. 71-84. DOI: 10.1504/ijpd.2005.006669
6. Vinogradov K.A. Methodology of gas turbine engine life cycle management based on the concept of «digital twin». *Tramplin k Uspekhu*. 2021. No. 16. P. 30-31. (In Russ.)
7. Koval' S.N., Badernikov A.V., Shmotin Y.N., Pyatunin K.R. Digital twin technology application while gas turbine engines development. *Aerospace MAI Journal*. 2021. V. 28, no. 3. P. 139-145. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2021-3-139-145
8. Borovkov A.I., Ryabov Yu.A., Maruseva V.M. A new paradigm for digital design and modeling of globally competitive products of a new generation. *Digital production: Methods, ecosystems, technologies*. P. 22-44. Available at: https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2018/04_april/12/cifrovoe-proizvodstvo-032018.pdf
9. Salnikov A.V., Gordin M.V., Shmotin Yu.N., Nikulin A.S., Makarov P.V., Frantsuzov M.S. Digital twins — a platform for aircraft engine lifecycle management. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2022. No. 4 (745). P. 60-72. (In Russ.). DOI: 10.18698/0536-1044-2022-4-60-72
10. GOST R 57700.37-2021. Computer models and simulation. Digital twins of products. General provisions. Moscow: Russian Standardization Institute Publ., 2021. 10 p.
11. Borovkov A.I., Lysenko L.V., Bilenko P.N., Verkhovskiy N.S., Fel'dman M.O., Lysenko S.L., Zavaleev I.S., Fokin S.N., Ryabov Yu.A., Maruseva V.M., Krasinskiy S.I., Parygin A.V., Demin P.V., Tret'yakov A.B. *Tsifrovoe proizvodstvo: metody, ekosistemy, tekhnologii* [Digital production: methods, ecosystems, technologies]. Available at: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11_november/17/tsifrovoe_proizvodstvo_112017.pdf