

От математической модели ГД к его Цифровому двойнику

Актуализация уже имеющего свою историю понятия “Цифровой двойник” (Digital Twin), обусловленная прогрессом в области информационных и вычислительных технологий, методов и средств математического моделирования и применения искусственного интеллекта, а также активным продвижением основанных на них цифровых решений, призванных революционизировать практически все сферы производства и жизни общества, привела к высокому уровню ожиданий от применения Цифровых двойников.

Это хорошо видно на рис. 1, где иллюстрируется так называемый хайп-цикл инновационных технологий по состоянию на 2018 год, на котором Цифровые двойники занимают “почетное” место на “Плато завышенных ожиданий” (Plato of Inflated Expectations).

Однако, в отличие от некоторых технологий, размещенных на кривой хайп-цикла, ожидания, связанные с Цифровыми двойниками, имеют под собой вполне реальную основу, определяемую как предысторией этой технологии, так и вовлеченностью в ее развитие крупнейших мировых промышленных и IT-компаний.

История понятия “Цифровой двойник”

Фактически зарождение концепции Цифрового двойника восходит к мероприятию Мичиганского университета 2002 года, посвященному проблеме формирования Центра по управлению жизненным циклом продукции (Product Lifecycle Management, PLM). Слайд сделанной на нем презентации сотрудника Флоридского института технологий доктора Майкла Гривса (Michael Grieves), показанный на рис. 2, был назван Conceptual Ideal for PLM (Концептуальный идеал для PLM). Базовой предпосылкой представленной модели является то, что каждый объект PLM состоит из пары – реально существующей физической системы и новой виртуальной системы, которая содержит всю информацию о физической системе, причем эти две системы связаны на всех стадиях жизненного цикла объекта (разработка, производство, эксплуатация и утилизация). Первоначальное название этой концептуальной модели – Mirrored Spaces Model

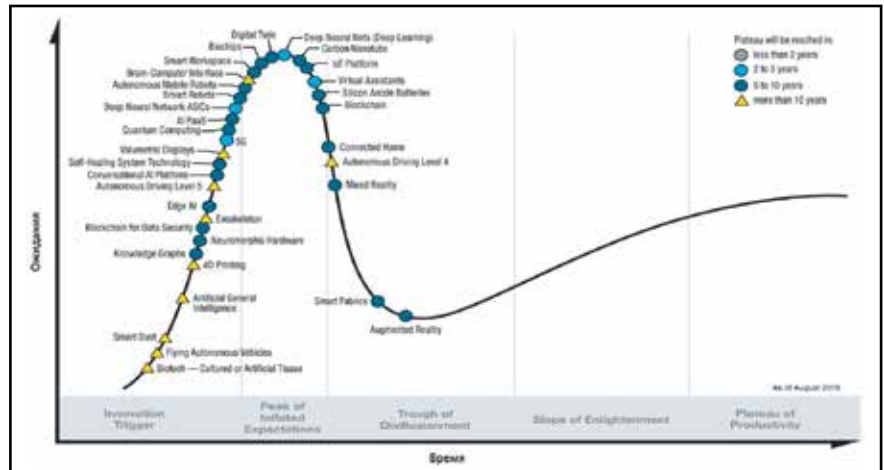


Рис. 1. Хайп-цикл инновационных технологий по состоянию на 2018 г.

(Модель зеркальных пространств) трансформировалось к 2006 году в Information Mirroring Model (Модель зеркального отображения информации).

Концепция была значительно расширена Майклом Гривсом в 2011 году в публикации “Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management”. Именно на этой стадии концепция Майкла Гривса получила название Digital Twin (Цифровой двойник), принадлежавшее его соавтору – инженеру NASA. Вне зависимости от того, является ли рассматриваемый объект искусственным коленным суставом или авиационным двигателем, Гривс считал, что, применяя единый подход, можно значительно сократить расходы на проектирование, изготовление, эксплу-

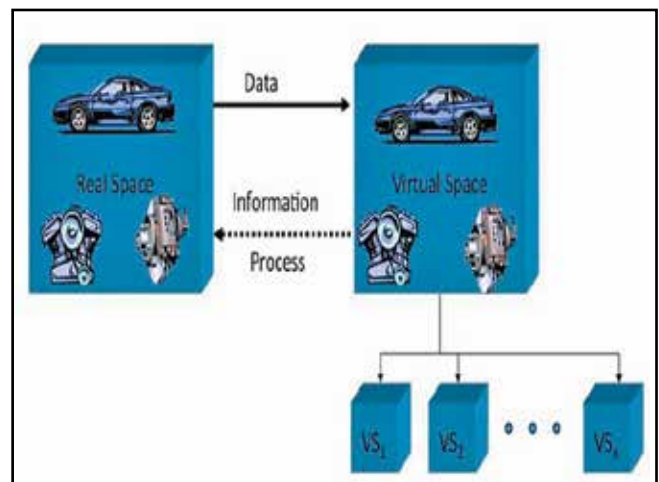


Рис. 2. Связь реального и виртуального представлений объекта PLM

тацию и последующее обслуживание изделия. Так, в частности, в своей статье 2003 года “Цифровые двойники: превосходство в производстве на основе виртуального прототипа завода” Гривс писал: “Применение цифрового двойника происходит на протяжении всего жизненного цикла изделия – чтобы обеспечить высокий уровень качества для потребителя и предоставить информацию о том, как он на самом деле пользуется продуктом, для изготовителя”. Интересно отметить, что термин “Digital Twin” был практически сразу принят в качестве концептуальной основы в аэрокосмической сфере: NASA активно использовало его в своих технологических дорожных картах, в предложениях по развитию исследований космоса, в концепциях перспективных истребителей и в других документах.

Однако следует отметить, что на начальном этапе своего развития технология Цифровых двойников основывалась прежде всего на использовании создаваемой конструкторами с помощью CAD-приложений (Unigraphics/NX и CATIA v.5) в рамках традиционных PLM-систем статичной информационной модели изделия в форме так называемых твердотельных 3D-моделей.

Ограничения традиционных PLM-систем

В PLM генерируется так называемая информационная модель изделия, что позволяет в значительной степени решить задачу обеспечения целостности данных проекта. В частности, применение цифрового макета (Digital Mock-UP, DMU) изделия, созданного на базе такой модели, давало возможность уже на ранних стадиях проектирования подтвердить его собираемость, проверить возможность эксплуатации и т.п. Иными словами, в любой момент времени можно “увидеть” (извлечь из центральной базы данных) статическое состояние изделия, соответствующее текущему моменту времени. Однако такая модель не может дать ответы на постоянно возникающие вопросы, связанные с изменениями в том или ином узле двигателя, а также отразить, как эти изменения повлияют на параметры двигателя в целом и условия функционирования других узлов. Попыткой решить данную проблему является использование итерационных циклов с многократным повторением пройденных этапов разработки. При этом обмен данными на каждом промежуточном этапе идет сначала в направлении от двигателя к узлам, а на следующем – в обратном, от узла к двигателю. Модели двигателя и узловые модели функционируют изолированно, что в конечном итоге приводит к искажению информации, снижению качества проекта, увеличению сроков и стоимости его реализации. Кроме того, принятие решения о повторении/прекращении циклов носит, как правило, субъективный характер. Сопутствующими мерами являются проектирование “с запасом” и отказ от решений, если они существенно отличаются от уже разработанных конструкций. Все это ведет как к увеличению продолжительности разработки вследствие простого увеличения затрат времени на многократное повто-

рение, так и, что более важно, к увеличению времени на доводку изделия вследствие недостаточно точного определения условий функционирования того или иного узла или системы. Принятие запасов и малых рисков в отношении отхода от реализованных решений снижает конкурентоспособность на рынке.

Цифровой двигатель как результат развития технологии математического моделирования ГТД

Параллельно с технологией конструирования изделия, основанной на использовании твердотельных 3D-моделей его деталей, узлов и цифровых макетов, развивались технологии предсказания характеристик элементов и узлов и поведения создаваемого изделия в целом, основанные на математическом моделировании физического рабочего процесса в нем. На начальном этапе – проектировании – такие технологии необходимы для обоснования достижимых ключевых характеристик изделия и контроля за их значениями по мере проработки, а на завершающем – для повышения информативности испытаний и замены наиболее дорогостоящих и опасных их видов численным экспериментом. В процессе эксплуатации изделия технологии математического моделирования поведения изделия не менее важны, поскольку дают возможность существенно сократить затраты на этом этапе жизненного цикла (на обучение, предсказание сценариев использования, сроков ремонта и т.д.).

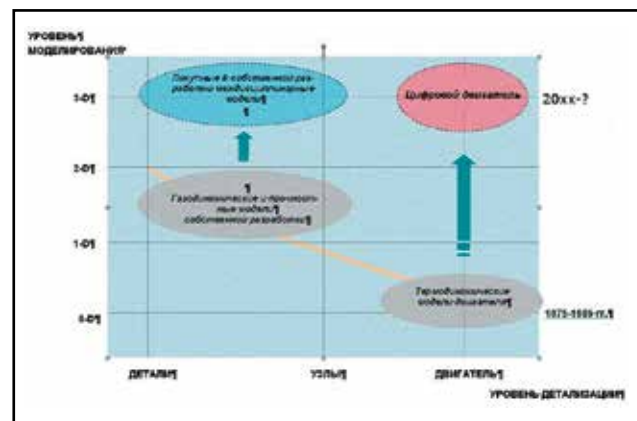


Рис. 3. Разрыв в уровнях моделировании параметров и характеристик деталей и узлов ГТД и системы в целом

Приведенный выше перечень основных задач математического моделирования применительно к авиационному ГТД не может быть решен без преодоления иллюстрируемой на рис. 3 проблемы повышения уровня моделирования самого двигателя как системы.

Обозначенные на рис. 3 термодинамические модели ГТД, создававшиеся преимущественно в 50-60-х годах прошлого века и сформировавшиеся в существующем виде в 1975-1985 годы, базируются на OD/1D-элементах и узлах двигателя, способ получения и использования которых в значительной степени зависит от наличия экспериментальных данных и квалификации специалистов. Подчеркнем, что таким термодинамическим моделям нет и, скорее всего, не

будет альтернативы при поиске принципиальных направлений развития совершенствования ГТД, на стадии их концептуального проектирования, при решении принципиальных вопросов по увязке авиационного ГТД с летательным аппаратом, требующих проведения большого числа расчетов характеристик сложных систем с многочисленными факторами влияния.

Однако, по мере увеличения степени проработки ГТД, а также при усложнении рабочего процесса, росте сложности узлов, усилении влияния внешних факторов (например, усложнения характера взаимодействия авиационного ГТД с летательным аппаратом) и т.д. разрешающей способности традиционных термодинамических моделей для решения ряда

критических задач по совершенствованию существующих и созданию новых силовых установок, использующих ГТД, становится недостаточно и необходим переход к математическим моделям нового типа, обозначенным на рис. 3 термином “Цифровой двигатель”.

Под этим термином понимается математическая модель ГТД с расширенным описанием рабочего процесса, для которой принципиальным является свойство многоуровневости, обеспечивающее возможность совместного использования как традиционных 1D-математических моделей, так и сложных 3D-математических моделей для отдельных элементов и узлов (например, для системы низкого давления, включающей воздухозаборник, вентилятор, подпорные ступени, турбину низкого давления, переходные каналы, канал наружного контура, сопла контуров и др.). Подчеркнем, что основным источником данных в Цифровом двигателе рассматриваемого типа является именно традиционная термодинамическая модель, с помощью которой также определяются в привычной для специалистов метрике интегральные характеристики ГТД в целом и характеристики отдельных узлов.

Основными подсистемами, обеспечивающими функционирование “Цифрового двигателя”, являются:

- ▶ **подсистема информационной поддержки**, которая обеспечивает через системные и пользовательские интерфейсы сетевое взаимодействие функционирующих на разнородных платформах с различными операционными системами (гетерогенная вычислительная среда) программных приложений, моделирующих работу узлов и подсистем двигателя, и гибкое управление процессами формирования исходных данных, последовательностью вычислений, получением и хранением данных с обеспечением упорядоченного доступа к ним с учетом ролей и функций участников работы;
- ▶ **подсистема программно-аппаратной поддержки**, обеспечивающая упорядоченный доступ к удаленным вычислительным ресурсам и конкретным инженерным приложениям и включающая многоядерные



Рис. 4. Основные стадии развития идеи повышения уровня моделирования авиационного ГТД во ФГУП “ЦИАМ им. П.И. Баранова”

сервера, систему хранения данных и депозитарий специализированных приложений по обработке и визуализации результатов расчетов.

На рис. 4 представлены основные стадии развития идеи повышения уровня моделирования авиационного ГТД во ФГУП “ЦИАМ им. П.И. Баранова”, включающие компьютерный стенд для сквозного расчета течения в ГТД на уровне вычислительных технологий конца 1990-х годов, демонстратор распределенной модели ГТД и концепцию создания интегрированной междисциплинарной среды для анализа рабочего процесса, которой в перспективе может стать предлагаемая к разработке многоуровневая математическая модель Цифровой двигатель.

“Интеллектуальная” PLM-система как среда существования цифрового двойника

Проблема повышения уровня моделирования авиационного ГТД до соответствия требованиям, отвечающим его цифровому двойнику, может быть в принципе решена в новом поколении “интеллектуальных” PLM, обладающих свойством моделирования поведения создаваемого продукта. Базирующиеся на этом подходе системы поддержки жизненного цикла перестают быть только “хранилищем” информации и становятся ее “источником”, позволяющим ответить на вопрос “что будет если...”. Это последнее свойство крайне важно, поскольку позволяет с максимально возможной достоверностью, определяемой совершенством моделей поведения, на каждой стадии разработки изделия, начиная с самых ранних, проводить оптимизацию всего изделия по техническим, технологическим и стоимостным критериям и предсказывать эффективность еще не созданного реально (виртуального) продукта.

Возможности современных информационных и вычислительных технологий, достигнутый уровень предметных областей знаний, действующие технологии производства и управления бизнес-процессами позволяют

ставить задачу создания и внедрения в практику таких интеллектуальных систем информационной поддержки разработки. Практически речь может идти о создании специализированной среды разработки и поддержки жизненного цикла авиационных ГТД, которая объединила бы возможности современных PLM-систем по обеспечению целостности данных в процессе разработки двигателя и систем его многоуровневого междисциплинарного математического моделирования “Цифровой двигатель” на разных стадиях жизненного цикла (рис. 5).

Создание такой среды, безусловно, отвечает потребностям современного этапа развития в области разработки, производства и эксплуатации авиационных ГТД, для которого характерны такие особенности, как:

- ▶ быстроменяющийся рынок с высокой степенью неопределенности;
- ▶ необходимость значительного (до 50%) сокращения срока выхода двигателя на рынок;
- ▶ рост сложности и стоимости разработки конкурентоспособных двигателей;
- ▶ кооперация участников как ответ на рост сложности и стоимости разработки;
- ▶ географическая/национальная разобщенность участников;
- ▶ широкое внедрение инструментов CAD/CAE/SAM при явно несоответствующих средствах интеграции;
- ▶ потребность в эффективном сопровождении и поддержке продукта и его модификаций в течение всего жизненного цикла.

Прогнозируемый рост мощностей и производительности компьютеров и сетевых возможностей в ближайшем будущем дает основание предполагать, что точное моделирование будет одним из основных инструментов разработки в различных областях техники. Причем в качестве одной из важнейших особенностей будущего подхода будет переход от точного моделирования одного компонента в одной предметной области, что характерно для сегодняшнего дня, к точному моделированию всей сложной междисциплинарной системы с учетом всех физических и производственных ограничений.

Реализация данного сценария потребует разработки специальной среды моделирования, поскольку из теории и практики описания сложных систем, каковой является авиационный двигатель, следует, что ее моделирование возможно только на основе декомпозиции – представления системы как совокупности объектов (компонент) с собственным внутренним описанием (моделью) в соответствующей предметной области. Предлагаемая концепция ориентируется на

использование модели объекта, то есть является модель-центрированной. В основе лежит сложная распределенная многоуровневая междисциплинарная модель двигателя (Цифровой двигатель), служащая единым источником и хранилищем статической и динамической информации (данных и функционального поведения объекта) начиная с самой ранней стадии его разработки.

Цифровой двигатель представляет собой цифровую модель реального двигателя, с максимальной достоверностью описывающую его поведение и являющуюся совокупностью междисциплинарных моделей разного уровня (включая высокий) узлов двигателя, функционирующих в распределенной интегрированной среде. Структура Цифрового двигателя позволяет рассматривать его как единую полиморфную модель (рис. 5) для всего цикла создания с одновременной возможностью повышения уровня достоверности описания процессов в двигателе в зависимости от этапа разработки.

Полиморфизм модели заключается в возможности и особенности ее существования в различных формах без радикального изменения среды и принципов моделирования. На различных этапах разработки Цифровой двигатель существует первоначально как термодинамическая модель двигателя, затем как междисциплинарная модель, далее как модель двигателя, верифицированная по результатам испытаний, наконец, в форме интерактивного руководства по эксплуатации для послепродажной поддержки двигателя в эксплуатации.

Цифровой двигатель в одной из своих форм поставляется заказчику и является единой моделью (Customer или Cycle Deck Model), описывающей поведение реального двигателя с заданной системой регулирования, включая эффекты 3D, ухудшение параметров по мере наработки в эксплуатации, экологические показатели, и включающей цифровой макет двигателя, весовые и инерционные показатели. Благодаря существенно более точному и многостороннему описанию

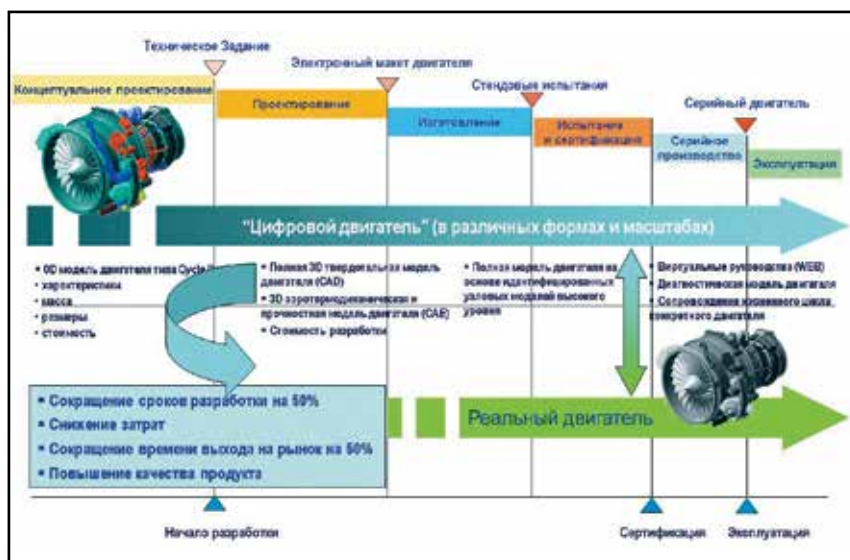


Рис. 5. Возможные формы систем моделирования “Цифровой двигатель” на разных стадиях разработки реального двигателя

функционального поведения двигателя эффективность совместной оптимизации двигатель-летательный аппарат существенно повышается, что дает возможность разработать более эффективный продукт (летательный аппарат), с более достоверными гарантированными характеристиками для его заказчика и с меньшими затратами времени.

Другой положительной стороной подхода является то, что, обладая по своей природе свойствами модульности и распределенности, Цифровой двигатель позволит задать стандартный интерфейс для распределенного моделирования авиационных двигателей и их компонент. Данное свойство исключительно важно в современных условиях широкой кооперации при создании изделий сложной техники. Существующий в настоящее время обмен информацией между участниками проекта в виде данных провоцирует последовательный итерационный подход обмена с соответствующими дополнительными затратами времени и неминуемыми искажениями информации. Единая среда моделирования и стандартный интерфейс существенно облегчат работу над проектом и его компонентами и сведут к минимуму искажения и потери информации при обмене. Например, узел двигателя, разрабатываемый компанией-партнером, будет поставлен компании-разработчику двигателя и представлен в модели (Цифровом двигателе) в виде объекта, функционирующего во всем диапазоне эксплуатационных режимов.

Дополнительными особенностями Цифрового двигателя являются наличие интерфейсов с системами CAD/CAM/CAE, использование твердотельной геометрической модели двигателя, возможность инкапсуляции моделей как собственной разработки (интерфейсы с системами CAE/CAM), так и выполненных в коммерческих стандартных пакетах, наличие интерфейсов для поддержания статической информации об изделии.

Использование в качестве объекта разработки Цифрового двигателя позволит заменить существующие последовательные подходы к проектированию и разработке двигателя, характеризующиеся большими затратами времени и средств, плохо организованными информационными потоками, ведущими к потере или искажению информации, эффективными параллельными, даст возможность сократить число стадий проектирования, их продолжительность, существенно увеличить гибкость в отношении введения изменений в реализуемый проект.

Цели, задачи, ожидаемые результаты

Основной целью создания упомянутой выше интеллектуальной PLM является обеспечение конкурентоспособности создаваемого авиационного газотурбинного двигателя в жестких рыночных условиях за счет существенного сокращения срока (на 50% от существующего) представления изделия на рынок (без негативного влияния на его показатели) благодаря опережающей оптимизации бизнес- и предметной области разработки двигателя, включая все стадии его жизненного цикла (проектирование, изготовление, испытания, производ-

ство и эксплуатацию) с помощью единой модели открытой архитектуры (Цифровой двигатель), функционирующей в среде предприятия.

Целью разработки интеллектуальной PLM является достижение следующих результатов:

- ▶ распределенность (функционирование в распределенной сетевой среде);
- ▶ возможность моделирования двигателя путем его сборки из компонентов, вне зависимости от их числа, типа, уровня описания и места их размещения в компьютерной сети;
- ▶ возможность создания иерархических компонентных моделей (данная функция является необходимой для взаимозаменяемости объектов и построения модели двигателя на принципах композиции на основе композитных компонентов, состоящий из подкомпонентов);
- ▶ поддержка функций многоуровневости и междисциплинарности с сохранением архитектуры среды;
- ▶ обеспечение взаимозаменяемости и совместимости различных версий среды и ее компонентов в процессе разработки и использования;
- ▶ платформенезависимость (обеспечение функционирования модели вне зависимости от используемых операционных систем и аппаратных средств);
- ▶ преемственность;
- ▶ создание эффективного и полного пользовательского интерфейса, обеспечивающего простой и удобный путь конструирования модели и ее исполнения. Решение поставленных задач позволит:
- ▶ обеспечить современную, модель-центрированную среду разработки объектов сложной техники с организацией информационных потоков внутри предприятия между узловыми и двигательным приложениями без потерь и искажения информации как между участниками, так и между этапами проектирования;
- ▶ более точно предсказывать характеристики двигателя в широком диапазоне эксплуатационных режимов с учетом влияния различных факторов за счет использования математической модели с эффектами повышения разрешающей способности при анализе того или иного узла;
- ▶ обеспечить генерацию достоверных исходных данных (достоверные граничные условия) для подсистем проектирования узлов высокого уровня за счет функционального согласования данных по двигателю и его компонентам в рамках единой модели;
- ▶ сократить сроки разработки проекта двигателя, полностью устранить потери и искажения данных при передаче их по цепи узел-двигатель за счет использования при моделировании двигателя целостных цифровых моделей узлов в виде программного кода, подготовленного специалистами, отвечающими за узлы, вместо имеющейся на сегодняшний день практики передачи статической информации (данных);
- ▶ обеспечить высокую степень управления моделью двигателя (проектом) за счет применения иерархического принципа делегирования функций участникам-специалистам.

Изменение методологии проектирования

Интеллектуальная PLM позволит увязать проблемы выбора параметров, проектирования узлов и их изготовления с самого начала разработки путем одновременной доступности модели специалистам различных предметных областей. Проектирование на основе модели Цифрового двигателя в распределенной среде предприятия приведет к существенно более достоверному определению облика двигателя на этапе технического задания, даст возможность выдать гарантированные данные заказчику с минимальными запасами на последующие возможные изменения проекта, вызванные недостаточным уровнем рассмотрения, и позволит сократить число вынужденных изменений в проекте. По сравнению с существующим подходом затраты времени и средств на построение модели Цифрового двигателя на начальных этапах разработки возрастают, а на последующих, существенно более емких в отношении затрат, сокращаются, что в конечном итоге даст существенную выгоду в суммарных показателях.

Дополнительные возможности и перспективы

Современное представление о Цифровом двойнике авиационного ПД не должно ограничиваться использованием соответствующей технологии на стадии проектирования двигателя. Оно должно органично вписываться в концепцию, согласно которой Цифровые двойники постоянно обновляются вслед за изменением физических прототипов и самосовершенствуются на основе данных от людей, от других подобных объектов, из более крупных систем и среды, частью которой они являются. По словам Колина Дж. Пэрриса, доктора

философских наук, вице-президента по исследованиям программного обеспечения GE Global Research Center, Цифровые двойники – это гибридная модель (одновременно физическая и цифровая), которая создается специально для определенных целей бизнеса, например прогнозирования неудач, снижения затрат на обслуживание, предотвращения незапланированных отключений. Колин Дж. Пэррис заявляет, что когда мы говорим о Цифровых двойниках, то эта система работает в три этапа: “видеть”, “думать” и “делать”. На стадии “видения” речь идет о получении данных о ситуации. Это информация двух видов – эксплуатационные данные и данные из окружающей среды. Следующий шаг, который Колин Дж. Пэррис условно назвал “думать”, связан с тем, что на этом этапе Цифровой двойник на разные запросы может предоставлять варианты, как лучше действовать в той или иной ситуации или какие опции предпочтительнее для целей бизнеса. Искусственный интеллект использует для анализа, например, прогнозы по выручке и расходам и предоставляет несколько опций, которые основаны на рисках и уверенности, что эти предложения смогут снизить их. Последний шаг – “делать” – связан непосредственно с реализацией того, что необходимо сделать. С помощью Цифровых двойников, например, можно увидеть изнутри проблемы физического объекта. На производстве нам уже необязательно видеть перед собой весь двигатель целиком, для того чтобы обнаружить дефект – технология Цифровых двойников позволит увидеть проблему в реальном времени с помощью компьютерной визуализации. Как заявил исполнительный вице-президент по разработке программного обеспечения Siemens Зви Фейер, Цифровой двойник – это решение, позволяющее в рамках PLM осуществить переход к Industry 4.0.

**В. Е. Макаров, В. Д. Коровкин,
ФГУП “ЦИАМ им. П. И. Баранова”**

НОВОСТИ

Schneider Electric и Positive Technologies – совместное решение для интеллектуальных месторождений

Компании Schneider Electric и Positive Technologies заключили соглашение о технологическом партнерстве в области разработки совместных решений для защиты АСУ ТП. Первый совместный программно-аппаратный комплекс будет построен на базе продукта PT Industrial Security Incident Manager View Sensor и промышленного компьютера Magelis iPC. Решение позволит выявлять кибератаки, неавторизован-

ные действия персонала и злоумышленников, не оказывая нежелательного влияния на технологический процесс, и сможет использоваться в сложных климатических и технологических условиях эксплуатации.

Цифровые месторождения могут снизить себестоимость эксплуатации месторождений в среднем на 20% (по оценке EnergySys). Уже сегодня компании добиваются значительной экономии с помощью умных технологий. Так, ВР за пять лет сократила затраты на добычу сланцевой нефти и природного газа на 34%. И если в 2011 году в мире было всего

800 цифровых скважин, то спустя четыре года их насчитывалось более 15 000.

Цифровизация повышает рентабельность нефтегазовой отрасли, однако требует применения современных средств защиты критической инфраструктуры от киберугроз. По данным исследования Positive Technologies, еще в прошлом году число компонентов АСУ ТП в России, доступных из Интернета, увеличилось примерно в полтора раза. Растет и число уязвимостей, которые могут эксплуатироваться удаленно без необходимости получения привилегированного доступа.

Представленная система может использоваться для мониторинга киберинцидентов как в нефтегазовой сфере, так и в промышленном производстве, металлургии и других отраслях. Аппаратная часть, построенная на базе Magelis iPC, рассчитана на эксплуатацию в жестких промышленных условиях и сочетает в себе компактность и высокую эффективность. Установленная на Magelis iPC OEM-версия PT ISIM View Sensor поддерживает работу с проприетарными протоколами Schneider Electric и совместима с другими технологиями компании.



INNOPROM

Turkey

Discover
the potential

8–11 июля 2019, Екатеринбург
МВЦ «Екатеринбург-ЭКСПО»

ИННОПРОМ

МЕЖДУНАРОДНАЯ
ПРОМЫШЛЕННАЯ ВЫСТАВКА

СТРАНА-ПАРТНЕР:

ТУРЕЦКАЯ РЕСПУБЛИКА

ТЕМА:

ЦИФРОВОЕ ПРОИЗВОДСТВО: ИНТЕГРИРОВАННЫЕ РЕШЕНИЯ



ИННОПРОМ.
МЕТАЛЛООБРАБОТКА



ИНДУСТРИАЛЬНАЯ
АВТОМАТИЗАЦИЯ



АДДИТИВНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ



МАШИНОСТРОЕНИЕ
И ПРОИЗВОДСТВО
КОМПОНЕНТОВ



ТЕХНОЛОГИИ
ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ

- 600 индустриальных компаний-экспонентов
- 46 000 уникальных посетителей из 107 стран мира
- более 160 деловых мероприятий

Организатор



Оператор



#ИННОПРОМ2019

Телефон горячей линии: **8-800-700-82-31**

www.innoprom.com