

DOI:

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ИЗДЕЛИЯ В ЕДИНОМ ИНФОРМАЦИОННОМ ПРОСТРАНСТВЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Стрелец Д.Ю., Серебрянский С.А., Шкурин М.В.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе д.4

dimstrelets@rambler.ru, s-s-alex@mail.ru, maksmai33@gmail.com

Аннотация: Цифровой двойник изделия в информационном пространстве отображает работу физического объекта на протяжении всего его жизненного цикла. Внедрение такой технологии способствует ускорению разработки новых изделий, уменьшит время на их испытание, сертификацию и ускорит начало производства. Это позволит повысить конкурентоспособность продукции отечественной авиационной промышленности. Внутренняя составляющая цифрового двойника представляет собой структурированную многомерную матрицу функциональных, технических, технологических, эксплуатационных и экономических свойств, которые формируются и проявляются на отдельных этапах ЖЦ АТ.

В статье рассматривается концепция единого информационного пространства, раскрывается понятие цифрового двойника изделия, описываются подходы, используемые при его создании, показаны преимущества использования такой технологии при создании современных образцов авиационной техники.

Ключевые слова: жизненный цикл изделия, единое информационное пространство, цифровой двойник, летательный аппарат, свойства, требования, структурированный массив информации.

Введение

В настоящее время отсутствует общепринятая методика определения уровня конкурентоспособности технически сложной промышленной продукции, в том числе и авиационной. Это усложняет выполнение заданных требований к изделию АТ на основе поэтапного планирования и контроля соответствия изделия заданным функциональным, техническим, технологическим и эксплуатационным требованиям, а также поддержания такого соответствия требованиям на протяжении всех этапов ЖЦ.

Цифровые двойники - это математические модели высокого уровня адекватности, учитывающие все технологии проектирования и производства, конструктивные материалы, детали, узлы и агрегаты всех составных частей изделия. В конструкции может присутствовать несколько сотен материалов и у каждого свои физико-технические свойства.

Единое информационное пространство создаёт ту облачную среду, в которой цифровой двойник проходит через все этапы жизненного цикла физического изделия.

1 Единое информационное пространство

В области разработки наукоемкой продукции современные тенденции направлены в сторону развития совместной работы над проектом географически удаленных организаций, находящихся в различных часовых поясах (рис. 1), т.е. работающих над проектом сложного технического изделия из разных мест и в разное время.

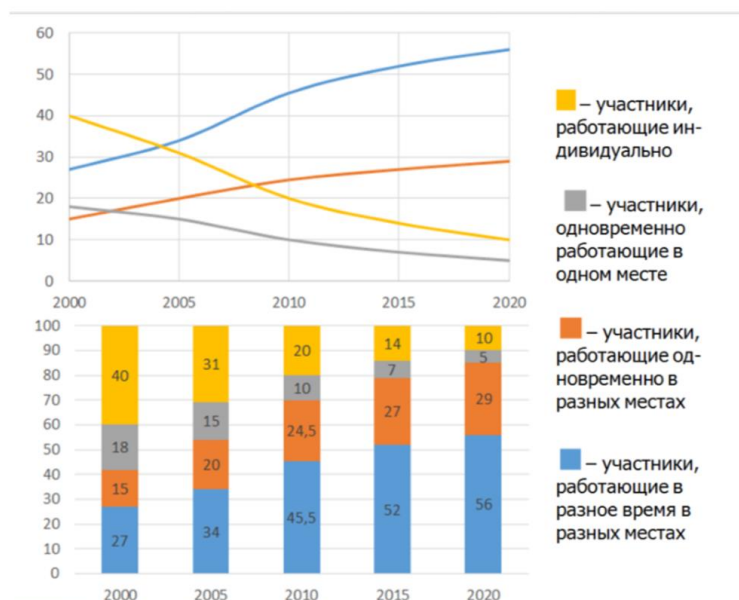


Рис. 1. Тенденции, направления и распределение совместной работы участников процессов в едином информационном пространстве

Это приводит к общему увеличению объёма информации и необходимости организации взаимодействия между участниками [1]. В основу концепции взаимодействия положена идея создания единого информационного пространства, где каждый из участников ЖЦ изделия получает свободный доступ к той области, где находится необходимая в данный момент информация. Единство информационного пространства не подразумевает физическое расположение всей электронной информации в одном месте. Предполагается создание так называемого «распределенного» информационного пространства, когда данные хранятся в облачном сервисе. Таким образом, информация, поступающая на разных стадиях ЖЦ изделия от различных участников работ, расположенных в разных местах, становится доступной любому участнику в необходимом для него объеме в удобное время и в удобном виде, независимо от географического местоположения. Это и составляет единое информационное пространство жизненного цикла изделия, которое должно обладать следующими свойствами:

- содержать информацию в электронном виде;
- охватывать всю созданную информацию об изделии;
- являться единственным источником данных об изделии;
- строиться только на основе государственных и отраслевых информационных стандартов;
- создаваться с использованием только имеющихся у участников ЖЦ программно-аппаратных средств;
- иметь возможность постоянного развития и расширения.

Основной проблемой, мешающей эффективному управлению информацией об изделии, является огромное количество разнородной информации, в результате чего образуется своеобразный информационный хаос и возникают коммуникационные барьеры между участниками ЖЦ изделия. Пути решения подобного рода проблем заложены в реализации концепции, которая направлена на создании единого информационного пространства для всех участников ЖЦ изделия (рис. 2).

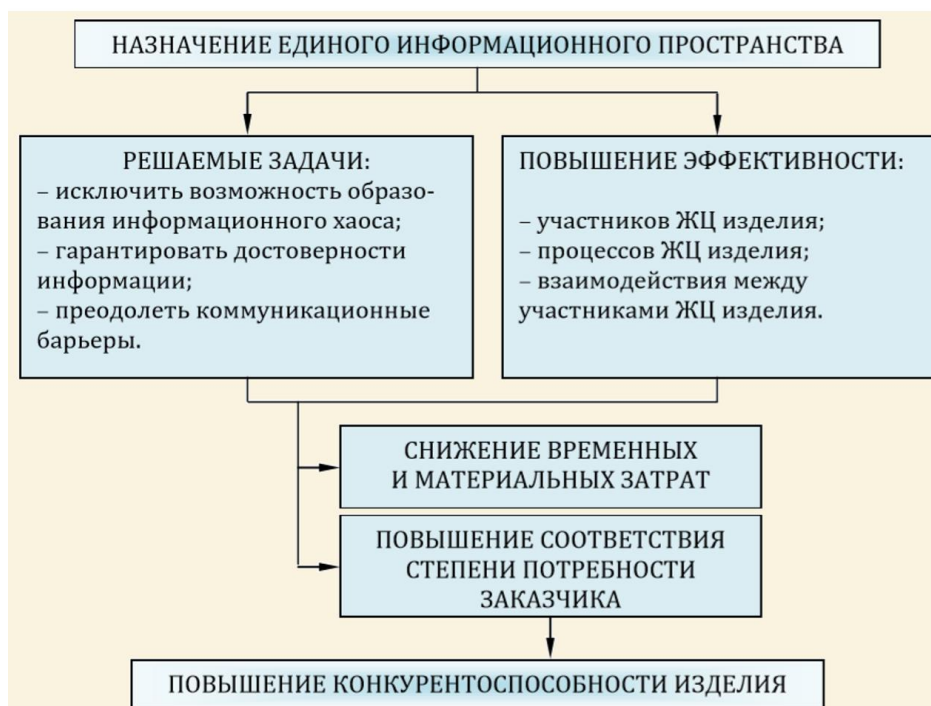


Рис. 2. Концепция единого информационного пространства

Конкурентоспособность авиационной продукции представляет собой комплексное понятие, которое требует многогранной и непрерывной оценки состояния изделия АТ и его составных частей в реальном времени. Внедрение цифровых технологий и переход к гибкому управлению жизненным циклом изделия способствуют этому[2]. Для каждого этапа жизненного цикла сложного технического изделия характерны два слоя: информационный и материальный. В информационном слое создаётся описание изделия (его виртуальный образ) и процессов происходящих на этапах ЖЦ. Здесь характерно преобладание интеллектуального труда. В материальном слое по полученным описаниям, представленным в различной форме, выполняется физическая реализация процессов и материализация изделия. В результате интеграции обоих слоёв происходит формирование единого информационного пространства [3], в котором создаётся цифровой двойник и обеспечивается полная цифровизация всех этапов его ЖЦ.

2 Цифровой двойник изделия

Цифровой двойник изделия в информационном пространстве, отображает работу своего физического объекта на всех этапах его жизненного цикла.

Внедрение такой технологии способствует ускорению разработки новых изделий, уменьшает время на их испытание, сертификацию и ускоряет начало производства. Это позволит повысить конкурентоспособность продукции отечественной авиационной промышленности.

Цифровой двойник летательного аппарата – как единая обучаемая система, включает в себя комплекс методик и математических моделей, описывающих и отображающих работу самолёта и его систем в течение всего жизненного цикла: проектирование, испытания, производство и эксплуатация.

Внутренняя составляющая цифрового двойника представляет собой структурированную многомерную матрицу функциональных, технических, технологических, эксплуатационных и экономических свойств [4, 5]. Эти свойства формируются и проявляются на отдельных этапах ЖЦ АТ (рис. 3), а так же требований: к экологическим показателям ($T^{\text{Экол}}$), к технической документации ($T^{\text{Т-док}}$), отраслевых стандартов ($T^{\text{ОСТ}}$), предъявляемых к авиационному изделию и его составным частям.



Рис.3. Взаимосвязь свойств изделия на этапах ЖЦ

Модель представления данных об изделии в информационном пространстве определяется как инструмент моделирования процессов на этапах ЖЦ, включающий в себя структуры данных о свойствах и требованиях, методы структурирования данных, правила ограничения целостности и алгоритмы взаимосвязи структурированных данных.

Каждое из свойств (S^K) и требований (T^K), предъявляемых к изделию, представляет собой элементы двухмерной матрицы параметров размерностью $(j \ i)$. А их совокупность определяет структурированную многомерную матрицу цифрового двойника (рис. 4) размерностью $(k \ j \ i)$.

Элементы матрицы функциональных свойств (S^F), определяются назначением изделия, условиями его применения, техническими возможностями и характеризуют приспособленность к выполнению своих функций в соответствии с предназначением.

Элементы матрицы технических свойств (S^{Tx}), характеризуют приспособленность изделия к реализации физических принципов, положенных в основу его функционирования как сложной технической системы.

Элементы матрицы технологических свойств (S^{Tn}), характеризуют приспособленность изделия к производству, то есть к возможности технологической реализации технических решений, заложенных на предыдущих этапах.

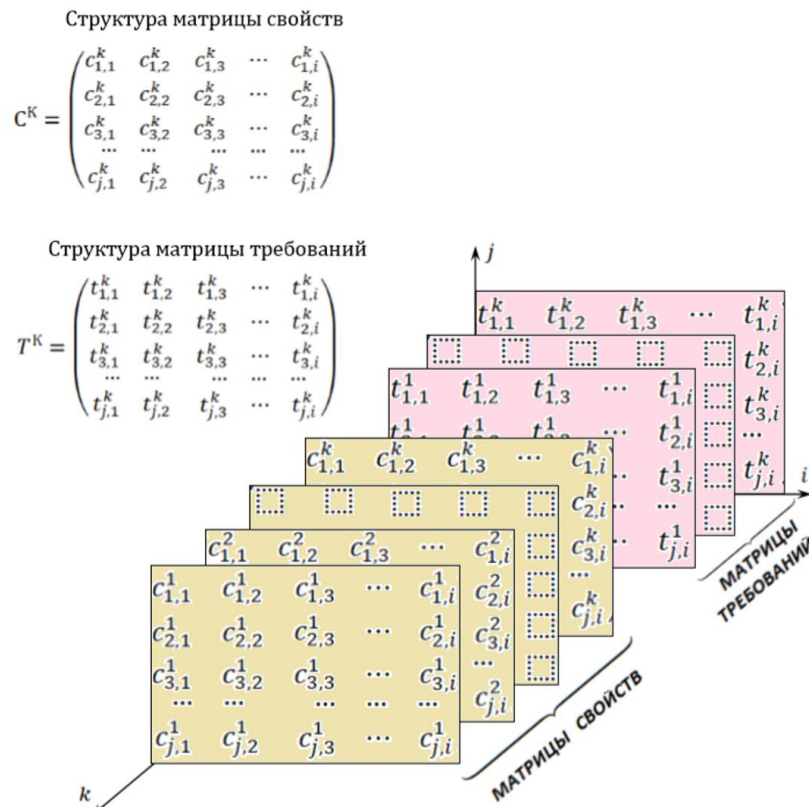


Рис.4 Структурированная многомерная матрица

Элементы матрицы эксплуатационных свойств ($C^{Экс}$), характеризуют приспособленность изделия к эксплуатации, которая является самым длительным этапом жизненного цикла изделия.

Элементы матрицы экономических свойств ($C^{Экн}$), содержат информацию о материальных и трудовых затратах на проектирование, производство, эксплуатацию, модернизацию и утилизацию изделия. При создании ЛА затраты средств идут на его разработку (выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ), производство, при эксплуатации – на содержание персонала, расходуемое топливо, запасные части, ремонт и т. д. Экономические свойства являются обобщающими и зависят от уровня эксплуатационных, технологических и технических свойств ЛА.

Такая многомерная матрица, практически, представляет собой совокупность функционально взаимосвязанных алгоритмов и математических моделей, содержит полную информацию об изделии и его составных частях, объединённых в рамках единого цифрового пространства [6, 7].

Ввиду того, что такого вида матрицы представляют собой многомерный структурированный массив информации, можно говорить о том, что матричная модель данных об изделии является многомерной (рис. 5). Это следствие указывает на то, что модель предметной области цифрового двойника, построенная с помощью структурированного массива информации, без каких-либо дополнительных надстроек, представляет собой математический аппарат многомерного анализа информации об изделии в текущем режиме.

Каждая ячейка массива представляет собой место хранения заданной информации или информации функционально зависимой от значений других ячеек. Функциональная зависимость элементов определяется взаимосвязью свойств (C^K) и требований (T^K), предъявляемых к изделию. Определяющими факторами являются: назначение и условия функционирования изделия, требования к его частям, варианты их реализации, научно-технический и технологический уровни разработки и т. д.

Если в качестве изделия рассматривать самолёт, то элементы ($a_{j,i}^k$) функциональных свойств ($C^Ф$), входящие в массив, будут включать такие параметры как: ($m_{цн}$; $V_{кр}$; V_{max} ; $H_{кр}$; H_{max} ; L_{max} ; $n_y^{Экс}$; $n_x^{Экс}$) и др. В данном случае: $m_{цн}$ – масса целевой нагрузки определяющая назначение летательного аппарата, а параметры $n_y^{Экс} = f n_y^p$ и $n_x^{Экс} = f n_x^p$ зависят от требований (n_y^p и n_x^p). К элементам массива технических свойств ($C^{Тх}$) будут относиться параметры,

характеризующие эффективность реализации физических принципов функционирования самолёта и его составных частей (двигатель, системы, оборудование): (γ_M ; σ_V ; E ; $\gamma_{дв}$; $C_{уд}$; λ ; η ; \bar{c} ; C_{x0} ; A ; $K_{аэр}$) и др. Элементы, характеризующие эксплуатационные свойства ($C^{Экс}$) будут состоять из эксплуатационных показателей и характеристик условий эксплуатации: ($T_{рес}$; $t_{подг}$; $K_{вост}$; $L_{разб}$; $L_{проб}$), ($\bar{G}_{бж}$ и $\sigma_{Эпр}$ для самолётов военного назначения) и др.

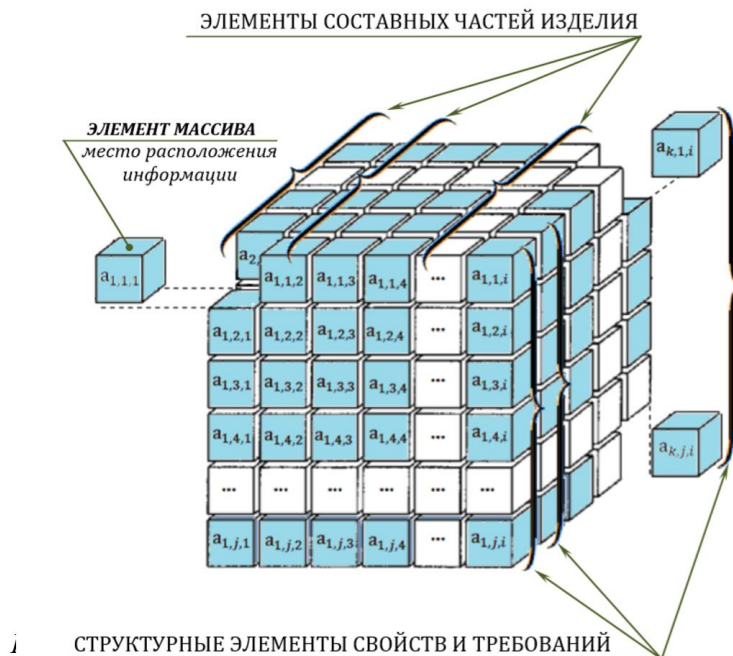


Рис. 5. Многомерный структурированный массив информации

Между собой параметры свойств (элементы структурированного массива) функционально взаимосвязываются частными и общими соотношениями.

Частные (локальные) соотношения связывают незначительное число параметров структурных свойств, например, в выражении (1) показана взаимосвязь элементов массивов эксплуатационных и технических параметров.

$$(1) L_{разб} = \frac{V_{отр}^2}{2m_{взл}g};$$

В выражениях (2) и (3) показана зависимость элементов массива функциональных параметров от элементов массивов технических свойств ($\gamma_{дв}^{V_{кр}H_{кр}}$; $C_{уд}^{V_{кр}H_{кр}}$) и требований ($C_{удоп}$; $V_{кр}$; $H_{кр}$).

$$(2) n_y = \frac{C_{удоп} \rho V^2 S}{2m_0 g};$$

$$(3) L_{ГП} = \left(\alpha - \frac{K_{дв} \gamma_{дв}^{V_{кр}H_{кр}} g \beta}{K_{аэр}^{V_{кр}H_{кр}}} \right) \frac{3,6 V_{кр} K_{аэр}^{V_{кр}H_{кр}}}{C_{уд}^{V_{кр}H_{кр}} \beta g};$$

Частные соотношения позволяют оценить правильность выбора локальных технических решений.

Общие (глобальные) соотношения увязывают между собой значительно большее число структурных параметров и на начальной стадии жизненного цикла позволяют определить целесообразность начала работ по разработке ЛА исходя из запросов рынка АТ, возможность реализации требований к проектируемому ЛА, функциональную эффективность результатов разработки.

Можно выделить три основные группы общих соотношений.

Уравнения эффективности, зависят от назначения ЛА и позволяют количественно определить критерий эффективности (4), зависящий от функциональных и эксплуатационных свойств, которые в свою очередь являются зависимостями от технических параметров:

$$(4) \quad \Xi = \Xi [C^Ф(C^{Тх}); C^{Экс}(C^{Тх})].$$

Экономические уравнения (5) позволяют определить стоимость жизненного цикла летательного аппарата ($C_{ла}$) в зависимости от функциональных, технических, технологических и эксплуатационных свойств.

$$(5) \quad C_{ла} = C_{ла}(C^{\Phi}; C^{Tx}; C^{Tн}; C^{Экс}).$$

Уравнение существования ЛА (6) связывает массу ЛА с функциональными, техническими и эксплуатационными параметрами:

$$(6) \quad m_0 = m_0(C^{\Phi}; C^{Tx}; C^{Экс}).$$

Комплексный критерий оценки конкурентоспособности (7) для принятия решения о целесообразности начала выполнения работ:

$$(7) \quad \text{критерий эффективность/стоимость} \{K = \mathcal{E}/C\} \rightarrow \text{max}.$$

Общие уравнения взаимосвязи между элементами структурированного массива информации цифрового двойника показывают, какие совокупности функциональных, эксплуатационных и технических параметров могут быть реализованы в проектируемом ЛА, а какие выбранные комбинации параметров реализовать невозможно.

Это позволяет при минимальных затратах средств и времени принять решения на этапах ЖЦ, при обосновании лётно-технических и эксплуатационных требований к ЛА, при проектировании ЛА; при выборе направлений модернизаций ЛА; при анализе взаимозависимости функциональных, технических и эксплуатационных свойств для выявления их оптимального сочетания (рис. 6).

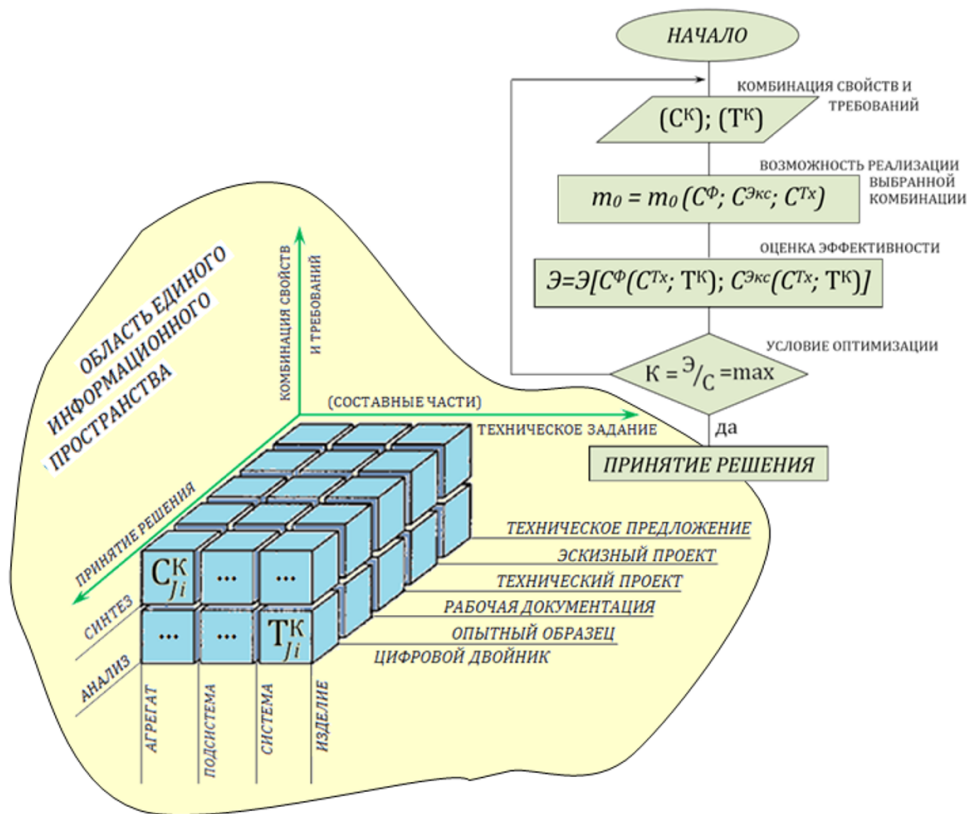


Рис.6. Формирование значений структурированного массива информации

Таким образом, структурированный массив цифрового двойника является программным аналогом физического устройства изделия, моделирующий внутренние процессы, технические характеристики и поведение реального объекта в условиях эксплуатации.

Особенностью цифрового двойника некоторого физического объекта является то, что для задания на него входных воздействий используется информация с датчиков (сенсоров), установленных на реальном устройстве. Для воздушного судна можно использовать информацию от системы объективного контроля.

Цифровой двойник способен работать как в онлайн, так и в офлайн режимах. Информация, поступающая с реальных датчиков двигателя, оборудования и систем, сравнивается с показаниями виртуальных данных «эталонного массива» цифрового двойника, это позволяет выявлять аномалии и устанавливать причины их возникновения. В таких условиях цифровой двойник способствует расширению возможностей аналитического центра, облачного сервиса в едином информационном пространстве.

На этапе эскизного проектирования с использованием программного обеспечения для системного и имитационного моделирования возможно создание вариаций структурной модели разрабатываемого изделия. Это позволит провести анализ множества комбинаций параметров свойств и требований с целью оценки и выбора наилучшего технического решения. Далее, на этапе технического проектирования, полученная на предыдущем этапе модель может дорабатываться и уточняться при помощи физически более точных системных моделей элементов. При этом данные могут быть получены на основе результатов многовариантных численных расчетов значений элементов структурированного массива информации.

Данная многофункциональная «точная» системная модель позволяет учесть и оптимизировать взаимодействие всех составных частей изделия с учетом режимов их работы и воздействий на окружающую среду, в соответствии с требованиями.

На этапе изготовления, разработанная системная модель (которая уже может называться Цифровым двойником изделия) поможет в определении требуемых допусков, точностей изготовления для соблюдения характеристик и безотказной работы изделия в течение всего срока ресурса, а также позволит быстро выявить причины неисправностей в процессе тестирования [8].

При переходе к этапу эксплуатации модель цифрового двойника может быть доработана для реализации обратной связи с разработкой и изготовлением изделия, диагностикой технического состояния и прогнозированием ситуации, повышением эффективности работы, выявления новых запросов рынка.

Цифровой двойник может выступать в роли инструмента, который позволяет на начальных этапах жизненного цикла промоделировать: различные варианты функционирования изделия в целом; вероятность отказов и неисправностей на этапе эксплуатации; функционирование составных элементов с учетом режимов и интенсивности их работы, воздействия климатических условий.

Построение комплексной модели цифрового двойника в ЕИП происходит с помощью различных инструментов.

Для построения комплексной модели цифровых двойников применяются различные программно-аппаратные инструменты [3] (рис. 7). Используются численные методы моделирования физико-технических процессов в конструктивных материалах изделия с целью анализа их работы и прогнозирования реакции на различные эксплуатационные нагрузки. Это возможно с помощью метода конечных элементов (FEA – FiniteElementAnalysis). Применяются САD-модели, которые содержат информацию о геометрических формах, размерах и структуре составных частей изделия, информацию о материалах, внутренних процессах и других параметрах. Используются FMEA-модели (FailureModeandEffectsAnalysis – «анализ видов и последствий отказов»), в основе работы которых лежит вероятностный анализ надёжности систем. Они могут объединять математические модели возникновения отказа со статистической базой данных.

Облачный сервис ЕИП накапливает и хранит историю эксплуатации изделия и всех видов работ, проводимых при обслуживании. Совокупность этих данных позволяет прогнозировать поведение реального изделия. Появляется возможность тестирования целого парка объектов авиационной техники, мониторинга их технического состояния и проведения системного анализа на основе агрегированной текущей информации от изделия и его составных частей.

В данном случае цифровые двойники используют информацию из целого ряда источников, включая данные с датчиков, осуществляющих мониторинг различных показателей рабочего состояния физического объекта, сведения от специалистов-экспертов и от других подобных изделий или парков изделий, а также более крупных систем, частью которых может быть физическое изделие. В цифровых двойниках можно реализовывать и технологии машинного обучения, в силу того что они являются, по сути, самообучающимися системами [9].

Симбиоз с технологиями интернета вещей является драйвером для развития информационных технологий. Цифровые двойники получают реальную информацию от различных источников, которые осуществляют мониторинг состояния физических изделий, при этом интернет вещей обеспечивает сбор, систематизацию и анализ данных различного рода. Это способствует тому, что процесс становится экономичным и эффективным.



Рис. 7. Инструменты технологии создания цифрового двойника

Заключение

Предложенные в настоящей работе подходы к созданию цифрового двойника, позволяют сформировать, в едином информационном пространстве жизненного цикла, виртуальную копию изделия, удобную в использовании на всех этапах ЖЦ. Это делает возможным с минимальными затратами человеческих, материальных и финансовых средств, воспроизводить структуру, состояние и поведение физического объекта с достаточной, для практических целей, степенью полноты, достоверности и оперативности.

При работе с цифровым двойником в едином информационном пространстве возникает ряд важных положительных факторов:

- обеспечение целостности данных;
- возможность организации доступа к данным географически удаленных участников ЖЦ изделия;
- отсутствие потерь данных при переходе между этапами ЖЦ изделия;
- изменения данных доступны одновременно всем участникам ЖЦ изделия; повышение скорости поиска данных и доступа к ним по сравнению с бумажной документацией;
- возможность использования различных компьютерных систем для работы с данными;
- обеспечение совместной работы проектных организаций, производственных предприятий, поставщиков, организаций сервиса и конечного потребителя на всех стадиях ЖЦ.

Основные практические преимущества использования цифрового двойника в едином информационном пространстве можно разделить на две группы. Первая группа относится к «внутренним» проектировочным циклам, прежде всего проектно-конструкторские и расчетные, а вторая – к «внешним» циклам, где организуется взаимодействие между участниками на разных этапах. При этом происходит накопление знаний о проектируемом изделии, на разных этапах, согласованно, принимаются решения о внесении изменений, осуществляется их увязка между различными категориями и группами разработчиков, испытателей, производителей и эксплуатирующими организациями.

Развитие цифровых двойников станет основой для цифровой промышленности. Их возможности заставили обратить пристальное внимание на технологию практически все ведущие компании мира,

что в итоге вывело «цифровой двойник» в десятку главных стратегических технологических трендов 2019 года.

Литература

1. Доросинский Л.Г., Зверева О.М. Информационные технологии поддержки жизненного цикла изделия. – Ульяновск: Зебра, 2016. – 243 с.
2. Судов Е.В., Петров А.Н., Петров А.В., Осяев А.Т., Серебрянский С.А. Технологии интегрированной логистической поддержки в процессах жизненного цикла авиационной техники. Учебное пособие / - М.: Эдитус, 2018. - 174 с.: ил. ISBN 978-5-00058-821-5
3. Стрелец Д.Ю., Серебрянский С.А., Шкурин М.В. Подход к управлению жизненным циклом изделия авиационной техники с использованием цифровых технологий. В книге: УПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЕМ КРУПНОМАСШТАБНЫХ СИСТЕМ MLSD'2019 Материалы двенадцатой международной конференции. Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. Москва, 2019. С. 717-719.
4. Lee J., Bagheri B., Kao H. A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems //Manufacturing letters. – 2015. – Т. 3. – С. 18-23.
5. Болховитинов О.В., Вольнов И.И., Захарченко В.С., Калашников В.И., Константинов С.Д., Михалёв Г.Е., Павлов С.Н., Подоляк М.П., Румянцев С.С., Хайров А.М.; Конструкция и прочность летательных аппаратов; Учебник для вузов ВВС. Под ред. О.В. Болховитинова. – М.: ВВИА им. Проф. Н.Е. Жуковского, 2004. – 678 с.: илл. – 407; табл. – 9; библи. – 42.
6. Борович З. И. Определители и матрицы. – 4-е изд. – СПб.: Изд-во«Лань», 2004– 185 с.
7. Элементы теории линейных пространств / Под общей редакцией Л.С. Ратафьевой / Учебное пособие.- СПб:СПбГИТМО (ТУ), 2001 - 140 с
8. Толстых Т. О., Гамидуллаева Л. А., Шкарупета Е. В. Ключевые факторы развития промышленных предприятий в условиях цифрового производства и индустрии 4.0 //Экономика в промышленности. – 2018. – Т. 11. – №. 1. – С. 11-19.
9. Боровков А.И., Рябов Ю.А., Марусева В.М. «Умные» цифровые двойники – основа новой парадигмы цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения // Трамплин к успеху. Цифровая экономика знаний. – 2018. - №13. – С. 13-17.