

Цифровой двойник в едином информационном пространстве жизненного цикла как инструмент обеспечения конкурентоспособности изделия авиационной техники

С.А. Серебрянский, Д.Ю. Стрелец, М.В. Шкурин (МАИ)

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. Для каждого этапа жизненного цикла сложного технического изделия характерны два слоя: информационный и материальный. В информационном слое создается описание изделия (его виртуальный образ) и процессов происходящих на этапах ЖЦ.

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.

В статье рассматривается концепция единого информационного пространства, раскрывается понятие цифрового двойника изделия, описываются подходы, использующиеся 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, структурированный массив информации, математическая модель, системная модель.

Введение

Внедрение новых технологий в авиационной промышленности делают все более актуальным вопрос развития и эффективного использования потенциала информационных ресурсов в жизненном цикле изделия авиационной техники. Данные технологии позволяют повысить конкурентоспособность выпускаемой продукции при сокращении сроков разработки, постановки на производство и испытаниях с учетом изменчивости потребностей рынка авиационной техники. 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 слоев происходит формирование единого информационного пространства, в котором создается цифровой двойник и обеспечивается полная цифровизация всех этапов его ЖЦ.

В рамках известного системного подхода физическая сущность материальной реализации сложной технической системы и ее составных частей (деталь, узел, агрегат, подсистема, система, изделие) может иметь математическое описание (алгоритм модели) в виде соответствующего информационно-цифрового объекта.

Ключевую роль в этом процессе играет применение передовых производственных технологий и в первую очередь цифрового проектирования и моделирования, которые позволяют представителям авиационной промышленности в кратчайшие сроки разрабатывать и создавать конкурентоспособные изделия авиационной техники. Это позволит повысить конкурентоспособность продукции отечественной

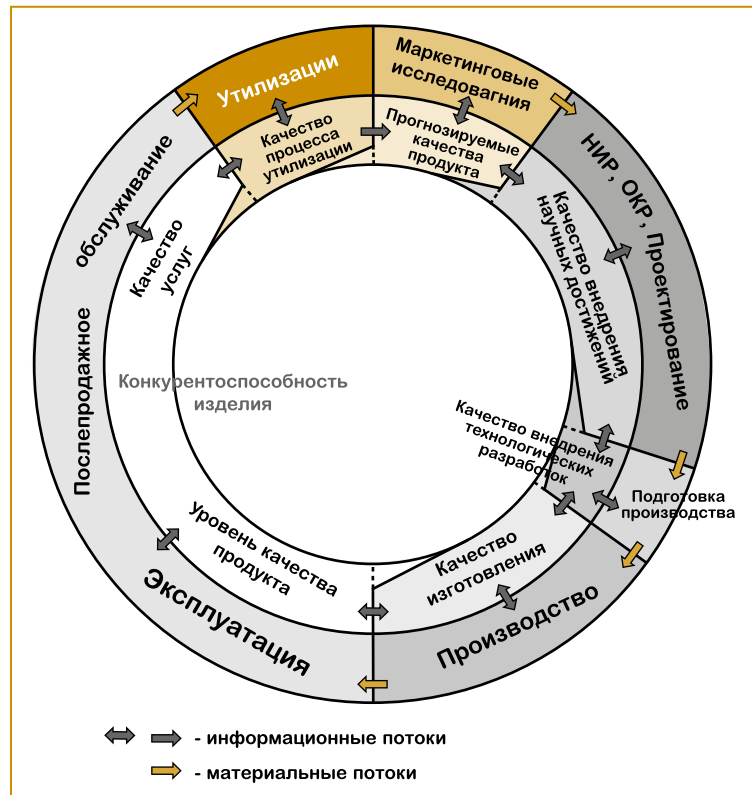


Рис. 1. Этапы жизненного цикла изделия и критерии качества процессов

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.

Одной из ключевых компетенций текущего времени является теория сквозного цифрового проектирования и моделирования изделий конкурентоспособной авиационной продукции на основе

цифровых двойников физических объектов: деталей, узлов, агрегатов; и процессов: производство, сборка, испытания, логистика.

Данная технология позволяет разработчикам отойти от необходимости проводить затратные по времени и стоимости натурные испытания, гибко вносить и реализовывать изменения по требованию заказчика, уменьшить число и весомость ошибок связанных с человеческим фактором. При этом сохранять в полной мере требования к функциональным, техническим, технологическим, эксплуатационным и экономическим свойствам разрабатываемого изделия [1].

Жизненный цикл (ЖЦ) состоит из совокупности взаимосвязанных процессов изменения состояния изделия и представляет собой последовательность этапов (рис. 1). На начальном этапе маркетинговых исследований потребностей рынка авиационной техники возникает концепция (зарождение идеи) нового продукта, заключительным этапом является его утилизации. Самым длительным из всех этапов является эксплуатация и послепродажное обслуживание. В этот период проявляются все свойства изделия, происходит оценка его эффективности [2].

Каждый этап ЖЦ реализуется определенной группой специалистов и генерирует свой объем данных, определяемый содержанием решаемых задач. Внутри этапов и между ними формируются информационные потоки, объем информации в которых от этапа к этапу возрастает.

Единое информационное пространство жизненного цикла изделия

Это приводит к общему увеличению объема информации и необходимости организации взаимодействия между участниками [3]. 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 метак, 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 эффективно управлению информацией об изделии, является огромные объемы 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).

Технология цифрового двойника в информационном пространстве [4] полностью охватывает все этапы жизненного цикла изделия: замысел (НИР, ОКР, проектно-конструкторские работы), производство, эксплуатация, послепродажное обслуживание и утилизация.

Цифровой двойник изделия авиационной техники

Цифровой двойник — это интегрированная, многоуровневая и multidisciplinary модель летательного аппарата или его системы, использующая доступные, наиболее полные физические модели составных частей изделия, текущие данные от датчиков. Накопленная информация о предыдущих условиях и интенсивность эксплуатации позволяют определить текущее техническое состояние своего реального физического двойника, скорректировать план выполнения технического обслуживания и ремонта (ТОиР), определить уровень текущей надежности и остаток ресурса изделия в целом (летательный аппарат) и его составных частей (двигатель, стойки шасси и др.).



Рис. 2. Концепция единого информационного пространства

Наиболее полные математические модели цифрового двойника позволяют в информационном пространстве отражать состояние и работу взаимосвязанных составных частей воздушного судна, таких как планер, силовая установка, самолетные системы, оборудование, система управления и жизнеобеспечения. Отклонения в работе составных частей летательного аппарата будут контролироваться цифровым двойником физического изделия с последующим формированием информационного сообщения эксплуатирующей организации, производителю, разработчику.

Цифровой двойник (Digital Twin) представляет собой систему высокоадекватных цифровых моделей изделия, технологических, производственных и эксплуатационных процессов, управлять которыми можно в виртуальной среде (едином информационном пространстве).

Основу цифрового двойника составляет структурированный набор данных о свойствах, требованиях и ограничениях характерных для разрабатываемого изделия. Требования и свойства формируются на этапе предварительного проектирования. В качестве ограничений выступают как ресурсные (время, финансы, кадры), так и технические, технологические, производственные, эксплуатационные, экологические, логистические и др.

Модель представления данных об изделии в информационном пространстве определяется как инструмент моделирования процессов на этапах ЖЦ, включающий структуры данных о свойствах и требованиях, методы структурирования данных, правила ограничения целостности и алгоритмы взаимосвязи структурированных данных [5].

Каждое из свойств (C^k) и требований (T^k), предъявляемых к изделию, представляет собой набор элементов двухмерной матрицы параметров размерностью (j, i). А их совокупность определяет струк-

турированную многомерную матрицу цифрового двойника (рис. 3) размерностью (k, j, i).

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

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

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

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

Элементы матрицы экономических свойств ($C^{Эки}$) содержат информацию о материальных и трудовых затратах на проектирование, производство, эксплуатацию, модернизацию и утилизацию изделия. При создании летательного (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, объединенных 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. 4). 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

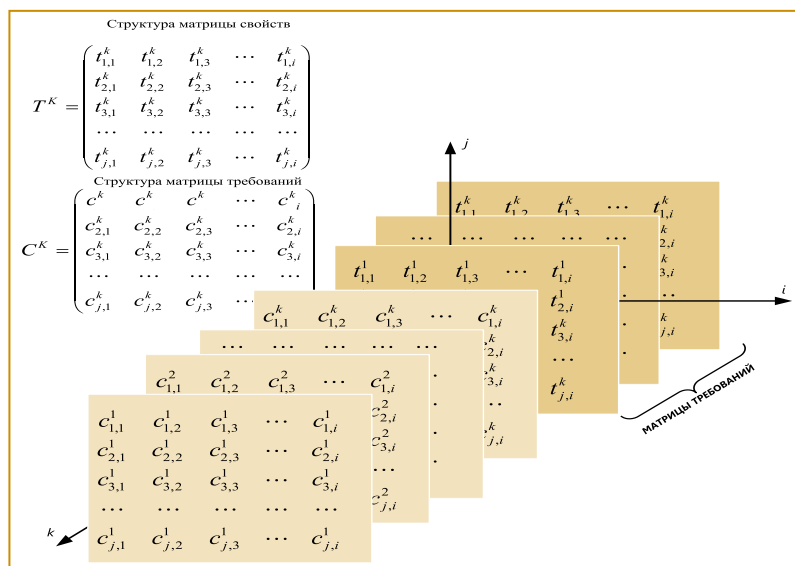


Рис. 3. Структурированная многомерная матрица

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 самолет, то элементы a_{ij}^k функциональных свойств (C^Φ), входящие в массив, включают такие параметры, как масса целевой нагрузки $m_{цн}$; крейсерская скорость полета $V_{кр}$; крейсерская высота полета $H_{кр}$; максимально допустимая эксплуатационная перегрузка $n_{умax}^{экс}$ и др.

В данном случае масса целевой нагрузки определяет назначение летательного аппарата.

К элементам массива технических свойств относятся параметры, характеризующие эффективность реализации физических принципов функционирования самолета и его составных частей (двигатель, системы, оборудование): коэффициент подъемной силы C_y ; коэффициент лобового сопротивления C_x ; аэродинамическое качество самолета $K_{аэ}$; удельный расход топлива $C_{уд}$; относительные параметры составных частей планера (фюзеляж, крыло, оперение) и другие технические свойства.

Элементы, характеризующие эксплуатационные свойства, включают эксплуатационные показатели и характеристики условий эксплуатации: ресурс $T_{рес}$; время подготовки к полету $t_{подг}$ и др.

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

Частные (локальные) соотношения связывают незначительное число параметров структурных свойств, например, в (1) показана взаимосвязь элементов массивов эксплуатационных и технических параметров. Здесь длина разбега самолета, зависит от скорости отрыва и взлетной массы:

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

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.

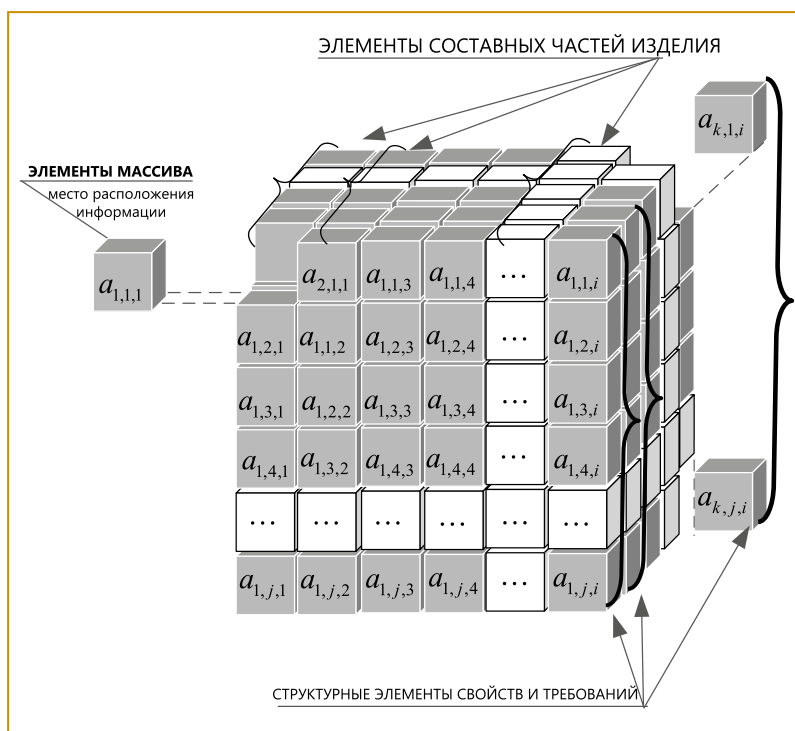


Рис. 4. Многомерный структурированный массив информации

Уравнения эффективности зависят от назначения ЛА и позволяют количественно определить критерий эффективности (2), зависящий от функциональных и эксплуатационных свойств, которые в свою очередь являются зависимостями от технических параметров:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}[C^\Phi(C^{Tx}); C^{\mathcal{E}кс}(C^{Tx})]. \quad (2)$$

Экономические уравнения (3) позволяют определить стоимость жизненного цикла летательного аппарата в зависимости от функциональных, технических, технологических и эксплуатационных свойств:

$$C_{ла} = C_{ла}(C^\Phi; C^{Tx}; C^{Tи}; C^{\mathcal{E}кс}). \quad (3)$$

Уравнение существования ЛА (4) связывает массу ЛА с функциональными, техническими и эксплуатационными параметрами:

$$m_0 = m_0(C^\Phi; C^{Tx}; C^{\mathcal{E}кс}). \quad (4)$$

Комплексный критерий оценки конкурентоспособности (5) для принятия решения о целесообразности начала выполнения работ критерий эффективность/стоимость:

$$\{K = \mathcal{E}/C\} \rightarrow \max. \quad (5)$$

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 обо-

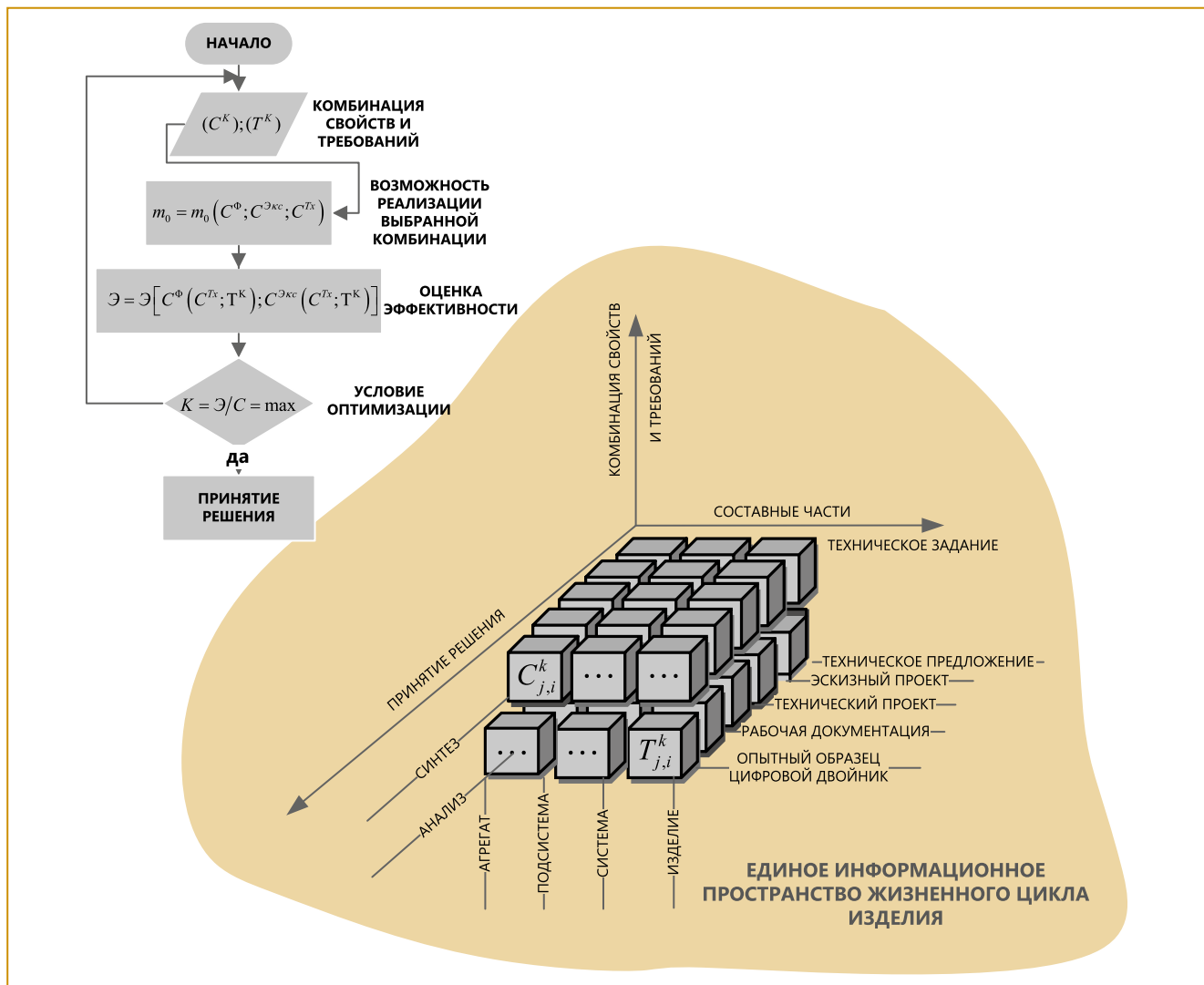


Рис. 5. Формирование значений структурированного массива информации едином информационном пространстве

сновании летно-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. 5).

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

Функциональные особенности цифрового двойника по этапам жизненного цикла

Отличительной особенностью цифрового двойника является его обучаемость по этапам ЖЦ — «машинное обучение». На каждом из этапов при необходимости происходит изменение и дополнение информации об изделии, а также изменение алгоритмом формирования данных. На этапе эскизного про-

ектирования с помощью программного обеспечения для системного или имитационного моделирования создаются вариации моделей разрабатываемого изделия для оценки (оптимизации) и выбора наилучшего технического решения из рассматриваемых. Далее на этапе технического проектирования выбранная модель может дорабатываться и уточняться при помощи более точных системных моделей элементов, полученных на основе результатов многовариантных численных расчетов [8, 9]. Такая многофизичная системная модель позволяет учитывать и оптимизировать функциональное взаимодействие всех элементов моделируемой системы с учетом режимов работы изделия (субъективные факторы) и взаимодействия с окружающей средой (объективные факторы). На этапе производства разработанная системная модель (с учетом используемых конструктивных материалов, точностей изготовления деталей, соблюдения технологий и требуемых допусков при сборке) начинает приобретать виртуальный облик «цифрового двойника» конкретного физического объекта

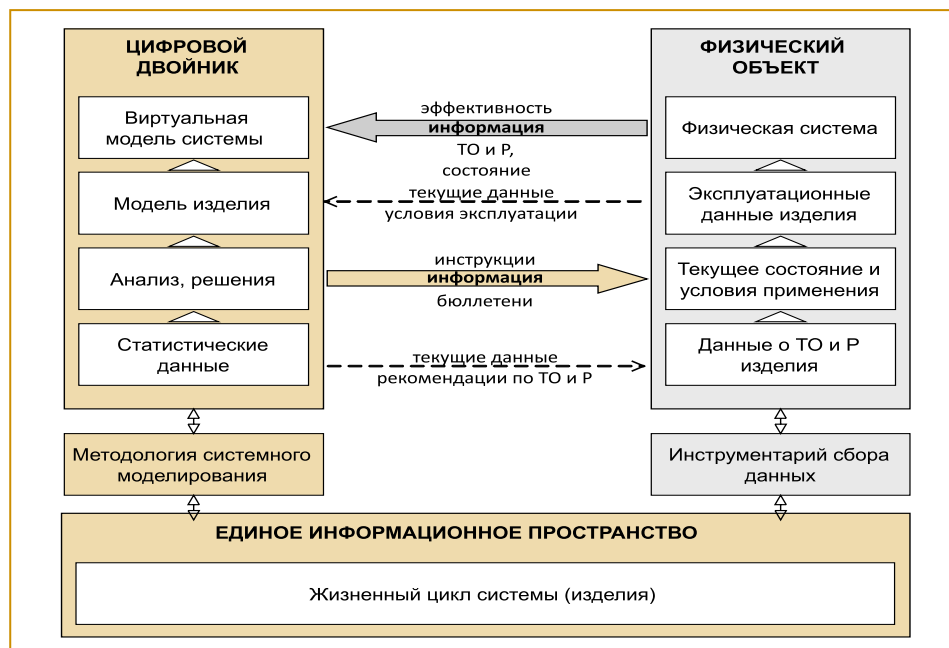


Рис. 6. Концепция взаимодействия цифрового двойника и физического объекта

«изделия». Это способствует контролю соответствия текущих технических характеристик, требуемым (эталонный цифровой двойник) в течение всего срока эксплуатации.

На этапах производства, испытаний и эксплуатации цифровой двойник изделия может быть доработан обратной связью для обеспечения взаимосвязи с этапами НИОКР. Это способствует тому, что информация, накопленная в ходе ТОиР, а также информация об условиях летной эксплуатации изделия позволит анализировать и прогнозировать причины возникновения отказов и неисправностей, благодаря чему в системные модели двойника максимально точно описывают производственные процессы в их динамике и учитывают изменения неизбежно происходящие в реальном времени. Это, в свою очередь, позволит изменять требования на этапе НИР и изменять конфигурацию изделия на этапе ОКР, тем самым улучшать качество и повышать эффективность использования изделия.

Информация, полученная в условиях эксплуатации, используется для изменения алгоритма модели формирования данных применяемых в цифровом двойнике. Данные, получаемые с физического объекта, способствуют созданию системной модели или объекта. Важным является то, что данные передаваемые из эксплуатационной среды единого информационного пространства способствуют накоплению знаний для машинного обучения, созданию баз знаний и формированию признаков искусственного интеллекта для принятия решений на этапах ЖЦ.

Так как цифровой двойник является программным отображением своего физического устройства, то поток информационных данных обеспечивает связь между ними на всех этапах жизненного цикла изделия (рис. 6).

Виртуальная модель, воплощенная в цифровом двойнике, изменяется в режиме реального времени при изменении состояния физического устройства на этапе эксплуатации.

Для реализации данной концепции необходима взаимосвязь датчиков и других коммуникационных устройств физического объекта с системной моделью цифрового двойника. Таким образом Digital Twin становится точной копией физического изделия или системы, которая отображает реальные условия его эксплуатации. Если рассматривать парк изделий, то наличие постоянной связи каждого двойника со своим физическим прототипом позволяет вести контроль работоспособности

и технического состояния каждого изделия в реальном времени. Для каждого физического изделия определять периодичность и объем требуемых работ по ТОиР.

Выделим особенности цифрового двойника, отличающие его от других традиционных моделей локально используемых на этапах ЖЦ и позволяющие:

- отслеживать состояние изделия между этапами жизненного цикла посредством взаимосвязи, которую обеспечивает информационный поток в едином виртуальном пространстве;
- понимать, как физический объект работает в текущих реальных условиях;
- наблюдать за работоспособностью изделия и принимать решения об изменении конфигурации изделия в зависимости от условий эксплуатации;
- планировать ТОиР, основываясь на накопленных знаниях о техническом состоянии и условиях эксплуатации;
- отслеживать ресурс изделия, на основании принципа «машинного обучения» вырабатывать рекомендации о способах его увеличения.

Модели виртуальной системы двойника (изделия) могут быть разного уровня сложности: от упрощенных до полномасштабных. Облегченные модели отражают упрощенную структуру (например, упрощенную геометрию) и упрощенную физику (например, модели пониженного порядка). Это позволяет снизить вычислительную нагрузку, особенно на предварительных стадиях инженерно-технической работы. Такие облегченные модели позволяют моделировать сложные системы и системы систем (SoS) и, соблюдая точность в соответствующих измерениях, получать необходимые данные с минимальными вычислительными затратами. Этими моделями можно

Человек – единственное живое существо на свете, способное смеяться и рыдать, ибо из всех живых существ только человеку дано видеть разницу между тем, что есть, и тем, что могло бы быть.

Уильям Хэзлитт

обмениваться внутри организации и с сетью поставщиков, тем самым помогая им лучше понимать создаваемую систему.

Выводы

На каждом этапе ЖЦ цифровой двойник может быть эталонирован в соответствии с характеристиками физического объекта или процесса. Это позволяет проводить в реальном времени мониторинг процесса работы изделия, а также своевременно выполнять анализ данных для предотвращения его отказов и неисправностей до их возникновения.

Появление концепции Интернета вещей (IoT) привело к тому, что реализация цифровых двойников стала экономически выгодной, а данная технология получает все большее признание в сообществе промышленного Интернета вещей (IIoT). По данным Gartner [10], в 2021 г. половина крупных промышленных компаний будут использовать технологию цифровых двойников с целью улучшения качества оценки производительности предприятия и снижения технических рисков.

Предложенные в данной 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.

Список литературы

1. Цифровые технологии в жизненном цикле российской конкурентоспособной авиационной техники: Монография / Под ред. М.А. Погосяна. М.: Изд-во МАИ, 2020. 448 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. Концепция развития CALS-технологий в промышленности России. ВИМИ, 2002.
4. Стрелец Д.Ю., Серебрянский С.А., Шкурин М.В. Подход к управлению жизненным циклом изделия авиационной техники с использованием цифровых технологий//Тр. XII международной конференции MLSD'2019. 2019. С. 717-719.
5. Болховитинов О.В., Вольнов И.И., Захарченко В.С., Калашников В.И. и др. Конструкция и прочность летательных аппаратов. Уч. для вузов ВВС. Под ред. О.В. Болховитинова. — М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2004. — 678 с.
6. Борович З.И. Определители и матрицы. — 4-е изд. — СПб.: Изд. «Лань». 2004. 185 с.
7. Элементы теории линейных пространств. Под общей ред. Л.С. Ратафьевой. Учебное пособие.- СПб:СПбГИТМО (ТУ), 2001 - 140 с.
8. Zeigler B.; Muzy A.; Kofman E. Theory of Modeling and Simulation: Discrete Event and Iterative System Computational Foundations, 3rd ed.; Academic Press: New York, NY, USA, 2018.
9. Madni A.M. Expanding Stakeholder Participation in Upfront System Engineering Through Storytelling in Virtual Worlds. Syst. Eng. 2015, 18, 16-27. [CrossRef].
10. Pettey C. Prepare for the Impact of Digital Twins; Gartner: Stamford, CT, USA, 2017.

Серебрянский Сергей Алексеевич – канд. техн. наук, доцент,

Стрелец Дмитрий Юрьевич – канд. техн. наук, начальник НИО-101, доцент,

Шкурин Максим Викторович – старший преподаватель Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

E-mail: dimstrelets@rambler.ru, s-s-alex@mail.ru, m.shkurin@mai.ru

Поступила в редакцию 20.12.2020.

Принята к публикации 15.01.2021

Новые модели сервоприводов Kinetix 5100 и серводвигателей TLP с напряжением питания до 480 В от Rockwell Automation

Комплексное решение, состоящее из сервопривода Kinetix 5100 и серводвигателя Kinetix TLP для автономного управления перемещением от компании Rockwell Automation, теперь может работать при напряжении питания до 480 В, что расширит область его применения в оборудовании OEM-производителей из упаковочной, перерабатывающей, полиграфической, сборочной и фармацевтических отраслей

Сервосистемы на базе Kinetix 5100 — это новое конкурентоспособное решение по управлению перемещением для гибкого и автономного производственного оборудования. С

его помощью OEM-производители смогут создавать механизированные и автоматизированные системы с минимальным временем перенастройки оборудования.

Кроме того, с помощью встроенной функции безопасного отключения крутящего момента операторы смогут останавливать двигатель, не отключая питание всей сервосистемы, что позволит ей быстрее перезапускаться после восстановления безопасного состояния. Встроенный двойной порт EtherNet/IP поддерживает кольцевую топологию аппаратно-уровня (DLR).

<https://www.rockwellautomation.com/ru-ru/>