

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ДИНАМИКИ РОТОРОВ

Терешко А.Г.<sup>1</sup>, Леонтьев М.К.<sup>2</sup>, Шапошников К.В.<sup>3</sup>, Дегтярев С.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ОКБ им. А. Люльки, филиал ПАО «ОДК-УМПО», г. Москва, anton.tereshko@lmz.umpo.ru

<sup>2</sup>Московский Авиационный Институт, г. Москва, lemka@alfatran.com

<sup>3</sup>ООО «Альфа-Транзит», г. Москва, kvshaposhnikov@alfatran.com, degs@alfatran.com

*Ключевые слова:* авиационный двигатель, цифровой двойник, динамика роторов, моделирование, DYNAMICS R4.

В настоящий момент во всех сферах отечественной промышленности идет активное внедрение технологий цифровых двойников (ЦД). Особенно актуально использование данной технологии при проектировании таких сложных технических изделий, как авиационный двигатель. Под ЦД понимают систему, состоящую из цифровой модели изделия и двухсторонних информационных связей с изделием или его составными частями, рис. 1.

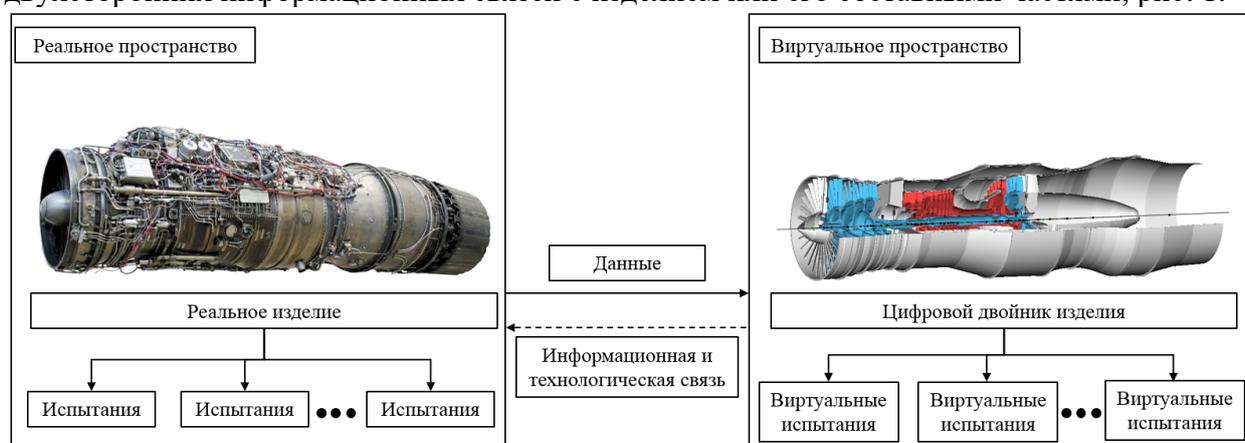


Рисунок 1 – Общая концепция цифрового двойника авиационного двигателя

Решение задач связанных с динамикой роторов двигателя является одним из приоритетных направлений при проектировании новых изделий и сопровождении существующих. Для таких задач обычно используются специализированные программные комплексы позволяющие строить стержневые модели двигателя включая его основные подсистемы (ротора, корпуса, подвеску) используя их типовые элементы (балки, оболочки, точечные массы, упругие связи и др.). Инженеры ОКБ им. А Люльки, проводят подобные расчеты в программной системе DYNAMICS R4, применение которой позволило решать задачи, связанные с моделированием общей динамики двигателя [1,2], осуществлять подготовку к статическим и динамическим испытаниям, проводя предварительные виртуальные испытания на цифровой модели изделия [3-5]. Накопленный специалистами ОКБ им. А Люльки опыт совместной научно-исследовательской работы с Московским Авиационным Институтом и ООО «Альфа-Транзит» позволил сформировать концепцию создания ЦД авиационного двигателя для решения задач роторной динамики на базе программной системы DYNAMICS R4, рис. 2. В рамках предложенной концепции на первом этапе создания ЦД для решения задач динамики роторов создается линейная модель двигателя. Создание линейной модели включает в себя подготовку статической и динамической модели двигателя. Создание статической модели включает: расчет жесткостей подшипников, оценку упругих и демпфирующих свойств демпферов, расчет полных матриц коэффициентов жесткости не моделируемых стержневыми элементами узлов силовой схемы двигателя. Последующая работа с динамической моделью позволяет проводить расчет собственных частот двигателя с учетом вращения его роторов, расчет критических скоростей и оценку форм колебаний динамической системы двигателя на них, расчет вынужденных колебаний от действия остаточного дисбаланса на роторах двигателя,

параметрический анализ влияния жесткостных и демпфирующих свойств основных силовых узлов двигателя на его резонансные режимы.

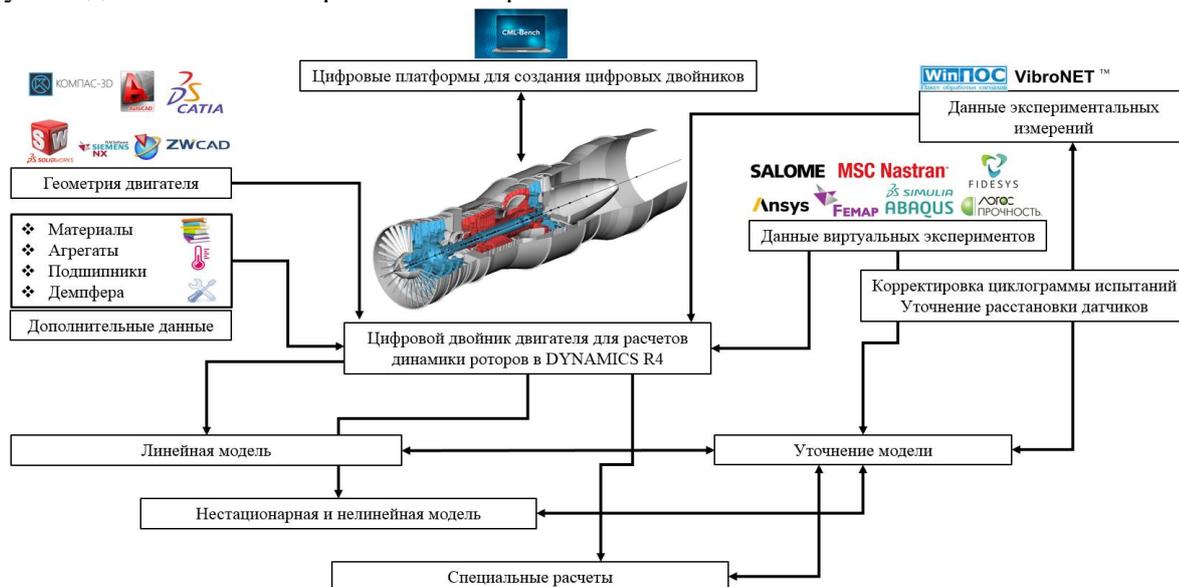


Рисунок 2 – Концепция цифрового двойника авиационного двигателя в DYNAMICS R4

Переход к нестационарной модели – этап создания ЦД авиационного двигателя для расчетов динамики роторов с учетом нестационарных эффектов (скорость прохода через резонансы, несинхронное возбуждение многовальных систем, нестационарные нагрузки). Переход к нелинейной модели авиационного двигателя – этап создания модели цифрового двойника авиационного двигателя для расчетов динамики роторных систем с нелинейным поведением в экспериментах. Создание нелинейной модели производится на базе линейной, для чего в динамической структуре двигателя выделяются узлы, обладающие нелинейными характеристиками. Построение нелинейной модели производится с использованием библиотеки нелинейных элементов (подшипников, демпферов, зубчатых соединений). Работа с нелинейной моделью позволяет проводить оценку дисбалансного поведения от совместного действия дисбалансов на всех роторах двигателя, анализировать форму вынужденных колебаний на резонансных и рабочих режимах, моделировать работу его опор и демпферов при динамических нагрузках, имитирующих реальные условия работы. Исходная линейная и построенная на ее базе нелинейная модели двигателя могут требовать уточнения отдельных элементов конструкции. Уточнение модели может производиться многократно, по мере изменения и совершенствования конструкции отдельных элементов двигателя, а также при получении обновленных данных численных или экспериментальных изменений. Отдельные элементы модели могут верифицироваться по результатам статических или модальных испытаний, как виртуальных, так и экспериментальных [6]. ЦД авиационного двигателя построенный в DYNAMICS R4 может быть интегрирован в цифровые платформы для создания цифровых двойников.

Применение ЦД авиационного двигателя обладает большим набором преимуществ, среди которых: исследование влияния различных дефектов на виброактивность двигателя (дисбаланс, вылет лопатки, внешнее динамическое воздействие, несоосность, трещина в роторе и др.) и разработка рекомендации по ее снижению, подготовка вибропаспорта для оценки вибросостояния серийных двигателей, настройка на вибрационное поведение конкретного двигателя, оптимизация динамической структуры двигателя, подготовка к модальным и статическим испытаниям, разработка схем препарирования двигателя датчиками вибрации в целях верификации его расчетных моделей, а также для его диагностики [7].

## Список литературы

1. Терешко А.Г., Леонтьев М.К. Использование МКЭ для решения задачи уточнения расчетной модели при определении критических частот вращения ротора классическими методами // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика СП Королёва (национального исследовательского университета). – 2006. – №. 2-2. – С. 315-318.
2. Леонтьев М.К., Терешко А.Г. Исследование влияния характеристик упругих элементов опор роторов на динамику ГТД // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика СП Королёва (национального исследовательского университета). – 2012. №. 3-1 (34). – С. 173-180.
3. Терешко А.Г., Баляева Н.Н., Гусенко С.М. Проектирование универсальной силовой рамы для статических и циклических прочностных испытаний элементов газотурбинных двигателей // Проблемы и перспективы развития двигателестроения. – 2016. – С. 86-87.
4. Макарычев А.С., Зайдуллин Д.А., Баляева Н.Н. Анализ влияния ослабления фланцевых соединений на критические частоты вращения ротора высокого давления газотурбинного двигателя // Проблемы и перспективы развития двигателестроения. – 2016. – С. 82-83.
5. Зайдуллин Д.А., Макарычев А.С., Терешко А.Г. Анализ причин дефекта с применением метода конечных элементов при решении задач роторной динамики // Проблемы и перспективы развития двигателестроения. – 2018. – С. 61-63.
6. Шапошников, К.В., Леонтьев, М.К. Верификация численных моделей роторов авиационных двигателей для решения задач роторной динамики // Авиация и космонавтика: тезисы 21ой международной конференции, Москва, 21–25 ноября 2022 года / Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – Москва: Издательство "Перо", 2022. – С. 178-179.
7. Шапошников К.В., Давыдов А.В., Дегтярев С.А., Леонтьев М.К., Гладкий И.Л. Методика препарирования авиационных газотурбинных двигателей датчиками вибраций через оценку их информативности методами математического моделирования // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2022. – № 4. – С. 155-165.

## Сведения об авторах

Терешко Антон Герольдович, главный специалист по прочностным испытаниям, начальник отдела. Область научных интересов: прочностные испытания, роторная динамика.

Леонтьев Михаил Константинович, доктор технических наук, профессор кафедры «Конструкция и проектирование двигателей» Московского Авиационного Института. Область научных интересов: роторная динамика, математическое моделирование, проектирование демпферных опор, цифровые двойники авиационных двигателей.

Шапошников Константин Владимирович, доктор философии по техническим наукам (PhD), инженер-исследователь. Область научных интересов: роторная динамика, модальный анализ, разработка схем препарирования, цифровые двойники авиационных двигателей.

Дегтярев Сергей Александрович, руководитель направления. Область научных интересов: роторная динамика, математическое моделирование.

## PERSPECTIVE OF JET ENGINE DIGITAL TWIN USAGE FOR ROTORDYNAMICS

Tereshko A.G.<sup>1</sup>, Leontiev M.K.<sup>2</sup>, Shaposhnikov K.V.<sup>3</sup>, Degtyarev S.A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Lyulka Design Bureau, sub. PJSC UEC-UEIA, Moscow, anton.tereshko@lmz.umpo.ru

<sup>2</sup>Moscow Aviation Institute, Moscow, lem@alfatran.com

<sup>3</sup>Alfa-Tranzit Co., Ltd., Moscow, kvshaposhnikov@alfatran.com, degs@alfatran.com

*Keywords: jet engine, digital twin, rotordynamics, modeling, DYNAMICS R4.*

Usage of digital twin technology provides benefits not only during design of new perspective jet engines but also during development and enhancement of existing aero-engines. The paper presents the concept of jet engine digital twin creation for rotordynamics simulation based on DYNAMICS R4 software.