ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ДИНАМИКИ РОТОРОВ ПРИ ПОДГОТОВКЕ К ИСПЫТАНИЯМ НА СТАДИИ РАЗРАБОТКИ ИЗДЕЛИЯ

К.В. Шапошников[1], С.А. Дегтярев[1], М.К. Леонтьев[2], И.Л. Гладкий[3]
[1] ООО «Альфа-Транзит», Москва,
[2] Московский авиационный институт, Москва
[3] АО «ОДК-Авиадвигатель», Пермь

В работе описан опыт создания и использования цифровой модели двухконтурного турбореактивного двигателя для расчетов динамики его роторов при подготовке к его испытаниям. Рассмотрены основные этапы формирования и верификации цифровой модели, построенной в программной системе DYNAMICS R4, по результатам виртуальных и реальных экспериментов.

PRACTICE OF AIRCRAFT ENGINE DIGITAL TWIN USAGE FOR ROTORDYNAMICS SIMULATION WHEN PREPARING FOR THE TRIALS AT THE STAGE OF ENGINE DEVELOPMENT

K.V. Shaposhnikov[1], S.A. Degtyarev[1], M.K. Leontiev[2], I.L. Gladkiy[3]
[1] Alfa-Tranzit Co., Ltd., Moscow, Russia
[2] Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia
[3] UEC-Aviadvigatel JSC, Perm, Russia

Practice of turbofan aircraft engine digital model development and usage for rotordynamics simulations to prepare for its trials was observed. Main steps of full-engine digital dynamic model preparation, built in program system DYNAMICS R4, and its verification based on virtual and real experiments were observed.

1 Введение

Развитие концепции и применения цифровых двойников (ЦД) приводит к все более тесной связи цифровых моделей (ЦМ) и физических объектов. Все ведущие производители авиационных двигателей за рубежом (GE, Rolls-Royce, Pratt&Whitney, MTU, Safran и д.р.) активно развивают и используют ЦД при проектировании новых и эксплуатации существующих двигателей. В отечественном авиадвигателестроении также активно ведётся исследование возможностей использования и внедрения концепции ЦД, применять которую предполагается на всех стадиях жизненного цикла изделия. Различные варианты реализации внедрения технологии ЦД предлагаются ведущими научными коллективами страны [1-3]. В тоже время в предлагаемых вариантах концепции ЦД подробно не освещается использование ЦД и входящих в его состав ЦМ для решения задач в области динамики роторов. Методы и подходы к созданию ЦМ для решения задач роторной динамики также подробно не описываются. Накопленный специалистами компании ООО «Альфа-Транзит» научно-исследовательский и практический опыт создания ЦМ авиационных двигателей позволил сформировать концепцию создания ЦД авиационного двигателя для решения задач роторной динамики на базе программной системы DYNAMICS R4 [4]. В рамках предложенной концепции основой для создания ЦД служит ЦМ двигателя - система математических и компьютерных моделей для расчетов общей динамики двигателя (линейных/нестационарных/нелинейных), а также моделей для специальных расчетов (модальные/статические испытания, модели подшипников/опор, модели для специальных экспериментов: обрыв лопатки, высокочастотная и низкочастотная балансировка роторов и др.)

В настоящей работе описан опыт создания и использования ЦМ турбореактивного двухконтурного двигателя (ТРДД) для расчетов динамики роторов, а также для подготовки к испытаниям на стадии его разработки.

2. Формирование цифровой модели

Цифровые модели для расчета динамики роторов обычно строят, используя программные системы, изначально созданные для таких задач. Эти программы позволяют строить модели двигателя, включая его основные подсистемы (роторы, корпусы, подвеску), на базе имеющихся в их библиотеке типовых элементов (балок, оболочек, точечных инерционных элементов, упругих связей и т.д.). В настоящей работе рассмотрена ЦМ ТРДД, построенная в DYNAMICS R4, Рис.1.

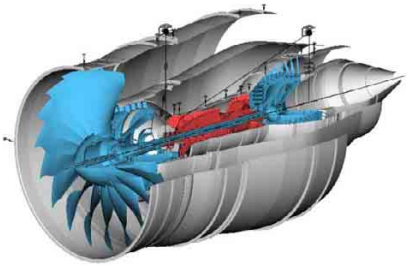

Рис. 1. Цифровая модель ТРДД в DYNAMICS R4

Цифровая модель ТРДД включает в себя систему его компьютерных и математических моделей, которые разрабатывались с учетом рекомендаций стандартов ГОСТ Р 57700.22-2020 [5] и ГОСТ Р 57412-2017 [6], используемых при подготовке таких моделей. ЦМ варианта компоновки двигателя также использовалась при разработке схемы препарирования двигателя датчиками вибрации для верификации расчетной модели [7,8].

При формировании цифровой модели двигателя сначала строится базовая (осредненная) ЦМ. Модель строится, основываясь на имеющихся для двигателя чертежах и 3D моделях, математических моделях, документации и данных об использованных в двигателе материалах. Формирование цифровой модели включает следующие этапы:

- Формирование или актуализация/перестройка расчетной схемы двигателя (если за основу берется цифровая модель предыдущего этапа работ) и его основных подсистем (роторов и корпусов) в соответствие с конструкторской документацией;
- Настройка материалов элементов модели на актуальное температурное состояние. Используются справочники материалов и опции настройки материалов элементов и сборок в DYNAMICS R4;
- Проверка масс и моментов инерции основных деталей и узлов двигателя, а также положения ц.т. основных модулей и сборок на соответствие конструкторской документации. Используются опции контроля пространственного положения элементов и сборок в DYNAMICS R4;
- Уточнение локальных податливостей;
- Оценка жесткости критически важных узлов и элементов конструкции двигателя;
- Оценка жесткости подшипников. Используются доступные в DYNAMICS R4 элементы шариковый и роликовый подшипник;
- Оценка жесткости демпферов опор двигателя. Используются доступный в DYNAMICS R4 элемент гидродинамический демпфер.

В общем виде основные этапы создания базовой цифровой модели ТРДД представлены на Рис. 2.

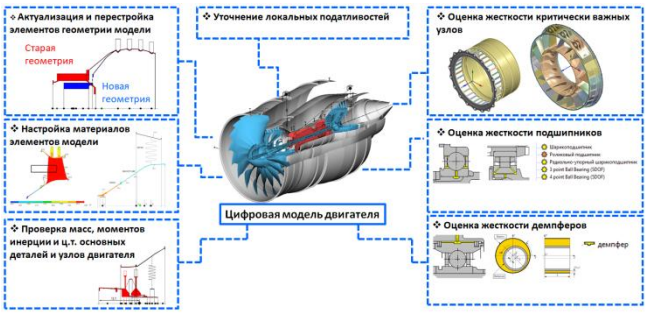

Рис. 2. Основные этапы создания цифровой модели двигателя в DYNAMICS R4

Формирование базовой цифровой модели – это сложный инженерный многоэтапный процесс, когда некоторые этапы создания модели могут идти одновременно, а также многократно повторяться по мере совершенствования и уточнения модели.

3. Верификация цифровой модели двигателя

Верификация модели двигателя — это сложный инженерно-итеративный процесс установления соответствия между экспериментальными измерениями и расчетной моделью. Верификация также производится для отдельных узлов и элементов модели двигателя. Ценные данные для верификации расчетных моделей представляют результаты экспериментальных модальных испытаний, проведение которых помогает оценить степень влияния упрощений, присутствующих в любой цифровой модели, на конечный результат в виде собственных частот и форм изгибных колебаний. Наиболее важным является проведение таких испытаний для свободно подвешенных роторов двигателя. Для того чтобы отделить влияние опор ротора от влияния его геометрии на собственный частоты и формы их колебаний и сосредоточиться на уточнении жесткостей деталей и узлов соединений, модальные испытания проводят для основной силовой линии ротора [9]. При планировании экспериментов готовят технологические модели роторов двигателя, которые рассматривают без

опор, без лопаток и без учета вращения, имитируя их свободный подвес в испытаниях. При отсутствии экспериментальных данных или при невозможности провести модальные испытания по причине отсутствия объекта испытаний, например, на этапе конструкторской проработки геометрии ротора, первичную оценку собственных частот и форм изгибных колебаний ротора можно провести, опираясь на результаты расчётов собственных частот и форм колебаний его цифровой модели в DYNAMICS R4, проводя виртуальные модальные испытания для нее [10]. Опыт использования DYNAMICS R4 для проведения виртуальных модальных испытаний, показывает, что подготовленные в программной системе для таких испытаний технологические модели успешно воспроизводят формы и частоты колебаний, полученные для их твердотельных аналогов, построенных в конечно-элементных программных пакетах общего назначения [9-11], что в соответствие с требованиями [12] подтверждает, что программная система DYNAMICS R4 адекватно и с высокой степенью точности выполняет подготовку цифровой модели, а также расчет и обработку результатов, полученных в ходе виртуальных модальных испытаний для цифровой модели.

Для оценки стабильности сборок ротора и его динамики при выходе на рабочие режимы могут использоваться реальные разгонные испытания ротора на опорах разгонно-балансировочных стендов, а также виртуальные испытания на цифровых моделях таких стендов [11,13-14]. Проведение виртуальных испытаний не отменяет и не снижает практической значимости реальных испытаний, однако позволяет снизить их кол-во, а так же лучше подготовиться к ним.

Верификация полной динамической модели двигателя проводится при сопоставление экспериментальных амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) двигателя с расчетными, полученными для его базовой модели. При выявлении несовпадения пиков резонансных режимов или их амплитуд проводится анализ формы колебаний на резонансном режиме и осуществляется поиск влияющего на данный резонансный режим элемента модели путем анализа результатов параметрических расчетов с использованием карт критических скоростей и вариантных расчетов с построением АЧХ. При выявлении влияющего элемента осуществляется поиск значений его жесткости, демпфирования или параметров его материала, позволяющие снизить расхождение с экспериментом по АЧХ, полученным при расчете дисбалансного поведения модели двигателя. Затем производится проверка адекватности выбранных значений, которая может включать в себя поверочные расчеты с использованием подробных твердотельных моделей данного элемента, после чего модель двигателя корректируется и снова проводится расчет АЧХ для сопоставления с экспериментом. В общем виде принцип верификации цифровой модели двигателя представлен на Рис. 3.

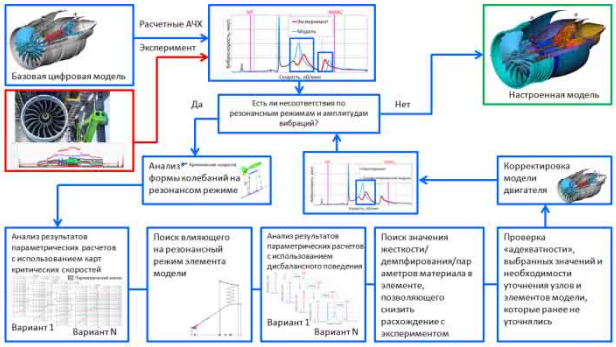

Рис. 3. Общий принцип верификации цифровой модели двигателя в DYNAMICS R4

Процесс поиска и выявления причин несоответствий между моделью и экспериментом может повторяться итеративно, пока не будет достигнут желаемый уровень согласования результатов.

3. Опыт использования цифровой модели двигателя для подготовки к его испытаниям

Перед проведением первых испытаний для ТРДД на открытом стенде от инженерно-проектировочного отдела был сформирован технический запрос о необходимости оценки динамики колебательной системы двигателя по его модели. На момент получения запроса базовая цифровая модель ТРДД в DYNAMICS R4 была полностью сформирована. Проведение вариантных расчетов на модели двигателя, ввиду особенностей конструкции демпферов его опор при моделировании в линейной постановке, привело к необходимости исследований различных по характеристикам динамических систем одного и того же объекта. Проведенные расчеты, в ходе которых были рассмотрены возможные сценарии поведения двигателя при его испытании на открытом стенде в зависимости от различных вариантов неуравновешенности его роторов, а также различных вариантов работы демпферов его опор, позволили лучше подготовиться к испытаниям. По результатам испытания осуществлялся процесс верификации и настройки цифровой модели ТРДД. Результаты имеющегося эксперимента показали низкую виброактивность и признаки нелинейного поведения двигателя, поэтому для полноценной верификации модели необходимо рассмотреть

большее количество испытаний, а для совершенствования цифровой модели – дополнить систему ее математических и компьютерных моделей для расчетов динамики роторов нелинейной моделью.

3 Заключение

В работе представлен опыт создания цифровой модели ТРДД в программной системе DYNAMICS R4 и применения процессов, описанных в стандартах [5,6]. Рассмотрены основные этапы формирования ЦМ двигателя. Кратко изложены принципы верификации элементов модели двигателя при помощи модальных испытаний на примере верификации моделей его роторов. Представлен общий принцип верификации ЦМ двигателя в DYNAMICS R4. Описан опыт использования цифровой модели на этапе разработки ТРДД для подготовки к испытаниям двигателя на открытом стенде. Для улучшения качества цифровой модели ТРДД и расширения ее возможностей предложено увеличить число экспериментов для ее верификации с тем, чтобы расширить «базу знаний» цифровой модели - различные варианты состояния модели двигателя, дающие различные характеристики ее динамического поведения. Для совершенствования ЦМ двигателя предложено дополнить систему ее математических и компьютерных моделей для расчетов динамики роторов моделью в нелинейной постановке.

Список использованных источников

[1] Ю. М. Темис и др. Цифровой двойник установки для испытаний центробежного компрессора малоразмерного ГТД //Авиационные двигатели. – 2021. – №. 1. – С. 5-16.

[2] К. А. Виноградов, А. С. Никулин, Ю. Н. Шмотин. 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.

[3] А. И. Боровков и др. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников (Digital Twins) CML-Bench (часть 3) //САПРиграфика. – 2023. – №. 10. – С.

[4] А. Г. Терешко, М. К. Леонтьев, К. В. Шапошников, С. А Дегтярев. Перспективы использования цифрового двойника авиационного двигателя для расчетов динамики роторов. Перспективы развития двигателестроения: материалы междунар. науч.-техн. конф. им. НД Кузнецова (21–23 июня 2023 г.): в 2 т.-Текст: электронны.2023.

[5] ГОСТ Р 57700.22 – 2020. Компьютерные модели и моделирование. Классификация. М.: Стандартинформ, 2020.11 с.

[6] ГОСТ Р 57412 – 2017. Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2018.15 с.

[7] К. В. Шапошников, М. К. Леонтьев, И. Л. Гладкий. Разработка схем препарирования авиационных двигателей датчиками вибрации с целью верификации их численных моделей для расчетов динамики роторов // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – 2022. – Т. 1. – С. 259-261.

[8] A.A. Inozemtsev, K.V. Shaposhnikov, S.A. Degtyarev, M.K. Leontiev, I.L. Gladkiy. Investigation on Information Assessment for Vibration Sensor Locations Installed in Aero-Engine Based on Unbalance Response Analysis. In: Chu, F., Qin, Z. (eds) Proceedings of the 11th IFToMM International Conference on Rotordynamics. IFToMM 2023. Mechanisms and Machine Science, vol 140. Springer, Cham., 2024.

[9] К.В. Шапошников, М.К. Леонтьев. Верификация численных моделей роторов авиационных двигателей для решения задач роторной динамики // Тезисы 21-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика» (21-25 ноября 2022 г., Москва, Россия). М.: Издательство «Перо», 2022. С. 178-179.

[10] К.В. Шапошников, С.А. Дегтярев, М.К. Леонтьев, С.В. Анисимов. Верификация моделей роторов авиационных двигателей по результатам виртуальных статических и модальных испытаний // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 1. С. 93-108.

[11] К. В. Шапошников, С. А. Дегтярев, В. М. Рыженков, М. К. Леонтьев. Использование цифровой модели вакуумного разгонно-балансировочного стенда для подготовки и планирования испытаний роторов

авиационных двигателей // Динамика и виброакустика. – 2024. – Т. 10, №3. – С. 58-80.

[12] ГОСТ Р 57700.2 – 2017. Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2018. 7 с.

[13] К. В. Шапошников, С. А. Дегтярев, В. М. Рыженков, М. К. Леонтьев. Перспективы использования цифровой модели вакуумного разгонно-балансировочного стенда для планирования испытаний роторов авиационных двигателей //ДиВ-2024: Тезисы 7ой межд. конф., Самара, 4-6 сентября 2024 года / Издательство Самарского университета, 2024. – С. 334-337.

[14] К.В. Шапошников, С.А. Дегтярев, В.М. Рыженков, М.К. Леонтьев. Применение цифровой модели вакуумного разгонно-балансировочного стенда для моделирования высокочастотной балансировки ротора авиационного двигателя // АиК: Тезисы 23ей межд. конф., Москва, 18–22 ноября 2024 года / МАИ. – М: Издательство "Перо", 2024. – С. 93-94.