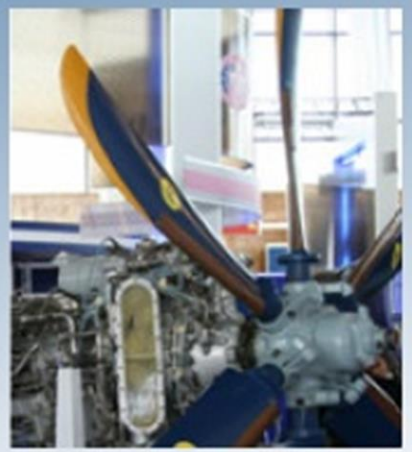


Цифровой двойник авиационного двигателя в DYNAMICS R4

TRANZIT

Научно-технический центр роторной динамики вращающихся машин
“Альфа-Транзит”

1. Что такое цифровой двойник?

- **Понятие цифрового двойника** впервые появилось в 2005 году после публикации статьи Майкла Гривса (Grieves M. W. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises //International Journal of Product Development. – 2005. – Т. 2. – №. 1-2. – С. 71-84)

- Согласно **ГОСТ Р 57700.37-2021** под **цифровым двойником** понимают: **систему**, состоящую из **цифровой модели изделия** и **двухсторонних информационных связей с изделием** или его **составными частями**

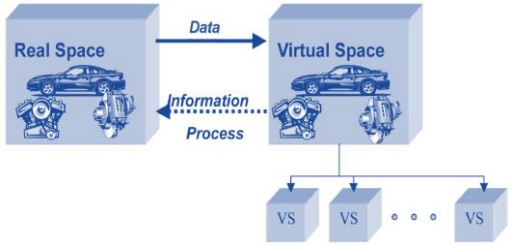
- **Цифровая модель изделия** – система **математических** и **компьютерных моделей**, а также электронных документов изделия, описывающих функциональность и поведение вновь разрабатываемого или эксплуатируемого изделия на различных стадиях жизненного цикла

- **Компьютерная модель изделия** – компьютерная модель, в которой объектом моделирования является изделие

- **Математическая модель изделия** – модель, в которой сведения об объекте моделирования представлены в виде математических символов и выражений

- Цифровой двойник разрабатывается и применяется на всех стадиях жизненного цикла изделия, изменяясь на каждой стадии

- Наполнение и функциональность цифрового двойника зависит от стадии жизненного цикла изделия



Концепция цифрового двойника
M. Grieves

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 57700.37—2021

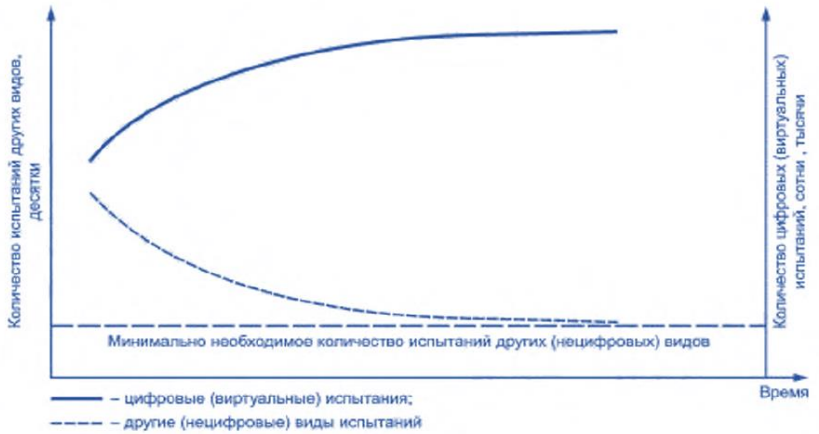
Компьютерные модели и моделирование

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ИЗДЕЛИЙ

Общие положения

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2021

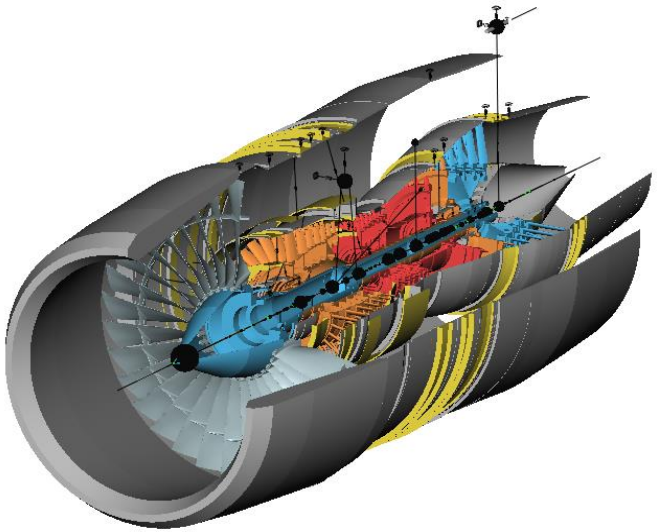


Снижение объемов испытаний за счет проведения достаточного количества цифровых (виртуальных) испытаний

Технология цифрового двойника

Стадия разработки изделия	Стадия серийного производства	Стадия эксплуатации изделия
❖ Улучшение качества проектирования изделия ❖ Обеспечение выполнения технических и тактико-технических требований ❖ Сокращение количества и проводимых испытаний опытного образца и повышение их результативности ❖ Проработка конструкторской документации изделия на технологичность	❖ Корректировка и разработка технологической документации изделия в зависимости от конкретных производственных условий	❖ Автоматизация и выполнение обоснованного планирования применения изделия в зависимости от его функциональных свойств и технического состояния ❖ Принятие обоснованных решений о техническом обслуживании и ремонте изделия при выполнении мероприятий технической эксплуатации

2. Концепция цифрового двойника авиационного двигателя в DYNAMICS R4



Геометрия двигателя

- Материалы
- Агрегаты
- Подшипники
- Демпфера

Дополнительные данные

Данные экспериментальных измерений

Данные численных экспериментов

Цифровой двойник двигателя для расчетов динамики роторов в DYNAMICS R4

Линейная модель

Уточнение модели

Нелинейная модель

Специальные расчеты

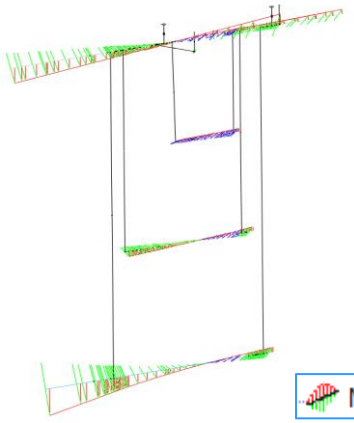
3. Линейная модель авиационного двигателя в DYNAMICS R4

- **Создание линейной модели** авиационного двигателя – это **первый важный этап** создания **модели цифрового двойника авиационного двигателя** для расчетов динамики роторов

- **Создание линейной модели** авиационного двигателя включает в себя подготовку:
  - статической модели
  - динамической модели

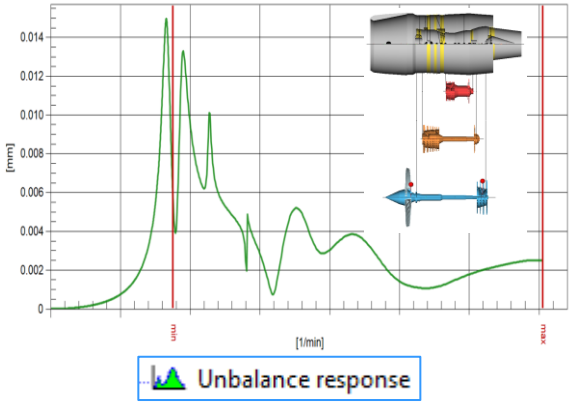
- **Создание статической модели** включает в себя:
  - Подготовку упруго-инерционной модели всей сборки двигателя
  - Проверку массовых и инерционных характеристик
  - Расчет жесткости подшипников
  - Оценку упругих и демпфирующих свойств демпферов
  - Расчет полных матриц коэффициентов жесткости не моделируемых стержневыми элементами узлов силовой схемы двигателя

- **Работа с динамической моделью** позволяет проводить такие расчеты как:
  - Расчет собственных частот с учетом вращения
  - Расчет критических частот
  - Расчет карт собственных частот
  - Расчеты дисбалансного поведения
  - Параметрический анализ
  - Анализ распределения потенциальной и кинетической энергии

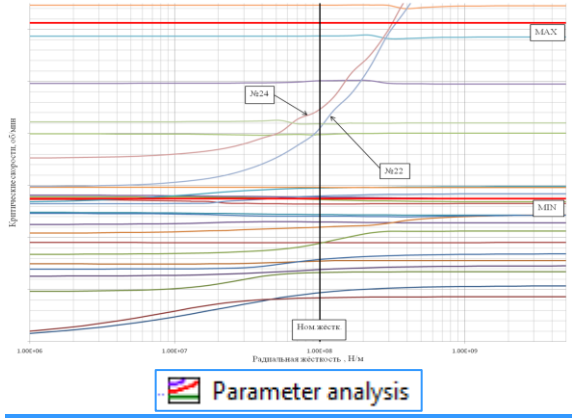


Freq [rpm]	Freq [Hz]
2.9	0.0
67.4	1.1
2556.4	42.6
2556.4	42.6
14121.2	235.4
14121.2	235.4
34508.6	575.1
34508.6	575.1
39472.9	657.9
39472.9	657.9

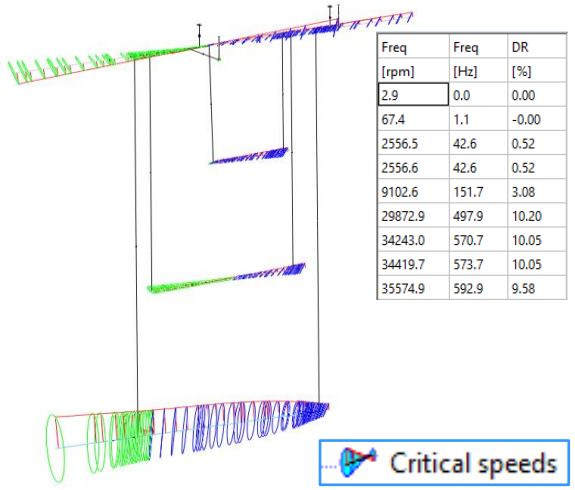
Расчет собственных частот (с учетом вращения и без)



Дисбалансное поведение

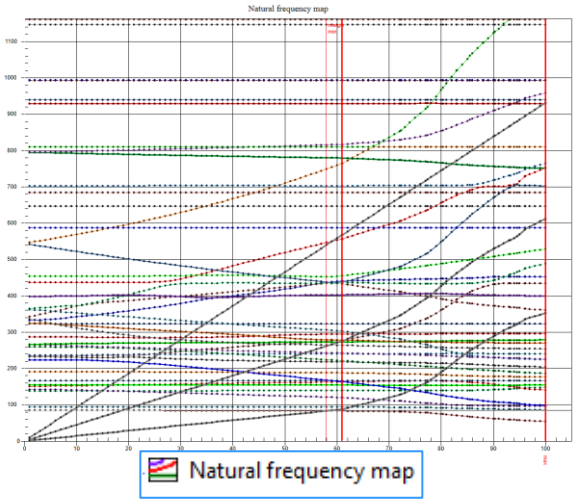


Параметрический анализ

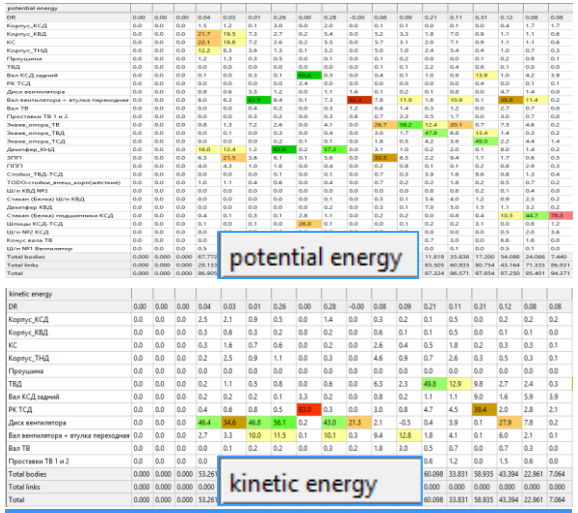


Freq [rpm]	Freq [Hz]	DR [%]
2.9	0.0	0.00
67.4	1.1	-0.00
2556.5	42.6	0.52
2556.6	42.6	0.52
9102.6	151.7	3.08
29872.9	497.9	10.20
34243.0	570.7	10.05
34419.7	573.7	10.05
35574.9	592.9	9.58

Расчет критических скоростей



Карта собственных частот



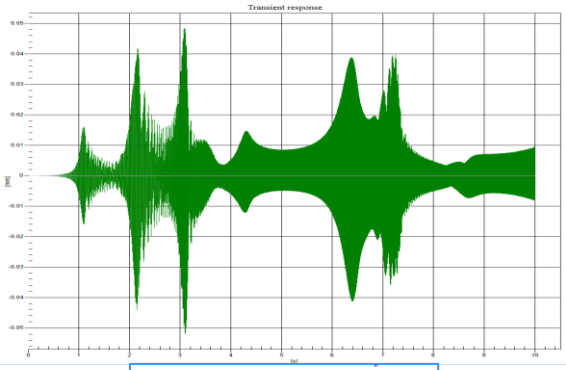
Анализ распределения потенциальной и кинетической энергии

4. Нелинейная модель авиационного двигателя в DYNAMICS R4

- **Переход к нелинейной модели авиационного двигателя –** следующий этап создания модели цифрового двойника авиационного двигателя для расчетов динамики роторов

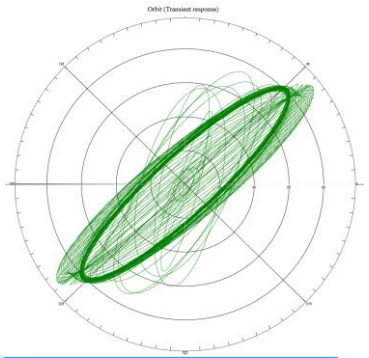
- **Создание нелинейной модели** авиационного двигателя – производится на базе **линейной модели,** для чего в динамической структуре двигателя выделяются узлы двигателя обладающие нелинейными характеристиками

- **Построение нелинейной модели** производится с использованием **библиотеки нелинейных элементов** (подшипников/демпферов/ шлицевых/зубчатых соединений)



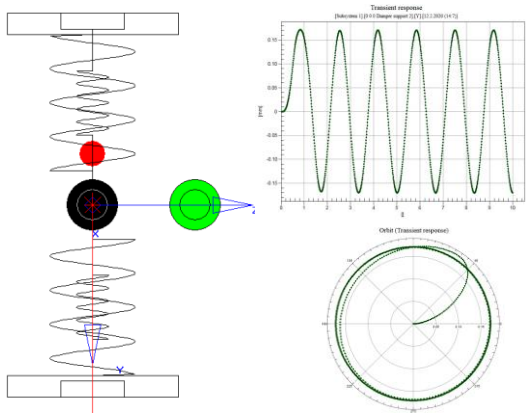
Transient response

Дисбалансное поведение

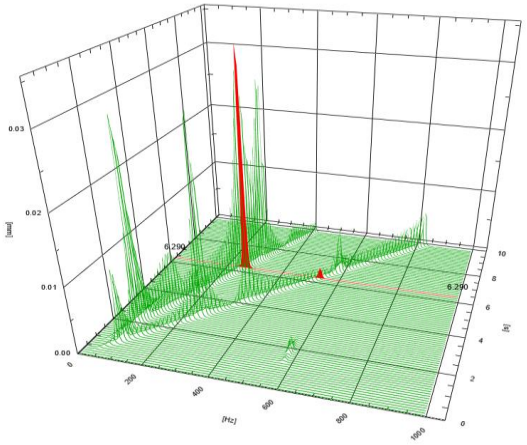


Orbit (Transient response)

Исследование орбит колебаний

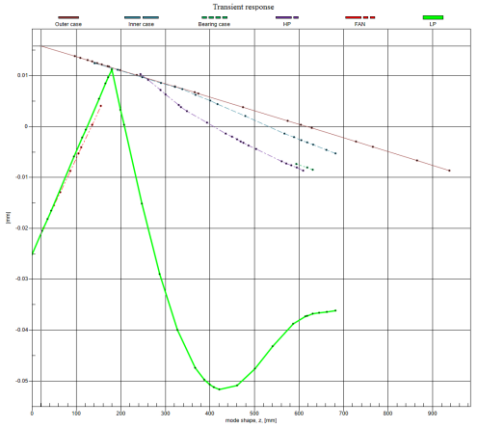


Моделирование работы демпферов



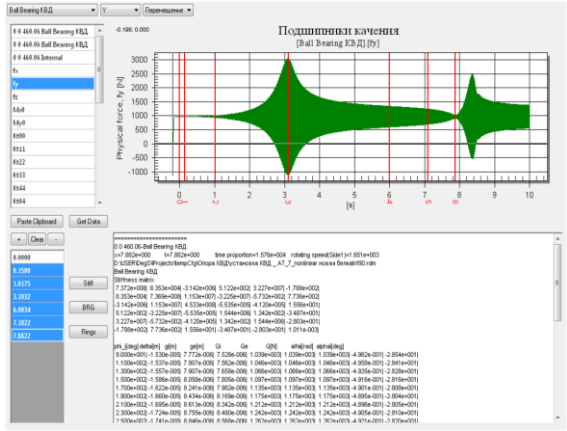
Waterfall diagram

Исследование каскадных диаграмм



Mode shape

Анализ форм вынужденных колебаний



Rolling bearings info

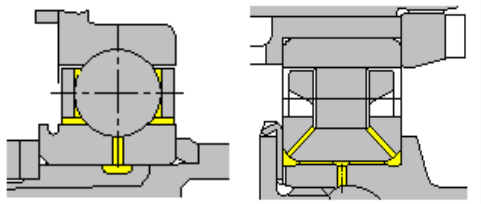
Моделирование работы подшипников качения

5. Уточнение модели авиационного двигателя в DYNAMICS R4

- **Исходные линейная** и построенная на ее базе **нелинейная модели** авиационного двигателя могут потребовать **уточнения отдельных элементов конструкции**

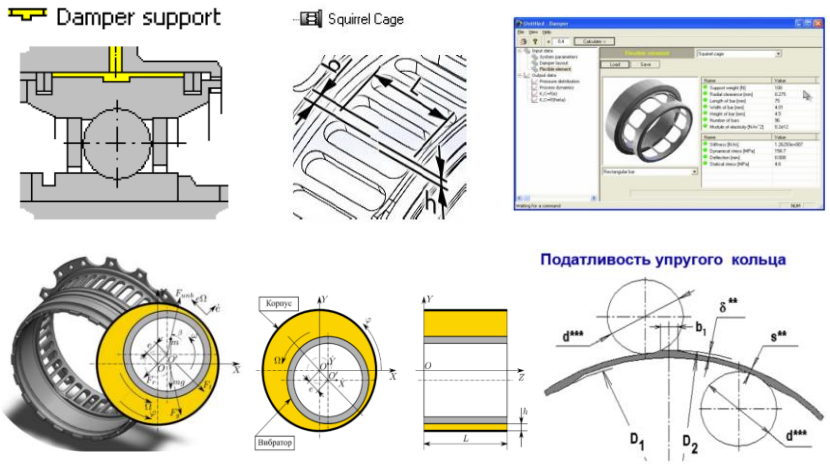
- **Уточнение модели** может **производиться многократно,** по мере изменения и совершенствования конструкции отдельных узлов и элементов двигателя, а также при получении обновленных данных численных и экспериментальных измерений

Проверка массовых и инерционных характеристик



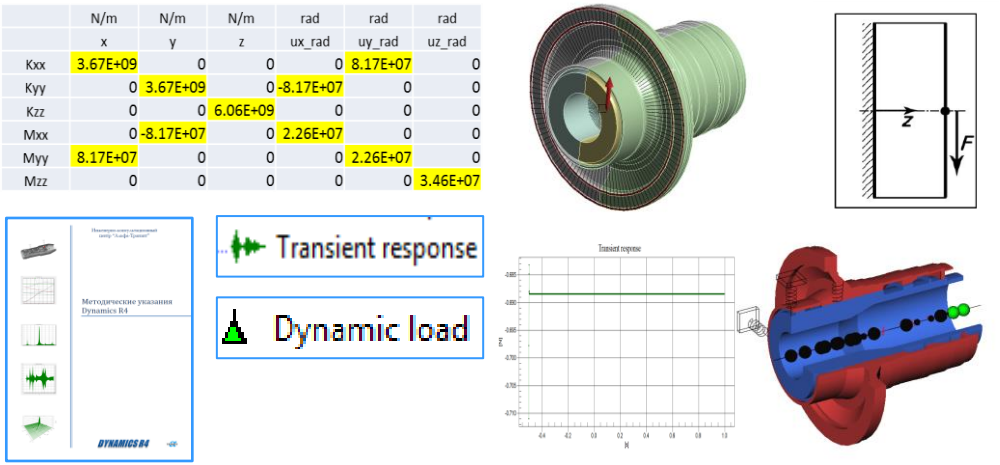
Оценка жесткости подшипников

Настройка модели на результаты модальных испытаний



Оценка упругих и демпфирующих свойств демпферов

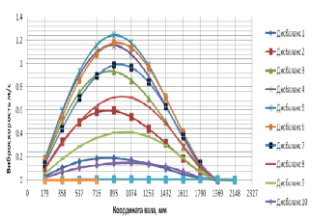
	N/m	N/m	N/m	rad	rad	rad
	x	y	z	ux_rad	uy_rad	uz_rad
Kxx	3.67E+09	0	0	0	8.17E+07	0
Kyy	0	3.67E+09	0	-8.17E+07	0	0
Kzz	0	0	6.06E+09	0	0	0
Mxx	0	-8.17E+07	0	2.26E+07	0	0
Myy	8.17E+07	0	0	0	2.26E+07	0
Mzz	0	0	0	0	0	3.46E+07



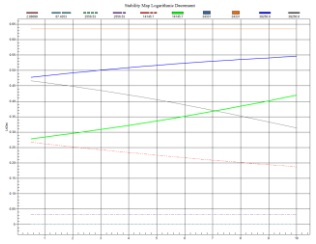
Расчет полных матриц коэффициентов жесткости для деталей роторов и корпусов двигателя с использованием КЭ моделей

6. Специальные расчеты для модели авиационного двигателя в DYNAMICS R4

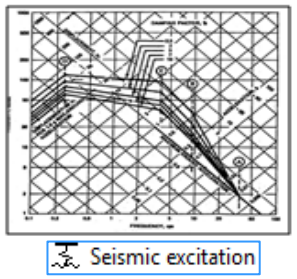
- Кроме **стандартного набора задач в линейной** и **нелинейной постановке**, цифровой двойник авиационного двигателя для расчетов динамики роторов может быть использован для **большого спектра специальных задач** в соответствии с требованиями инженеров-конструкторов



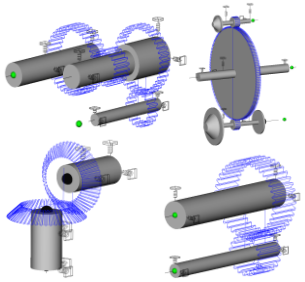
Расчет ДКВ



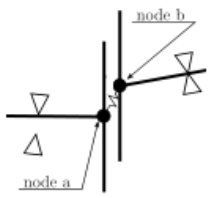
Оценка устойчивости ротора



Сейсмические нагрузки

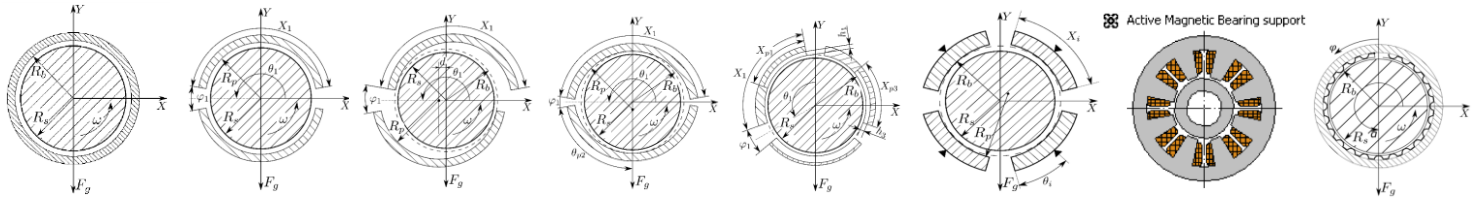


Зубчатые соединения

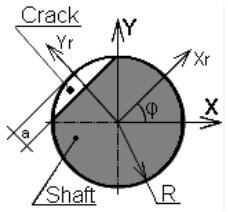


Несоосность валов роторов

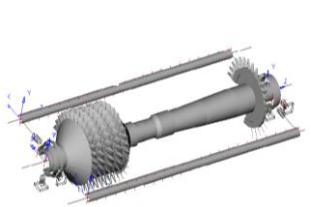
DynFB



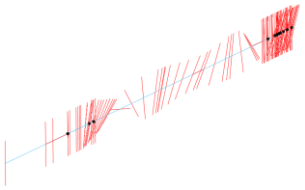
Расчет подшипников (скольжения/магнитных/газодинамических)



Трещина в роторе

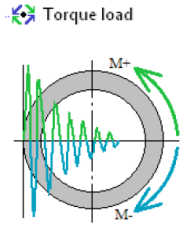


Подготовка технологических моделей

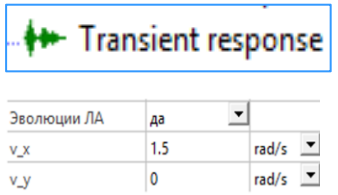


Крутильные колебания

Обрыв лопатки

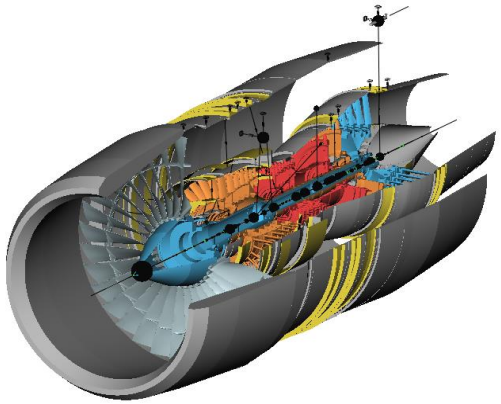


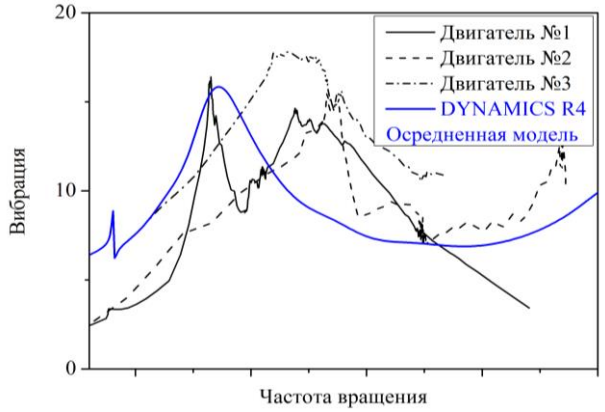
Короткое замыкание



Инерционные нагрузки при эволюциях самолетов

7. Преимущества использования цифрового двойника авиационного двигателя в DYNAMICS R4

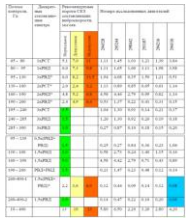




Данные экспериментальных измерений

Цифровой двойник двигателя для расчетов динамики роторов в DYNAMICS R4

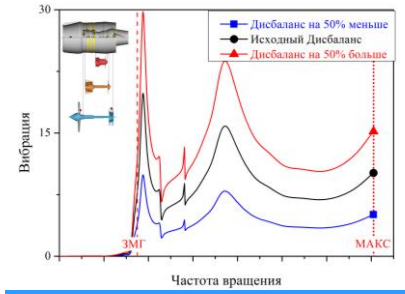
Уточнение модели



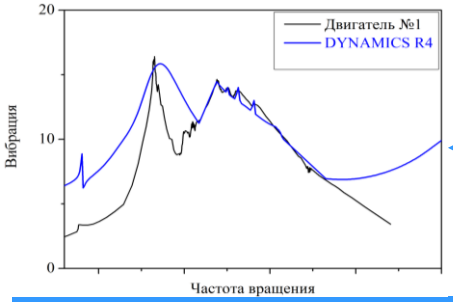
Подготовка Вибропаспорта двигателя

Unbalance load
Blade loss
Dynamic load
Torque load
Clearance
Coupling
Crack
Misalignment (shafts)

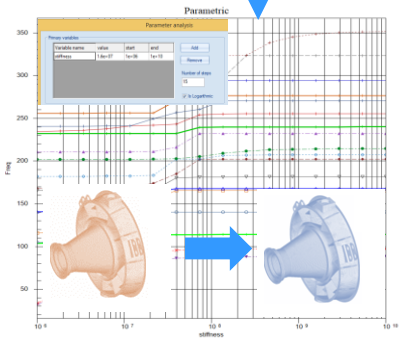
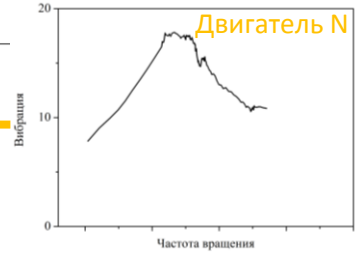
Исследование влияния дефектов на виброактивность двигателя



Разработка рекомендаций по снижению виброактивности



Настройка модели на конкретный номер двигателя



Оптимизация динамической структуры двигателя