Предложение по организации статических и модальных испытаний для корпусов двигателей и их элементов

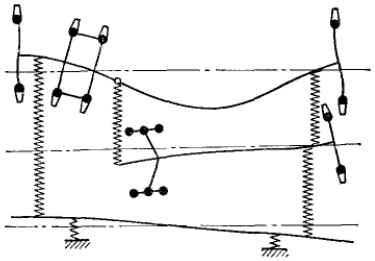
TRANZIT

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

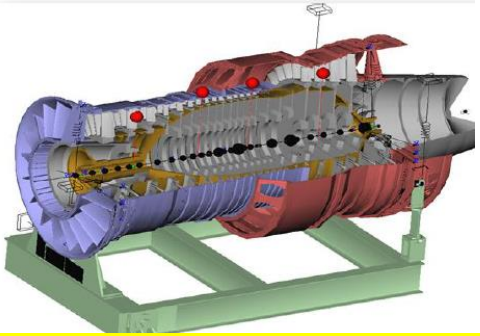
Инженер
ООО «Альфа-Транзит»
Шапошников К.В.

1. Актуальность проблемы

- Жесткость корпусов и силовых элементов конструкции двигателя может существенно влиять на определение критических частот системы ротор-опоры-корпус
- Ввиду большого количества соединений между деталями и узлами корпусов современных двигателей, а также применение различных материалов для них, расчетным путем оценить уровень их демпфирования реализуемый в элементах статора практически невозможно
- Опыт эксплуатации отечественных ГТУ таких как ГТД-110 (ОДК-Сатурн), ГТН-16 (УТЗ) показал, что недостаточное внимание к учету жесткости корпусов двигателя может перерасти в хроническую проблему повышенных вибраций машины наблюдаемых в эксплуатации

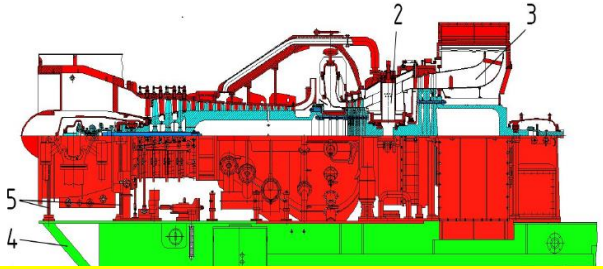


Системы ротор-опоры-корпус



Модель двигателя ГТД-110 созданная специалистами ООО "Альфа-Транзит" в Dynamics R4

Для решения вышеописанных проблем компания ООО "Альфа-Транзит" рекомендует проведение экспериментальных измерений по оценке жесткости корпусов двигателя на этапах его проектирования и доводки



Продольный разрез ГТН-16 (УТЗ)

2. Рекомендуемые виды испытаний

Компания ООО "Альфа-Транзит" рекомендует проведение следующих видов испытаний для корпусов опор и всего статора двигателя без роторов:

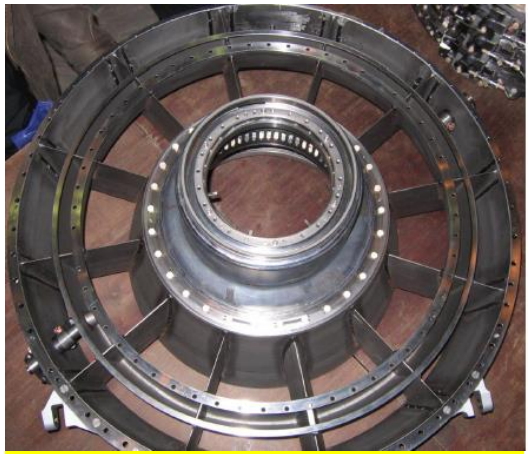
1) Статические испытания для оценки статической жесткости
2) Модальные испытания свободно подвешенных корпусов для определения их собственных частот и форм колебаний
3) Модальные испытания корпусов без роторов с имитацией их реального закрепления в составе летательного аппарата или на раме для ГТД наземного типа для определения их динамической жесткости и оценки демпфирования

3. Объект испытаний

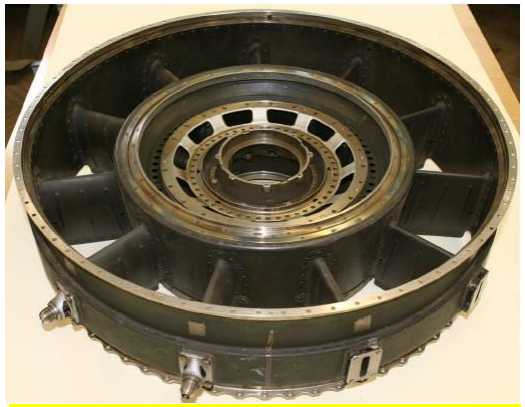
Для двигателя АЛ-31Ф и его модификаций объектами испытаний могут быть следующие корпуса двигателя:

- Корпусом передней опоры (отдельно или в составе статора вентилятора)
- Промежуточный корпус
- Корпус опоры турбины НД
- Весь корпус в сборе с вынутым ротором

Статор вентилятора



Промежуточный корпус



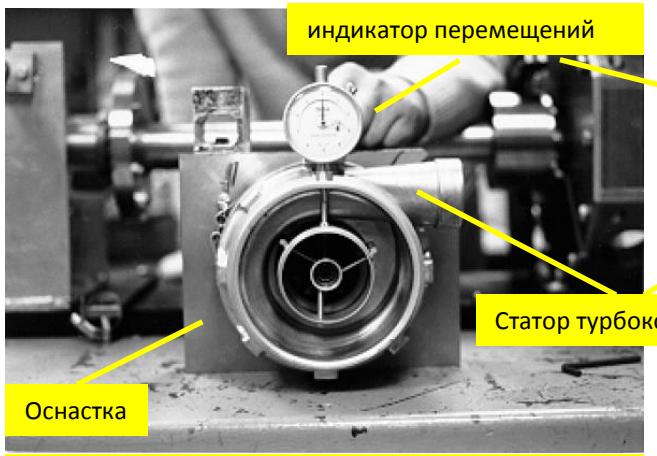
Корпус опоры турбины НД

4. Статические испытания промежуточных корпусов двигателей и их статоров

подготовил: Шапошников К.В. /
kvshaposhnikov@alfatran.com

4.1 Принцип проведения статических испытаний корпусов для определения их жесткости

- При помощи дополнительной оснастки обеспечивается крепление промежуточных корпусов двигателя или всего статора имитирующее их реальное закрепление на корпусе летательного аппарата или раме ГТД наземного применения
- На стойки жесткость которых требуется определить устанавливается индикатор перемещений
- Для измерения радиальной и осевой жесткости корпуса нагружается статической массой в вертикальном, горизонтальном или осевом направлении по отдельности. После нагружения производится измерение перемещений в направлении нагружения от действия приложенной нагрузки
- Для измерения жесткости на кручение необходимо прикладывать момент и производить измерение углов закрутки по поверхностям где происходило нагружение
- Измерение жесткости на кручение позволяет оценить влияние массово инерционных характеристик агрегатов расположенных на корпусах двигателя
- Во всех случая нагружения жесткость определяется расчетным путем по данным измерений



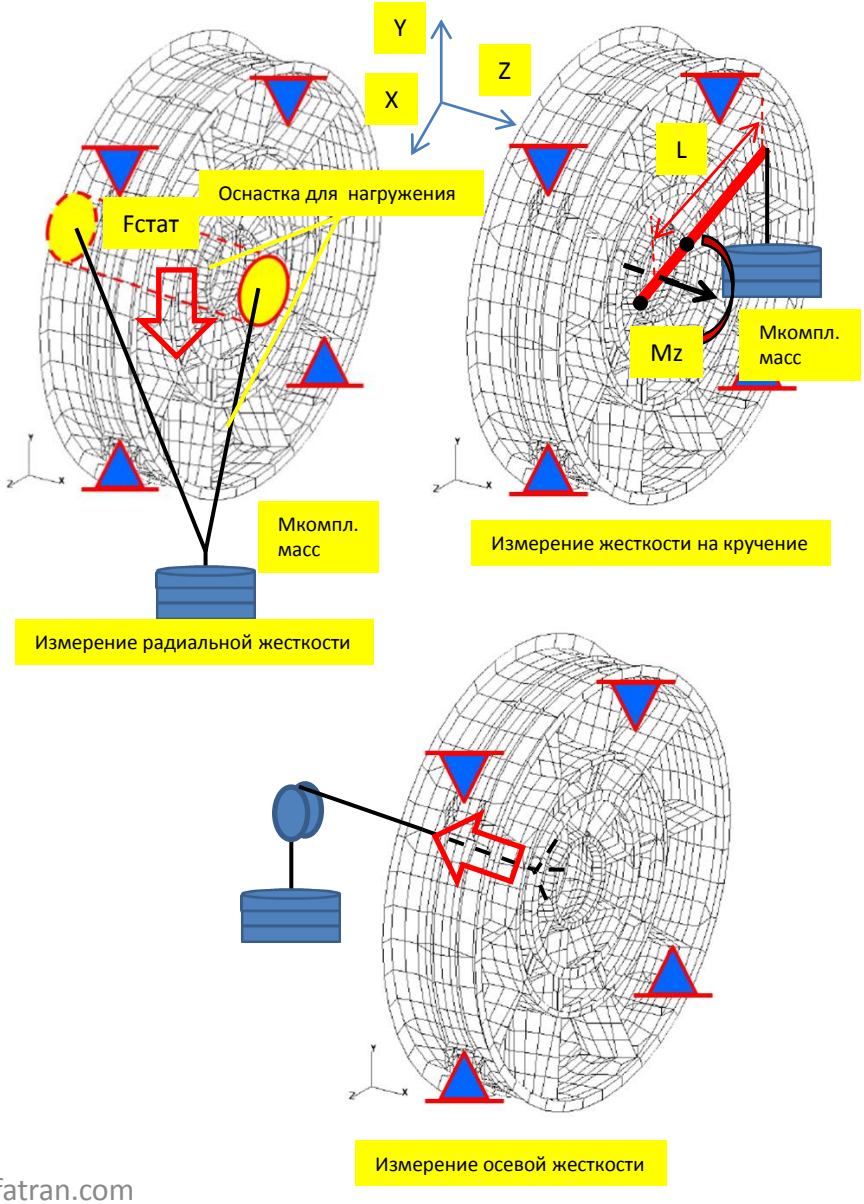
Пример организации измерений статической жесткости для статора турбокомпрессора

<u>Необходимое оборудование</u>

- Дополнительная оснастка для крепления детали
- Индикаторы перемещений : электронные/часового типа (например ИЧ02, диапазон измерений от 0 до 2 мм)
- Тросы для подвеса статических масс
- Комплект статических масс

4.2 Подготовка к статическим испытаниям корпусов

- Выполнение предварительных численных расчетов: выбор статической массы для эксперимента проводится по данным статического расчета для каждого испытываемого корпуса по отдельности с учетом того, что максимальные напряжения нагружаемого корпуса не превышают предел упругости материала
- Подготовка оснастки для каждого испытываемого корпуса имитирующей реальное закрепление в статоре или на корпусе летательного аппарата/раме ГТД наземного применения
- Подготовка оснастки для осуществления статического нагружения опоры: имитатор вала – для равномерного нагружения опоры в необходимом направлении, комплект статических масс и тросы для их подвески
- Подготовка измерительной аппаратуры – индикаторы перемещений, индикаторы измерения углов поворотов
- Для измерения радиальной и осевой жесткости определяют силу статического нагружения (Fстат) и замеряют вызванные ей перемещения опоры. Если оснастка имеет значительную массу ее также необходимо учитывать при определении силы статического нагружения при измерении радиальной жесткости в вертикальной плоскости
- Для измерения жесткости на кручение определяют момент (может быть создан комплектом статических масс расположенных на оснастке с плечом L) вокруг соответствующей оси и производят контроль углов поворота нагружаемой поверхности корпуса
- Во всех случаях нагружения, эксперимент проводят постепенно увеличивая массу нагружения, строя кривую зависимости перемещений/углов поворота опоры от массы нагружения. Так как максимально допустимые массы подбираются с учетом недопущения пластических деформаций, то полученная кривая должна иметь линейную зависимость. Если полученная кривая будет иметь нелинейный вид, причины нелинейного поведения (недостаток конструкции, погрешности измерения, проблемы расчетов) следует уточнить



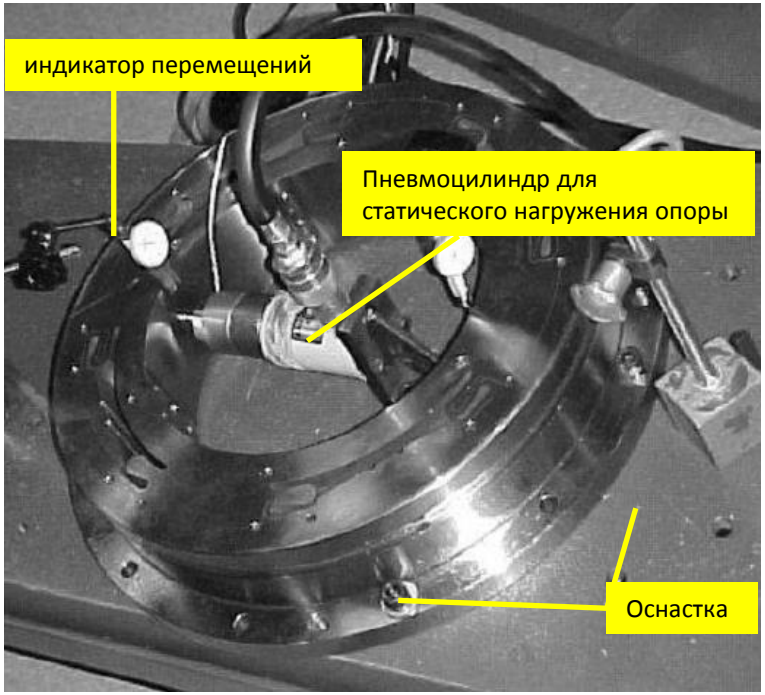
4.3 Применение специальных испытательных стендов

- Организация статических испытаний корпусов для измерения их статической жесткости может выполняться на специальных измерительных стендах
- Организация нагружения на стендах может осуществляется при помощи пневмо- или электромеханических цилиндров

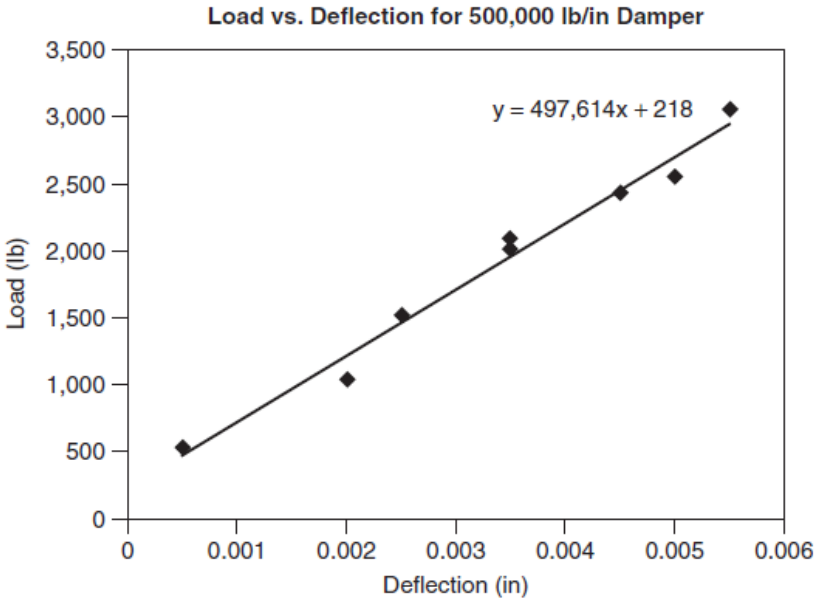
Электроцилиндр на базе планетарной ролико-винтовой передачи для создания нагружений

Система нагружения специального стенда для статических испытаний двигателя ПД-14 в АО «ОДК-Авиадвигатель»

4.4 Пример статических испытаний



Пример организации статических испытаний для корпуса опоры со встроенным демпфером описанный в книге Vance J.M.



Зависимость перемещений опоры от приложенной нагрузки

- Результаты испытаний показывают практически линейную зависимость измеренных перемещений от величины приложенной нагрузки
- Определенная по данным испытаний фактическая статическая жесткость (497 614 lb/in) отличается от проектной (500 000 lb/in) не более чем на 1%

4.5 Преимущества статических испытаний корпусов

Результаты испытаний позволят

- Определить действительные значения статической жесткости для корпусов двигателя и всего статора в сборе и сопоставить их с проектными
- Оценить точность МКЭ моделей соответствующих корпусов двигателя
- Проверить матрицы жесткости используемые в расчетах динамики роторов при моделировании в Dynamics R4

5. Модальные испытания по определению собственных частот и форм колебаний свободно подвешенных корпусов двигателей и их статоров

подготовил: Шапошников К.В. /
kvshaposhnikov@alfatran.com

5.1 Необходимое оборудование для проведения модальных испытаний

Для успешного проведения модальных испытаний необходимо наличие следующего оборудования:

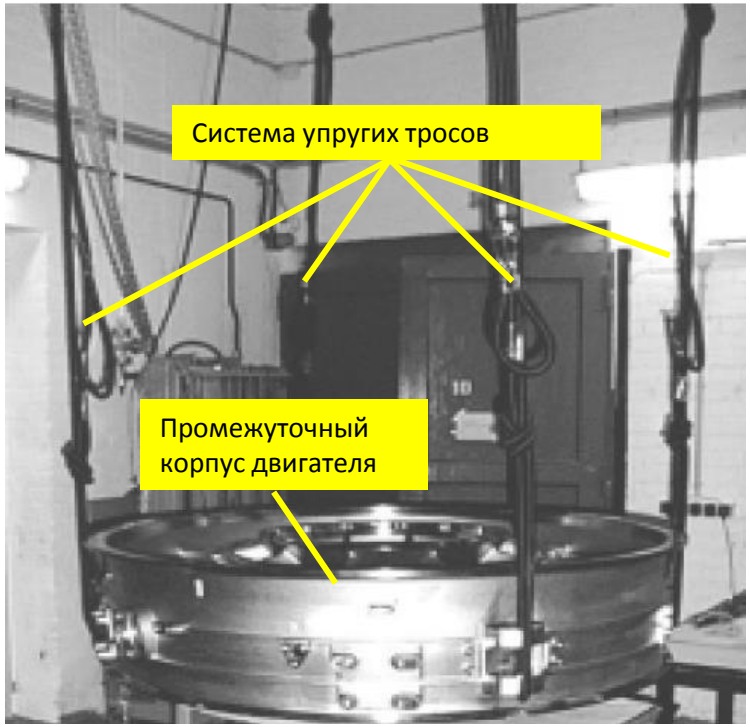
- Специальные многоканальной системы для сбора и анализа данных измерений
- Комплект акселерометров
- Ударные молотки (большие/средние) с набором насадок (металл, алюминий, нейлон), дополнительных масс или Вибровозбудитель
- Канаты/тросы для организации подвеса корпусов

Многоканальная система сбора и анализа данных

Ударные молотки

Вибровозбудители

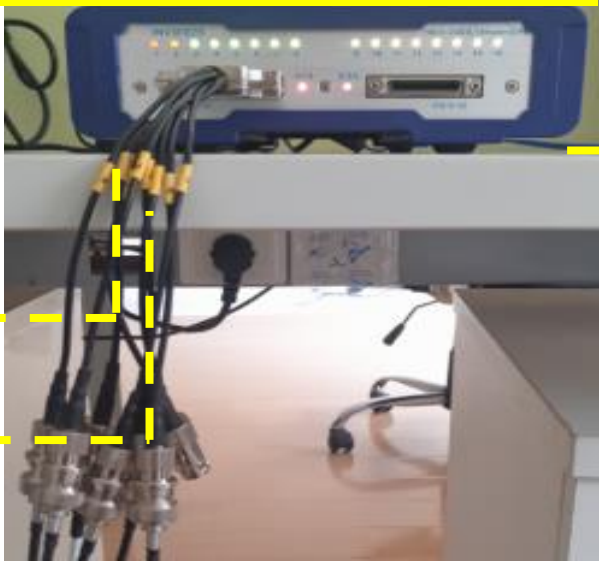
Акселерометры



Пример подготовки к модальным испытаниям промежуточного корпуса одного из двигателей BMW Rolls-Royce Aero Engines описанный в статье Schedlinski C., M. Link и A. Schönrock

5.2 Подготовка оборудования

Многоканальная система сбора данных

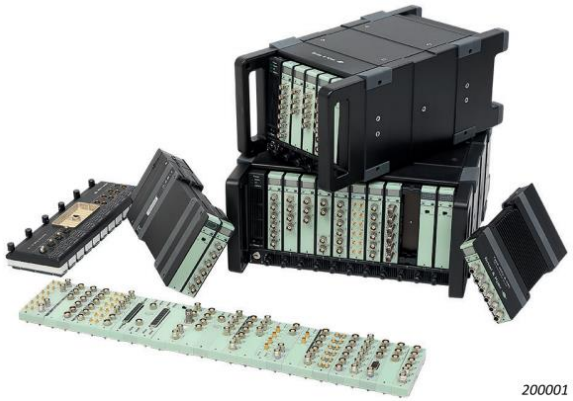


ПК с установленной системой записи и анализа данных

<u>Пример организации оборудования для проведения модальных испытаний</u>

- Акселерометры Kistler 8774B050A (Швейцария)
- COINV Dongfang - INV3062 16-ти канальная система сбора измерений (Китай)
- Ударный молоток COINV Dongfang INV9313 (Китай)
- Система обработки и анализа - COINV Dongfang DASP (Китай)

5.3 Системы сбора данных



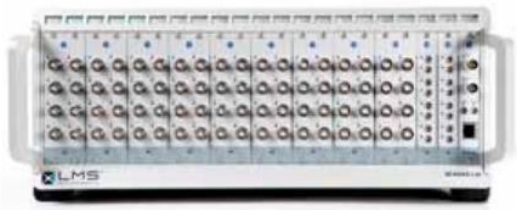
Brüel & Kjær (Дания)

Kistler (Швейцария)

COINV Donfang (Китай)

Data Physics (США)

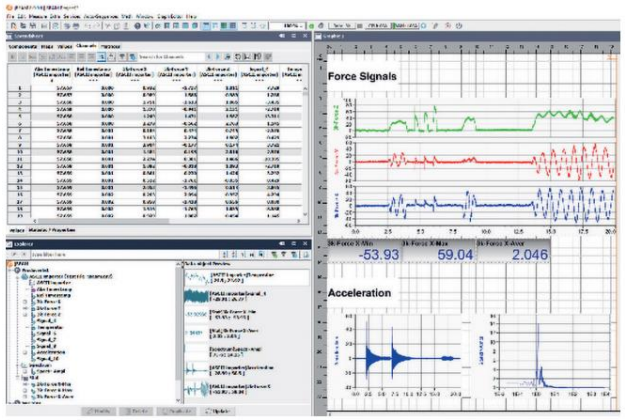
Crystal Instruments (США)



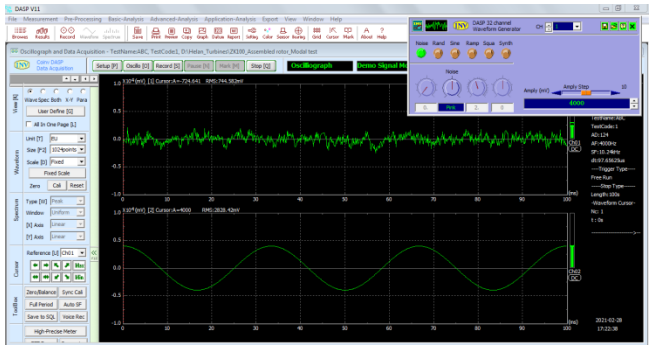
LMS International
Siemens (Германия)

5.4 Системы анализа данных

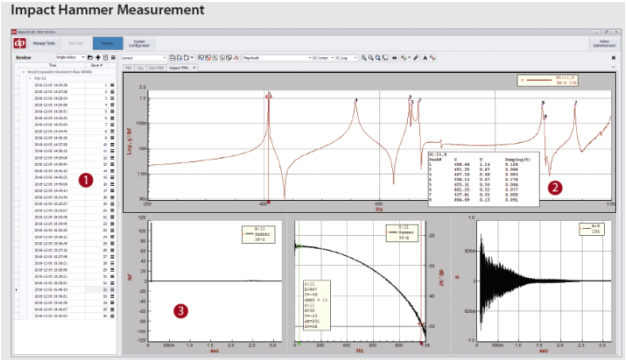
PULSE Reflex
Brüel & Kjær (Дания)



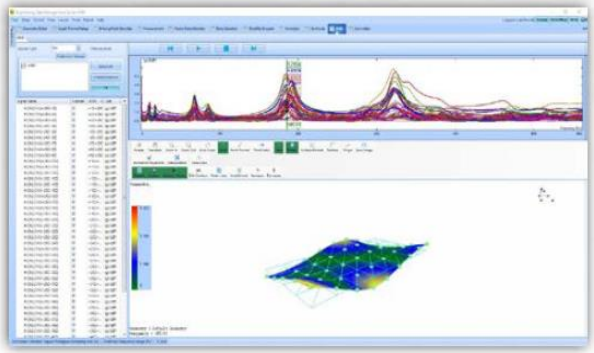
KiStudio Lab with jBEAM
Kistler (Швейцария)



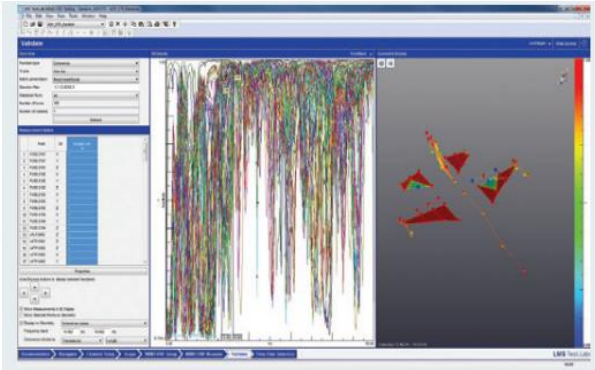
DASP - COINV Dongfang (Китай)



DP SignalCalc
Data Physics (США)



EDM
Crystal Instruments (США)

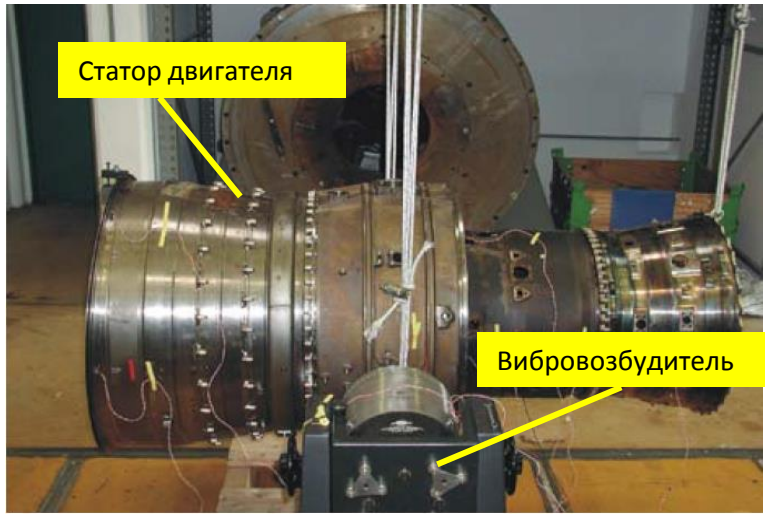


LMS Test.Lab
Siemens (Германия)

5.5 Способы организации вибровозбуждения

- Вибровозбуждение может производиться ударным молотком или вибровозбудителем

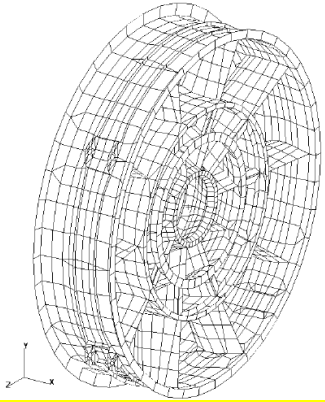
Ударный молоток		Вибровозбудитель	
(+)	(-)	(+)	(-)
➢ Простота ➢ Относительно небольшая стоимость ➢ Быстрота подготовки оборудования	➢ В диапазоне высоких частот хуже точность измерений ➢ Для тяжелых роторов и их статоров требуются молотки больших размеров	➢ В диапазоне высоких частот точность измерений лучше ➢ Возможно задавать различные виды сигналов возбуждения	➢ Большая стоимость в сравнении с модальными молотками ➢ Более длительное время подготовки (необходимо дополнительное закрепление стингера на роторе, выравнивание и центровка



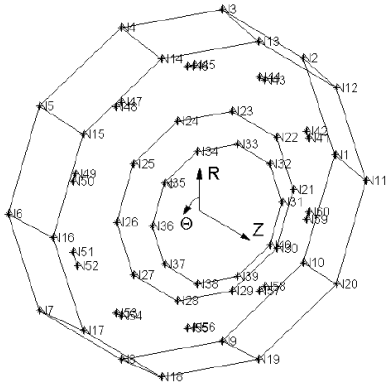
Пример подготовки к модальным испытаниям статора авиационного двигателя в рамках Европейского проекта CERES с организацией возбуждения при помощи вибровозбдителя

5.6 Принцип проведения модальных испытаний свободно подвешенных корпусов двигателя

- Выполняется предварительный численный расчет МКЭ модели промежуточного корпуса или всего статора при нормальной температуре для определения собственных частот, форм колебаний и выбора мест расположения датчиков
- Подвешивание реального корпуса при помощи системы упругих тросов. Обеспечение его стабильного пространственного положения без качаний и поворотов
- Установка акселерометров для проведения измерений
- С помощью ударного молотка или вибровозбудителя производится возбуждение свободно подвешенного корпуса для идентификации частот его свободных колебаний
- По данным измерений, проведенным при нормальной температуре, производится построение форм колебаний и оценка модального демпфирования для соответствующих форм



Пример МКЭ модели для промежуточного корпуса авиационного двигателя BMW Rolls-Royce Aero Engines



Пример расположение датчиков (60 штук) на промежуточном корпусе авиационного двигателя

5.7 Практическое применение модальных испытаний в авиадвигателестроении

- В статье Schedlinski, Link и A. Schönrock приведён пример коррекции МКЭ модели промежуточного корпуса опоры авиационного двигателя BMW Rolls-Royce по данным модального эксперимента
- Сопоставление проводилось при помощи MAC критерия*

$$MAC(r,q)=\frac{\left|\{\varphi_A\}_r^T\{\varphi_X\}_q\right|^2}{\left(\{\varphi_A\}_r^T\{\varphi_A\}_r\right)\left(\{\varphi_X\}_q^T\{\varphi_X\}_q\right)}.$$

The MAC is calculated as the normalized scalar product of the two sets of vectors $\{\varphi_A\}$ and $\{\varphi_X\}$

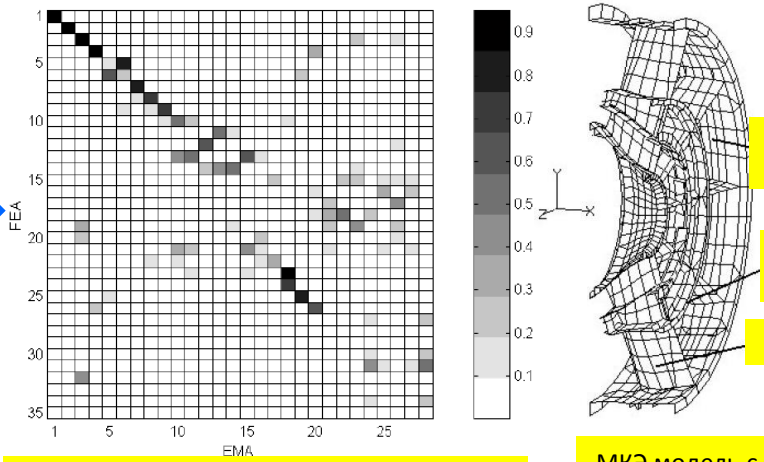
- Анализ расчетных и экспериментальных данных позволил значительно улучшить точность модели, а также выявить элементы конструкции наиболее сильно влиявшие на расхождение результатов

МКЭ модель | Эксперимент | Расхождение | MAC критерий

Table 2: IMC initial correlation

FEA no.	EMA no.	freq. [Hz] FEA	freq. [Hz] EMA	deviation [%]	MAC [%] (> 60 %)
1	1	128.15	127.38	0.61	94.75
2	2	136.71	132.64	3.07	95.05
3	3	152.64	195.78	-22.03	89.11
4	4	236.47	213.36	10.83	90.79
6	5	241.96	225.31	7.39	63.92
5	6	236.83	242.04	-2.15	79.06
7	7	243.57	249.12	-2.23	85.09
8	8	304.01	310.14	-1.97	68.21
9	9	304.95	311.80	-2.20	66.62
12	12	332.82	348.10	-4.39	62.47
13	15	336.81	379.35	-11.21	63.13
23	18	421.79	413.33	2.05	89.59
25	19	469.53	444.81	5.56	81.70
26	20	484.31	477.06	1.52	65.00

Начальное соотношение МКЭ модели и эксперимента



MAC матрица для начальной МКЭ модели

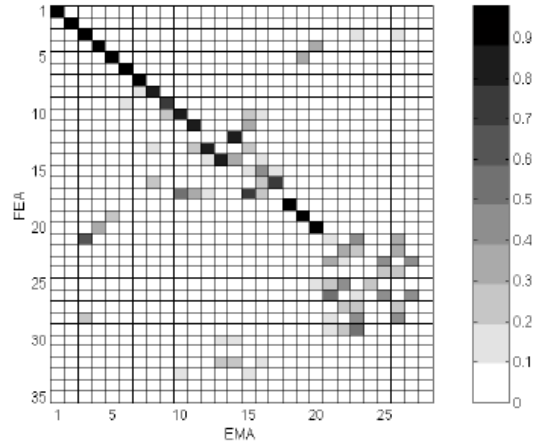
МКЭ модель с выделенными элементами которые использовались для коррекции модели

МКЭ модель | Эксперимент | Расхождение | MAC критерий

Table 3: IMC correlation after iteration step 8

FEA no.	EMA no.	freq. [Hz] FEA	freq. [Hz] EMA	deviation [%]	MAC [%] (> 60 %)
1	1	127.27	127.38	-0.08	94.25
2	2	137.61	132.64	3.75	95.60
3	3	182.43	195.78	-6.82	94.88
4	4	228.88	213.36	7.27	96.76
5	5	240.64	225.31	6.80	96.84
6	6	249.35	242.04	3.02	96.21
7	7	252.05	249.12	1.18	95.56
8	8	314.10	310.14	1.28	84.68
9	9	325.90	311.80	4.52	68.86
10	10	346.02	326.33	6.03	84.76
11	11	349.65	341.36	2.43	78.94
13	12	362.89	348.10	4.25	79.38
14	13	366.01	351.44	4.15	79.09
12	14	354.28	355.08	-0.23	78.51
17	15	403.76	379.35	6.44	75.71
16	17	398.18	393.85	1.10	77.30
18	18	428.78	413.33	3.74	97.70
19	19	463.28	444.81	4.15	93.61
20	20	481.77	477.06	0.99	93.88

Соотношение откорректированной МКЭ модели и эксперимента



МАС матрица для начальной МКЭ модели

*MAC – Modal assurance criterion

5.8 Преимущества модальных испытаний свободно подвешенных корпусов двигателя

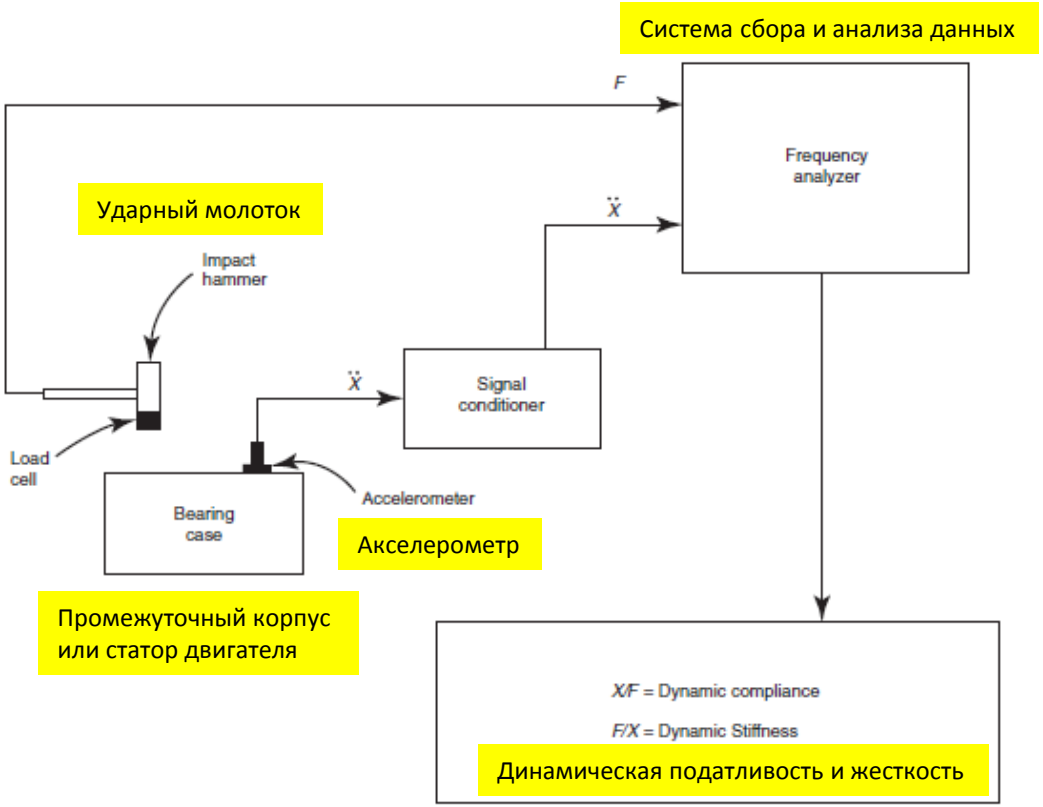
Результаты испытаний позволят:

- Определить собственные частоты и формы колебаний промежуточных корпусов и статора двигателя
- Оценить уровень демпфирования в корпусах двигателя (логарифмический декремент, модальное демпфирование)
- Оценить влияние сборки на собственные частоты и формы колебаний промежуточных корпусов и статора двигателя
- Оценить точность численных моделей с целью их дальнейшего улучшения

6. Модальные испытания промежуточных корпусов опор или статора двигателя с имитацией его реального закрепления для определения их динамической жесткости и оценки демпфирования

6.1 Принцип организации испытаний

- При ударном возбуждении корпуса двигателя встроенный в ударный молоток датчик силы регистрирует ее величину, одновременно с возбуждением происходит регистрация отклика конструкции установленными на нее датчиками – акселерометрами
- Система сбора и анализа данных производит дальнейшее их двойное интегрирование, что позволяет перейти от ускорений измеренных датчиками к перемещениям для оценки податливости конструкции
- Ударное возбуждение проведенное вблизи датчика, в плоскости его расположения позволяет измерить динамическую податливость тестируемой конструкции в направлении в котором производится возбуждение и измеряется отклик.



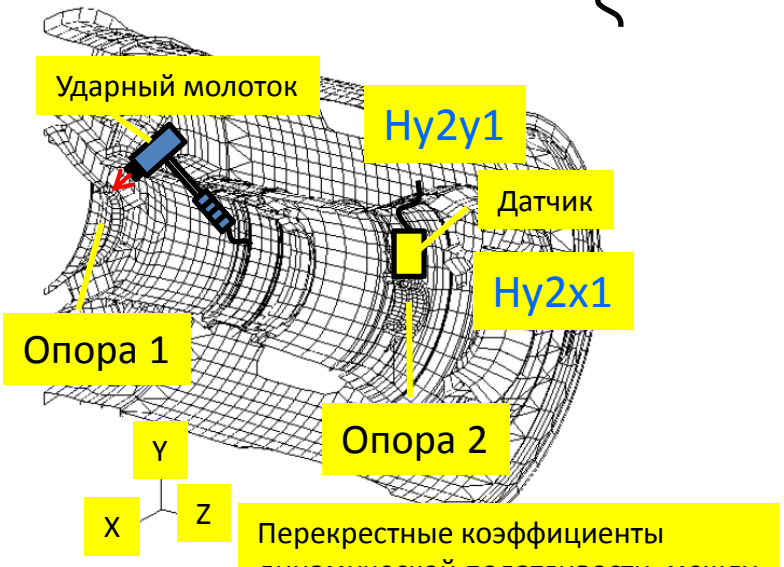
Принцип проведения модального теста

- По данным измерений, по результатам отклика всех установленных на корпусе датчиков может быть построена его форма колебаний

6.2 Виды динамической податливости

- Коэффициенты динамической податливости, которые представляют отношение отклика опоры измеренного датчиком от возбуждения произведенного в плоскости расположения датчика (Hxx) принято считать прямыми коэффициентами податливости опоры
- Коэффициенты динамической податливости, которые представляют отношение отклика опоры измеренного датчиком от возбуждения произведенного ортогонально плоскости расположения датчика (Hyx) принято считать перекрестными коэффициентами податливости опоры
- Коэффициенты динамической податливости, которые представляют отношение отклика опоры от возбуждения произведенного на другой опоре называют перекрестными коэффициентами влияния между опорами
- В свою очередь перекрестные коэффициенты влияния между опорами также могут быть прямыми (Hy2y1) или перекрестными (Hy2x1)

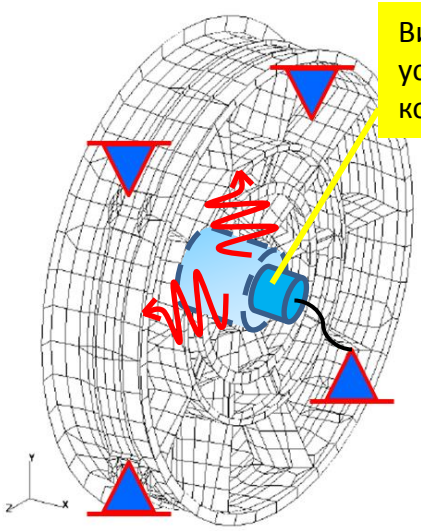
Коэффициенты динамической податливости для одной опоры



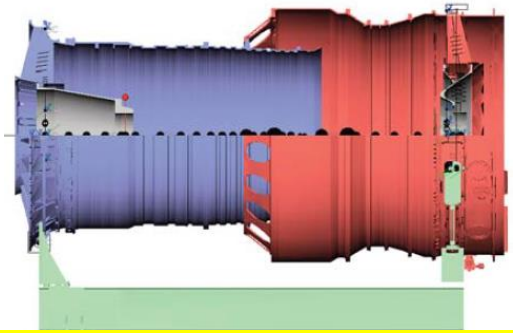
Перекрестные коэффициенты динамической податливости между отдельными опорами

6.3 Применение кругового вибровозбуждения для измерения динамической податливости и жесткости корпусов опор

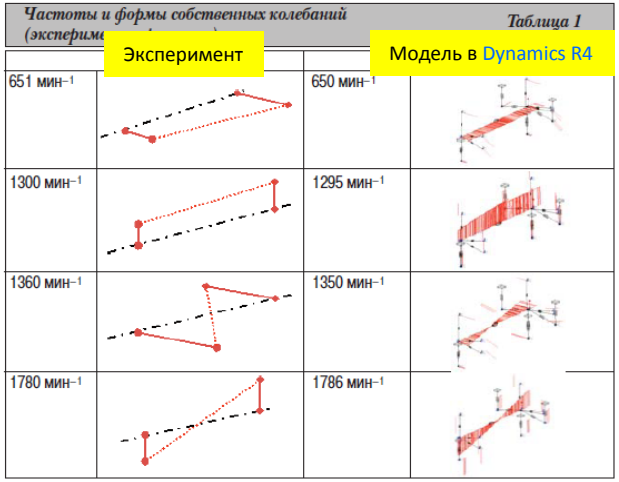
- Измерение динамической податливости и жесткости для корпусов опор и статора двигателя возможно с применением осе-центрального возбуждения создаваемого вибровозбудителем установленным в саму опору
- Вибровозбудитель жестко фиксируется в опоре податливость которой определяется, при этом измерения и регистрация параметров выполняется одновременно во всех опорах, позволяя оценить влияние одной опоры на другие
- В ходе измерений вибратор создает круговую динамическую нагрузку
- Подобным образом проводилось исследование динамической жесткости опор ГТД-110 в начале 2000-х годов
- Данные измерений использовались специалистами компании ООО "Альфа-Транзит" при создании и валидации моделей для ГТД-110. По результатам работы опубликована статья в журнале «Газотурбинные технологии»



Пример промежуточного корпуса с имитацией реального закрепления



Модель статора двигателя ГТД-110 созданная специалистами ООО "Альфа-Транзит« в Dynamics R4



Валидация модели двигателя ГТД-110 по данным эксперимента

6.4 Использование вибровозбудителя установленного на корпус опоры для измерения динамической жесткости в условиях эксплуатации

- В статье R. Subbiah описан пример использования вибровозбудителя установленного на корпус опор паровых турбин большой мощности для турбин Siemens
- Вибровозбудитель применялся для измерения динамической жесткости опор с разгоном машины и выводом ее на рабочий режим
- По результатам измерений в рабочем диапазоне был выявлен резонанс опор и определена его форма колебаний. Результаты сопоставлялись с данными МКЭ расчетов

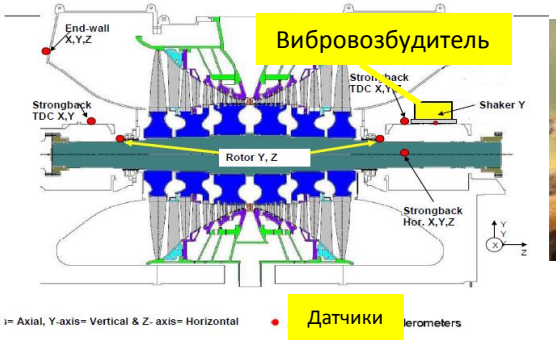
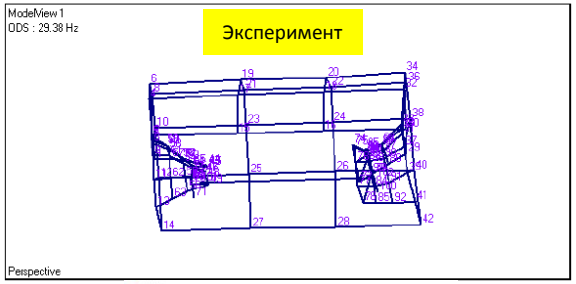
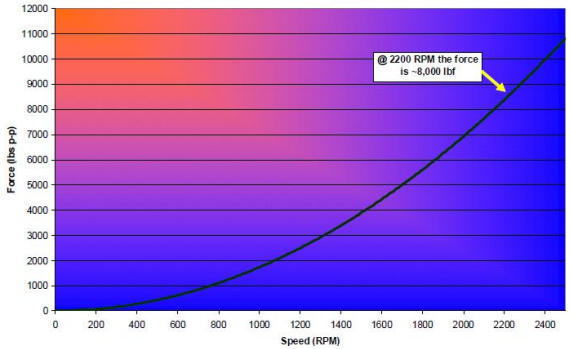


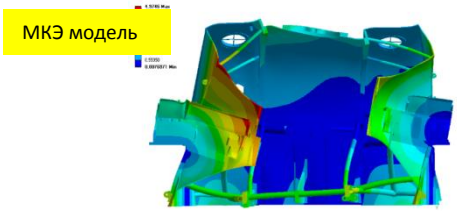
Схема установки вибровозбудителя и датчиков-акселерометров на корпусе ТНД паровой турбины Siemens

Примеры установки вибровозбудителей на корпуса различных турбин ТНД фирмы Siemens



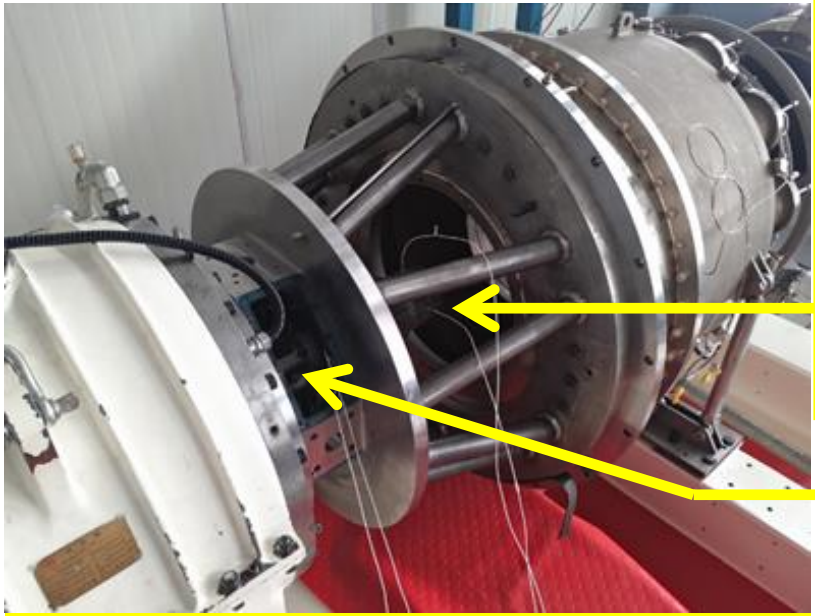


Кривая силового возбуждения реализуемого вибровозбудителем в зависимости от частоты его вращения



Форма колебаний корпуса на выявленном по результатам измерений резонансе опор

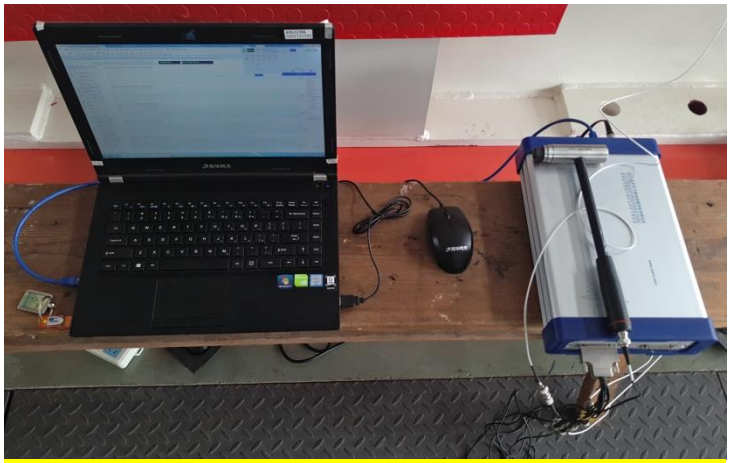
6.5 Пример организации измерений с использованием модального молотка



Статор 2МВт ГТУ (без ротора) на фундаментной раме подготовленный для модальных испытаний с имитацией реального закрепления

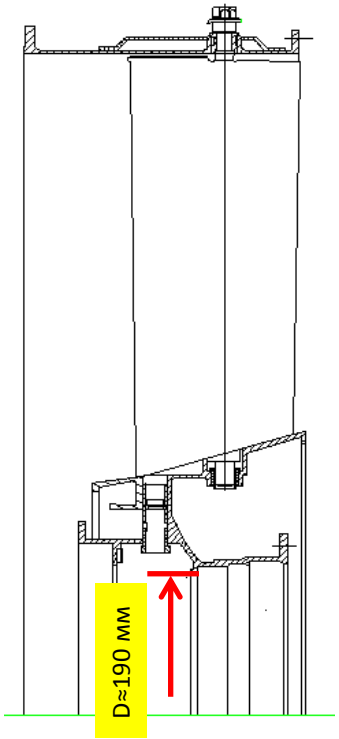
Акселерометры установленные на опорах статора

- Акселерометры Kistler 8774B050A
- COINV INV3062 16-ти канальная система сбора измерений
- Модальный молоток COINV INV9313
- Система обработки и анализа данных – COINV DASP

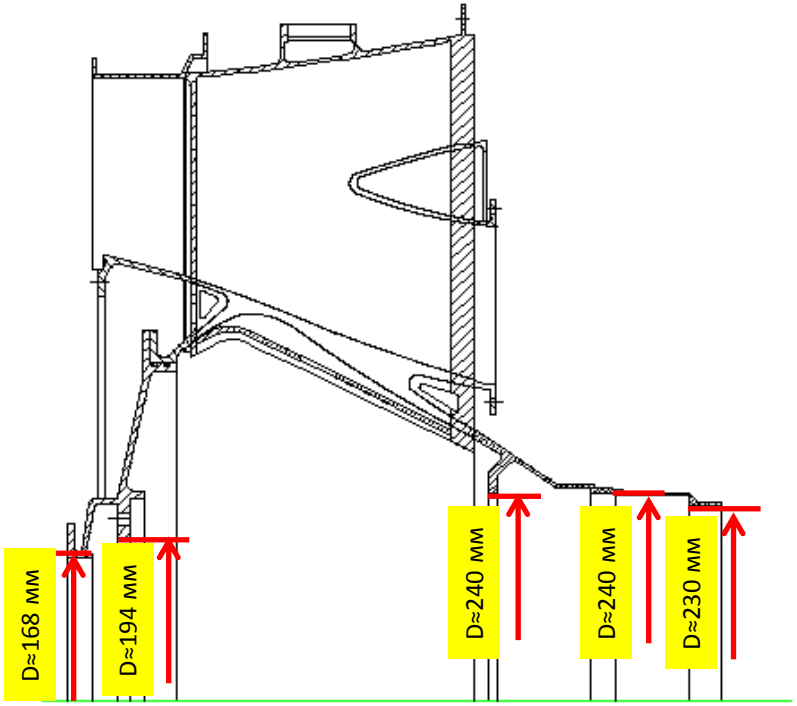


Ударный молоток и система сбора и анализа данных

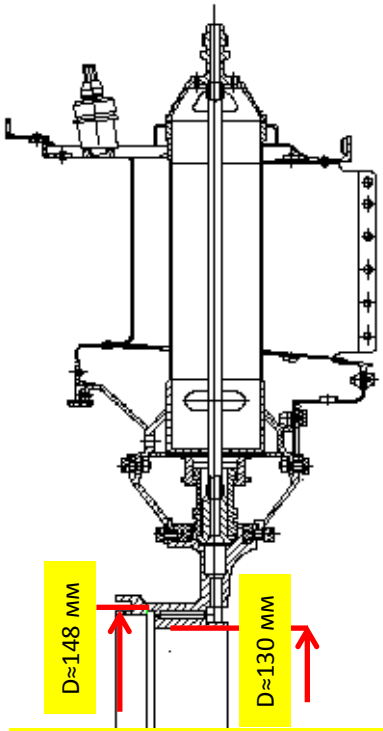
6.6 Возможности организации измерений для АЛ-31Ф



Корпус опоры вентилятора

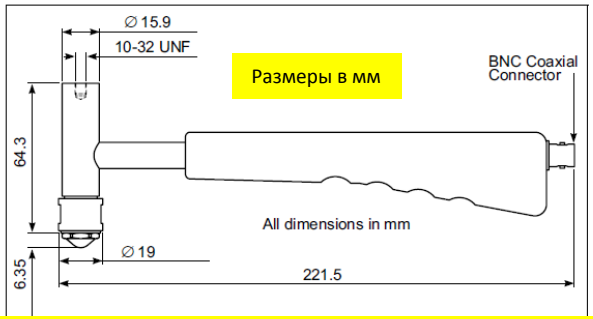


Промежуточный корпус



Корпус опоры турбины НД

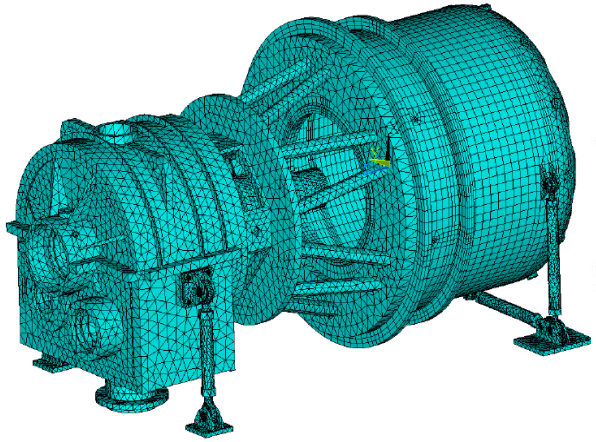
Диаметральные размеры внутренних поверхностей корпусов опор двигателя АЛ-31Ф позволяют использовать для измерений динамической податливости его опор ударные молотки средних размеров, например Type 8206 фирмы Brüel &Kjær



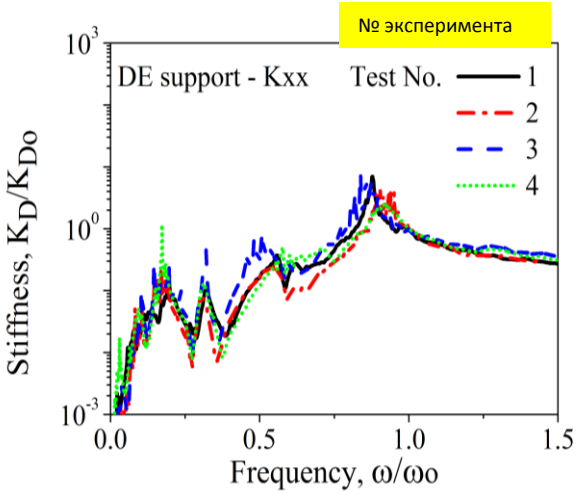
Ударный молоток Brüel &Kjær Type 8206

6.7 Практическое применение модальных испытаний корпусов двигателя с имитацией их реального закрепления

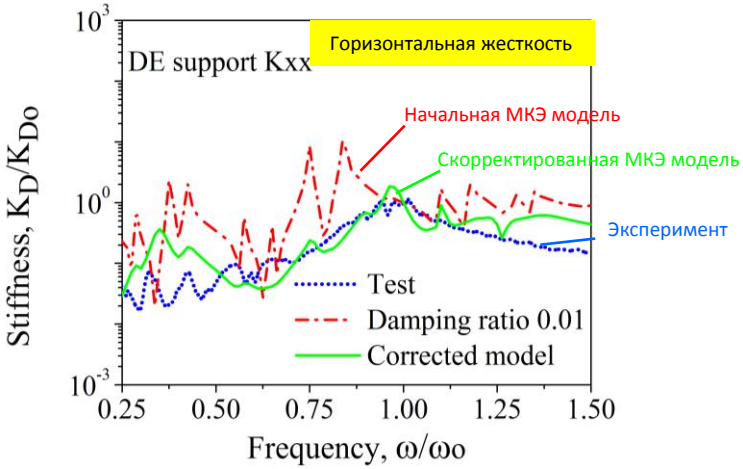
- В статье приведен пример существенного расхождения динамической жесткости определённой по начальной МКЭ модели для статора ГТУ с данными эксперимента
- Анализ расчетных и экспериментальных данных позволил откорректировать МКЭ модель и значительно улучшить ее точность
- Показано влияние сборки статора (между экспериментами происходила разборка-сборка статора) на девиацию динамической жесткости его опор
- Экспериментально определенные динамические жесткости каждой из опор двигателя использовались для улучшения численных моделей для расчетов динамики роторов а также для создания комбинированных моделей (численные + эксперимент)

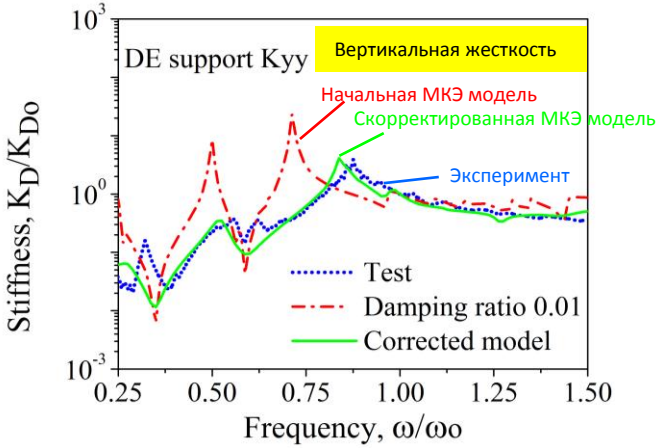


Статор 2МВт ГТУ (без ротора)



Влияние сборки на динамическую жесткость передней опоры ГТУ

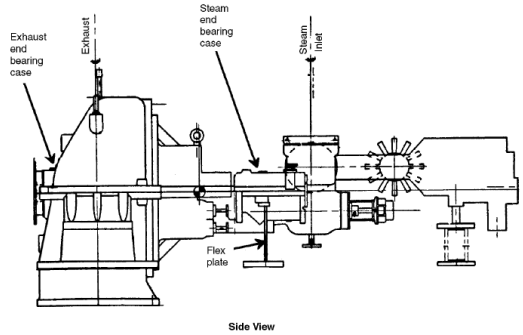




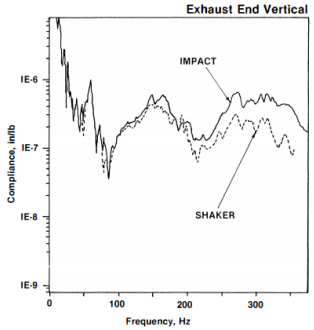
Сопоставление динамической жесткости передней опоры в горизонтальном и вертикальном направлении для МКЭ модели с данными эксперимента

6.8 Практическое применение модальных испытаний корпусов двигателя с имитацией их реального закрепления

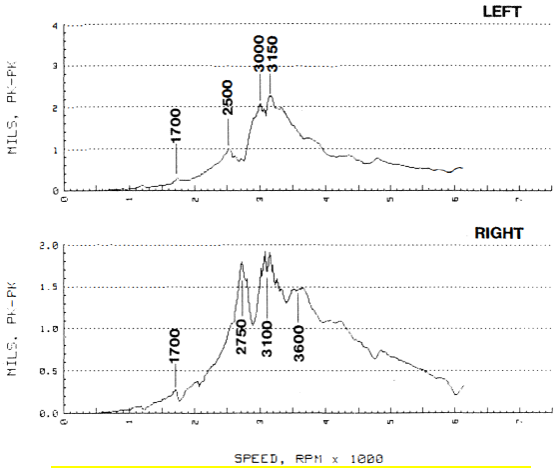
- О практической пользе применения модальных испытаний с имитацией реального закрепления корпусов неоднократно говорится в статьях J.C. Nicholas
- Разработанная им методика проведения таких испытаний также легла в основу параграфа 2.4 стандарта API 684, посвященному проблемам моделирования опорных узлов турбоагрегатов
- Проведение модальных испытаний для корпусов паровой турбины позволило выявить несовершенство ранее созданной численной модели, а также объяснить наличие резонансов в рабочем диапазоне частот турбоагрегата, которые модель не предсказывала



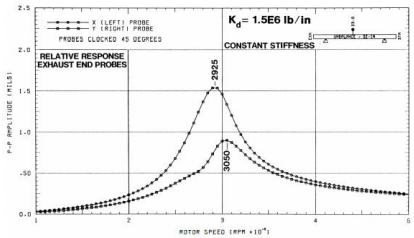
Статор паровой турбины описанный в статье Nicholas J. C., Whalen, J. K. И Franklin (1986)



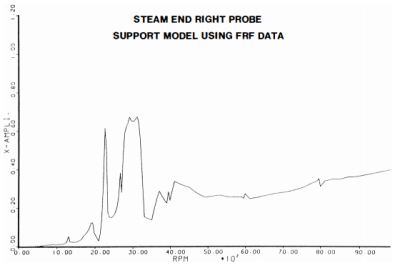
Результаты измерений динамической податливости для опоры на выхлопе турбины



АЧХ по данным эксперимента



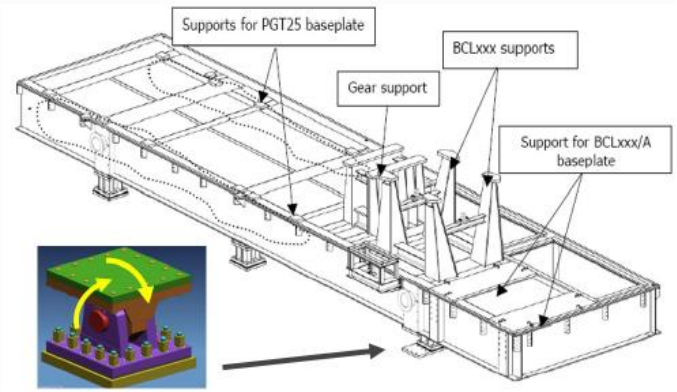
АЧХ изначально созданной численной модели



АЧХ скорректированной численной модели

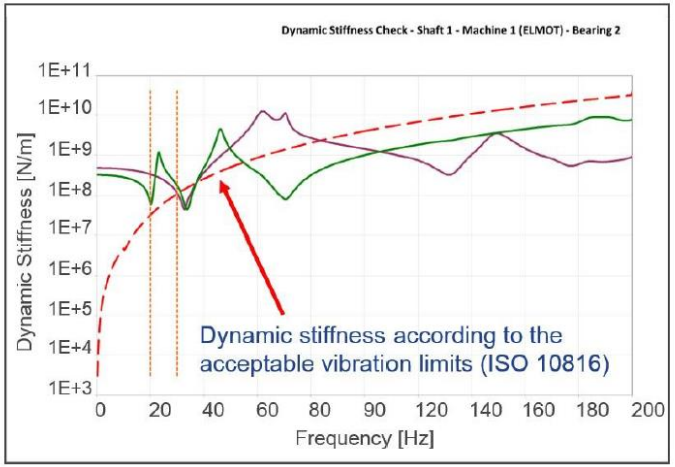
6.9 Практическое применение модальных испытаний корпусов двигателя с имитацией их реального закрепления

- Результаты статьи Rossin S., Meli E., Pallini G., Panconi S., Rindi A. показывают что экспериментально определенные с помощью модальных испытаний динамические жесткости для опорной системы разрабатываемой новой ГТУ морского типа на базе двигателя PGT25 измеренные в эксплуатации оказались ниже чем предполагаемые, определенные по стандарту, что подчеркивает важность подобных испытаний при проектировании новых машин и модернизации существующих



Рама двигателя PGT25 для установки на судах и буровых установках морского типа

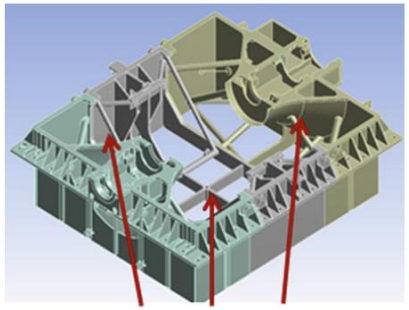
ГТУ PGT25 (Baker Hughes, GE)



Сопоставление данных измерений динамической жесткости для двигателя PGT25 с допустимой согласно стандарту

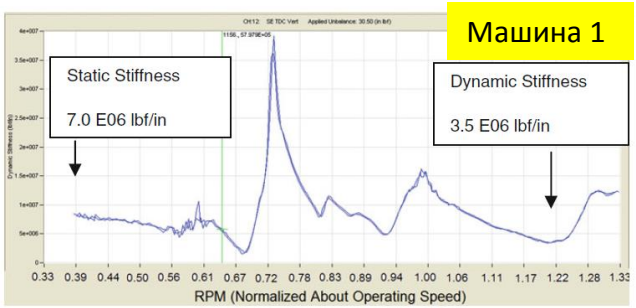
6.10 Практическое применение модальных испытаний корпусов двигателя с имитацией их реального закрепления

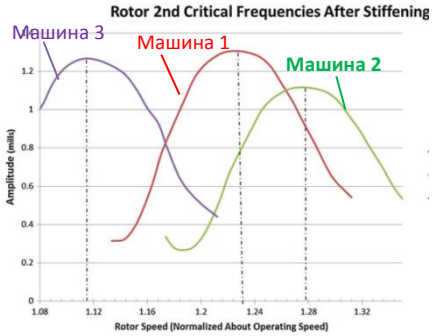
- В статье Raj Subbiah приведены результаты модальных испытаний по определению динамической жесткости опор паровых турбин большой мощности производства компании Siemens
- Результаты испытаний показали что для разных машин одной серии динамическая жесткость опор на рабочей частоте может существенно отличаться от статической (50 – 75%)
- По данным испытаний были проведены технические мероприятия по усилению опор дополнительными трубчатыми стойками с целью повышения динамической жесткости опор на рабочей частоте
- Отмечено влияние динамической жесткости опор на критические частоты ротора



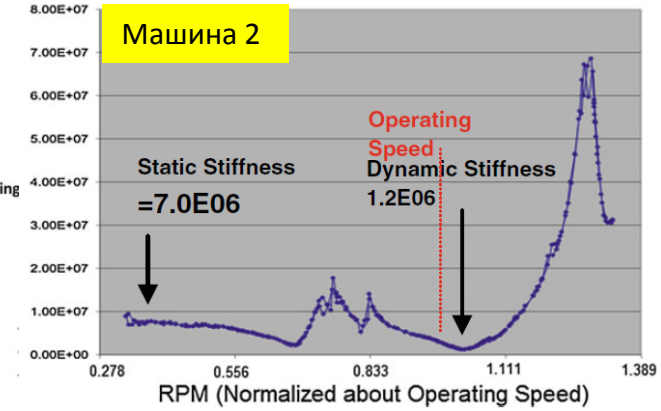
Typical Lower Exhaust Hood Support Structure Components

Статор ТНД турбины паровой турбины Siemens





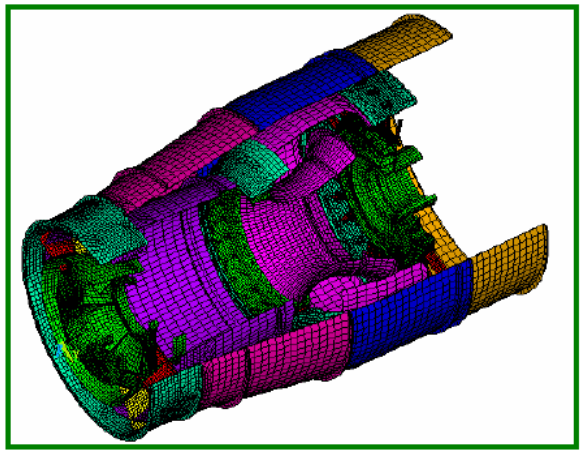
Влияние ужесточения опор на вторую критическую частоту для разных машин одной серии



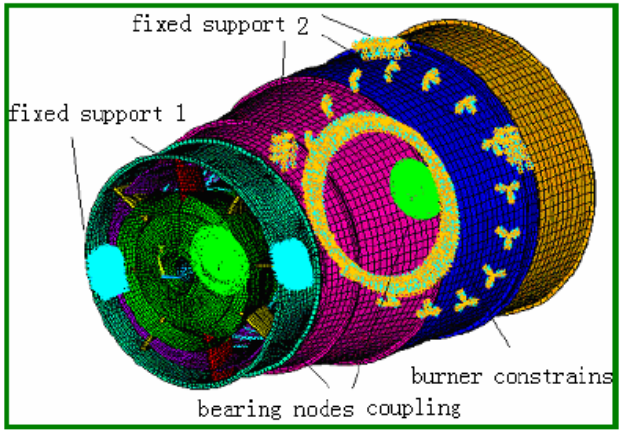
Отличие динамической жесткости опор на рабочей частоте от статической для разных машин одной серии

6.11 Несовершенство расчетных моделей

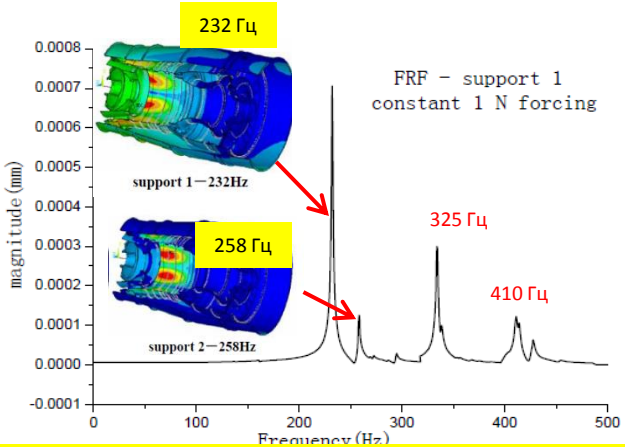
- Результаты статьи Hong Jie, Meng Chen и Shuguo Liu также указывают на проблемы точности МКЭ моделей и необходимость их валидации путем проведения модальных экспериментов
- Выявленные собственные частоты сборного корпуса по данным МКЭ модели слабо согласуются с данными экспериментальных измерений, где выявлено множество других пиков объяснений которым в статье не дано



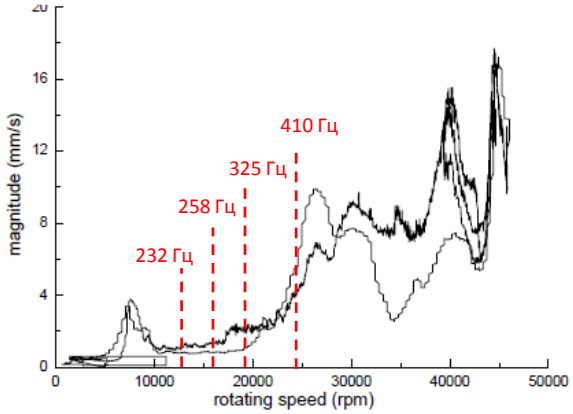
МКЭ модель сборного корпуса авиационного двигателя



Граничные условия для МКЭ модели корпуса авиационного двигателя



АЧХ передней опоры двигателя при гармоническом возбуждении, полученная по МКЭ модели



АЧХ двигателя по данным испытаний*

*место измерений не уточняется

6.12 Преимущества модальных испытаний корпусов двигателя с имитацией закрепления

Результаты испытаний позволят

- Определить динамическую податливость промежуточных корпусов двигателя в местах расположения опор
- Измерить прямые и перекрестные жесткости для промежуточных корпусов двигателя в местах расположения опор
- Оценить влияние опор ротора друг на друга путем измерения перекрестных жесткостей между опорами при сборе их в едином статоре
- Выявить имеются ли какие-либо резонансы статора и его узлов в диапазоне рабочих частот ротора, оценить уровень демпфирование и формы колебаний для них
- Выявить влияние сборки отдельных узлов промежуточных корпусов и всего статора на динамическую жесткость его опор
- Использовать данных измерений в моделях для расчета динамики роторов

7. Техническое предложение

Компания ООО "Альфа-Транзит" предлагает следующие виды услуг:

- Разработка методики по организации и проведению модальных испытаний
- Помощь в выборе соответствующего оборудования
- Подготовка оборудования к проведению экспериментальных измерений
- Помощь в проведение экспериментальных измерений
- Анализ данных экспериментальных измерений
- Составление рекомендаций по данным экспериментальных измерений
- Использование данных измерений в моделях роторной-динамики для улучшения текущих моделей и создания новых

Program System for Turbomachinery Rotordynamics Analysis

DYNAMICS R4