24-я Международная научно-техническая конференция
«Авиация и космонавтика»
Московский авиационный институт, 17-21 ноября, 2025

TRANZIT
DYNAMICS R4

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОПЛОСКОСТНОЙ НИЗКОСКОРОСТНОЙ БАЛАНСИРОВКИ РОТОРА В СОБСТВЕННЫХ ОПОРАХ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ЕГО ВИБРОАКТИВНОСТИ В СОСТАВЕ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Шапошников К.В.[1], Дегтярев С.А.[1], Рыженков В.М. [2], Леонтьев М.К.[2]
[1]ООО «Альфа-Транзит», [2]Московский Авиационный Институт,

Докладчик: **Шапошников К.В.**
Инженер-исследователь,
ООО «Альфа-транзит»
kvshaposhnikov@alfatran.com

г. Москва, 2025

Введение

TRANZIT DYNAMICS R4

- **Для некоторых роторов авиационных ГТД,** возможны **повышенные вибрации при работе** в **составе двигателя,** поскольку применяемая для таких роторов **балансировка на низкочастотных станках (НЧБ) не компенсирует** наличие **производственных погрешностей деталей, сборки** и **самой балансировки**

- **Снижение виброактивности таких ГТД экспериментальным путем может потребовать обширных исследований** или **привести к полной переборке сборного ротора.**

- **Добиться снижения вибраций двигателей** до **требуемого уровня** можно с использованием **высокочастотной балансировки** (ВЧБ) в **разгонно-балансировочном стенде** (РБС), который также **может использоваться** и **для проведения низкоскоростной балансировки без вакуума**

- **Однако использование ВЧБ** требует **наличия на предприятии как самого РБС**, стоимость которого значительно превосходит стоимость станков для НЧБ, так и специально обученного квалифицированного персонала для его обслуживания

- **На предприятиях**, **производящих авиационные ГТД**, для **обеспечения требуемых вибрационных характеристик роторов ГТД** перспективным видится **развитие** и **освоение методов многоплоскостной низкоскоростной балансировки роторов**

Ротор ГТД на опорах низкочастотного балансировочного станка ДИАМЕХ серии ВМ*

*Балансировочные станки производства ООО «ДИАМЕХ 2000». Вибрация и диагностика, №2 – 2005.

Ротор ГТД на опорах высокочастотного вакуумного РБС МАИ

Низкочастотные балансировочные станки и высокочастотные балансировочные стенды

TRANZIT

DYNAMICS R4

Низкочастотные балансировочные станки

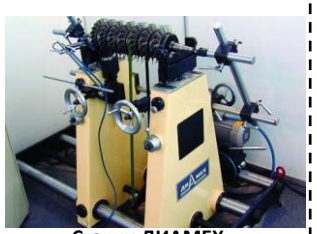
Станки Schenk серии HM и HL[1]

Станки BALTECH серии HBM[2]

Станки РОБАЛС серии H[3]

Дорезонансные

Станки РОБАЛС серии S[3]



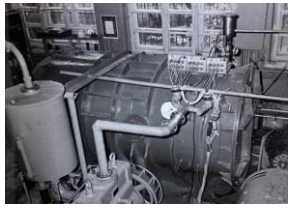
Станки ДИАМЕХ серии BM[4]

Зарезонансные

Высокочастотные балансировочные стенды

РБС Schenck серии DH[5]

Промышленные



РБС МАИ203

РБС МАИ205

Исследовательские

Преимущества

- Высокая точность балансировки
- Относительно невысокая стоимость станка и достаточно быстрый ввод в эксплуатацию
- Высокая производительность
- Относительно малое время, необходимое для отдельных пусков
- Балансировка может осуществляться силами 1-2 специалистов

Недостатки

- Невозможность регулировать жесткость стоек и ограничения по грузоподъемности каждой из моделей станка
- Невозможность разгона ротора до реальных рабочих скоростей вследствие ограничений мощности привода и особенностей конструкции самого привода
- Не все модели оснащены укрытиями

Преимущества

- Высокая точность балансировки
- Современные промышленные стенды обычно оснащены комплектами стоек разной грузоподъемности, также позволяющими регулировать жесткость в определённом диапазоне значений
- Возможность разгона ротора до скоростей превышающих рабочие обороты
- Возможность решать широкий спектр исследовательских задач

Недостатки

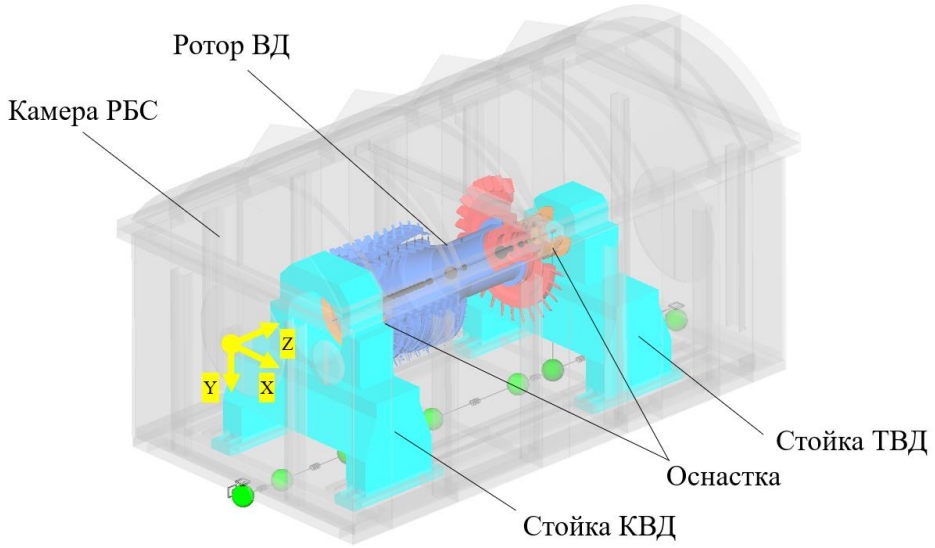
- Высокая стоимость стендов и их длительные сроки строительства и ввода в эксплуатацию
- Не все виды стендов оснащены бронезащитными укрытиями
- Низкая производительность
- Длительное время, необходимое для отдельных пусков
- Для осуществления балансировки требуется команда квалифицированных специалистов (инженеров-операторов, балансировщиков, машинистов технологического оборудования стенда)

1 Каталог продукции станков Schenck
2 Каталог продукции станков компании BALTECH
3 Каталог продукции станков компании РОБАЛС
4 Каталог продукции компании Диамех 2000
5 DH 2- DH 13 High speed balancing and overspeed test facility: data sheet. Schenck RoTec GmbH, Darmstadt, Germany.

Математическая модель неуравновешенного состояния ротора

TRANZIT
DYNAMICS R4

- **Для моделирования виртуальной низкоскоростной балансировки использована цифровая динамическая модель РБС МАИ** с установленным на опоры стенда при помощи оснастки **ротором высокого давления** (РВД) **авиационного двигателя** малой степени двухконтурности
- **Ротор РВД состоит из двух основных модулей**: **ротора компрессора высокого давления** (КВД) **с задним валом** и **ротора турбины высокого давления** (ТВД)
- **Цифровые модели строились с учетом рекомендаций** стандартов **ГОСТ Р 57700.22-2020** и **ГОСТ Р 57412-2017** по подготовке цифровых моделей
- **Модель РВД была верифицирована** по результатам **виртуальных модальных испытаний**
- **Величина допустимого остаточного дисбаланса** в модели **РВД** на опорах стенда РБС оценивалась **по ГОСТ ИСО 1940** для класса **точности G 6,3** ($U_{perG6,3}$=276 гмм)
- **Для моделирования начального неуравновешенного** состояния ротора **величина исходного механического дисбаланса** была принята равной $U_{мех}$=2*$U_{perG6,3}$= 552 гмм)
- **В расчетной модели дисбаланс задан** в **виде распределения локальных дисбалансов, установленных в центры тяжести модулей компрессора высокого давления** (КВД) и **турбины высокого давления** (ТВД)



Цифровая динамическая модель вакуумного РБС МАИ с РВД авиационного двигателя в DYNAMICS R4

$$U_{мех} = U_{кор} + U_{res}$$

$$U_{мех} = \sum_{k=1}^{K} U_{дет} + \sum_{s=1}^{S} U_{сбор}$$

величина общего механического дисбаланса ротора, включающая дисбалансы всех его K деталей и дисбалансы вносимые при их S сборках в ротора

$$U_{кор} = m_{кор.груз} \cdot r_{пл.кор}$$

величина дисбаланса от установки всех корректирующих грузов, в имеющиеся плоскости коррекции на роторе или при съеме материала с ротора

$$U_{res}$$

величина остаточного дисбаланса

Моделирование неуравновешенного состояния ротора

Критерии отбалансированного ротора

TRANZIT DYNAMICS R4

- **Любая балансировка ротора** всегда производится **с некоторой точностью**, поэтому на роторе всегда присутствует **остаточный дисбаланс** (Ures)
- **Для удовлетворительной работы ротора** величина **остаточного дисбаланса** на нем **не должна превышать** некоторого **допустимого значения** (Uper), установленного перед проведением балансировки с учетом типа ротора (жесткий/квазижесткий/гибкий, межопорный/консольный), а также выбранного класса точности балансировки с учетом рекомендаций стандарта по которому определяются требования к качеству балансировки ротора
- **Для рассмотренной в работе модели РВД** авиационного ГТД **уровень вибрации при принятом классе точности балансировки** ротора **G 6,3** составляет **$V_э$=6,3 мм/с**
- **Верхняя допустимая вибрация РВД на опорах стенда**, рассчитанная согласно выбранному критерию по оценке допустимого уровня вибрации с учетом выбранных C_0-C_3 составила **$V_Б$= 40.3 мм/с**
- **Соответствующая данному уровню величина допустимой двойной амплитуды вибропермещений** в каждой плоскости измерения на роторе на его максимальной постоянной скорости вращения и на любой другой скорости в рабочем диапазоне, составила **$A_Б$(pk-pk)=21 мкм**
- **Согласно ГОСТ 31320 если предварительно** была **проведена НЧБ балансировка, общий остаточный дисбаланс ротора** не должен превышать **100%** от **допустимого остаточного дисбаланса ротора** как **жесткого тела**
- **При ВЧБ балансировке** на **нескольких скоростях вращения согласно ГОСТ 31320** эквивалентный остаточный дисбаланс **не должен превышать 60%** от **допустимого остаточного дисбаланса** ротора **как жесткого тела**

$$U_{res} \le U_{per}$$

U_{res} – величина остаточного дисбаланса; U_{per} – величина допустимого дисбаланса, установленного для ротора

Допустимый остаточный дисбаланс*

* ГОСТ ИСО 1940-1-2007. Вибрация. Требования к качеству балансировки жестких роторов. Часть 1. Определение допустимого дисбаланса. – Москва: Стандартинформ, 2008

$$V_Б = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot V_э$$

$V_э$ – допустимое среднее квадратичное значение виброскорости опор ГТД в эксплуатации

C_0 – коэффициент отношения допустимого значения оборотной составляющей к среднему значению вибрации

C_1 – коэффициент отношения податливости опор ротора в РБС и опор в двигателе

C_2 – коэффициент, используемый при измерении колебаний цапф ротора вместо вибрации опор подшипников, равный отношению значения вибрации цапф ротора к значению вибрации его опор

C_3 – коэффициент, используемый при измерении колебаний ротора в местах его максимального динамического прогиба, равный отношению значений вибрации ротора, измеренной в местах его максимального прогиба к значению вибрации цапф ротора

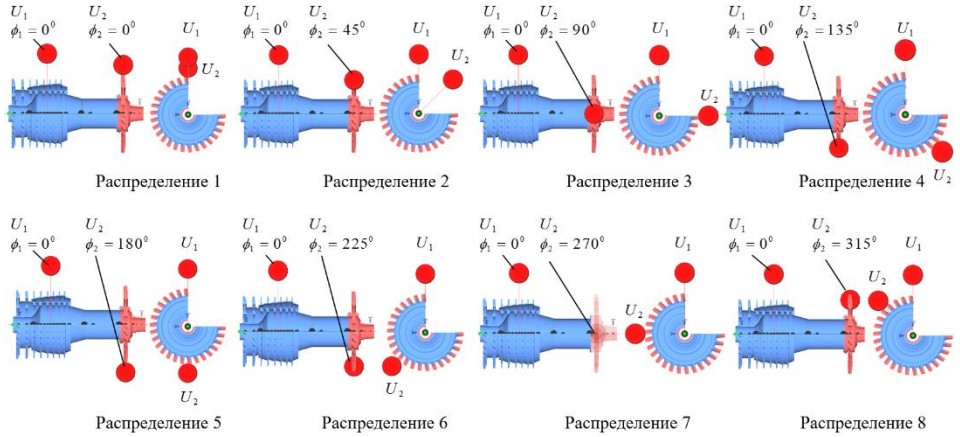
Допустимый уровень вибрации**

** Справочник по балансировке / М. Е. Левит, Ю. В. Агафонов, Л. Д. Вайнгортин [и др.] ; под общ. редакцией М. Е. Левита. – Москва: Машиностроение, 1992. – 464 с

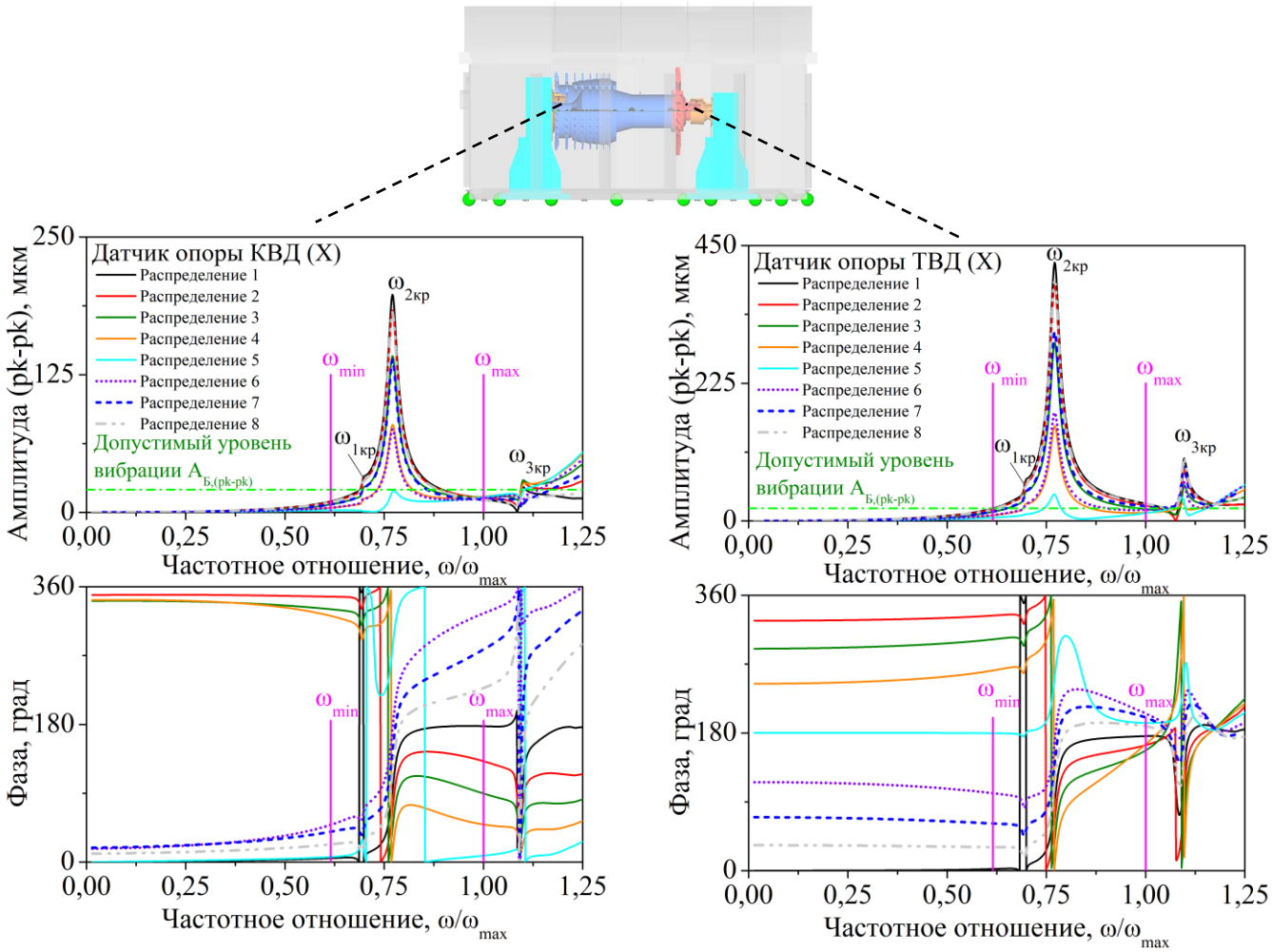
Влияние сборки модулей ротора на его виброактивность

TRANZIT
DYNAMICS R4

- **Для исследование влияния сборки модулей ротора** на его виброактивность проведена серия расчетов вынужденных колебаний модели от заданной начальной неуравновешенности
- **Влияние сборки моделировалось** путем **варьирования взаимного расположения локальных дисбалансов** на **модулях** ротора
- **Было принято**, что **в каждом модуле величина неуравновешенности характеризуется главным вектором дисбаланса, преобладающим над главным моментом**



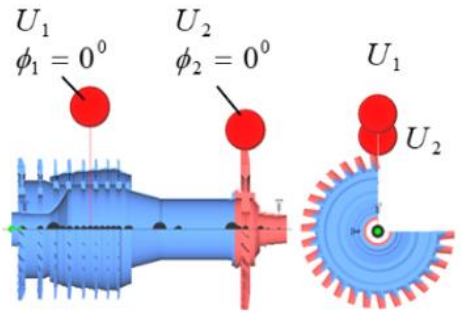
Варианты распределения начальных дисбалансов в модели РВД
(U– величина дисбаланса, ф-фазовый угол расположения дисбалансов



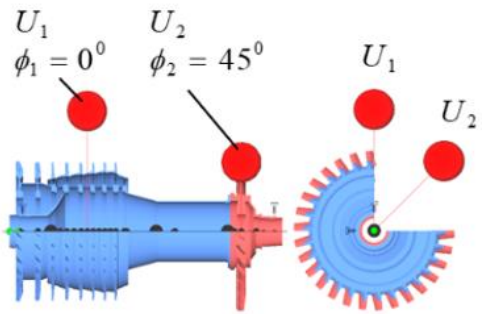
АФЧХ модели РВД в РБС от действия распределений начальных дисбалансов

Подготовка цифровой модели ротора в РБС к низкоскоростной балансировке и последующим испытаниям по разгону до рабочих режимов

TRANZIT
DYNAMICS R4

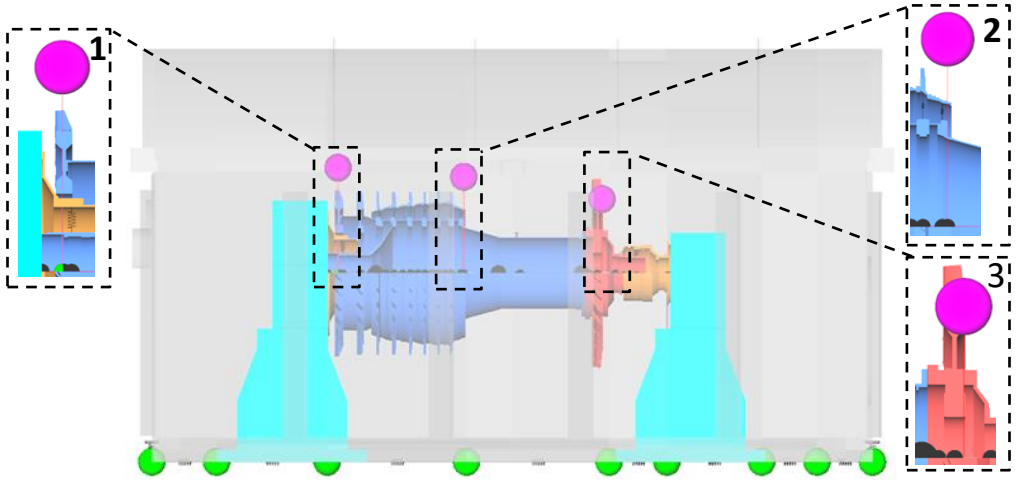


Распределение 1

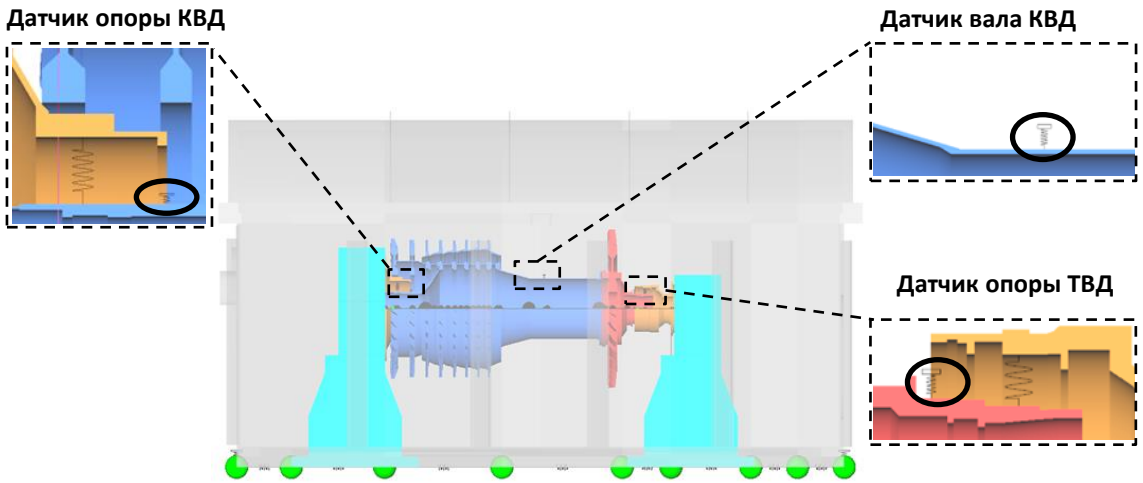


Распределение 2

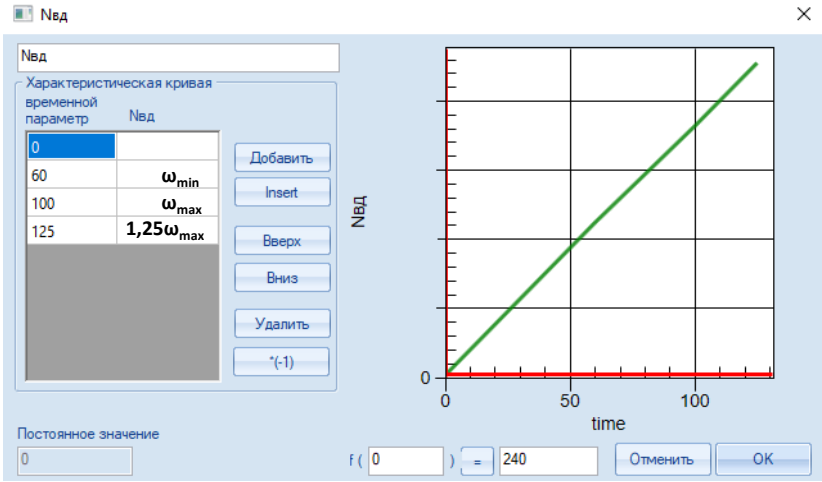
1. Выбор распределения начальных дисбалансов



2. Выбор местоположения плоскостей коррекции на роторе



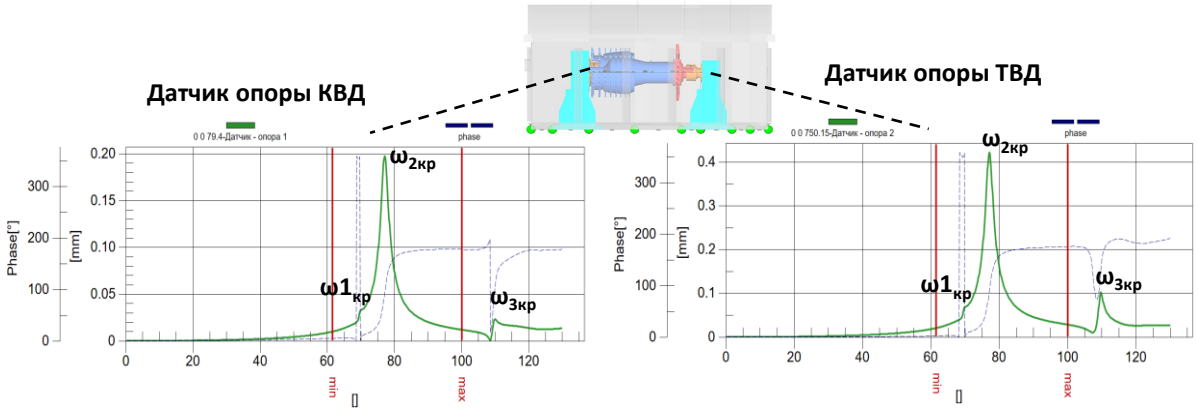
3. Выбор расположения виртуальных датчиков



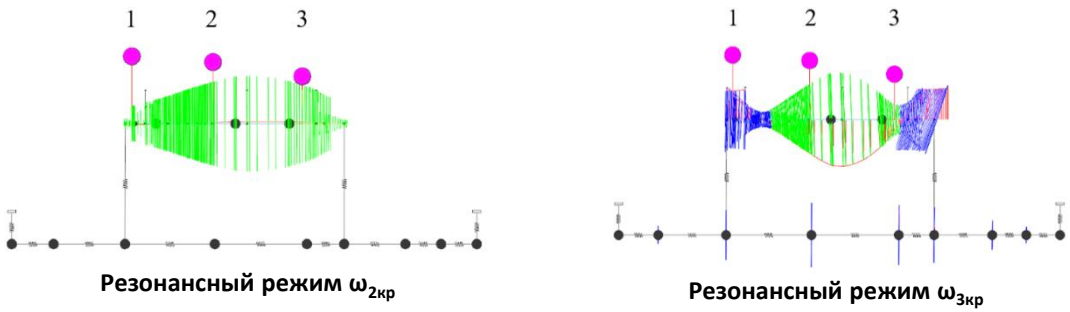
4. Выбор диапазона разгона ротора в РБС для проверки результатов балансировки, определение рабочих режимов

Подготовка к виртуальной низкоскоростной балансировке ротора в РБС

TRANZIT
DYNAMICS R4



1. Анализ АФЧХ после разгона ротора с исходной неуравновешенностью

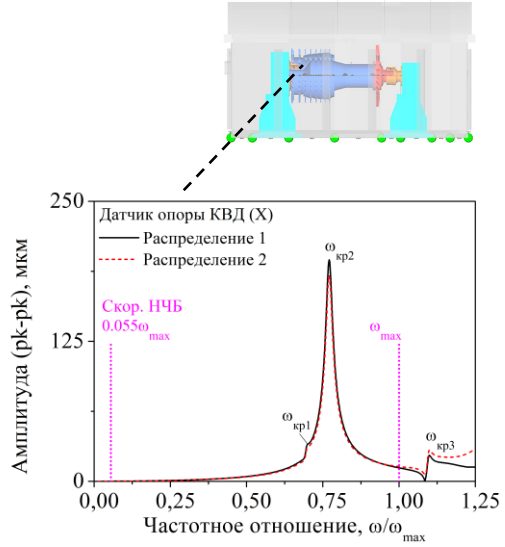


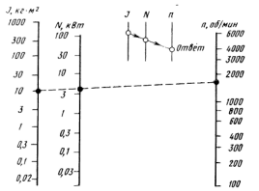
Резонансный режим $\omega_{2кр}$

Резонансный режим $\omega_{3кр}$

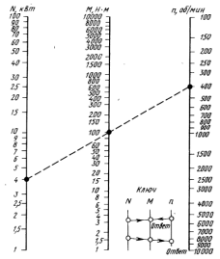
Цифрами обозначены плоскости коррекции, пурпурными кругами – дисбалансы от корректирующих грузов

2. Анализ форм колебаний на резонансных режимах

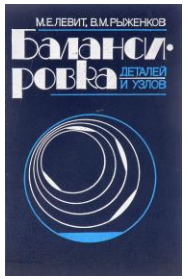




Макс скорость при балансировке

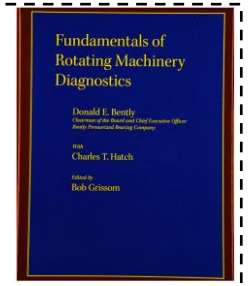


Минимальная скорость при балансировке



3. Выбор балансировочной скорости для низкоскоростной балансировки

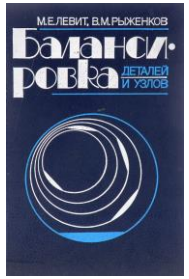
В книге Bently D.E. и др. «Fundamental of rotating machinery diagnostics» массу пробных грузов рекомендуется выбирать используя следующие соотношения:



$$m_{пр.груз} = \frac{0{,}10 \cdot W}{r_{пл.кор} \cdot \omega^2} = \frac{0{,}10 \cdot M_{рот} \cdot g}{r_{пл.кор} \cdot \omega^2}$$

, где $m_{пр.груз}$ – масса пробного груза, кг; $r_{пл.кор}$ – радиус установки груза в балансировочной плоскости, м; ω – скорость вращения ротора, рад/с; W=Mg – вес ротора, Н, M- масса ротора, кг.

В книге Левит М.Е., Рыженков В.М. «Балансировка деталей и узлов» массу пробных грузов рекомендуется выбирать используя следующие соотношения:



$$m_{пр.груз} \le \frac{0{,}20 \cdot M_A \cdot g}{r_{пл.кор} \cdot \omega^2}$$

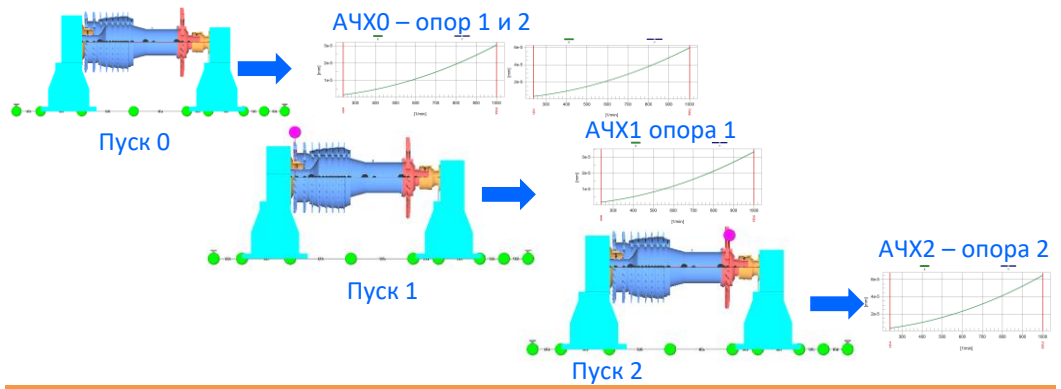
, где $m_{пр.груз}$ – масса пробного груза,кг; $r_{пл.кор}$ – радиус установки груза в балансировочной плоскости, м; ω – скорость вращения ротора, рад/с; M_A –масса ротора приходящаяся на ближайшую опору, кг.

4. Расчет масс пробных грузов

Моделирование виртуальной низкоскоростной балансировки ротора в собственных опорах, установленных на опоры станка

TRANZIT DYNAMICS R4

Низкоскоростная балансировка в 2-х плоскостях



1. Установка пробного груза в плоскости возле опор и замер амплитуд вибраций на постоянной балансировочной скорости

$$a_{ik} = \frac{\Delta\bar{A}}{\bar{P}_{пр.груз}} \qquad \bar{P}_{кор.груз} = \frac{\bar{A}_0}{\Delta\bar{A}} \cdot \bar{P}_{пр.груз} = \frac{\bar{A}_0}{\bar{a}_{ik}}$$

$\Delta A = A_1 - A_0$ вектор изменения вибрации
A_0 – начальная вибрация
A_1 – вибрация с пробным грузом
$P_{пр.\ груз}$ – масса пробного груза
$P_{кор.груз}$ – масса корректирующего груза

2. Расчет ДКВ, определение масс и углов установки корректирующих грузов

$$U_{res} \le U_{per}$$

U_{per} – величина допустимого дисбаланса ротора
U_{res} – величина остаточного дисбаланса ротора

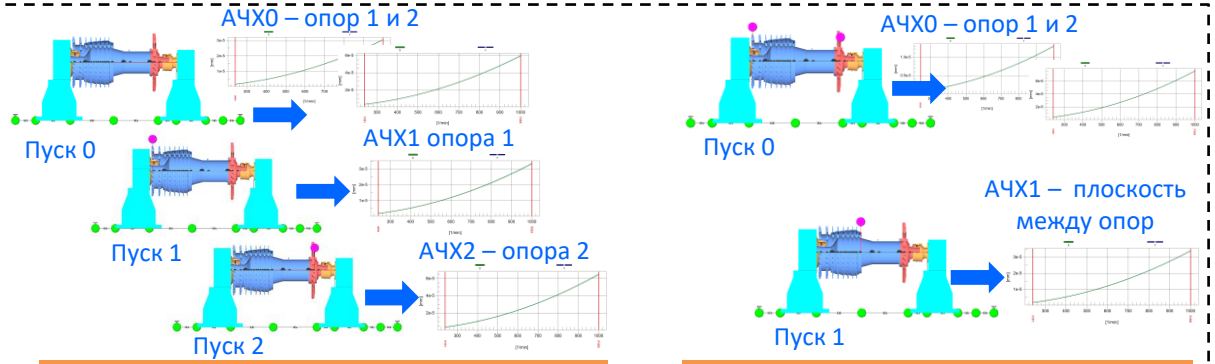
3. Остаточный дисбаланс соответствует требованиям

Нет

Да

4. Ротор отбалансирован

Низкоскоростная балансировка в 3-х плоскостях с разгоном до рабочих оборотов



1. Установка пробного груза в плоскости возле опор и замер амплитуд вибраций на постоянной балансировочной скорости

$$a_{ik} = \frac{\Delta\bar{A}}{\bar{P}_{пр.груз}} \qquad \bar{P}_{кор.груз} = \frac{\bar{A}_0}{\Delta\bar{A}} \cdot \bar{P}_{пр.груз} = \frac{\bar{A}_0}{\bar{a}_{ik}}$$

2. Расчет ДКВ, определение масс и углов установки корректирующих грузов

3. Установка пробного груза в плоскость между опор и замер амплитуд вибраций на постоянной балансировочной скорости

$$a_{ik} = \frac{\Delta\bar{A}}{\bar{P}_{пр.груз}} \qquad \bar{P}_{кор.груз} = \frac{\bar{A}_0}{\Delta\bar{A}} \cdot \bar{P}_{пр.груз} = \frac{\bar{A}_0}{\bar{a}_{ik}}$$

4. Расчет ДКВ, определение масс и углов установки корректирующих грузов

$$U_{res} \le U_{per}$$

5. Остаточный дисбаланс соответствует требованиям

Да

6. Разгон до рабочих оборотов

Нет

7. Вибрации соответствуют требованиям

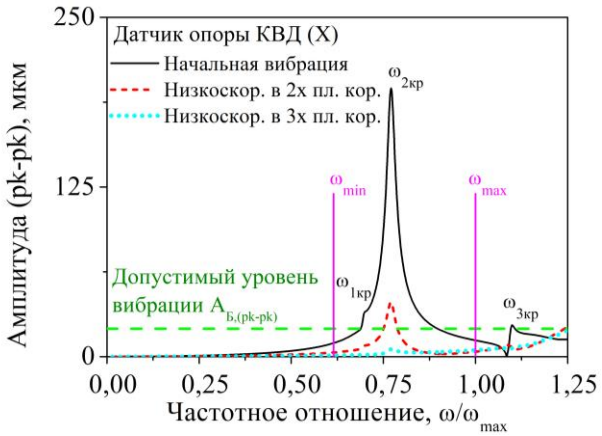
Да

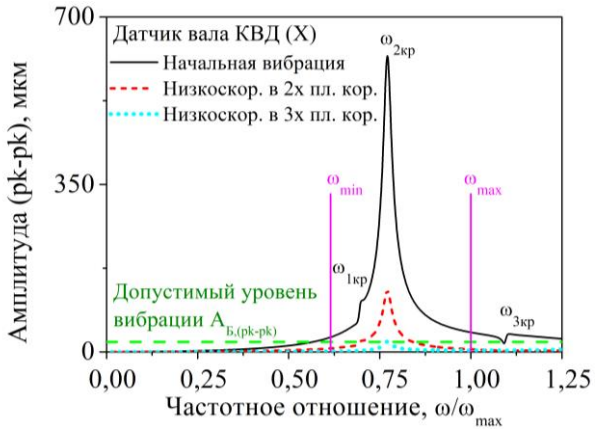
8. Ротор отбалансирован

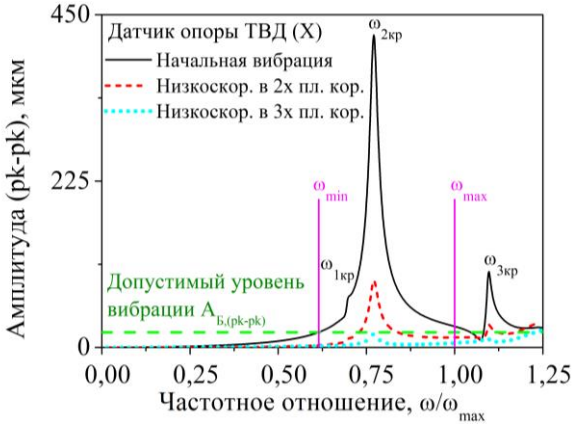
Пример виртуальной низкоскоростной балансировки ротора (Распределение начальных дисбалансов 1)

TRANZIT
DYNAMICS R4

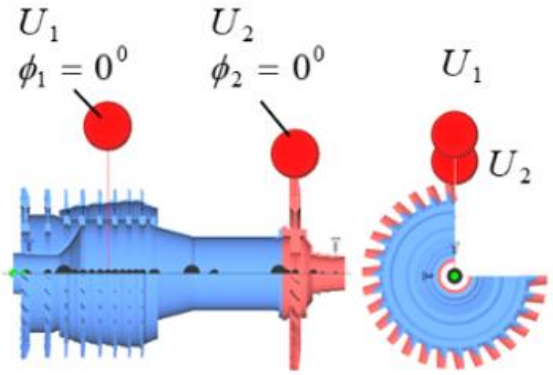
- **Представлены результаты виртуальной низкоскоростной балансировки** для варианта распределения начальной неуравновешенности 1
- **После низкоскоростной балансировки в 2-х плоскостях амплитуды вибрации ротора** на **рабочих режимах удовлетворяют критериям по вибрации**, однако **на резонансном режиме $\omega_{2кр}$** превышают допустимый уровень вибрации: **на опоре КВД** почти в 2 раза, **на опоре ТВД** в 4 раза, **а на валу КВД** в 6 раз. На резонансном режиме **$\omega_{3кр}$** вибрации ротора на опоре ТВД также превышают допустимый уровень почти в 1,5 раза.
- **После низкоскоростной балансировки в 3-х плоскостях вибрации ротора** на **рабочих режимах** во **всем диапазоне скоростей** его вращения **удовлетворяют критериям по вибрации** во всех местах ее контроля





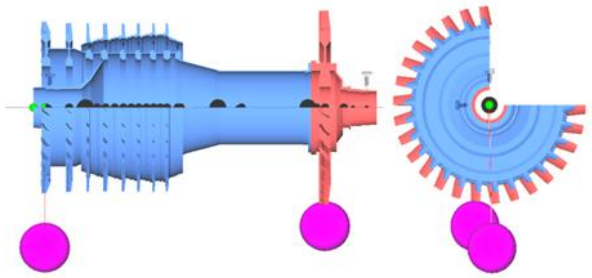


АЧХ модели РВД в РБС после низкоскоростной балансировки в собственных опорах

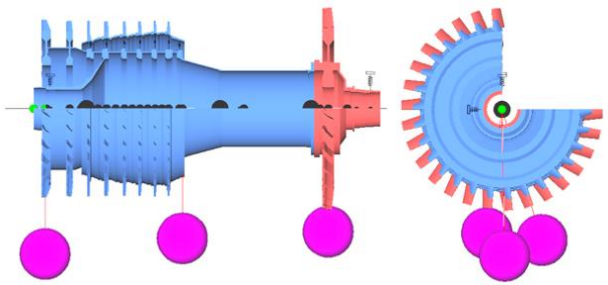


Распределение 1

Начальное распределение дисбалансов в модели



Низкоскоростная балансировка в 2-х плоскостях коррекции

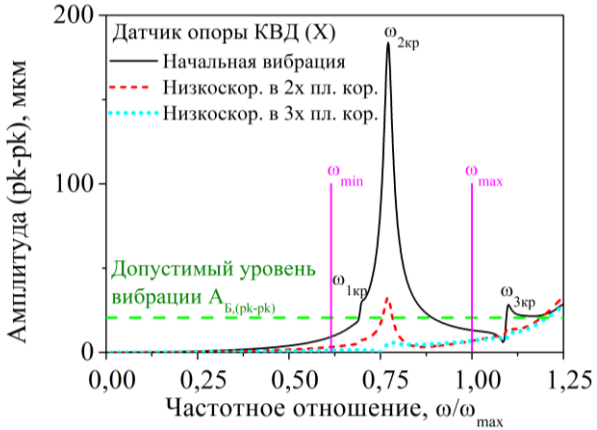


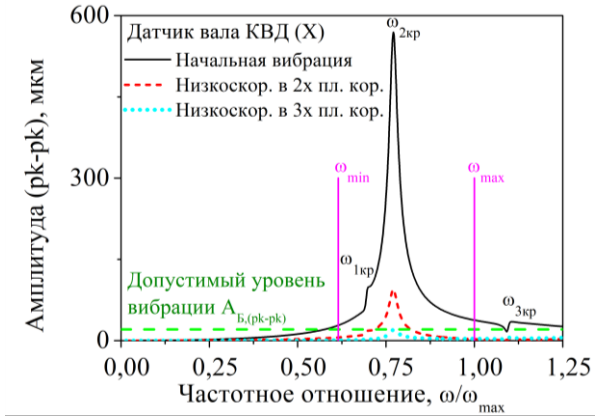
Низкоскоростная балансировка в 3-х плоскостях коррекции

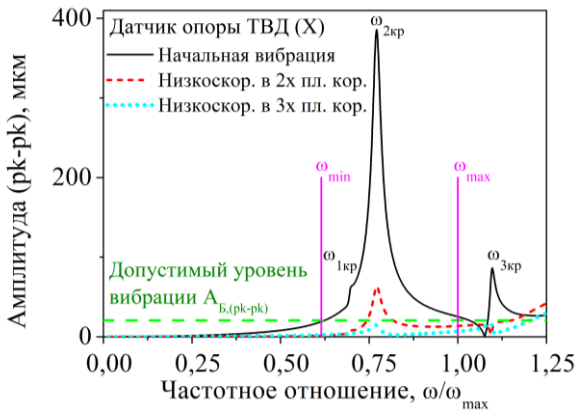
Пример виртуальной низкочастотной балансировки ротора (Распределение начальных дисбалансов 2)

TRANZIT DYNAMICS R4

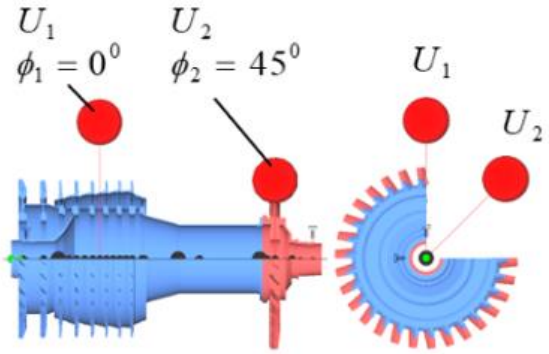
- **Представлены результаты виртуальной низкоскоростной балансировки** для варианта распределения начальной неуравновешенности 2
- **После низкоскоростной балансировки в 2-х плоскостях амплитуды вибрации ротора** на **рабочих режимах удовлетворяют критериям по вибрации**, однако **на резонансном режиме $\omega_{2кр}$** превышают допустимый уровень вибрации: **на опоре КВД** почти в 1,6 раза, **на опоре ТВД** в 3 раза, **а на валу КВД** в 4,6 раз. На резонансном режиме **$\omega_{3кр}$** вибрации ротора во всех местах контроля не превышают критерия по допустимому уровню вибрации
- **После низкоскоростной балансировки в 3-х плоскостях вибрации ротора** на **рабочих режимах** во **всем диапазоне скоростей** его вращения **удовлетворяют критериям по вибрации** во всех местах ее контроля





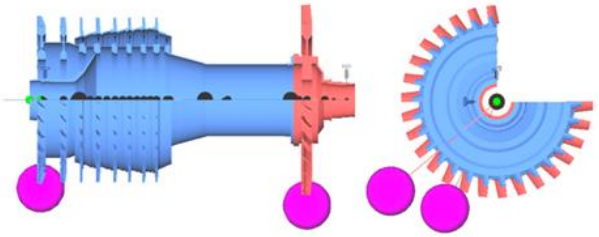


АЧХ модели РВД в РБС после низкоскоростной балансировки в собственных опорах

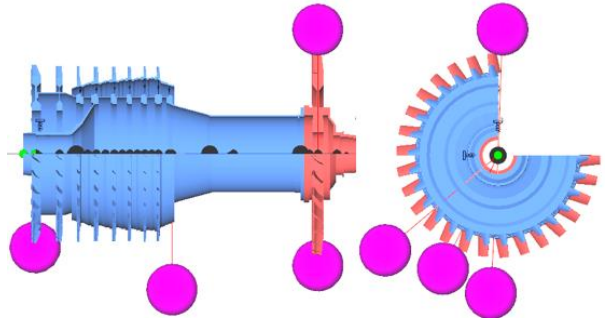


Распределение 2

Начальное распределение дисбалансов в модели



Низкоскоростная балансировка в 2-х плоскостях коррекции

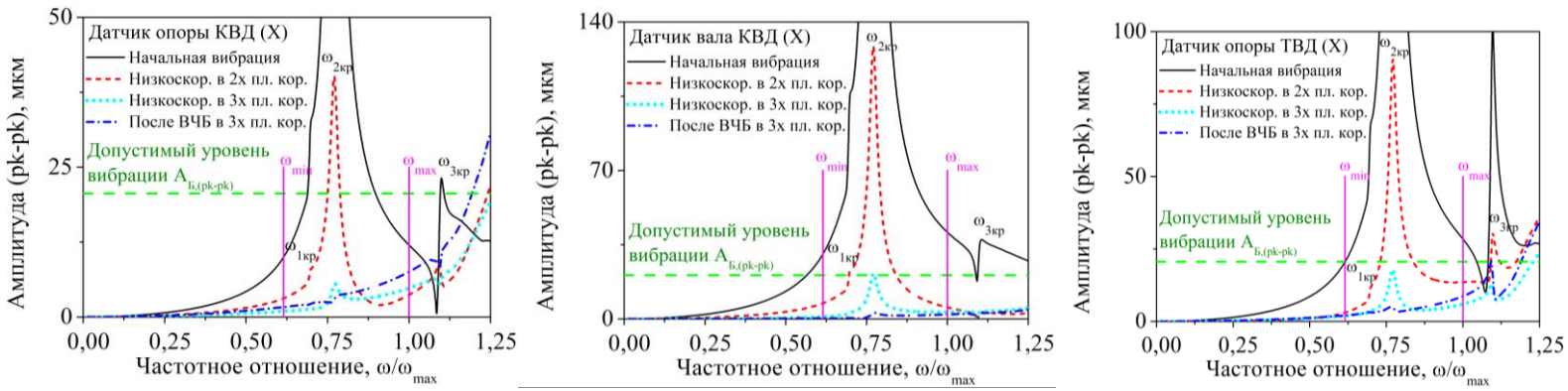


Низкоскоростная балансировка в 3-х плоскостях коррекции

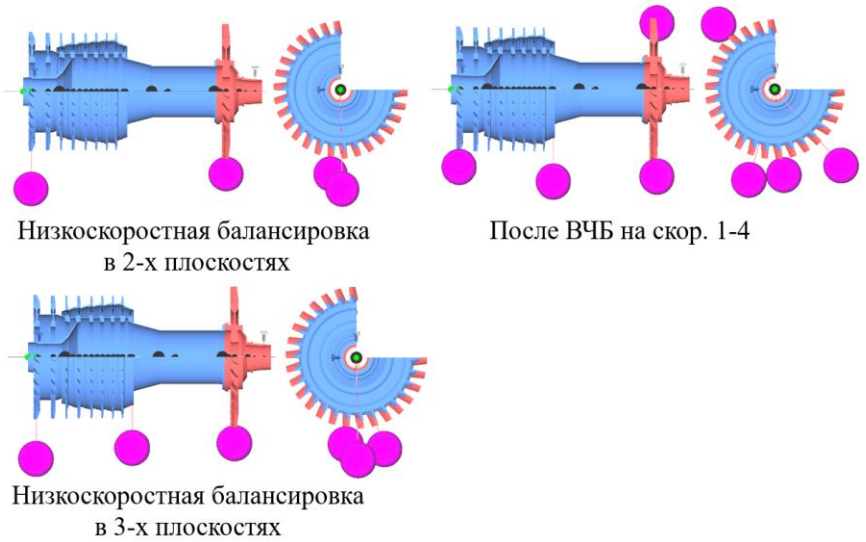
Сравнение результатов виртуальной балансировки (распределение начальных дисбалансов 1)

TRANZIT DYNAMICS R4

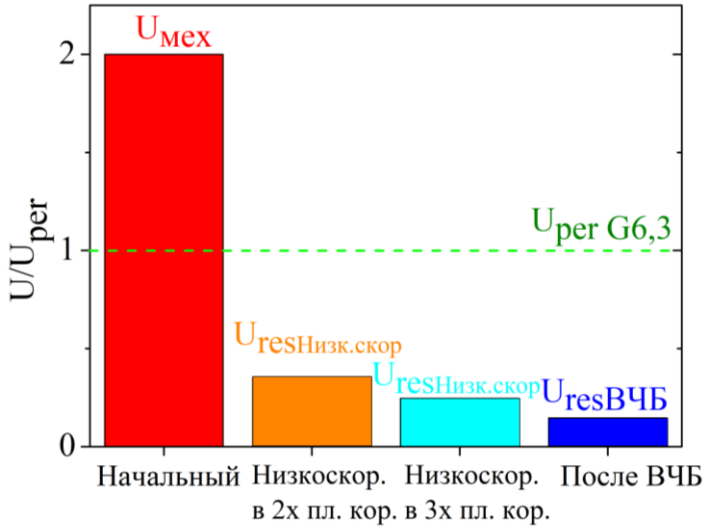
- **Использование низкоскоростной балансировки в 3-х плоскостях при распределении начальных дисбалансов на роторе для варианта 1** позволяет **снизить вибрации** на **резонансном режиме $\omega_{2кр}$** и **$\omega_{3кр}$ в рабочем диапазоне** до **уровня допустимых значений**
- **Уровень остаточной неуравновешенности** после **низкоскоростной балансировки в 3-х плоскостях соответствует допустимым** для **класса точности G 6,3** стандарта **ГОСТ ИСО 1940** значениям
- **Общий остаточный дисбаланс после низкоскоростной балансировки** в **2-х** и **3-х** плоскостях также **соответствует требованиям ГОСТ 31320** и **не превышает 100% от допустимого остаточного дисбаланса жесткого ротор** на максимальной рабочей скорости
- **Уровень остаточной неуравновешенности после низкоскоростной балансировки в 3-х плоскостях превышает** достигнутый **уровень остаточной неуравновешенности при ВЧБ балансировке** на **4-х скоростях коррекции** (является более трудоемкой и требует больших затрат времени для достижения результата) **в 1,2 раза**



АЧХ модели РВД в РБС после низкоскоростной и ВЧБ балансировки



Системы корректирующих грузов

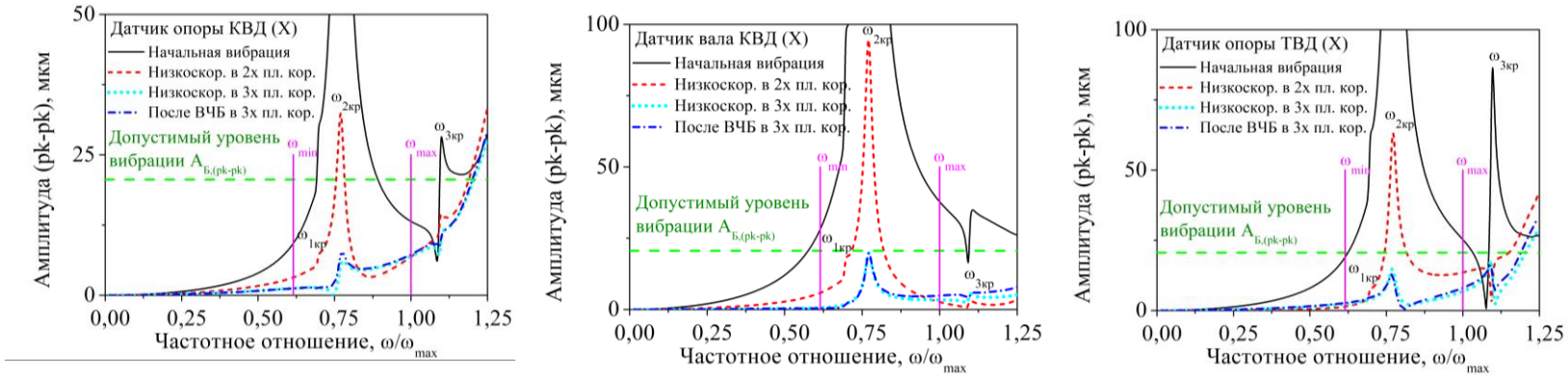


Сравнение величин дисбалансов

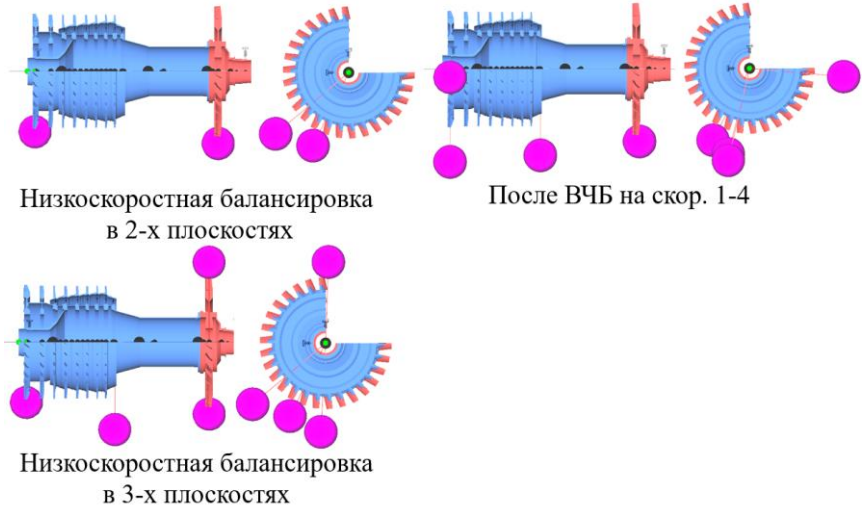
Сравнение результатов виртуальной балансировки (распределение начальных дисбалансов 2)

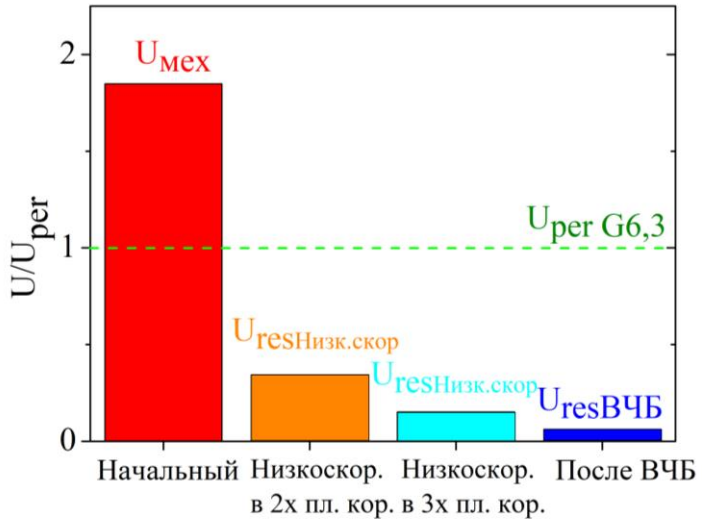
TRANZIT
DYNAMICS R4

- **Использование низкоскоростной балансировки в 3-х плоскостях** при **распределении начальных дисбалансов** на роторе **для варианта 2** позволяет **снизить вибрации** на **резонансном режиме** $\omega_{2кр}$ и $\omega_{3кр}$ в рабочем диапазоне **до уровня допустимых значений**
- **Уровень остаточной неуравновешенности** после низкоскоростной балансировки **в 3-х плоскостях соответствует допустимым** для **класса точности G 6,3** стандарта **ГОСТ ИСО 1940** значениям.
- **Общий остаточный дисбаланс после низкоскоростной** в **2-х** и **3-х** плоскостях также **соответствует требованиям ГОСТ 31320** и **не превышает 100% от допустимого остаточного дисбаланса жесткого ротор** на максимальной рабочей скорости
- **Уровень остаточной неуравновешенности после низкоскоростной балансировки в 3-х плоскостях превышает** достигнутый **уровень остаточной неуравновешенности** при **ВЧБ балансировке** на **4-х скоростях в 2,4 раза,** однако **уровень вибрации ротора** на **рабочих** и **резонансных режимах практически такой же как** после **более трудоемкой** и **время затратной ВЧБ**



АЧХ модели РВД в РБС после НЧБ и ВЧБ





Системы корректирующих грузов

Сравнение величин дисбалансов

Заключение

- **В работе рассмотрены основные принципы подготовки** и **планирования низкоскоростной балансировки роторов** авиационных двигателей с собственными опорами в РБС с использованием цифровой динамической модели стенда и методов математического моделирования

- **На расчетной модели показано**, что что **при одном и том же уровне остаточных дисбалансов** на модулях ротора **виброактивность** всего **ротора в сборе** на **опорах стенда** может **существенно зависеть** от того, как **модули ротора собраны друг относительно друга**

- **Результаты виртуального моделирования** показали, что **применение низкоскоростной методики балансировки ротора в 3-х плоскостях** коррекции при допустимом общем остаточном дисбалансе на роторе **позволяет обеспечить** значительно **более низкий уровень вибрации** ротора во всем диапазоне его рабочих скоростей **в сравнении** с вариантом **низкоскоростной балансировки в 2-х плоскостях** коррекции

- **Описанный в работе подход подготовки** и **проведения виртуальной многоплоскостной низкоскоростной балансировки** может использоваться для **повышения эффективности штатных методик** низкочастотной балансировки и **разработке новых методик**, адаптированных под конструктивные особенности ротора и доступное измерительное оборудование

TRANZIT
DYNAMICS R4

Спасибо за внимание!