

ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский университет "МЭИ"

# **Инновационный подход к подготовке специалистов в области наладки и вибродиагностики энергетического оборудования**

д.т.н. Куменко Александр Иванович,  
д.т.н. Меркурьев Игорь Владимирович,  
к.т.н. Мозгунова Анна Ивановна

03.07.2024

# Кадровая проблема в отрасли тепловой и атомной энергетики.



Факты: После устранения Чубайсом энергетических трестов никакие вузы не готовят кадры по ремонту, наладке и диагностике энергооборудования. От недостатка специалистов страдает триада: турбинный- электрический и котельный цеха.

Турбинный цех Электроцех и котельный цеха ТЭС и АЭС сегодня приглашают на ремонт турбин и насосов людей с сантехническим образованием. Всего на тэс может находиться до 2500 насосов с приводом от двигателя.

На сайте концерна РЭА висит объявление о востребовании 900 механиков инженеров по сборке и монтажу оборудования. Все специалисты в концерне РОСЭНЕРГОАТОМА, отвечающие за балансировку валопроводов, нигде не получали образование, не считая курсов ПК в несколько дней.

В Суоргуте мы применяли около 20 методов Виброналадки. – В мосэнерго применяют едва ли 4-5 вибдов. Основной вид – балансировка.

Практически исчезла культура определения расцентровок опор и на этой основе культура определения центровок роторов по полумуфтам.

# Кадровая проблема в отрасли тепловой и атомной энергетики.



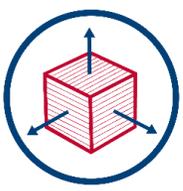
**Факты:** На некоторых станциях Мосэнерго устраняю Низеочаситотную вибрацию по полгода и более.

Лишний пуск на крупном блоке оценивается в миллион долларов в сутки.

Крупный турбоагрегат 1000 МВт в сутки производит около 1000000 кВт \* 24 часа = 24 000000 кВт час. Электроэнергии при цене 1 кВт часа в 3,5 руб, населению продают поставщики по 6 руб за кВт час, получится, что блок производит энергии 84 млн руб. или примерно миллион долларов. При суточном простое косвенные потери могут составлять десятки миллионов долларов.

Таким образом отсутствие специалистов приводит к огромным убыткам как у генерирующих компаний, так и у поставщиков. ЭЭ,.

Пример. В 2012 г. На муфте Ротор генератора – якорь возбуждителя т/ап 1000 МВт Калининской АЭС разрушилось пять призонных штифтов. После улучшения технологии сборки и применения моментной затяжки, разрушились все 12 штифтов. Ремонт занял несколько месяцев. Сожгли шейку ротора генератора, убытки исчислялись огромными суммами.



# Инновационный подход к подготовке специалистов в области наладки и вибродиагностики энергетического оборудования

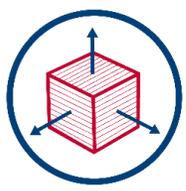


**Цели проекта:** обучение специалистов отделов Техдиагностики с использованием цифровых технологий и современных вибдов **обработки сигналов**

проведение на базе многофункционального научно-учебного испытательного комплекса исследовательских работ для выявления диагностических признаков дефектов и подтверждения характеристик инновационных решений.

Повышение надежности турбоагрегатов за счет разработки и внедрения инновационных решений, проведения исследований и организации дополнительной инженерной подготовки специалистов ОТД филиалов и повышения квалификации кадров в области ремонта, наладки и диагностики основного и вспомогательного роторного оборудования ТЭС на основе комплексного системного подхода.

**Создание технологической установки для проверки и начального обучения нейронных сетей. В стандартах ИСО упоминается необходимость обучения программ искусственного интеллекта, но ~~никаких методических основ не представлено.~~**



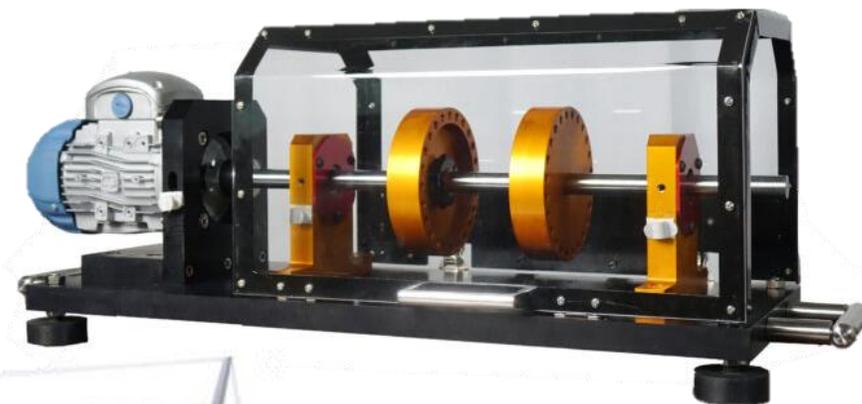
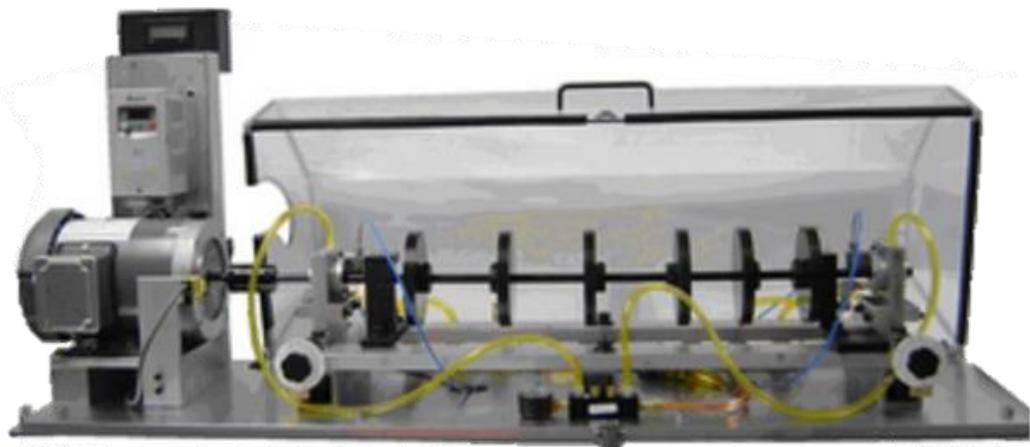
# Инновационный подход к подготовке специалистов в области наладки и вибродиагностики энергетического оборудования

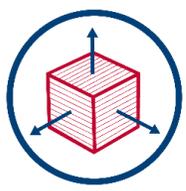


На рис. далее показаны стандартные продаваемые в Европе роторные системы с несколькими массами на шарико-подшипниках (см. слайд.6). Они не годятся для имитации турбинных проблем, так как в Турбинах используются пошинники скольжения. По этой же причине не годится для обучения и валопровод МЭИ на 6-ти опорах (каф. ПГТ., см. слайд 7 ) так как таких физических процессов, как на этом роторе в турбинах не бывает.

Предлагаемый нами стенд, имеет прототип, выполнен по ГОСКОнтракту в НПЦ ДИНАМИКА (г. ОМСК,(слайд 8). Первоначально он был смонтирован на станине экспериментального насоса. Затем в основание был положен брусом из дерева фундамента и сделана резиновая виброизоляция. Были затрачены средства РНФ в сумме 16,5 млн. руб за три года. Получены диагностические признаки при имитации примерно 20 дефектов. (в том числе задевания, прогибы роторов, субгармонические резонансы, автоколебания, расцентровки, влияние температуры масла на границы устойчивости по частоте вращения, Трещины в болтах полумуфт, Угловые несовершенства сборки, Созданы методы балансировки с использованием датчиков вала.

Главные испытания состояли в том, что опоры могут регулироваться плавно, как по высоте, так и в поперечном направлении. Ни один стенд в Европе это не умеет делать. Кроме того, На каждом подшипнике с шейкой 60 мм. Были установлены 4 проксиметра, для фиксации шеек роторов в расточках подшипников, что по стандарту ИСО невозможно выполнить, так как только в Российском ГОСТ прописана полная система датчиков вала (проксиметров), что имеет важное значение для турбоагрегатов мощностью более 200 МВт.





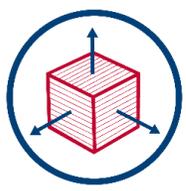
# Актуальность проекта



Многоопорный стенд

В Вузах РФ сегодня **отсутствует** подготовка специалистов в области ремонта, диагностики и пуско-наладочных работ на турбоагрегатах.

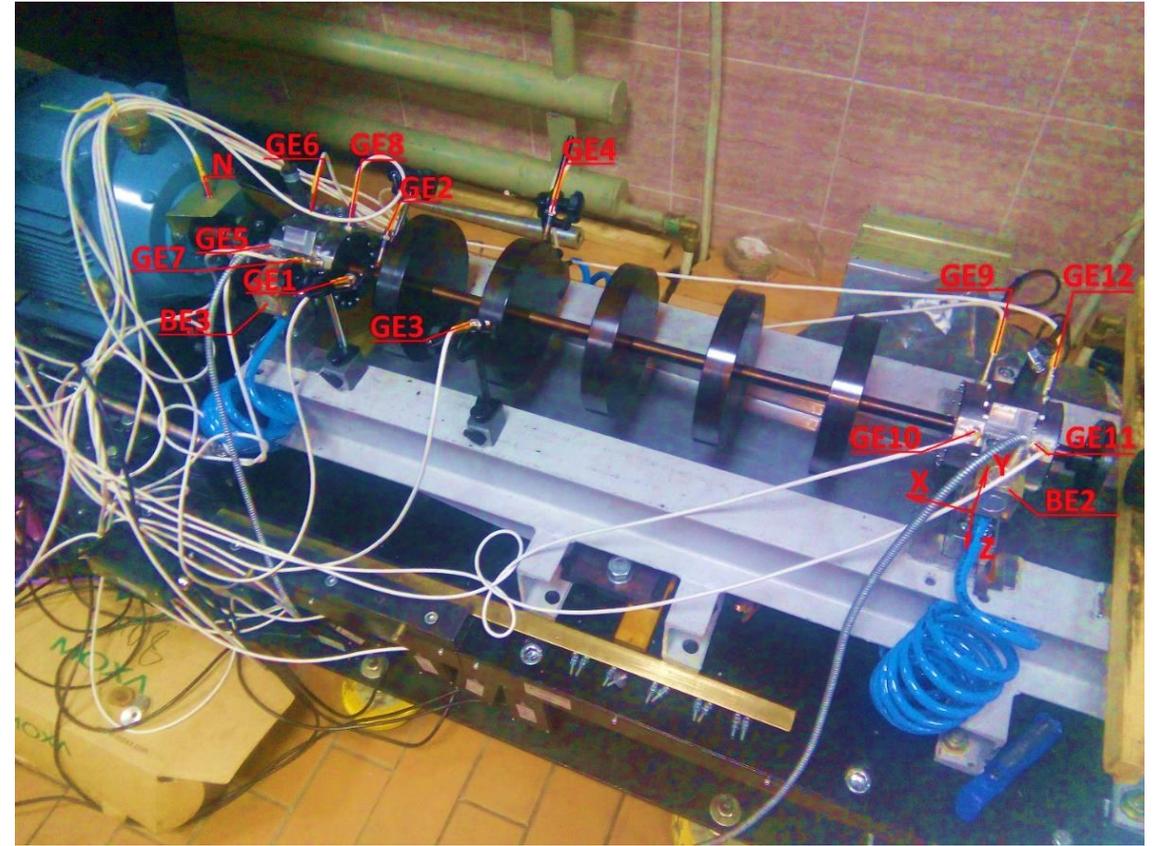
Система обучения, проводимая ремонтными трестами практически уничтожена.



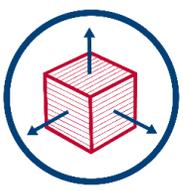
# Прототип проектируемого стенда



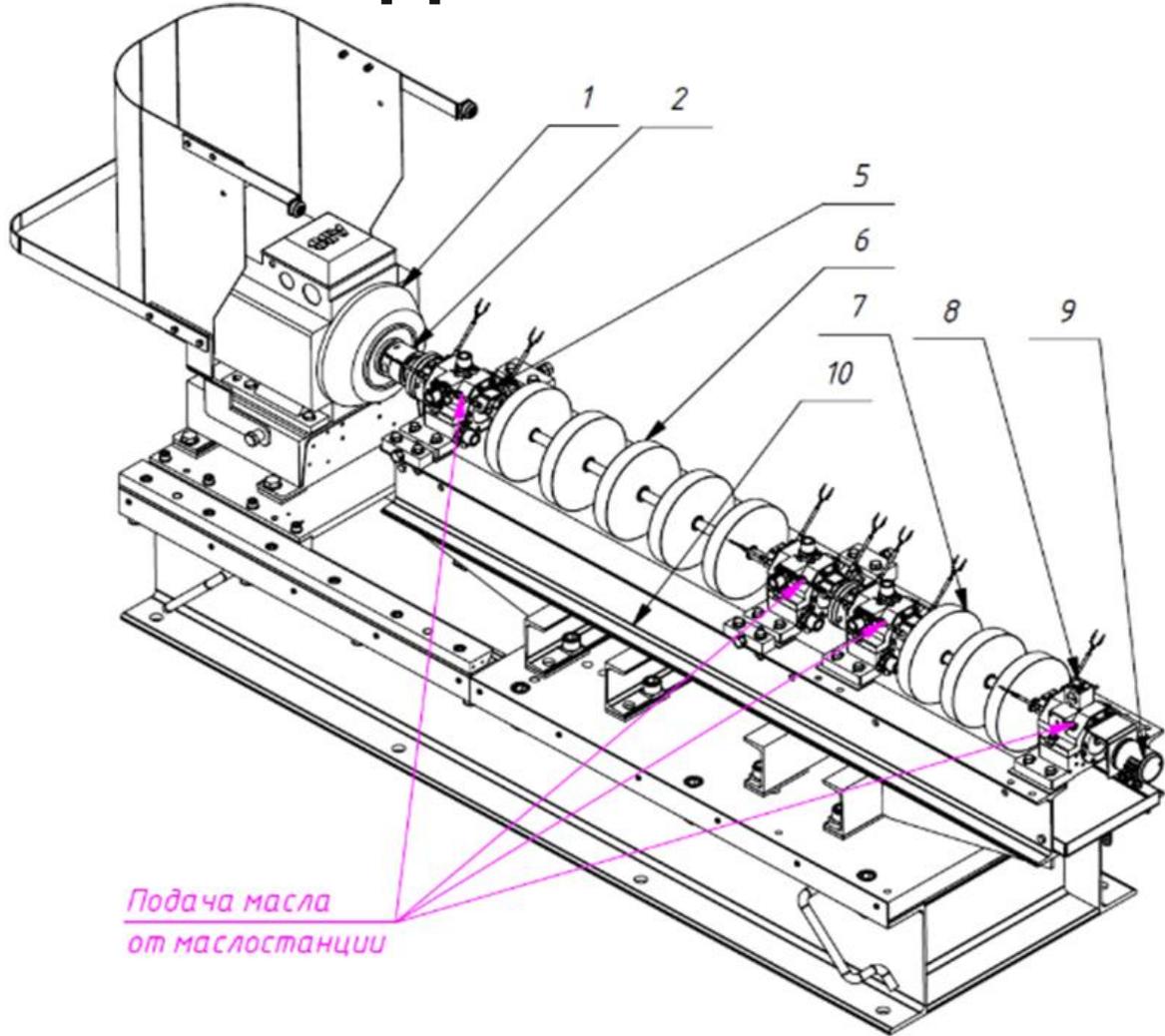
Многоопорный стенд,  
разработанный  
на базе фирмы НПЦ «Динамика»



Прототип проектируемого стенда

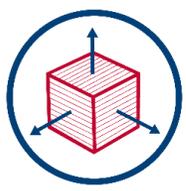


# Макет испытательного роторного стенда



## Макет испытательного роторного стенда

- 1 – асинхронный электродвигатель, 3000 об/мин;
- 2 – полумуфта привода;
- 3 – пьезоэлектрический вибропреобразователь;
- 4 – вихретоковый датчик (14 шт);
- 5 – опора подшипника скольжения с эллиптическим вкладышем;
- 6 – ротор № 1–5 дисков (общая масса 35 кг);
- 7 – ротор № 2–3 диска (общая масса 22 кг);
- 8 – датчик вибрации трехкомпонентный;
- 9 – опора роторной системы

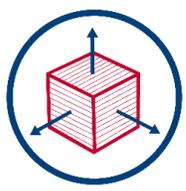


# Реализация проекта



Для реализации предлагаемых работ необходимо **выполнить требования:**

1. создана система, предназначенная для контроля и фиксации задеваний при пуско-наладочных работах и стационарной работе;
2. выполнен аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы по проблеме работы. Должны быть исследованы, обоснованы и выбраны методы и средства измерений перемещений вала, направления исследований и способы решения поставленных задач;
3. обоснован метод измерений с вероятностью обнаружения задеваний не менее 90%;
4. выполнены требования ГОСТ Р 55262. -2012 и ГОСТ Р 55263.2-2012;
5. выработаны предложения и рекомендации по внедрению разработанной системы контроля задеваний роторов паровых и газовых турбин;
6. проведено моделирование задеваний и проверка качества системы на многоопорном стенде МЭИ, имитирующем валопровод турбоагрегата 200 МВт;
7. разработан и изготовлен экспериментальный образец системы с необходимой доработкой узлов турбины и проведена его проверка на натурном объекте;
8. проведены исследовательские испытания системы по разработанной Программе и методикам исследовательских испытаний.



# Реализация проекта



Планируемый цикл лабораторных работ:

№ работы	Название
1	Измерения вибрации и сопутствующих тепловых, механических электрических параметров турбоагрегата
2	Изучение методов оценки погрешностей при измерениях
3	Применение спектрального анализа для анализа вибрационного состояния
4	Балансировка ротора
5	Балансировка многоопорного валопровода
6	Центровка роторов по полумуфтам. Оценка корректирующих центровок
7	Диагностика ротора с трещиной
8	Диагностика ротора при разрушении болтов полумуфт

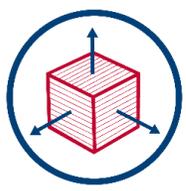


# Реализация проекта



Планируемый цикл лабораторных работ:

№ работы	Название
9	Диагностика роторов с «коленчатостью»
10	Диагностика роторов с дефектом типа «маятник»
11	Диагностика роторов с остаточным прогибом
12	Балансировка роторов с остаточным прогибом
13	Измерение крутильных и изгибно-крутильных колебаний (ИКК)
14	Диагностика дефектов по изменению характеристик ИКК
15	Диагностика слабых задеваний роторов о статор
16	Диагностика люфтов на опорных поверхностях и отрывов опор



# Реализация проекта



Планируемый цикл лабораторных работ:

№ работы	Название
17	Диагностика расцентровок опор. Изучение влияния взаимного положения опор на вибрацию вала и динамические свойства системы. Имитация расцентровок опор путем регулировки их пространственного положения
18	Диагностика НЧВ (автоколебаний)
19	Диагностика субгармонических колебаний
20	Настройка и оптимизация гасителей колебаний для борьбы с вибрациями на нескольких частотах
21	Определение дефектов роторов типа трещина методом удара
22	Влияние переноса грузов на сбалансированность ротора. Практическое применение методов переноса грузов для снижения вибраций и повышения надежности



# Реализация проекта



Планируемый цикл Лабораторных работ охватывает практически все виды явлений и способов обработки сигналов, начиная с орбит и АФЧХ шеек роторов и опор для балансировки и кончая величинами всплытия для отработки технологии мониторинга центровок роторов и напряжений в элементах валопровода. Множество решений (более 60 %) предлагается впервые.

Обучение на таком стенде позволит на практике изучить основные вибрационные явления и закономерности связанные с проявлением форм колебаний, что позволит меньше делать ошибок будущим специалистам по диагностике, центровке и балансировке роторов, сокращать количество балансировочных пусков роторов, правильно назначать минимальные зазоры при ремонте турбоагрегатов.

## Список литературы

**Костюк, А.Г.** Динамика и прочность турбомашин [Текст] / А.Г. Костюк. – М.: Издательство МЭИ, 2000.

**Костюк, А.Г.** Расчет характеристик динамической устойчивости валопроводов мощных паровых турбоагрегатов [Текст] / А.Г. Костюк, А.П. Ручнов, А.И. Куменко // Теплоэнергетика. – 1987. – № 8. – С. 9–12.

**Куменко, А.И.** Критерии надежности и мониторинг технического состояния мощных турбоагрегатов с использованием статических и динамических сил [Текст] / А.И. Куменко, Н.Ю. Кузьминых. А.В. Тимин // [XXI Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике, 28 февраля – 2 марта 2017 г. – М.: ЦВК «Экспоцентр», 2017.](#)

**Kumenko, A.I.** Self-excited and subharmonic vibrations in a pilot rotor [Electronic resource] / A.I. Kumenko, V.N. Kostyukov, N.Yu. Kuzminykh and A.V. Timin // AIP Conference Proceedings 1876, 020090 (2017); doi: 10.1063/1.4998910 View online: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4998910>. View Table of Contents: <http://aip.scitation.org/toc/apc/1876/1>. Published by the American Institute of Physics.



# Реализация проекта



## Список литературы -продолжение

**Куменко, А.И.** О проблеме прогибов роторов и возможности правки роторов высокого и среднего давления мощных турбин системами балансировочных грузов [Текст] / А.И. Куменко, В.Ю. Махнов, М.И. Шкляров // Надежность и безопасность энергетики. – 2009. – № 4.

Вибрации в технике [Текст]: в 6 томах. – М.: Машиностроение, 1979. – Т. 1.

**Костюк, А.Г.** Анализ нелинейных колебаний систем ротор-подшипники [Текст] / А.Г. Костюк, А.Л. Некрасов, А.И. Куменко // Сб. трудов межд. конф. «Динамика роторных систем», 21–23 мая 1996 г., Украина, г. Каменец-Подольский. – С. 37–39.

**Костюк, А.Г.** Анализ субгармонических колебаний систем «ротор – подшипники скольжения» [Текст] / А.Г. Костюк, А.Л. Некрасов, А.И. Куменко // Теплоэнергетика. – 1998. – № 1. – С. 10–15.

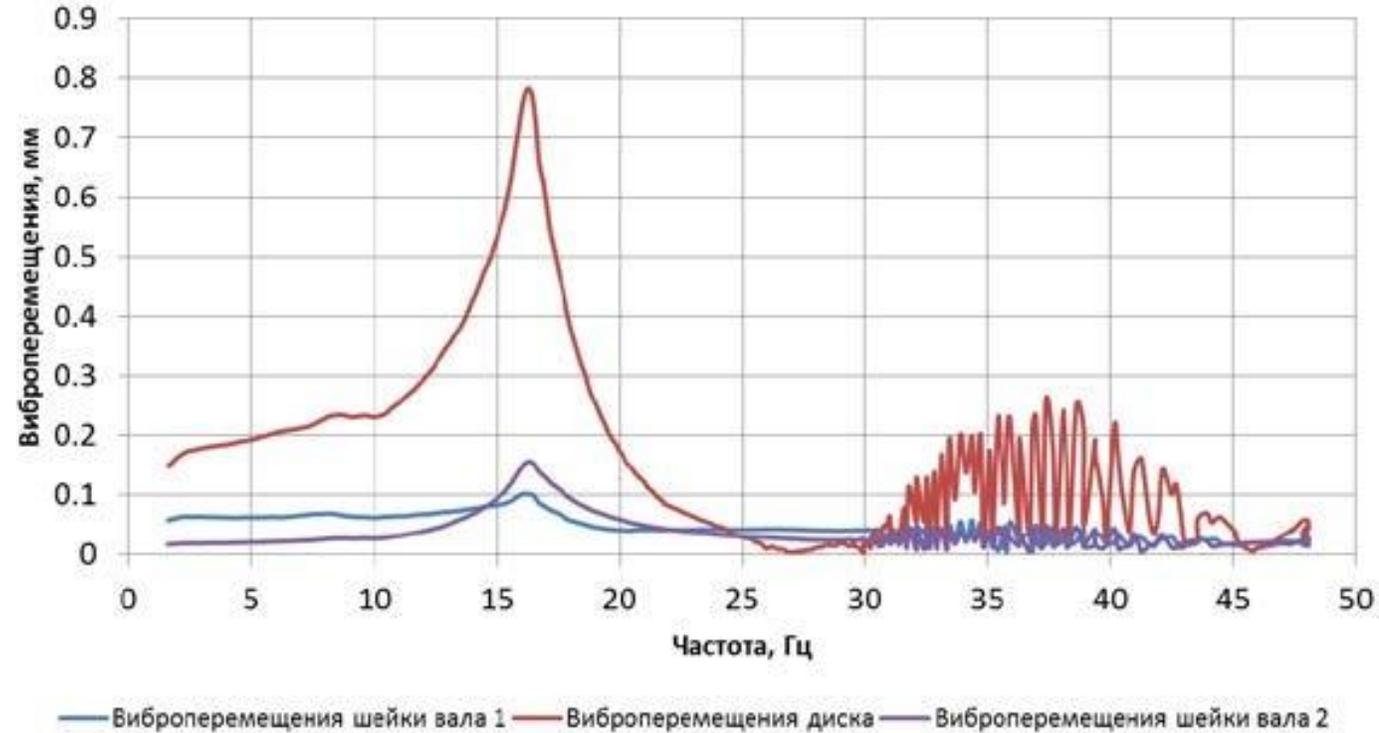
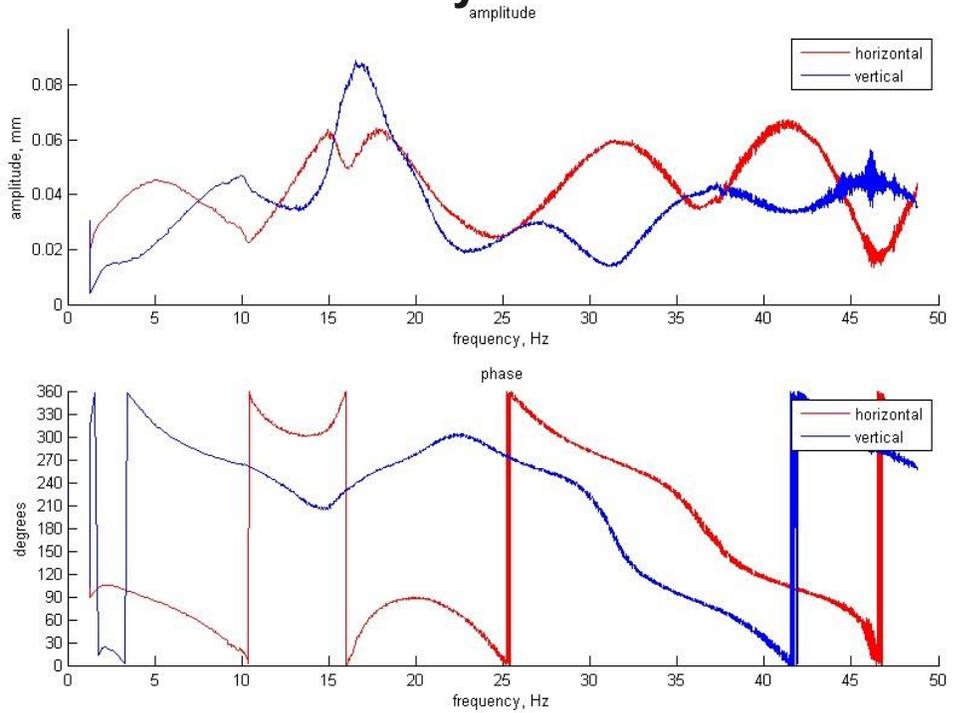
**Adams, H.L.** Protect against large rotor unbalance [Text] / H.L. Adams // Power. – 1981. – Vol. 125. – No 7. – P. 52–54. 10. Риски возникновения автоколебаний и субгармонического резонанса роторов при сборке подшипников, опор и валопроводов турбоагрегатов [Текст]: V научно-технический семинар «Современные технологии сборки», 19–20 октября 2017 г. – М.: Московский политехнический университет, 2017. – С. 26–34.

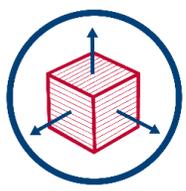
**Куменко, А.И.** Низкочастотная вибрация роторов турбин, ее причины, методы диагностирования и устранения [Текст] / А.И. Куменко // Сборка в машиностроении и приборостроении. – 2006. – № 4.

**Muszynska, Agnieszka (Agnes)** Rotordynamics [Text] / Agnieszka (Agnes) Muszynska. – London – New York, 2010. – 1240 p.

**Bently, D.** Vibration Diagnostics of rotating Machinery [Text] / D. Bently. – 2004. – 960 p.

На слайдах 16 и 17 Показаны АФЧХ роторов стенда прототипа и полученные гистерезисные явления при автоколебаниях, а так же уникальное явление затухания автоколебаний при подъеме частоты вращения, что противоресчит установившемся понятиям.





# Заключение

