А.И. КУМЕНКО, А.В. ТИМИН, Н.Ю. КУЗЬМИНЫХ
(ООО» НПЦ «Динамика», г. Москва, Россия)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ РАСЦЕНТРОВОК И НЕУРАВНОВЕШЕННОСТИ НА РОТОРНОМ СТЕНДЕ *

В докладе приведены предварительные результаты экспериментального исследования для двух задач:

• проверка методик определения расцентровок опор по данным измерений всплытия цапф датчиками вала [1–3];

• определение обобщенных чувствительностей, измеренных по валу в диапазоне частот от 0 до рабочей частоты вращения и необходимых для совершенствования методики мониторинга и диагностики остаточных неуравновешенностей валопровода.

Попутно изучалось влияние расцентровок на динамические характеристики роторов 4-опорного валопровода на стенде (рис. 1) с плавно регулируемым перемещением опор [1] (рис. 2).

Из четырех опор три были выполнены с плавной регулировкой их положения для возможности задания произвольных взаимных положений опор. Передний подшипник остался без регулировки, так как короткий муфтовый пролет для соединения с двигателем на подшипниках качения практически не позволял цапфе свободно всплывать. Она всплывала на 20 % меньше, чем остальные.

Для повышения точности измерений всплытия на цапфах установлено по две пары датчиков вала в соответствии с ГОСТ Р 55263–2012. Зазоры в эллиптических подшипниках диаметром 60 мм и длиной 38 мм составили в среднем 0,25 мм. Предварительно валопровод был собран без расцентровок. Затем путем плавного смещения опор друг относительно друга с шагом 0,05 мм задавались расцентровки в вертикальной плоскости. В каждом положении регистрировалось всплытие и вибрация вала. Частота вращения менялась от 0 до 50 Гц.

Результаты измерения всплытия вала показали, что достоверно определить всплытие можно только в области устойчивой работы ротора. При возникновении автоколебаний, когда их амплитуда велика, движение шейки вала оказывается хаотичным и не существует ее устойчивого среднего положения, вокруг которого она прецессирует, видимо из-за несинхронности автоколебаний.

На рис. 3 показаны траектории всплытия слева и справа на 2-м подшипнике при номинальном положении опор. При повторении пусков и тех же условиях центровки повторяемость высокая и трудно отличить разницу.

На рис. 4 показаны траектории всплытия смежного подшипника № 3 (ротор легче в полтора раза).

* Данная работа выполняется при финансовой поддержке РНФ в соответствии с соглашением № 15-19-00267 от 19 мая 2015 г.

Рис. 1. Общий вид испытательного стенда, оснащенного системой измерений (голубые гибкие шланги – подвод масла к подшипникам)

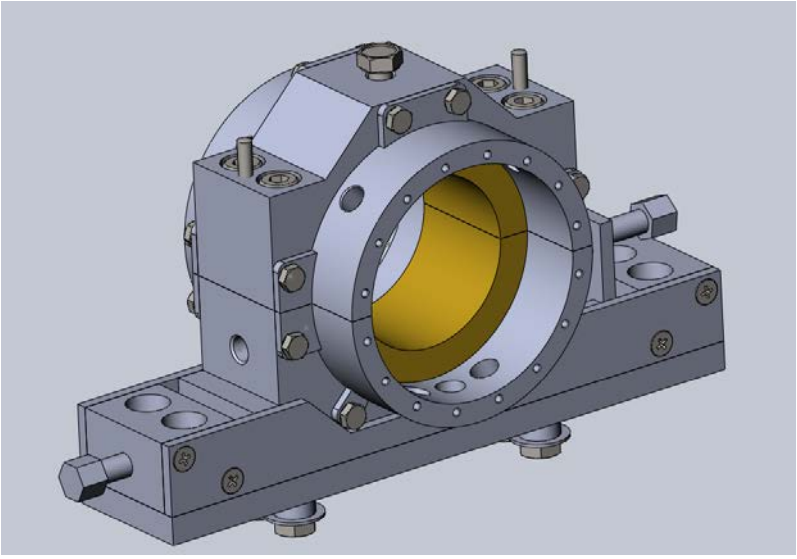
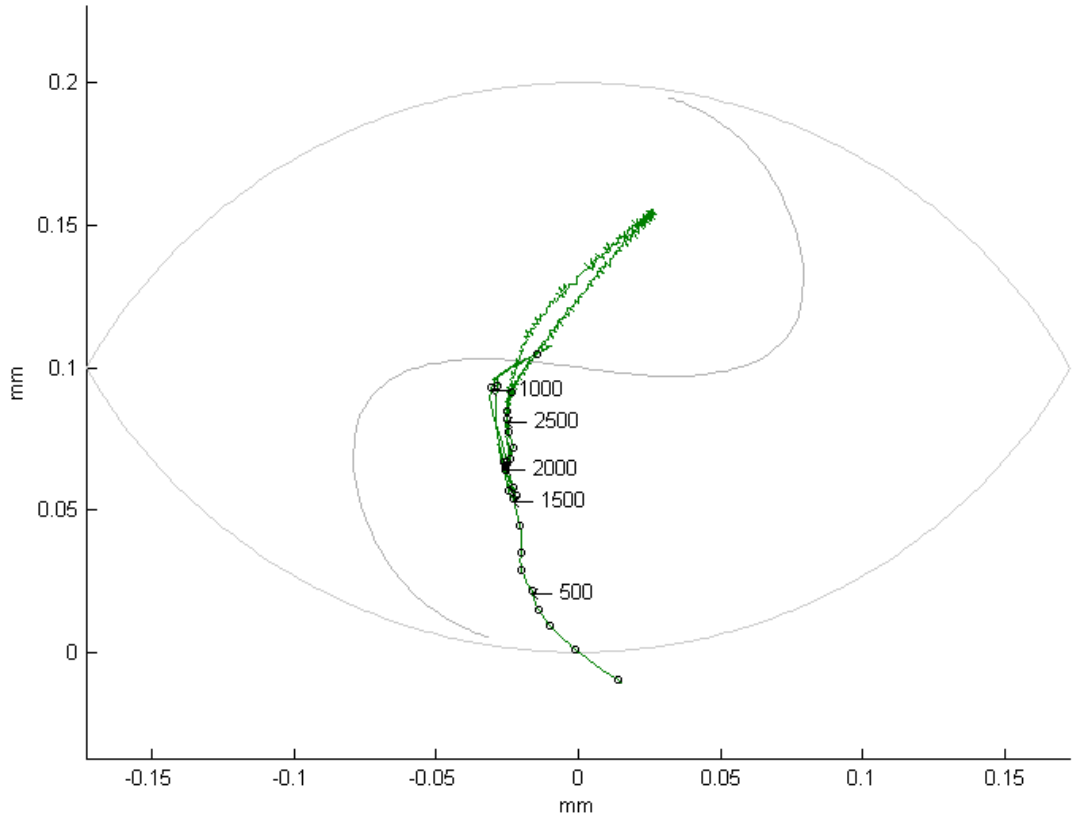


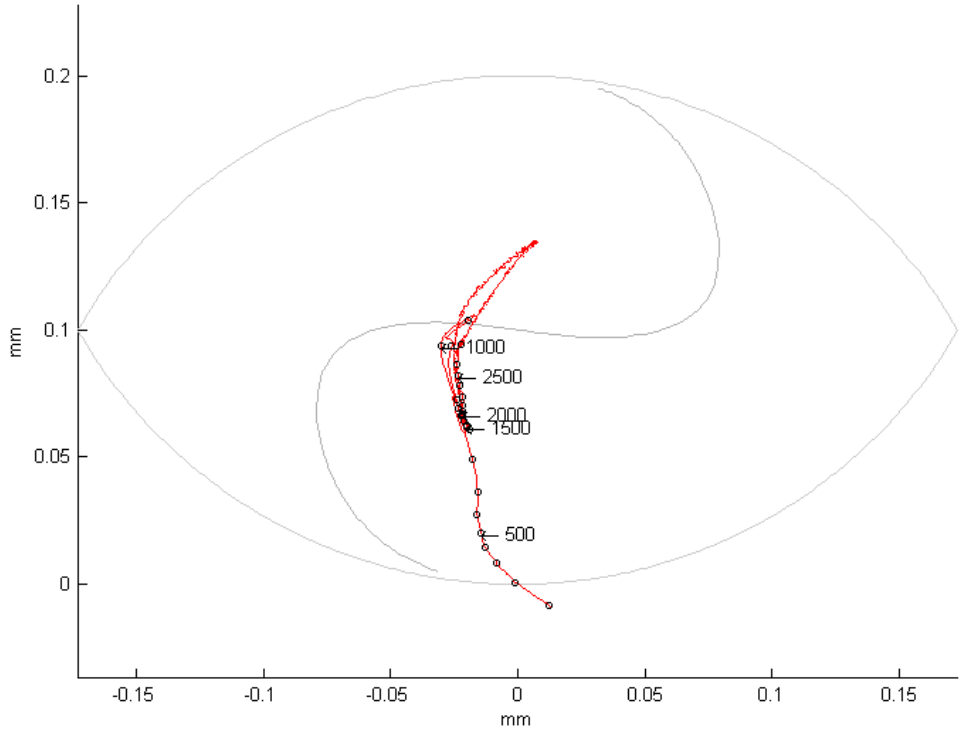
Рис. 2. Опора стенда с регулируемым положением центра расточки подшипника по высоте и в поперечном направлении.

На рис. 5 показаны траектории всплытия слева и справа на 2-м подшипнике при подъеме опоры 2 на 0,2 мм. Видно, что подшипник всплывает, как и положено меньше, так как нагружен.

Результаты измерения всплытия вала и расчеты корректирующих центровок подтвердили экспериментально возможность мониторинга и вычисления расцентровок смежных опор. Для роторной системы стенда выполнены предварительные расчеты в соответствии с методикой [2]. Точность определения расцентровок опор на данном этапе достигает более 80 от заданных величин. При взаимном смещении опор на 0,2–0,4 мм, расчеты расцентровок с использованием матрицы жесткости валопровода в соответствии с методикой [2, 3] дают 0,165–0,33 мм.



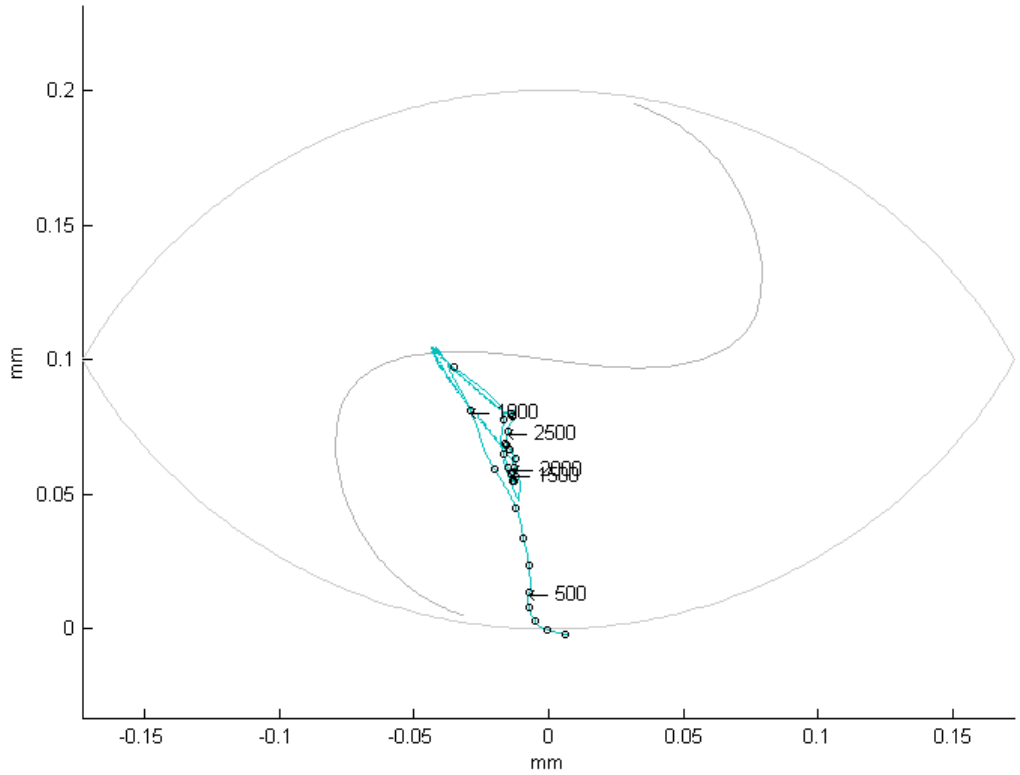
а)



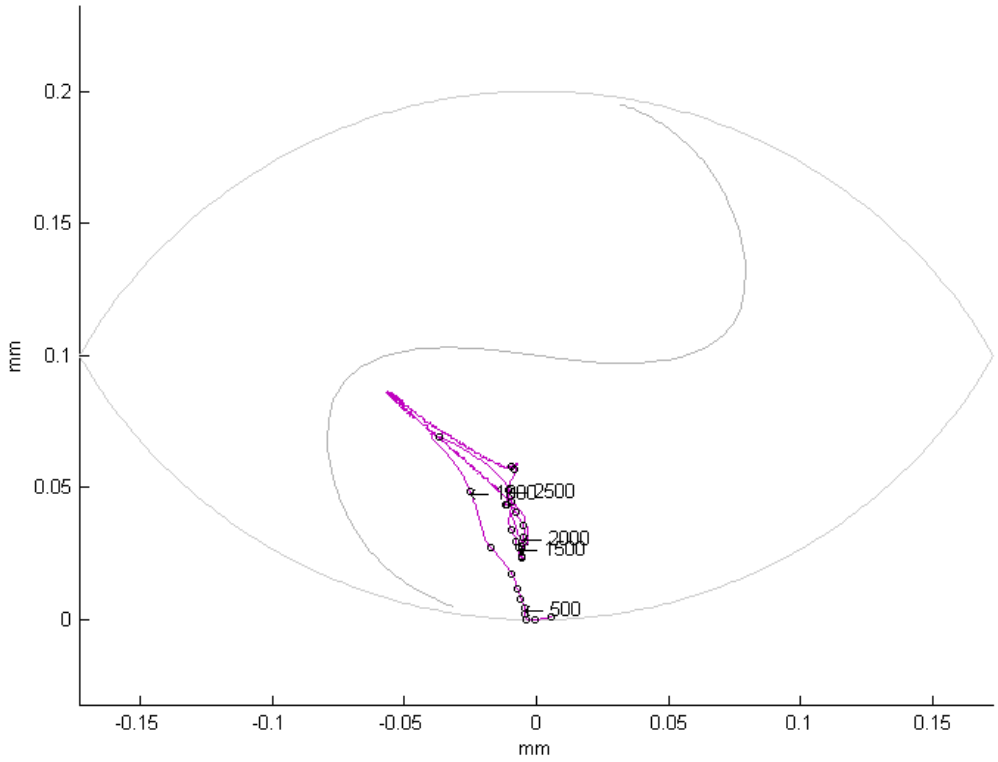
б)

Рис. 3. Траектории всплытия слева и справа на 2-м подшипнике в области возможных перемещений. Положение опор – номинальное:

а – подшипник № 2 сечение цапфы слева (без расцентровок); *б* – подшипник № 2 сечение цапфы справа (без расцентровок)



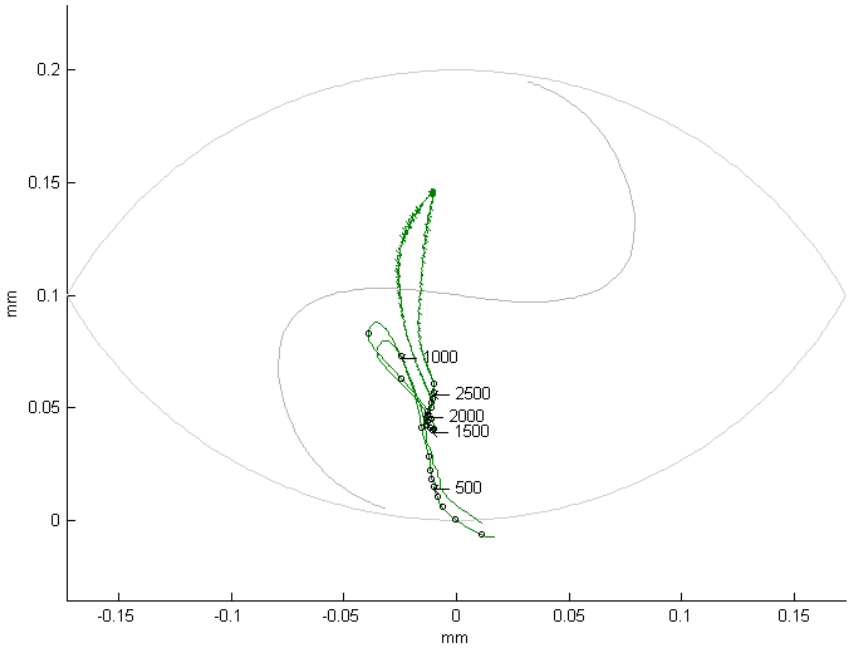
а)



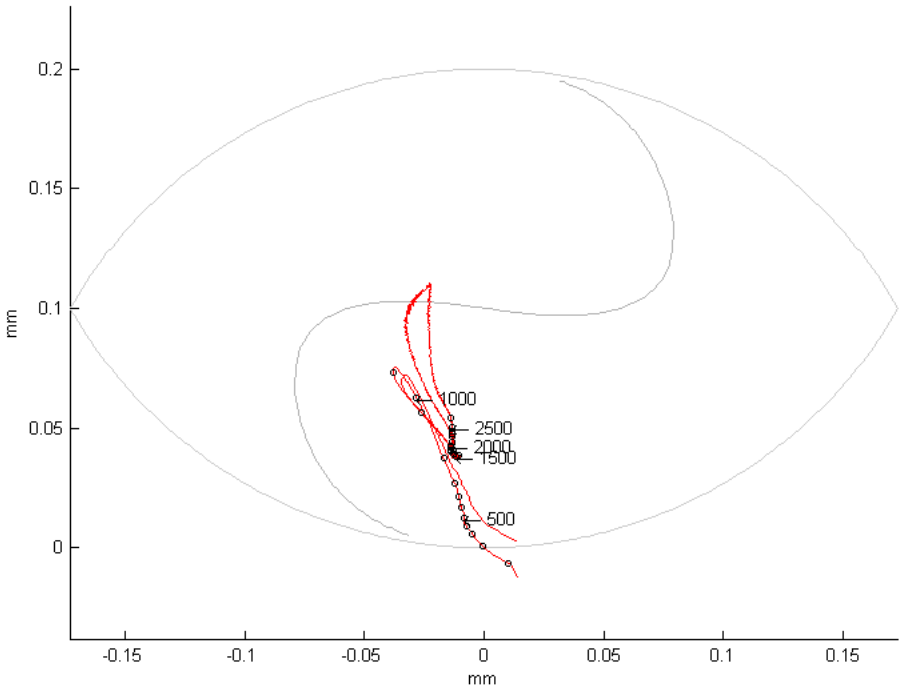
б)

Рис. 4 Траектории всплытия слева и справа на 3-м подшипнике в области возможных перемещений. Положение опор – номинальное:

а – подшипник № 3 сечение цапфы слева (без расцентровок); *б* – подшипник № 3 сечение цапфы справа (без расцентровок)



а)



б)

Рис. 5. Траектории всплытия слева и справа на 3-м подшипнике в области возможных перемещений. Положение опор – подъем опоры № 2 на 0,2 мм:

а – подшипник № 2 сечение цапфы слева (Подъем опоры № 2 0,2 мм); *б* – подшипник № 2 сечение цапфы справа (подъем 0,2 мм)

Точнее установить величины расцентровок на маломасштабном стенде невозможно из-за погрешностей измерений малых величин. Погрешность линейного измерительного инструмента с учетом погрешностей установки опор 10 %, погрешность показаний датчиков вала в соответствии с ГОСТ не превышает 10 %, реально показания перемещений фиксируются

до 1 мкм и менее, однако базовое положение шеек при боковом зазоре в 200 мкм определяется с точностью до 10 мкм. Для крупных агрегатов эта точность возрастает благодаря тому, что абсолютные значения зазоров увеличиваются в несколько раз.

Для повышения точности, как уже отмечалось в [2, 3], необходимо повышать точность расчета характеристик всплытия подшипников и погрешность измерений перемещений вала нужно снижать до 5 %. Однако имеющейся точности определения расцентровок вполне достаточно для практики и систему мониторинга [2, 3] можно рекомендовать для опытного использования на крупных агрегатах.

Далее в докладе приведены результаты влияния температуры и расцентровок на характеристики вынужденных колебаний в диапазонах устойчивой работы системы роторов, на рис. 6 – АФЧХ 2-й цапфы (слева) для неотбалансированного ротора при температуре масла на входе $t_м$ = 43 °С. Следует отметить, что ротор имеет остаточную кривизну около 0,35 мм.

Хорошо видно, что первую критическую частоту цапфа ротора № 1 проходит с размахом более 150 мкм. Потеря устойчивости возникает в районе 38 Гц. На рис. 7 для той же цапфы при температуре, близкой к 42 °С представлены АФЧХ отбалансированного ротора. Видно, что вибрация цапфы упала в 2,5 раза. Отчетливо видны 2 пика на первой критической частоте, так как подшипники эллиптические и боковой зазор приблизительно в 2 раза больше вертикального. Необходимо обратить внимание на то, что границы устойчивости отбалансированного ротора поднялись и практически достигли 47 Гц, т. е. стали выше на 9 Гц. При падении температуры масла до 36–38 градусов граница устойчивой работы снижается до прежних 37 Гц (рис. 8).

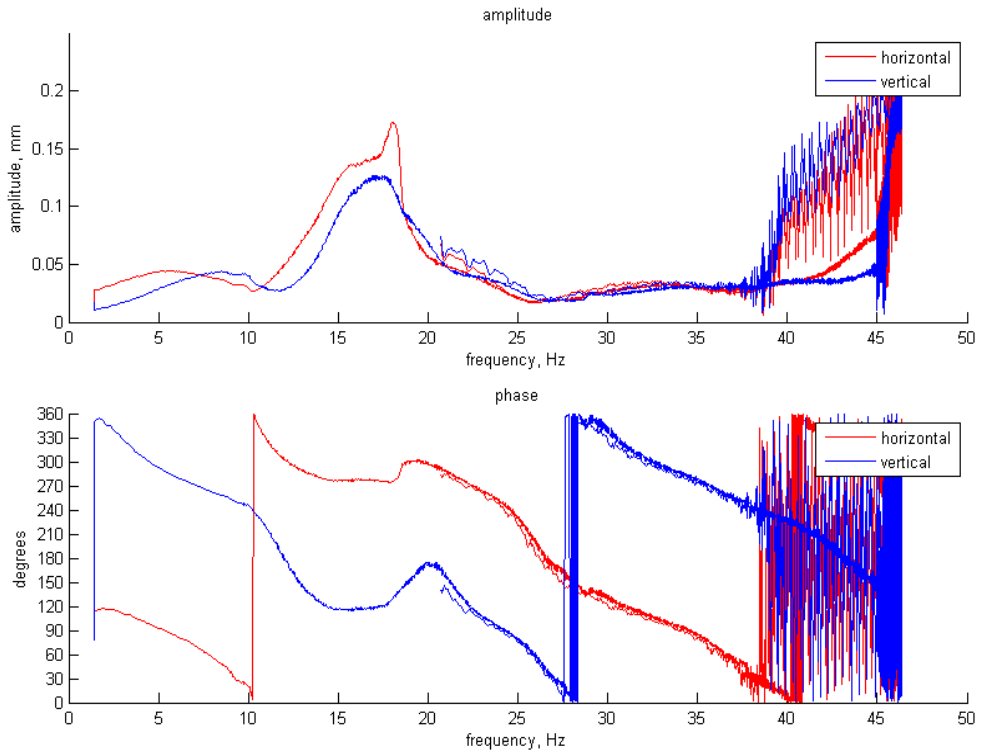


Рис. 6. АФЧХ 2-й цапфы слева для неотбалансированного ротора, $t_м$ = 43 °С

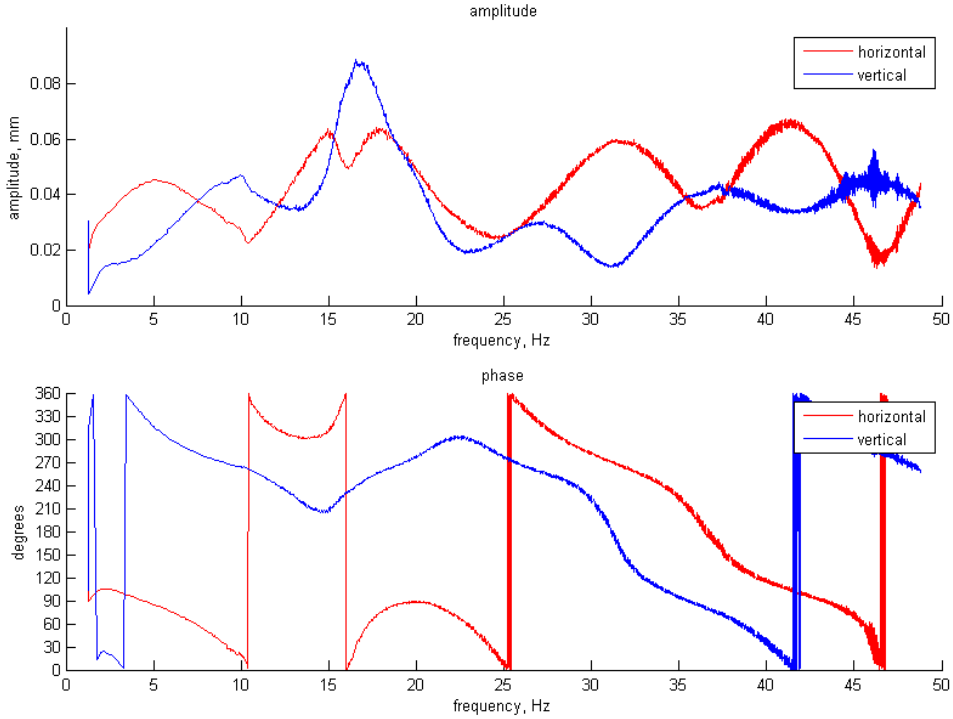


Рис. 7. АФЧХ 2-й цапфы (слева) для отбалансированного ротора, $t_м$ = 42 °С

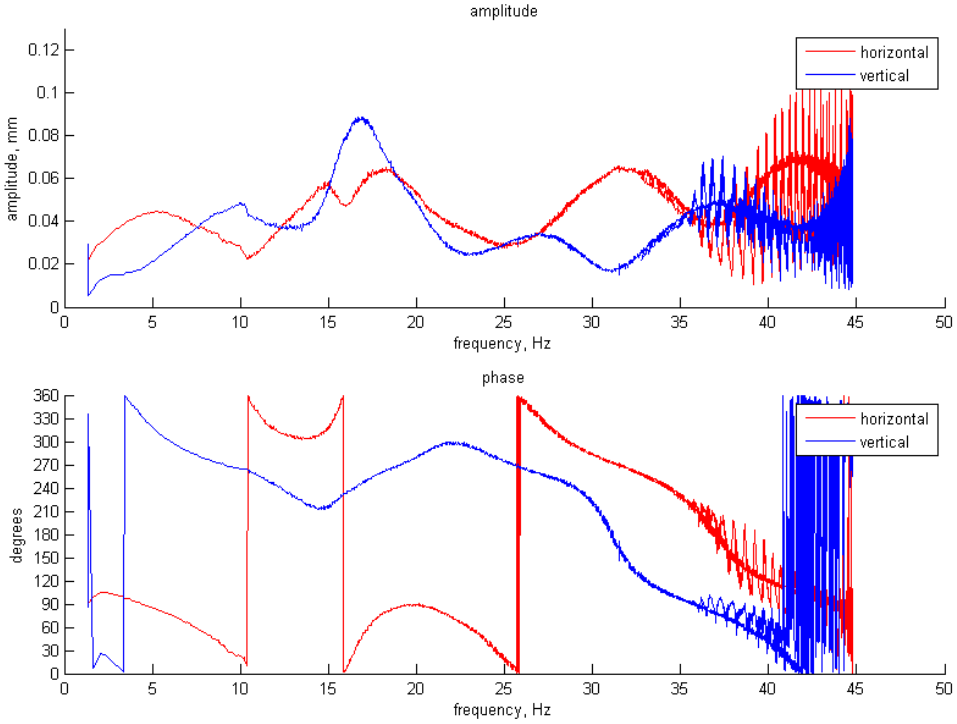


Рис. 8. АФЧХ 2-й цапфы слева для отбалансированного ротора, $t_м$ = 36 °С

Аналогичные процессы происходят и в середине пролета ротора № 1, на диске 3 (рис. 9–11). Для неотбалансированного ротора размах превышает 1 мм. После балансировки размах падает более, чем в 3 раза (см. рис. 10). Но грузы, установленные для балансировки, не выпрямляют полностью прогиб, и он уменьшается лишь до 0,3 мм.

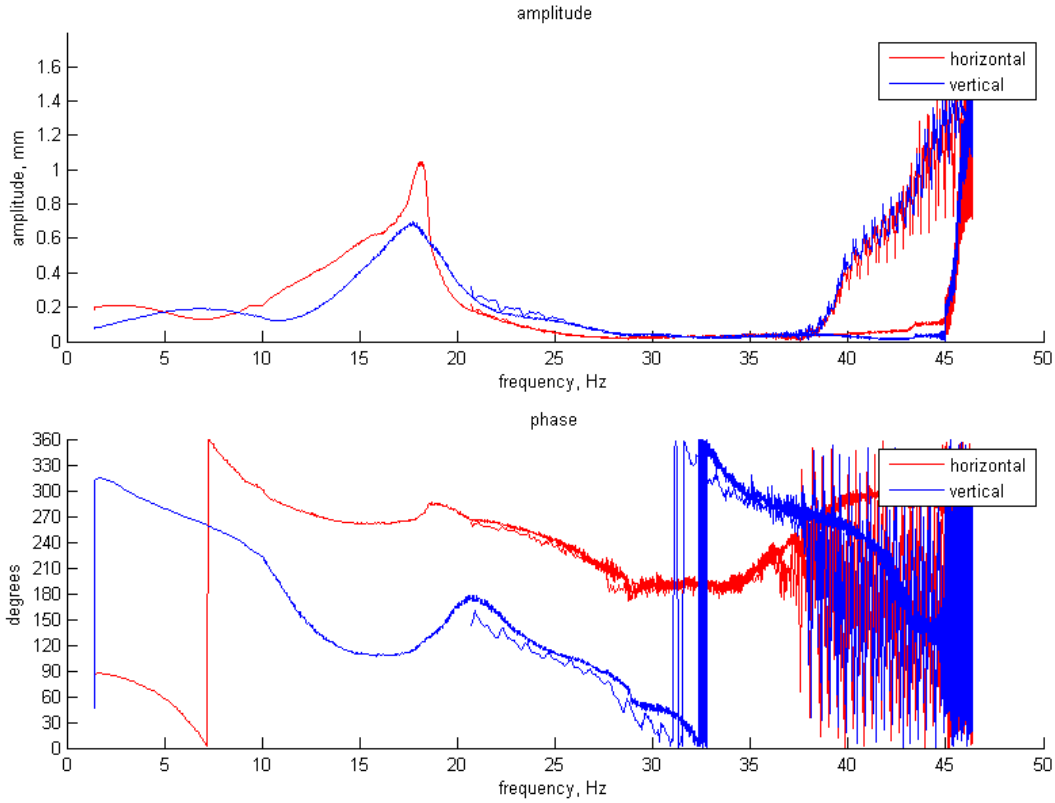


Рис. 9. АФЧХ 2-й цапфы слева для отбалансированного ротора, $t_м$ = 36 °С

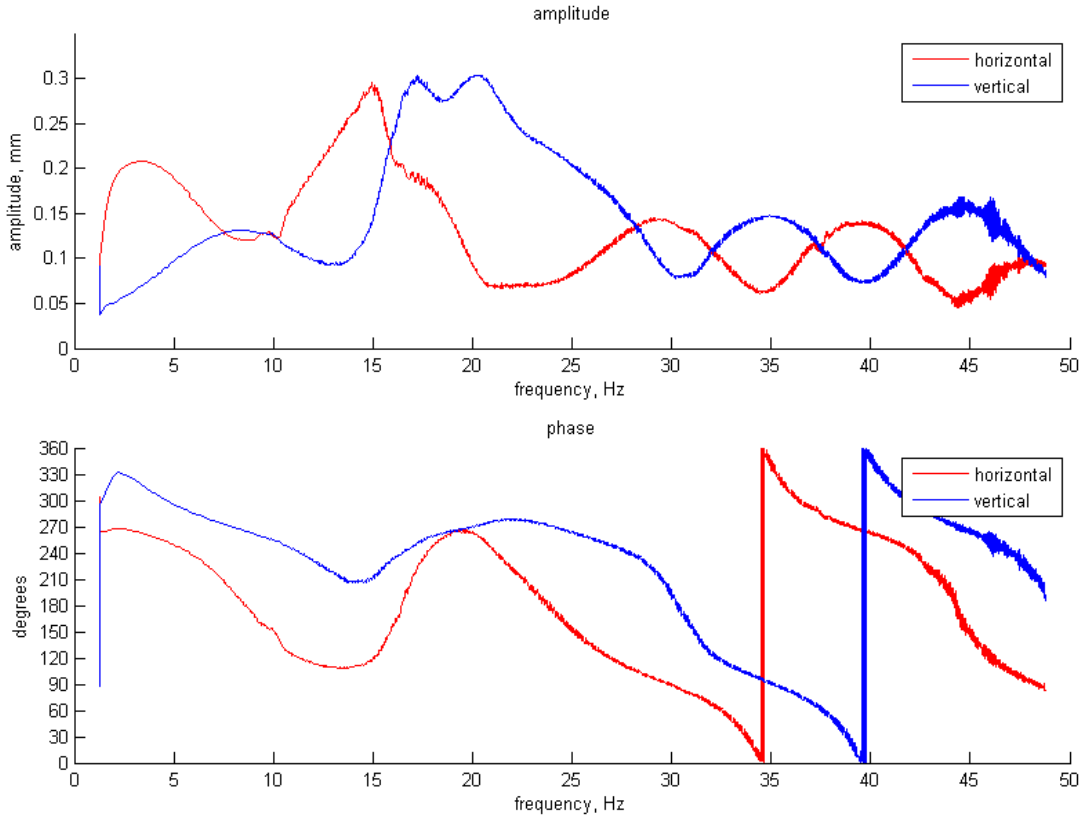


Рис. 10. АФЧХ 3-го диска отбалансированного ротора, $t_м$ = 42 °С

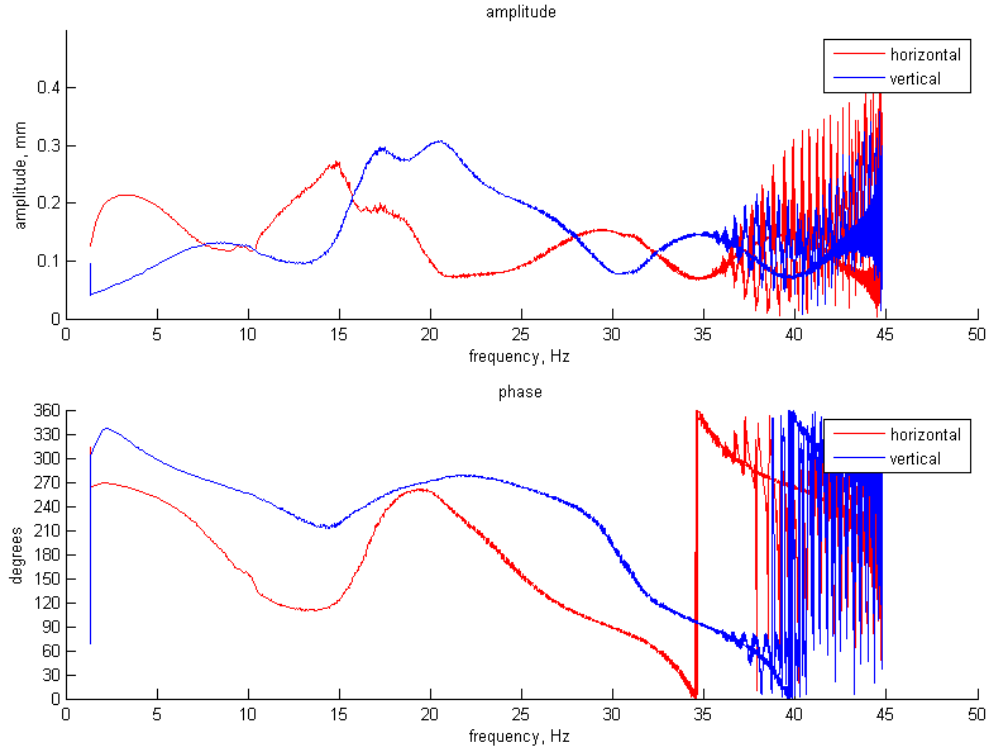


Рис. 11. АФЧХ 3-го диска отбалансированного ротора, $t_м$ = 36 °С

При снижении температуры размахи и фазы движения середины ротора меняются мало, за исключением зоны потери устойчивости (см. рис. 10 и 11).

Выводы

1. Результаты измерения всплытия вала показали, что достоверно определить всплытие можно только в области устойчивой работы ротора.

2. Результаты измерения всплытия вала и расчеты корректирующих центровок подтвердили экспериментально возможность мониторинга и вычисления расцентровок смежных опор. Соответствующую методику можно рекомендовать для внедрения на крупных турбоагрегатах.

3. Повторяемость измерений – высокая.

4. Точность определения расцентровок опор на данном этапе достигает более 80 % от заданных величин. При определении расцентровок опор с такой точностью для практики вполне достаточно.

5. Для повышения точности расчетов расцентровок необходимо повышать точность расчета характеристик всплытия подшипников, а погрешность измерений перемещений вала нужно снижать до 5 %. Для этого необходимы статистические данные по положению цапф за достаточно длительный период времени (неделя, месяц) с выборкой одинаковых установившихся режимов работы по температурам масла, режимным параметрам по нагрузке на турбоагрегат.

6. Приведены АФЧХ для разных условий работы роторов. Показано влияние температуры масла на АФЧХ цапф и середины пролета для отбалансированного и неотбалансированного роторов.

Список литературы

1. **Куменко, А.И.** Мониторинг распределенной неуравновешенности экспериментального ротора с использованием датчиков вала [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., Москва, ЦВК «Экспоцентр». – М., 2017.

2. **Куменко, А.И.** Разработка элементов системы мониторинга технического состояния турбоагрегатов ТЭС и АЭС. Примеры моделирования расцентровок опор [Текст] / А.И. Куменко, В.Н. Костюков, Н.Ю. Кузьминых, А.В. Тимин // Теплоэнергетика. – 2017. – № 9. – С. 1–11.

3. **Куменко, А.И.** Разработка элементов системы мониторинга технического состояния турбоагрегатов ТЭС и АЭС. Методология использования датчиков вала [Текст] / А.И. Куменко, В.Н. Костюков, Н.Ю. Кузьминых // Теплоэнергетика. – 2017. – № 8. – С. 17–23.

4. **Kumenko, A.I.** Анализ влияния статических характеристик опор и податливости масляного слоя на параметры коррекции центровок роторов [Текст] / А.И. Куменко, Н.Ю. Кузьминых, А.В. Тимин // Труды XVIII Междунар. научно-практ. конф. «Энергоресурсосбережение. Диагностика–2017. – Димитровград, 2017.

5. **Kumenko, A. I.** Self-excited and subharmonic vibrations in a pilot rotor. / 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

Открытое акционерное общество
«Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени
Теплотехнический научно-исследовательский институт»
(ОАО «ВТИ»)

Общество с ограниченной ответственностью «Диамех 2000»
(ООО «Диамех 2000»)

IX Международная
научно-техническая
конференция

ПРОБЛЕМЫ ВИБРАЦИИ, ВИБРОНАЛАДКИ, ВИБРОМОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Сборник докладов

22–24 ноября 2017 г.

Под общей редакцией
канд. техн. наук Д.В. Тарадая

Москва
ОАО «ВТИ»

УДК 620.178.51:621.311.22
ББК 31.37–5
П-78

П-78 Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций [Текст]: сб. докл. / под общ. ред. канд. техн. наук Д.В. Тарадая // IX Международная научно-техническая конференция. – М.: ОАО «ВТИ», 2017. – 250 с.
ISBN 978-5-905858-21-5

Посвящен широкому спектру вопросов, касающихся проблем вибрации и повышения вибрационной надежности турбин, генераторов и вспомогательного оборудования ТЭС и АЭС.
Рассматриваются такие темы, как современное вибрационное состояние оборудования электростанций, важнейшие повреждения и технологические нарушения последних лет, диагностика, поиск методов и средств предупреждения различных дефектов оборудования с помощью переносной и стационарной аппаратуры; применение новых технологий при ремонте, организация и оптимизация виброналадочного процесса, мониторинг крутильных колебаний валопроводов турбоагрегатов, опыт эксплуатации, перспективы совершенствования надежности и повышения эффективности питательных насосов российских и зарубежных фирм.
Предназначен для широкого круга специалистов-электроэнергетиков и может быть полезен работникам электростанций, научно-технических, проектно-конструкторских и наладочных организаций.

ПМБ ВТИ. РФ, 115280, г. Москва, ул. Автозаводская, д. 14.
Тираж 120 экз. Зак. № 73.

ISBN 978-5-905858-21-5
© ОАО «ВТИ», 2017