

УДК 621.181

ДИАГНОСТИКА ПОПЕРЕЧНЫХ ТРЕЩИН В РОТОРАХ ТУРБОМАШИН

Сидорук Ю.С., Трахимович И.А.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Качан С.А.

На сегодняшний день в белорусской, как и в российской, энергетике значительное количество турбоагрегатов выработали свой ресурс.

В течение эксплуатации элементы конструкций оборудования подвергаются разным видам износа (усталостный, абразивный, коррозионный, квантанционный), накапливается по разным причинам технологический дисбаланс. Все эти факторы увеличивают вероятность появления трещин во вращающихся деталях. Особенно опасны трещины, появляющиеся и развивающиеся на роторах (рисунок 1). Ситуация усугубляется тем, что в последние годы межремонтный период эксплуатации турбоагрегатов имеет тенденцию к увеличению.

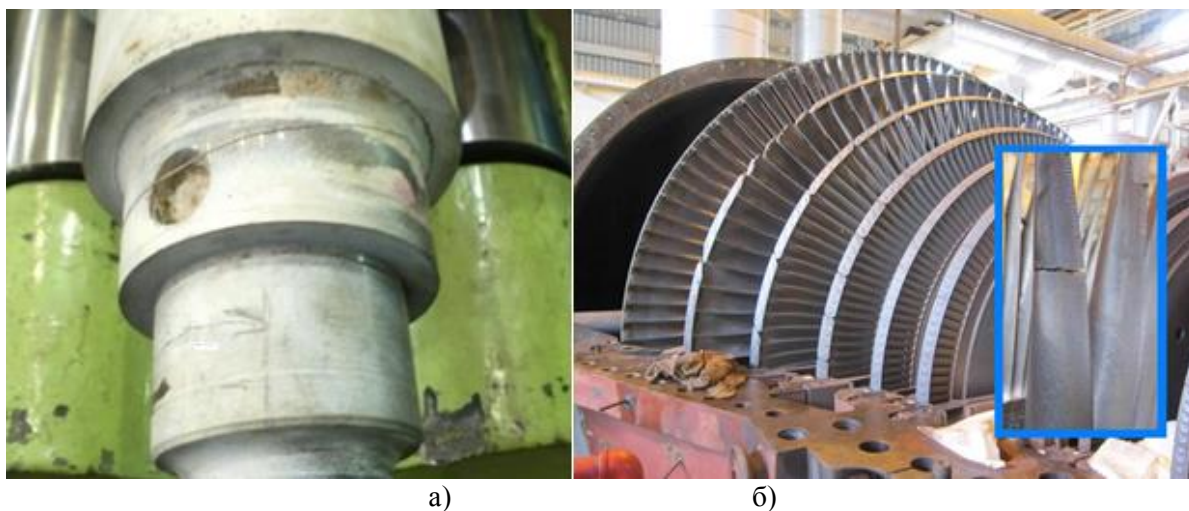


Рисунок 1. Трещины на роторе (а) и лопатке последней степени (б)

В федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования (ФГБОУ ВПО) «Санкт-Петербургский институт машиностроения» разработана методика выявления поперечной трещины на роторах во время их ремонта [1].

Методика предполагает выявление собственных частот колебаний испытуемого ротора на основании его резонансных колебаний, полученных в результате действия на ротор импульса механической силы.

Для получения свободных колебаний было реализовано два варианта:

1. РВД с лопатками подвешивался на штатной траверсе и ударами специальной кувалды по центру или концу вала в поперечном направлении возбуждались изгибные колебания.

Полученные вибросигналы одновременно от разных датчиков, расположенных на измерительной поверхности ротора по продольной оси в соответствии с рисунком 2, регистрировались магнитографом для последующего спектрального анализа с целью выявления признаков наличия трещин. Собственные частоты колебаний определялись для нескольких последовательных положений ротора: 0° , 90° , 180° , 270° .

При этом величина раскрытия трещины должна была зависеть от углового положения ротора, наибольшее проявление которой обнаруживалось, когда трещина находилась внизу, принятое при испытаниях за начальное угловое положение 0° .

2. РВД с лопатками был установлен на «козлы» с мягкими опорами и возбуждался в 16-ти положениях с шагом по углу 24 градуса, определяемого числом болтов, равным 15. Поворот вокруг продольной оси осуществлялся по часовой стрелке относительно торца РВД

со стороны шейки вала. Спектры получены последовательно для начального положения, когда трещина расположена сбоку.

В первом варианте испытаний выявлено, что при максимальном раскрытии трещины в окрестности одного из главного сигнала-отклика с частотой 364 Гц появляются дополнительные сигналы с частотами 356 и 377 Гц.

Во втором варианте на козлах так же четко происходит расщепление пиков откликов, например, на базовой частоте в районе 140—150 Гц в зависимости от положения трещины на роторе в момент ее возбуждения (рисунок 3).

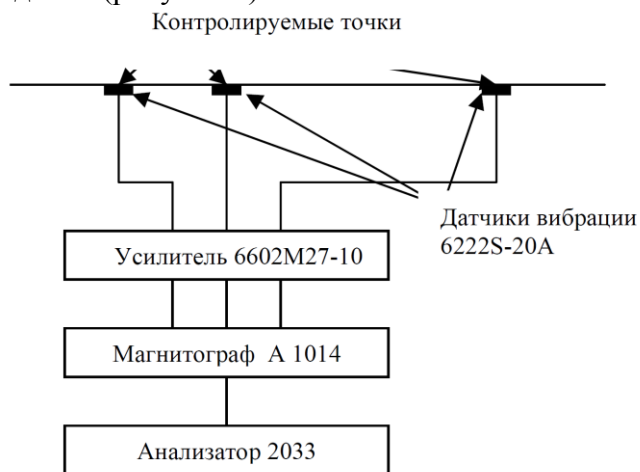


Рисунок 2. Схема расположения контролируемых точек на РВД и подключение приборов измерительного тракта

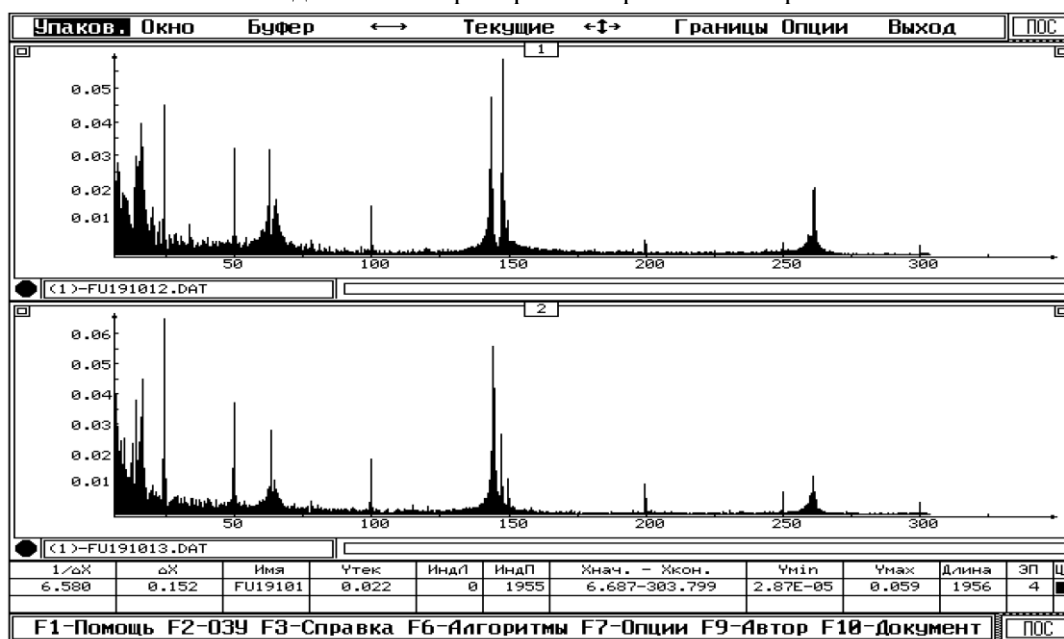


Рисунок 3. Расщепление отклика сигнала на частоте 140—150 Гц при положении трещины сбоку от вертикального направления

Исследования показали, что спектральный метод вибродиагностики позволяет обнаруживать трещину по изменению спектральных характеристик свободных колебаний ротора при возбуждении ударом.

Рекомендовано внедрение такого метода в техпроцесс капитальных ремонтов цельнокованых роторов, время эксплуатации которых более 100000 часов.

Порядок исследований

Для проведения исследований испытуемый ротор подвешивается в горизонтальном положении на тросах (на штатной траверсе, рекомендуется с динамометрическими индикаторами) либо укладывается горизонтально на козлах (рисунок 4) [2, 3].

При выполнении измерений необходимо убедиться в отсутствии посторонних вибросигналов от вспомогательного и вблизи работающего оборудования. Для контроля необходимо выполнить анализ шумовых спектров от посторонних источников.



Рисунок 4. Испытуемый ротор подвешен на траверсе

Оборудование и материалы

Для обнаружения трещины используется измерительный тракт, состоящий из датчиков вибрации (акселерометр) с высоким коэффициентом чувствительности (порядка 100 милливольт), установленных на поверхности ротора вдоль его длины и анализатор спектра вибрации (с низким шагом разрешения по частоте — около 0,1 Гц) с многоканальной приставкой. Данные замеров записываются в память анализатора, для последующего анализа на компьютере [2, 3]. Рекомендуется использовать виброанализатор с микрофонным входом для возможности регистрации комментариев в процессе измерений.

Для создания силового возмущения в виде механического импульса, достаточного для проведения исследований, используется кувалда, не повреждающая при этом поверхность ротора.

Методика диагностирования трещины на роторе

1. Перед проведением измерений свободно подвешенного ротора его торцы размечаются на 4 (например, 0°, 90°, 180° и 270°) или более участков (рисунок 5) [2, 3]. Нумерацию участков желательно привязать к номеру болтового отверстия на полумуфте.

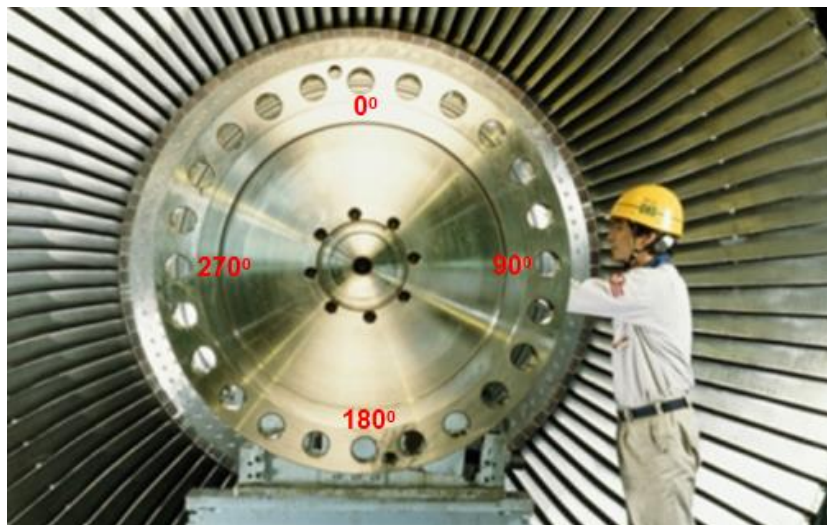


Рисунок 5. Разметка ротора

2. Диапазон исследуемых частот, который необходимо установить на анализаторе, определяется из конкретной конструкции ротора.

3. В одном из выбранных положений ротора вдоль его продольной оси устанавливают датчики вибрации в контрольных точках и не меняют их в процессе измерения спектральных характеристик.

4. В одном из выбранных для исследований положений ротора производят механический импульсный удар специальной кувалдой в поперечном направлении в определённой для этого точке (по центру или концу вала) для получения резонансного вибросигнала-отклика при совпадении гармоник импульса силы с собственными частотами колебаний ротора. Полученные вибросигналы одновременно от разных датчиков, расположенных на измерительной поверхности ротора по продольной оси в соответствии с рисунком 6, регистрировались виброанализатором для последующего спектрального анализа с целью выявления признаков наличия трещин.



Рисунок 6. Схема измерений

5. При выполнении импульсного удара следует запомнить величину размаха кувалды и принять его постоянным для других положений ротора.

6. Для других положений ротора последовательно выполняются п. 3—5, при этом датчики вибрации всегда находятся в одном из выбранных сечений ротора, которое всегда располагают в одном фиксированном положении, например, в вертикальном положении.

7. Диагностическим признаком наличия поперечной трещины на наружной поверхности ротора является значительное понижение вибрационного сигнала на одной (или нескольких) из собственных частот колебаний и раздвоение пика амплитуды колебаний на две близко расположенные — слева и справа от неё. Раздвоение пика происходит в связи с анизотропией ротора.

Анализ производят путем сравнения измеренного спектра, с аналогичным спектром, полученным при измерении ротора без трещин (эти характеристики обычно измеряют перед монтажом турбины и заносятся в как паспортные данные после изготовления).

8. При необходимости производится оконтуривание дефекта.

9. Определяются координаты дефекта по длине и сечению ротора.

При положении трещины внизу, когда жесткость наименьшая, частота собственных колебаний снижается. При этом наблюдается один мощный отклик по амплитуде. При расположении трещины сверху мы видим также один мощный отклик по амплитуде, однако частота СК при закрытой трещине выше 146 Гц, но ниже, чем при положении трещины сбоку (149 Гц). Во всех промежуточных положениях спектры раздваиваются и даже расстраиваются, в зависимости от уровня отклика ротора в двух перпендикулярных положениях.

В целом наблюдается четкое чередование интенсивности откликов при последовательном повороте ротора.

Главным диагностическим признаком является расщепление собственной частоты ротора при повороте его относительно оси. Можно ожидать, что при чувствительности датчиков прибора и высокой его разрешающей спектральной способности (около 0,1 Гц), вполне можно рассчитывать на определение трещины при ее докритическом размере, когда она занимает 5—8 % по сечению. В принципе возможно и снижение этой величины до 3—4%.

В заключение обозначим основные принципы рассмотренной диагностики.

1. По снижению частоты собственных колебаний регистрируется кольцевая трещина. Для проведения таких проверок требуются незначительные затраты и штатные переносные приборы с высокой разрешающей способностью.

2. Спектр частот свободных колебаний ротора возбуждаемых ударом, как при подвесе его на траверсе, так и на козлах зависит от углового положения трещины в роторе. Кроме того, происходит расщепление спектра в связи с анизотропией жесткости ротора.

3. Спектральный метод вибродиагностики позволяет обнаруживать трещину по изменению амплитудно-частотных характеристик свободных колебаний ротора.

4. Изменения в амплитудах на диагностических частотах зависит от углового положения трещины исследованного ротора, и отчетливо наблюдаются только при узкополосном анализе.

5. Значения частот зависят от положения трещины и от ее величины. Наименьшая собственная частота для соответствующей формы колебаний получается при положении трещины внизу (при раскрытии трещины).

6. Чувствительность прибора порядка 0,2—0,3 Гц позволяет зафиксировать раздвоение амплитудного пика на спектрах. Учитывая, что при 40 процентной трещине мы имеем снижение частоты примерно на 9 Гц (или 6% от базовой частоты), ожидается, что расщепление собственной частоты можно заметить и при 4—5 % (до критической) трещины, которая другими «дешевыми» способами практически не определяется.

7. Для диагностики трещины при вращении вала (во время эксплуатации турбоагрегата) необходимы системные наблюдения. И если отделить снижение критических частот из-за расцентровок и других дефектов от снижения из-за разрыва болтов или появления трещины, то можно таким образом регистрировать появление трещины и во вращении. Кроме того, при вращении есть еще целый ряд диагностических признаков ее появления.

Литература

1. Шкляр, М.И. Разработка и внедрение методов повышения динамической надежности и снижения вибрации турбоагрегатов на стадиях проектирования, доводки и эксплуатации : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.04.12 / С.-Петербург. политехн. ун-т. - Санкт-Петербург, 2006. - 16 с.

2. Бойкин С. Как диагностировать трещину на роторе // [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://blog.vibroexpert.ru/?p=1183>.

3. Житков, В.Е. Диагностика поперечных трещин в роторах турбомашин // [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://prezi.com/1dndnblkx0u/presentation/>