УДК 621:534

# ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИВНОСТЬ ПОЛНЫХ СПЕКТРОВ И ОРБИТ ПРИ АНАЛИЗЕ СИГНАЛОВ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ВИБРОСМЕЩЕНИЙ ВАЛА В ОПОРАХ СКОЛЬЖЕНИЯ

**© Ф.Я. Балицкий, А.Г. Соколова**

*Институт машиноведения им. акад. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия*

***Аннотация***. *В статье приводится описание спектрального метода совместного анализа относительных вибросмещений опор скольжения во взаимно перпендикулярных радиальных направлениях, алгоритм получения «полных» спектров и результаты их применения для диагностического анализа данных вибрационных измерений газотурбинных двигателей. Приводится таблица соответствия некоторых дефектов подшипников скольжения и параметров полных спектров.*

***Ключевые слова:*** *относительная вибрация, орбита прецессии вала, полный спектр, диагностика роторных машин.*

**1. Введение.** Известно [1, 2], что сигналы с системы датчиков относительных вибросмещений, два из которых установлены радиально и взаимно перпендикулярно (например, вертикально и горизонтально), а третий снимает сигнал углового положения вала (который можно отображаать на временных диаграммах в виде жирной точки, следующей после небольшого пробела для определения направления течения времени), дают возможность не только проанализировать свойства соответствующих осциллограмм и спектров, но также оценить траекторию (орбиту) и направление прецессии центра вала в зазоре подшипника (см. рис 1).

Сотрудниками фирмы Bently Nevada Corporation была предложена характеристика прецессии вала в опорах скольжения, представляющая параметры орбиты, но в частотной области [3, 4, 5], названная полным спектром. Частотные компоненты этого представления отличаются по амплитуде от обычного спектрального представления и, в отличие от него, позволяют определить направление прецессии на данной частоте даже без необходимости рассмотрения «отфильтрованной орбиты» с отметкой на ней угла поворота вала.

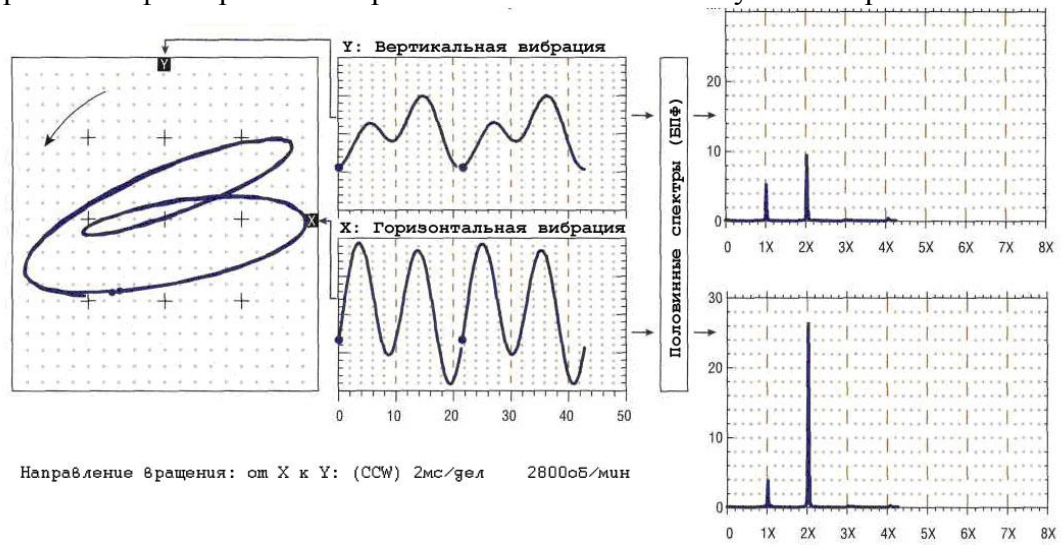



***Рис.1.*** *Орбита центра вала (слева), построенная по осциллограммам вертикальной и горизонтальной вибрации (в центре). Справа - соответствующие стандартные спектры (можно сказать, половинные, – в отличие от полных спектров, о которых пойдёт речь дальше).*

**2. Полные спектры.** В алгоритме получения полного спектра [5] используются комплексные представления данных, а спектральные характеристики определены для областей и положительных, и отрицательных частот (см. рис.2).

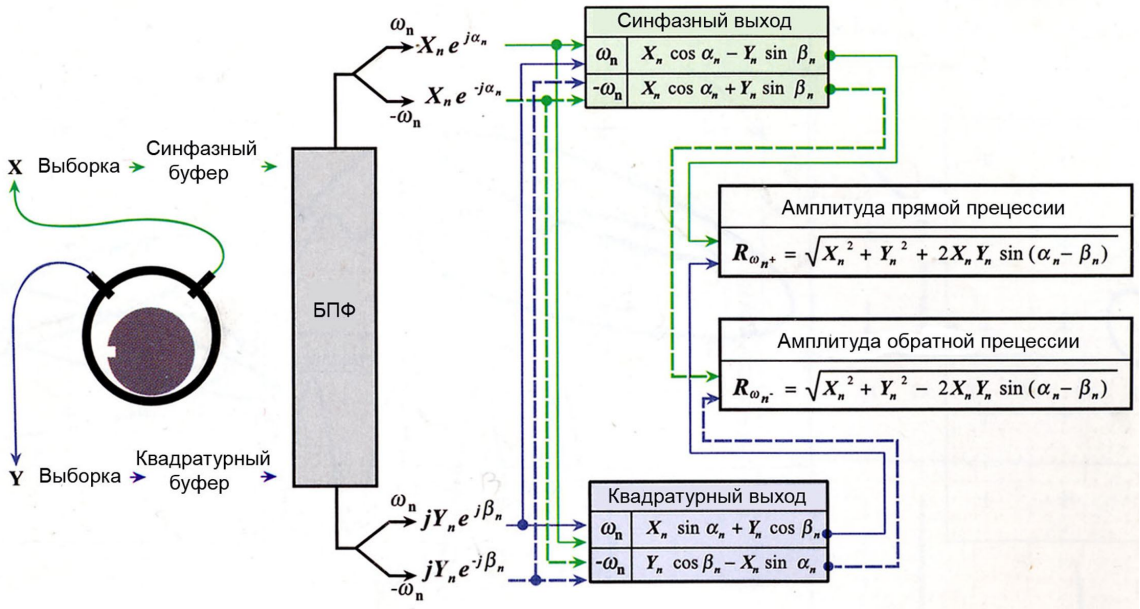



***Рис. 2.*** *Алгоритм получения параметров полного спектра из сигналов вертикального Y и горизонтального X вибросмещений.*

Физический смысл такого представления можно легче уяснить из следующего рисунка (см. рис.3), на котором, в частности, показано разложение орбиты на отфильтрованные составляющие (на частоте вращения ротора и её второй гармоники). Понятно, что каждая такая «элементарная» орбита рисуется концом вектора вибрации на соответствующей частоте. При этом оказывается, что удобнее представить каждый такой вектор как сумму двух векторов, вращающихся в противоположных направлениях, – в направлении вращения вала (прямой компонент) и в обратном направлении (обратный компонент), как показано на рисунке. Вот эти самые компоненты и определяют вид полного спектра. Информация, представленная в виде «не отфильтрованной» (полной) орбиты, и в полном спектре - одна и та же. Однако, по форме полного спектра можно видеть преимущественное направление прецессии на каждой частоте (оно определяется тем, какой компонент имеет бóльшую амплитуду – прямой или обратный) даже не имея сигнала с датчика углового положения вала (который на практике подчас бывает недоступен), и не получая для этого «отфильтрованных орбит» с отметками сигнала датчика углового положения ротора.

Как интерпретируются представления полных спектров? Прежде всего, видно, что они отличаются от обычных спектров по соотношениям амплитудных значений на первой (1X) и второй (2X) гармониках частоты вращения. Следующее отличие (и преимущество!) заключается в том, что картинка полного спектра не меняется при изменении ориентации ортогонально установленных датчиков в плоскости измерения, в то время как сами сигналы (и их обычные спектры) существенно зависят от направления датчика. И, наконец, направление прецессии каждого частотного компонента определяется, как говорилось выше, направлением бóльшего по амплитуде компонента, и при этом нет необходимости получать «отфильтрованные» на каждой гармонике орбиты и соотносить их с сигналом датчика углового положения ротора.

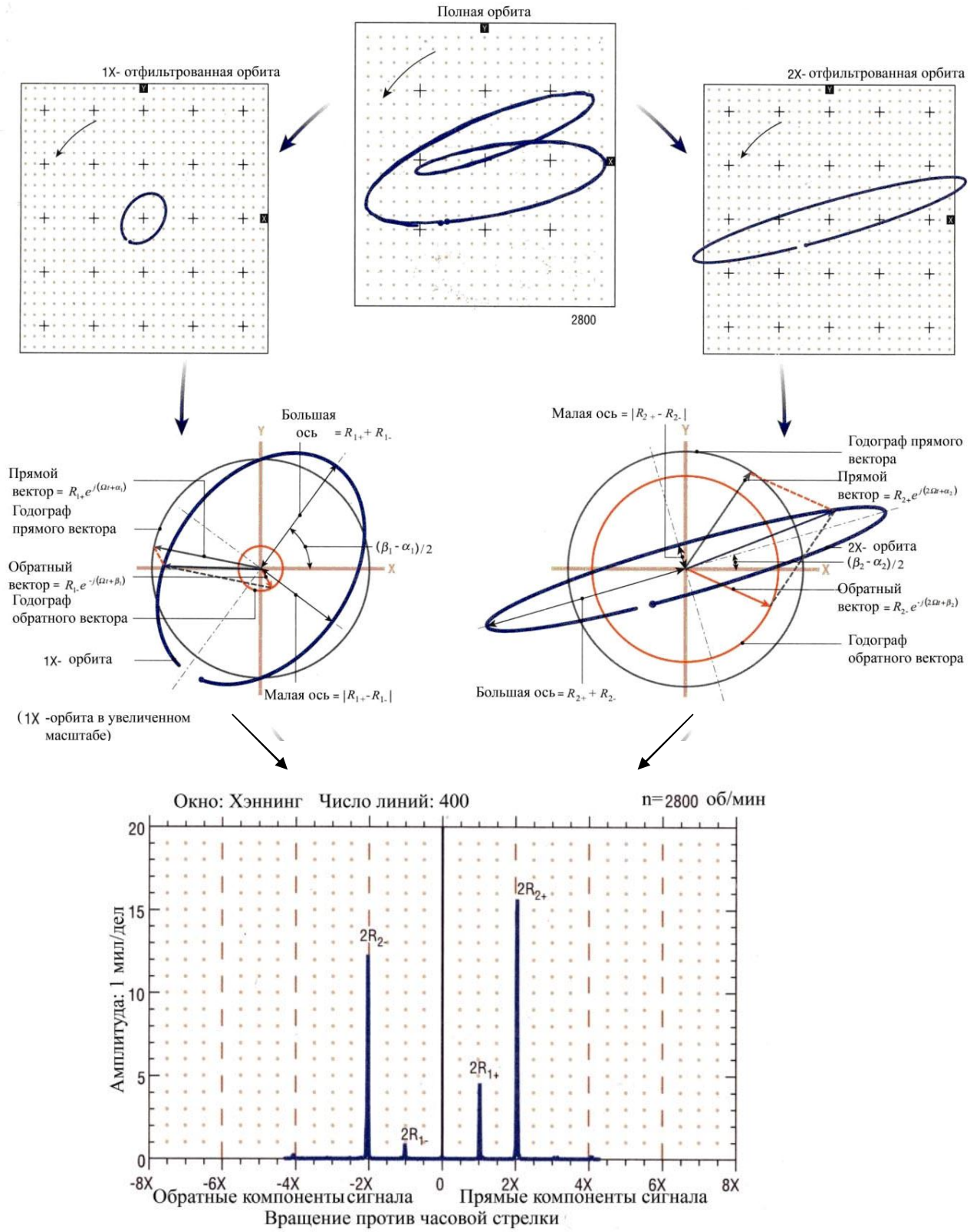
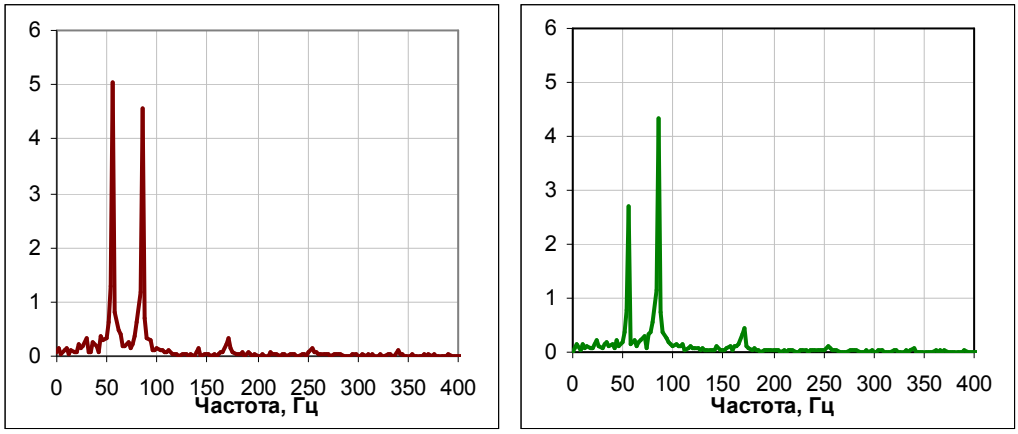



***Рис.3**. Графическая интерпретация получения прямой и обратной отфильтрованных орбит, и полный спектр, соответствующий сигналам (см. рис.1) и орбитам относительной вибрации, приведенным в верхней части рисунка.*

**3. Практическое применение полных спектров**. Ниже приводятся несколько примеров практического использования полных спектров для интерпретации данных, измеренных в реальных условиях.

**3.1. Пример №1**: на рис.4 представлены спектры горизонтальной и вертикальной относительной вибрации задней опоры (ЗО) центробежного нагнетателя (ЦБН) одного из газоперекачивающих агрегатов (ГПА).




*а)* *б)*

***Рис.4.*** *Спектры: а )- горизонтальной* ***S(x)*** *и б ) - вертикальной* ***S(y)*** *относительной вибрации ротора ЗО ЦБН ГПА-3 от 24.12.07.*

В спектрах доминируют составляющие на частотах: fp=87.5 Гц (частота вращения ротора) и fo=56.25Гц=2/3 fp. Данные спектры принципиально ничем не различаются, кроме амплитудных значений значимых компонентов. Можно сделать предположение о том, что низкочастотный компонент вибрации является следствием неустойчивости масляного клина или задевания ротора, - в любом случае, нужна дополнительная информация.

Рассмотрим теперь полный спектр тех же компонентов прецессии вала (рис.5):

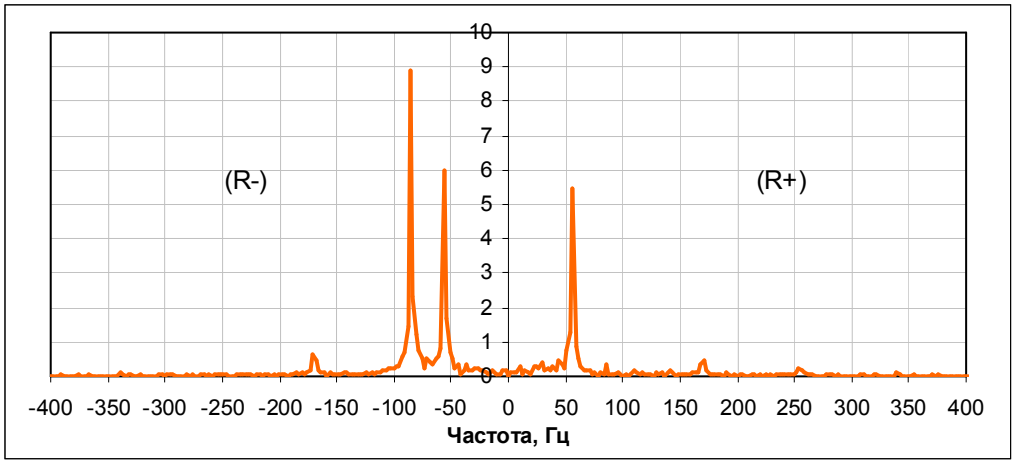
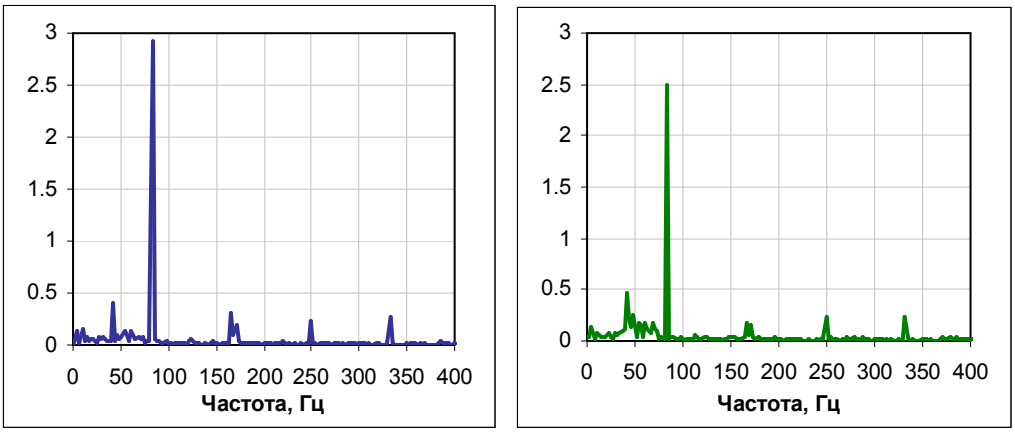



***Рис.5****. Полный спектр* ***(R-;R+)*** *соответствующих предыдущему рисунку компонентов вибрации ЗО ЦБН ГПА-3 от 24.12.07.*

Видно, что на частоте вращения ротора прецессия центра вала – обратная, и орбита должна быть

круговой с большим размахом, а на субгармонической составляющей уровни для прямого и обратного направления прецессии практически одинаковы. Такая картина полного спектра характерна для автоколебаний на собственной частоте ротора, близкой к субгармонике fo= ± 2/3fp, и соответствует полному по углу поворота задеванию ротора о статор при наличии сухого трения (см. таблицу 1 в конце статьи, где сведены характерные особенности полных спектров для разных дефектов).

**3.2. Пример №2**: на рис.6 представлены спектры горизонтальной и вертикальной относительной вибрации задней опоры центробежного нагнетателя (ЦБН) другого агрегата за 8 дней до останова двигателя по причине выхода из строя роликового подшипника турбогазогенератора (ТГГ).




*а)* *б)*

***Рис.6.*** *Спектры: а )- горизонтальной* ***S(x)*** *и б ) - вертикальной* ***S(y)*** *относительной вибрации ротора ЗО ЦБН ГПА-5 от 04.05.07 за 8 дней до останова агрегата.*

Основные составляющие спектров - на частотах: fp= 87.5 Гц (частота вращения ротора) и fo=1/2 fp, и доминирует первая из них. Соответствующий полный спектр (см. рис.8) показывает на признаки частичного задевания (вероятнее всего в уплотнении), поскольку уровень субгармоники незначителен и дисбаланса (по направлению прецессия на оборотной частоте совпадает с вращением вала).

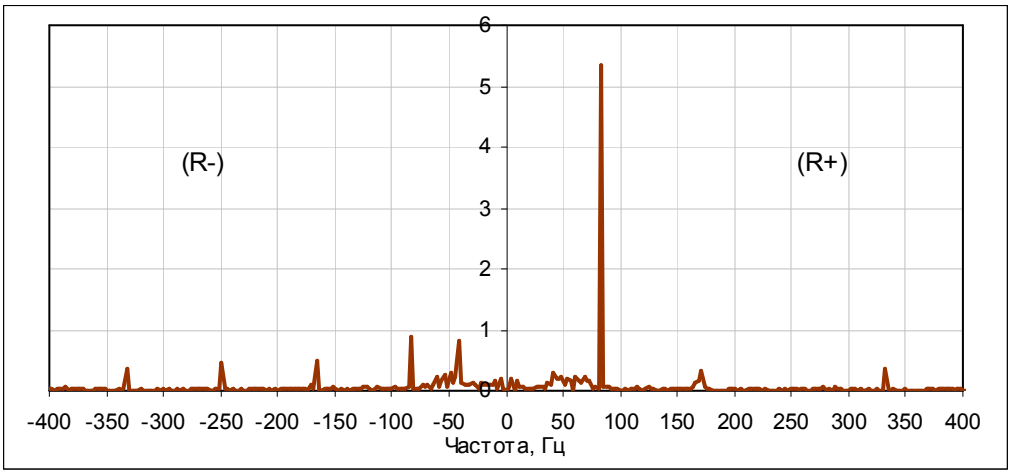



***Рис.7.*** *Полный спектр* ***(R-;R+)*** *соответствующих предыдущему рисунку компонентов вибрации ЗО ЦБН ГПА-5 от 04.05.07 за 8 дней до останова агрегата.*

Этот предварительный диагноз подтверждается рассмотрением соответствующей орбиты (траектории движения центра вала), приведенной на рис.8.

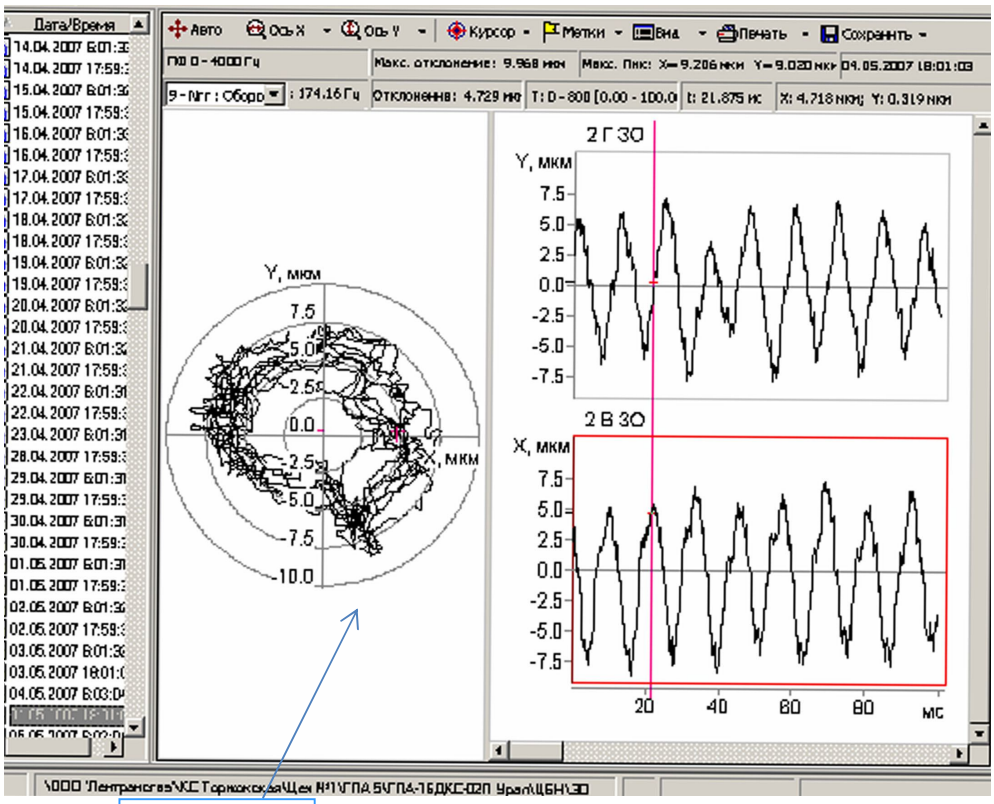
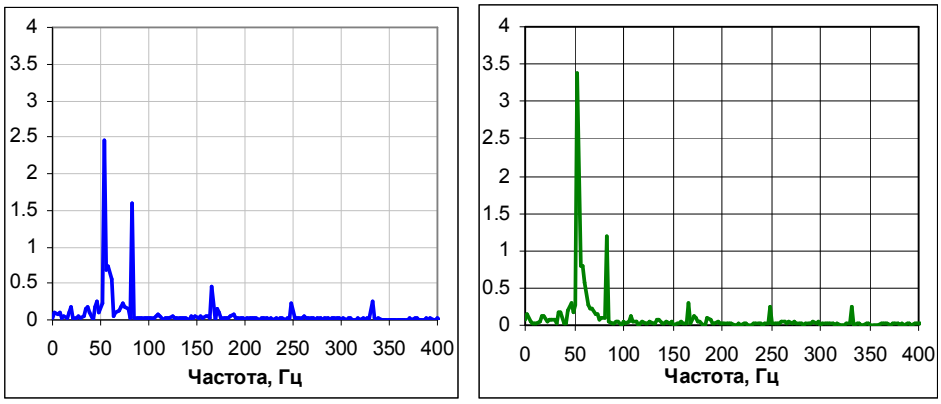



***Рис.8.*** *Орбита и осциллограммы вертикальной* ***Y*** *(сверху) и горизонтальной* ***X*** *вибрации вала в задней опоре ЦБН ГПА-5 от 04.05.07 за 8 дней до останова агрегата.*

**3.3. Пример №3**: на рис.9 представлены спектры вертикальной и горизонтальной относительной вибрации задней опоры центробежного нагнетателя того же агрегата, что и в предыдущем примере, за 1 день до останова двигателя по причине выхода из строя радиального подшипника турбогазогенератора (ТГГ). В спектрах содержатся, в основном, 2 составляющие (как и в предыдущих примерах): на частоте **fp**= 87.5 Гц (частота вращения ротора ЦБН) и, доминирующая, на частоте **fo**=56.25 Гц=2/3 **fp**. Очевидно, дефект типа задевания ротора о статор развивался со временем наработки и привел к изменению собственной частоты (явление-то нелинейное) и, соответственно, к изменению частоты проявления дефекта - с половинной субгармоники (1/2 **fp**) частоты вращения ротора на субгармонику 2/3 **fp**. Уровень субгармонических колебаний стал выше уровня синхронных колебаний (на частоте вращения), что говорит о «суровости» дефекта и, в тоже время, является одной из причин изменения собственной частоты.




*а)* *б)*

***Рис.9.*** *Спектры: а ) - горизонтальной* ***S(x)*** *и б ) - вертикальной* ***S(y)*** *относительной вибрации ротора ЗО ЦБН ГПА-5 от 12.05.07 за 1 день до останова агрегата.*

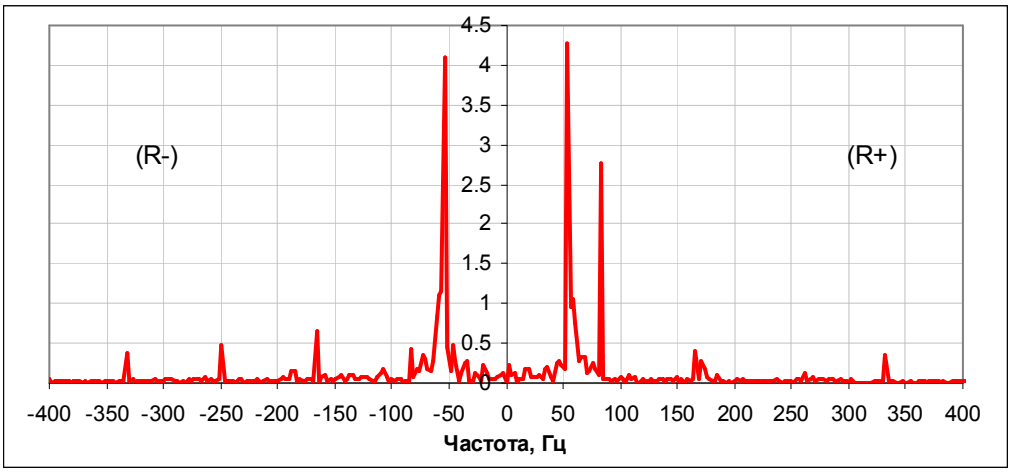



***Рис.10.*** *Полный спектр* ***(R-;R+)*** *соответствующих предыдущему рисунку компонентов вибрации ЗО ЦБН ГПА-5 от 12.05.07 за 1 день до останова агрегата*

.

Такая картина полного спектра вероятнее всего свидетельствует о задевании вала за корпус с возбуждением резонансных колебаний на собственной частоте ротора. Субгармоники ($\lambda X^-$)и ($\lambda X^+$), где $\lambda$=2/3, в полном спектре практически одинаковы, что соответствует выродившейся в прямую линию орбите, - можно предположить, что вал раскачивается как маятник в зазоре подшипника преимущественно на данной частоте. Если рассмотреть непосредственно полную орбиту (рис.11), или, ещё лучше, отфильтрованные орбиты (рис.12), то можно утвердиться в поставленном диагнозе.

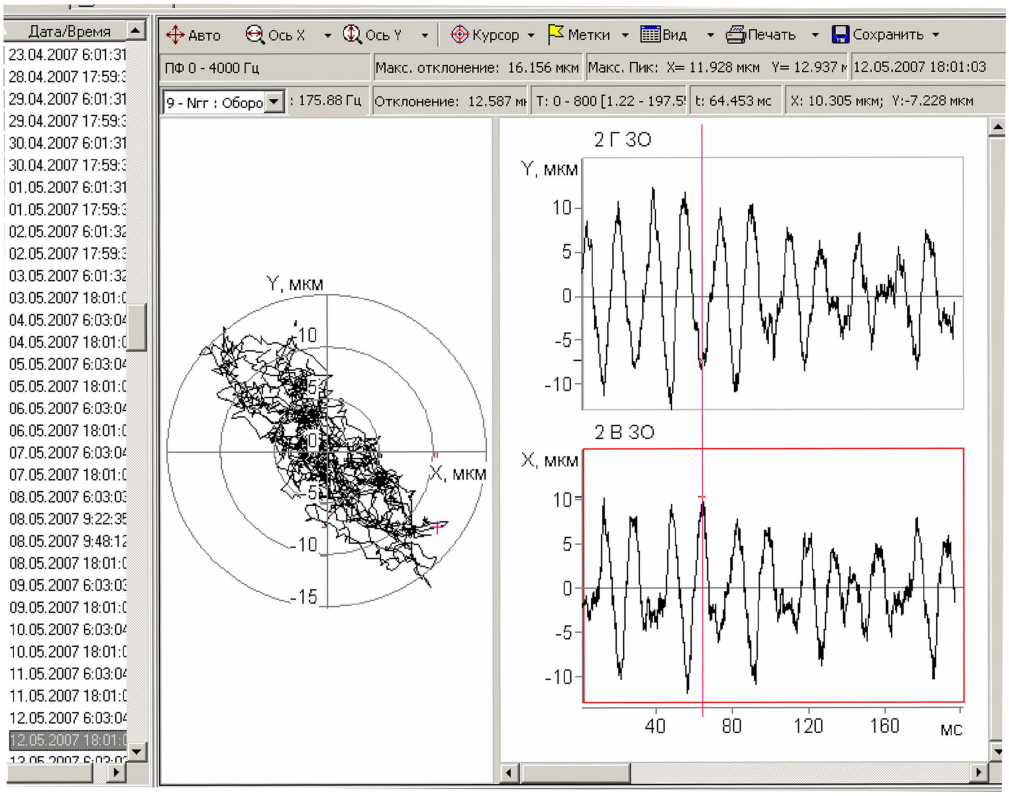



***Рис.11.*** *Орбита и осциллограммы вертикальной и горизонтальной вибрации вала ЗО ЦБН ГПА-5 от 12.05.07.*

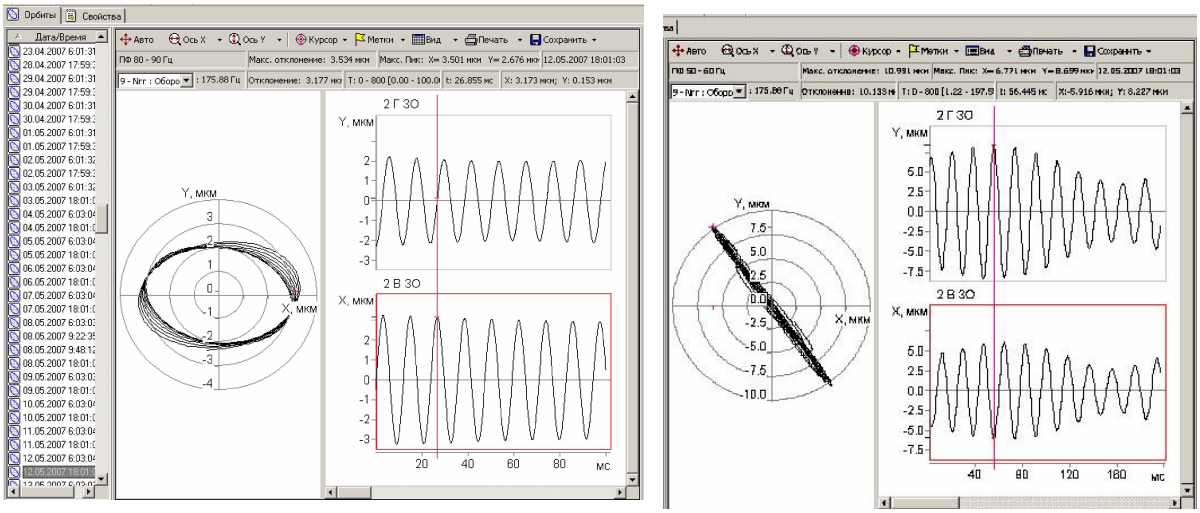



***Рис.12.*** *«Отфильтрованные орбиты» и осциллограммы вертикальной и горизонтальной вибрации вала ЗО ЦБН ГПА-5 от 12.05.07 на частоте вращения* ***fp*** *(слева) и на субгармонике 2/3****fp*** *(справа).*

**4. Выводы**: при анализе сигналов относительной вибрации ротора в опорах скольжения, наряду с такими характеристиками движения вала как орбита и усреднённое положение центра вала, полезно рассмотреть параметры полного спектра, по которым сразу можно получить представление о направлении прецессии вала на каждой частотной составляющей вибрационного процесса. При этом ориентиром для оценки направления прецессии служит информация о том, какая из составляющих полного спектра является

доминирующей: прямая или обратная. Полный спектр позволяет также приблизительно оценить форму «отфильтрованной на данной частоте орбиты» (при равенстве амплитуд прямой и обратной прецессии орбита вырождается в линию, при росте разницы - становится эллиптической, приближаясь к круговой при стремлении одной из амплитуд к нулю). Использование приведенной ниже таблицы 1 может оказать помощь в интерпретации данных анализа. Таблица, однако, нуждается в уточнении, поскольку опыт использования полных спектров ещё невелик и уж, по крайней мере, значительно беднее опыта использования обычных спектров.

***Таблица 1***

*Компоненты полного спектра, соответствующие разным дефектам. Знаки* (+) *или* (−) *означают наличие или практическое отсутствие составляющей данной частоты и направления.*

| **Вид дефекта** | **Кратность частоте вращения** | **Направление прецессии компонента вибрации** | | **Примечания** |
|---|---|---|---|---|
| | | **Прямое** | **Обратное** | |
| Дисбаланс (вращающаяся нагрузка) | 1X | + | При наличии анизотропии жёсткости опоры. | Прямой компонент является ключевым при балансировке. Обратный уменьшается при уменьшении прямого. |
| Однонаправленная радиальная нагрузка | 1X | + | + | С ростом радиальной нагрузки прямые компоненты 1X и 2X уменьшаются, а обратные - растут; эллиптичность орбиты возрастает. |
| | 2X | + | + | |
| Трещина ротора | 1X | + | - | Доминирующие изменения происходят на амплитудах прямых 1X и 2X компонентов вибрации. Обратные компоненты тоже могут существовать при наличии анизотропии жёсткости опоры. Они могут также изменяться из-за трещины ротора. Особенно важны при диагностике трещины ротора фазы составляющих 1X и 2X, которые здесь не показаны. |
| Частичное задевание | 1X | + | + | Компоненты IX и 2X ведут себя как в случае однонаправленной радиальной нагрузки: амплитуда обратной компоненты растёт, а прямой – уменьшается с развитием задевания. Можно наблюдать вра-щение главных осей отфильтрован-ных орбит. Компоненты 1/2X, 1/3X, ... появляются, если частота вращения выше, чем собственная частота, соответственно, в 2, 3, ... раз. На этих субгармониках есть и прямые, и обратные компоненты. Соответствующие отфильтрован-ные орбиты могут быть сильно вытянутыми эллипсами, а обратные компоненты – доминирующими. |
| | 2X | + | + | |
| | 1/2X, 1/3X, … | + | + | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Полное по углу поворота задевание | 1X | + | – | В зависимости от сухого трения между ротором и уплотнением, его податливости, величин затухания и неуравновешенности, система мо-жет проявлять либо вынужденный отклик с доминированием прямого компонента 1X, либо – резонанс-ный, с доминированием обратного компонента. |
| Вихревая смазка | λX λ=0,3 … 0,49 | + | – | Доминирующая прямая орбита с внутренней петлёй (комбинация вихревого компонента и 1X). В полном спектре это проявляется как субгармонический прямой компонент. |
| Взбиваемая смазка | Собственная частота ротора | + | + | Доминирующая прямая орбита с внутренней петлёй (комбинация компонентов 1X и взбиваемой смазки). В полном спектре это проявляется как субгармонический прямой компонент. Обычно небольшие обратные компоненты IX и субгармонический присутствуют из-за анизотропии жёсткости опоры. |
| Вращающийся срыв | λX λ=0,1 … 0,8 | + | – | Вращающийся срыв можно отличить от самовозбуждения на масляном клине по его исчезновению с возрастанием потока через компрессор. Полный спектр очень похож на спектр при вихревой смазке. |

## Литература

1. ***Donald E. Bently*** with ***Charles T. Hatch***, edited by ***Bob Grissom***. “Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics”. Bently Pressurized Bearing Press, 2002, pp.726.
2. ***Неразрушающий контроль***, Справочник в 7-ми томах под редакцией акад. РАН В.В.Клюева, том 7, книга 2, глава 6, стр. 546 -563.
3. ***Southwick, D.,*** “Using Full Spectrum Plots”, Orbit, Volume 14, No.4, December, 1993, pp.19-21, Part 1.
4. ***Southwick, D.,*** “Using Full Spectrum Plots”, Orbit, Volume 15, No.2, June, 1994, pp.11-15, Part 2.
5. ***Goldman P., Muszynska, A.***, “Application of Full Spectrum to Rotating Machinery Diagnostics”, Orbit, Vol.20, No.1, First Quarter, 1999, pp. 17-21.

*Поступила: 22.01.2010.*