



Общество с ограниченной ответственностью

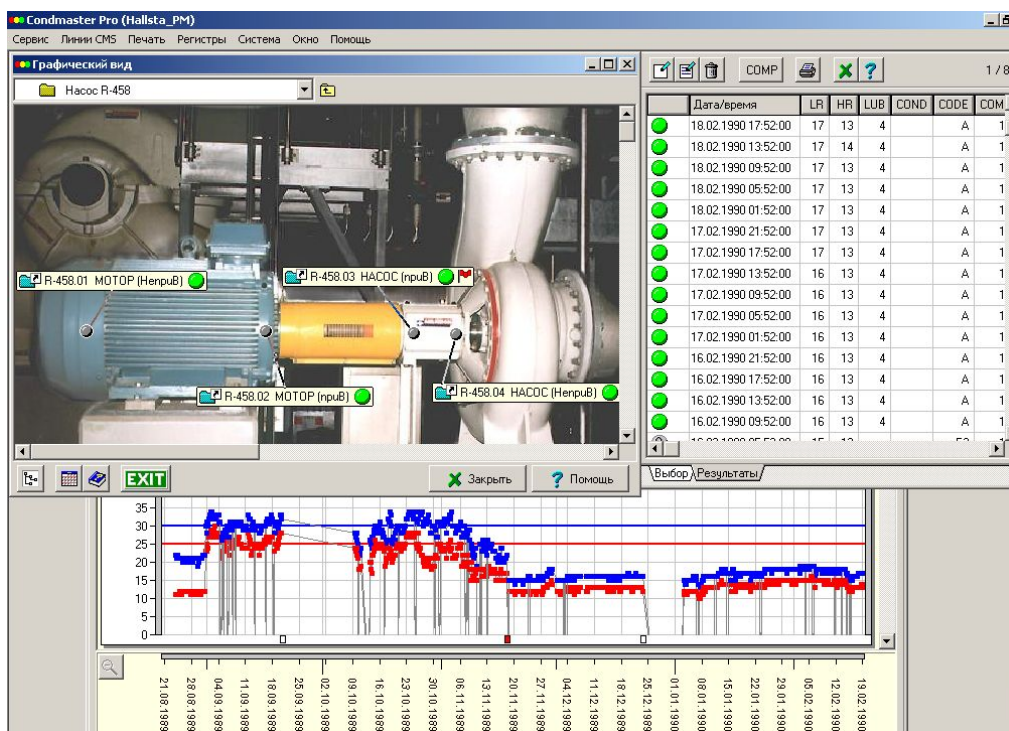
## «Техническая Диагностика и Мониторинг»

Россия, 198329, Санкт-Петербург, ул. Тамбасова, дом 12, офис 49

Тел: (812) 934-90-40, (812) 950-15-57, info@tdm-spb.ru, www.tdm-spb.ru



# Технологии измерений ударных импульсов SPM (общее описание)



Март 2020

При подготовке данного документа использованы следующие материалы:

1. К.А. Аксенов, В.Ф. Кашин (КИНЕФ, Россия): Применение метода ударных импульсов SPM для диагностики подшипников качения на ООО «КИНЕФ».
2. Г.А. Барков (SPM Instrument, Россия): Надежная работа подшипниковых узлов оборудования.
3. Г.А. Барков (ТДМ), К.А. Аксенов (SPM Instrument, Россия): Применение метода SPM.
4. А. Сундберг (SPM Instrument, Швеция): Метод ударных импульсов.
5. Рекламные материалы (SPM Instrument, Швеция).

## Причины повышения ударных импульсов SPM

Повышение уровня ударных импульсов SPM® в общем случае может быть вызвано:

- любым загрязнением смазки подшипника во время его монтажа, например, мельчайшей производственной металлической или иной пылью в сборочном цеху во время сборочных работ или даже раньше. Следует учитывать, что подшипник обычно имеет остаточный магнетизм металла, поэтому он просто «собирает» в себя мельчайшую металлическую пыль из окружающей среды, даже когда он просто лежит на полке в цеху или на складе без надлежащей упаковки,
- любым загрязнением смазки подшипника в процессе его эксплуатации, например, мельчайшей металлической или иной пылью из окружающей среды (даже несмотря на все исправные уплотнения валов, картеров и т.п.), продуктами коррозии самого подшипника или окружающего его подшипникового узла; загрязнениями и продуктами коррозии централизованной системы смазки, полостей картера, смазочных каналов и полостей консистентной смазки; продуктами высыхания и затвердевания консистентной смазки в смазочных каналах и полостях, продуктами износа самого подшипника и окружающего его подшипникового узла,
- попаданием воды в смазку в процессе эксплуатации с образованием водомасляной эмульсии,
- ухудшением эксплуатационных свойств смазки в процессе эксплуатации, например, постепенным снижением вязкости смазки, снижением свойств необходимых присадок или иной подобной проблемой, приводящей к ухудшению нормальных условий смазки в зоне качения подшипника,
- повышением рабочей температуры смазки по каким-либо причинам, которое сопровождается снижением вязкости смазки,
- высыханием, выдавливанием, замерзанием и т.п. консистентной смазки в процессе эксплуатации. Замерзание и последующее выдавливание консистентной смазки весьма характерны для подшипников электродвигателей, работающих на открытых площадках в зимний период с температурами окружающего воздуха ориентировочно ниже  $-20^{\circ}\text{C}$ , особенно для подшипников со стороны крыльчатки охлаждающего вентилятора электродвигателя,
- несоответствием применяемой смазки условиям работы подшипника. Если сигнал ударных импульсов SPM изменяется вместе с нагрузкой, которая остается нормальной для данного механизма, то это может свидетельствовать о том, что свойства данной смазки не обеспечивают необходимую полноценную пленку смазки в зоне качения подшипника при нормальных изменениях нагрузки. Если результаты оценки состояния подшипника (т.е. исключая сами уровни ударных импульсов LR/HR) изменяются вместе с изменением скорости вращения, которая остается нормальной для данного механизма, то это может свидетельствовать о том, что свойства данной смазки не обеспечивают необходимую полноценную пленку смазки в зоне качения подшипника при нормальных изменениях скорости вращения. См. также информацию ниже по поводу переменной скорости. Особенно чувствительными к свойствам смазки являются шариковые подшипники, так как пятно контакта шарика с дорожкой представляет собой практически одну точку,
- повышенной нагрузкой на подшипник. Если сигнал ударных импульсов SPM изменяется вместе с нагрузкой, которая остается нормальной для данного механизма, то это может свидетельствовать о том, что данный подшипник не обладает необходимой грузоподъемностью при нормальных изменениях нагрузки. Особенно чувствительными к нагрузке являются шариковые подшипники,
- вибрацией механизма, создающей повышенную нагрузку на подшипник. Следует особо отметить, что ударные импульсы SPM не реагируют на саму вибрацию и не отражают ее интенсивность. Ударные импульсы SPM реагируют только на ПОСЛЕДСТВИЯ вибрации, т.е. на ухудшение условий работы подшипника, вызванное вибрацией (если, конечно, такое ухудшение вообще происходит). Если сигнал ударных импульсов SPM изменяется вместе с уровнем вибрации, которая остается нормальной для данного механизма, то это может свидетельствовать о том, что либо данный подшипник не обладает необходимой грузоподъемностью при воздействии нормальной вибрации, либо свойства данной смазки не обеспечивают необходимую полноценную пленку смазки в зоне качения подшипника при воздействии нормальной вибрации, либо то и другое вместе. Особенно чувствительными к вибрации являются шариковые подшипники.

- излишним отклонением геометрии деталей подшипника от идеальной круглой формы,
- неудовлетворительным монтажом подшипника (перекос, недостаточный зазор и т.п.), что в общем случае приводит к повышенной нагрузке на подшипник и к пробоям пленки смазки в зоне качения,
- неудовлетворительной центровкой валов агрегата, что в общем случае приводит к повышенной нагрузке на подшипник и к пробоям пленки смазки в зоне качения,
- повышенным радиальным зазором в подшипнике, что в общем случае приводит к повышенной вибрации, создающей повышенную нагрузку на подшипник и пробои пленки смазки в зоне качения,
- ослаблением посадки подшипника, что в общем случае приводит к местной вибрации, создающей повышенную нагрузку на подшипник, и к пробоям пленки смазки в зоне качения, см. также исключения ниже в описании вариантов поведения подшипника при провороте обоймы,
- помехами - трущимися деталями (например, проволокой, застрявшей в рабочем колесе насоса),
- помехами - ударяющимися деталями (например, неплотно привинченной крышкой подшипника),
- ударными воздействиями на подшипники, возникающими в результате работы зубчатого зацепления (в случае дефекта зубчатого зацепления ударные импульсы от всех близлежащих подшипников валов данного зубчатого зацепления растут одновременно),
- соседним подшипником, чей нормальный уровень ударных импульсов SPM значительно превышает уровень ударных импульсов SPM контролируемого подшипника,
- неисправностями электромагнитной природы электрических машин, которые приводят к повышенной нагрузке на подшипник и к пробоям пленки смазки в зоне качения или к разрядам электрического тока через подшипник или к появлению электрических помех непосредственно для измерительного оборудования SPM,
- нормальными (!) особенностями исправных электрических машин с частотным приводом, которые приводят к прохождению высокочастотных составляющих индуцированного электрического тока через подшипник или к появлению электрических помех непосредственно для измерительного оборудования SPM,
- наличием кавитации перекачиваемой среды в насосе, при которой в результате захлопывания газовых каверн в перекачиваемой среде непосредственно создаются ударные волны, распространяющиеся по корпусу насоса, которые и воспринимаются датчиками ударных импульсов SPM,
- наличием нестабильности потока перекачиваемой среды в насосе, которая сопровождается созданием ударных воздействий ротора насоса на его подшипники,
- вибрацией подсоединенных трубопроводов или арматуры, связанной с нестабильностью потока перекачиваемой среды. Особенно это характерно для насосов консольного типа, в подшипниках которых повышение ударных импульсов SPM может происходить при неисправных обратных клапанах или при наличии отложений в клинкетных задвижках в подсоединенных трубопроводах.
- повреждением подшипника.

**Следует особо отметить тот факт, что в большинстве случаев причиной повышенного уровня ударных импульсов SPM является НЕ повреждение самого подшипника, а лишь ухудшение условий его работы, в основном, из-за проблем со смазкой!**

Более подробный анализ условий работы подшипника для выяснения конкретных причин избыточных внешних воздействий на подшипник, а также детальный анализ состояния подшипника для выяснения конкретных дефектов подшипника существенно облегчаются в том случае, когда пользователь применяет **спектральный анализ ударных импульсов SPM Спектр** или **метод ударных импульсов высокого разрешения SPM HD®**.

## Метод ударных импульсов SPM

Метод ударных импульсов SPM® (Shock Pulse Method) используется в приборах и системах, выпускаемых фирмой SPM Instrument AB в Швеции, начиная с 1970 года. Основным назначением метода SPM был – и по-прежнему остается - мониторинг состояния подшипников качения. Главными задачами такого мониторинга являются:

- получение своевременного предупреждения об ухудшении условий смазки подшипников для осуществления своевременной замены смазки по ее фактическому состоянию,
- получение своевременного предупреждения об ухудшении условий работы подшипниковых узлов из-за неблагоприятных внешних воздействий (например, перегрузки, неправильного монтажа или сильной вибрации) для своевременного устранения таких воздействий,
- получение заблаговременного предупреждения о появлении дефектов подшипников для планирования замен подшипников,
- сведение к минимуму простоев оборудования,
- сведение к минимуму рисков отказов оборудования и обеспечение надежности его работы.

С течением времени метод SPM был усовершенствован, и в настоящее время он позволяет оценивать условия смазки даже неповрежденных подшипников. Поэтому технический персонал может не только вовремя обнаруживать возникающие повреждения тел и дорожек качения, но и предотвращать само их появление путем поддержания и улучшения условий смазки – самой главной причины выхода из строя подшипников. Чувствительность метода позволяет обнаруживать мельчайшие загрязнения смазочных материалов, а также видеть изменения условий смазки при изменении температуры смазочного материала.

Метод ударных импульсов неприхотлив в отношении точности исходных данных, - ошибка в 5-10% по исходным данным не приведет к существенной погрешности в результатах измерений.

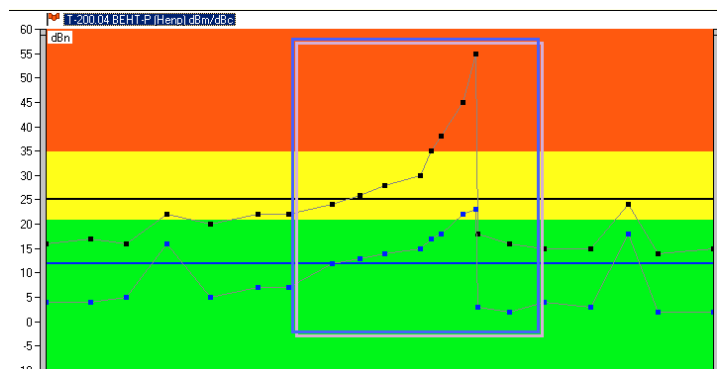
Метод ударных импульсов позволяет измерять состояние подшипников при очень низких скоростях вращения (единицы оборотов в минуту).

При нормальных эксплуатационных условиях подшипников и при использовании подшипников, обладающих достаточной «живучестью», время с момента появления первых признаков неисправности до серьезного развития дефекта составляет в общем случае, как минимум, несколько дней. Этого времени вполне достаточно для того, чтобы технический персонал принял правильное решение по каждому отдельному случаю повышения ударных импульсов SPM. Поэтому автоматизация функций защиты и резервирования на основании изменений сигналов ударных импульсов в практике, как правило, оказывается излишней и потому не применяется.

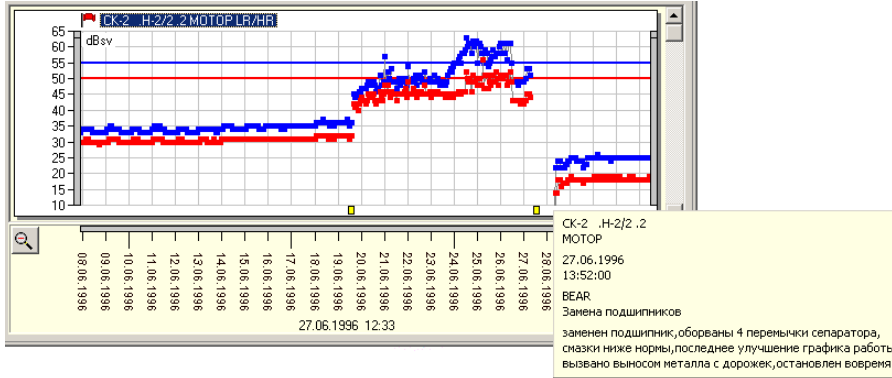
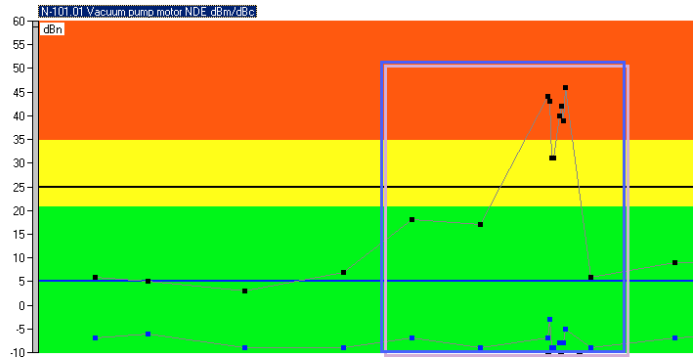
При небольших скоростях вращения, при умеренной и равномерной нагрузке на подшипники, при использовании высококачественных подшипников время с момента появления первых признаков неисправности до серьезного развития дефекта может составлять несколько месяцев.

**Примеры получаемых результатов (рамки выделяют соответствующие участки графиков):**

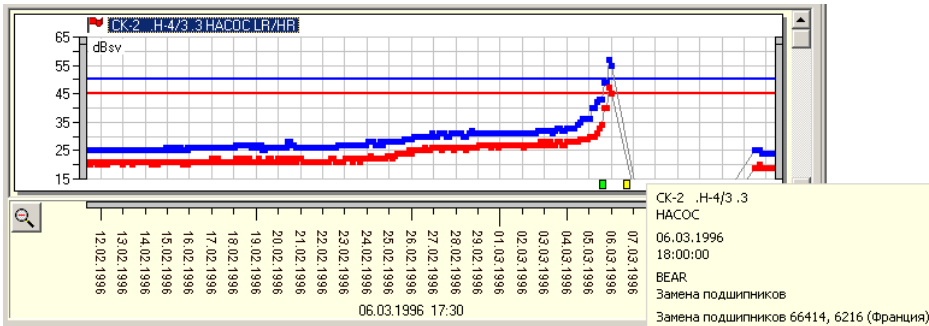
Дефект подшипника вентилятора со стороны рабочего колеса (сколы на наружном кольце).  
Замена подшипника.



Дефект подшипника электродвигателя насоса (износ).  
Замена электродвигателя.

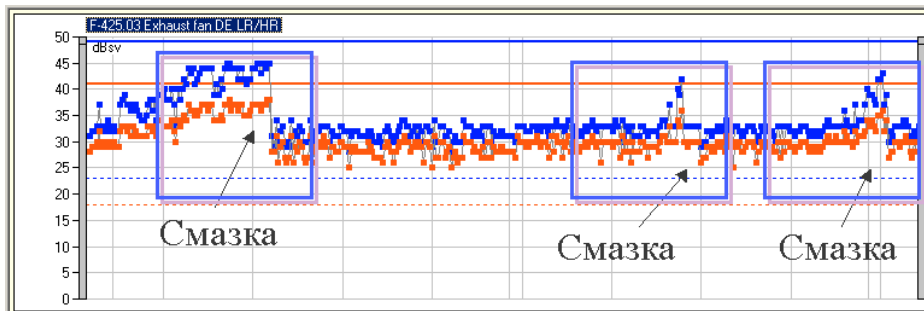


Дефект подшипника насоса (обрыв 4-х перемычек сепаратора).  
Замена подшипника.



Дефект подшипника насоса (выбоина примерно 4 мм<sup>2</sup> на наружной обойме).  
Замена подшипника.

Во многих случаях (по отзывам заказчиков до 75% всех работ, выполняемых по результатам мониторинга состояния методом SPM) сигнал ударных импульсов используется как основание для очередного проведения или замены смазки подшипника: при росте уровня ударных импульсов добавляют (или заменяют) смазку, одновременно при этом определяя эффективность проведенного мероприятия по последующему снижению уровня ударных импульсов (см. пример ниже):



Подшипник вытяжного вентилятора со стороны муфты: проведение смазки подшипника на основе получаемого сигнала ударных импульсов.

Указанные выше примеры наглядно иллюстрируют основной смысл и подчеркивают простоту применения метода ударных импульсов SPM.

## Спектральный анализ ударных импульсов SPM Спектр

### Спектральный анализ ударных импульсов высокого разрешения SPM HD®

В дополнение к измерениям общего уровня ударных импульсов SPM Вы можете задать последующий спектральный анализ полученного сигнала SPM Спектр, включающий частотный спектр ударных импульсов, или же спектральный анализ высокого разрешения SPM HD®, включающий частотный спектр и временной сигнал ударных импульсов, с целью амплитудно-частотного анализа закономерности следования ударных импульсов. В результате такого анализа Вы можете получить детальную информацию как о характере сигнала ударных импульсов, так и о различных источниках этого сигнала, что даст возможность сделать выводы о природе дефекта подшипника, о причине перегрузки подшипника и о наличии иных причин повышенного уровня ударных импульсов, а также о наличии помех от сторонних источников.

В общем случае порядок возникновения и прихода ударных волн, а также, соответственно, порядок следования измеренных импульсов может быть как периодическим, так и случайным. Периодические ударные волны порождаются ударными воздействиями, происходящими с определенными одинаковыми временными интервалами, например, прокатыванием тел качения подшипника по дефекту его обоймы или ударным взаимодействием зубьев дефектного зубчатого зацепления. Случайные (апериодические) ударные волны порождаются ударными воздействиями, возникающими в результате хаотических неупорядоченных процессов, например, в результате захлопывания газовых каверн в жидкости во время кавитации.

Спектральному анализу ударных импульсов SPM Спектр или SPM HD подвергается именно выходная последовательность импульсов, полученная на выходе измерительного устройства. В результате спектрального анализа выясняется, есть ли какая-либо упорядоченность и закономерность повторений во времени отдельных ударных импульсов, и, если есть, то с какими частотами и амплитудами они повторяются. Полученные частоты повторений ударных импульсов автоматически сопоставляются с расчетными частотами, на которых могут происходить ударные взаимодействия в деталях механизмов, преимущественно в подшипниках качения и в зубчатых передачах.

Спектральный анализ ударных импульсов SPM Спектр - и особенно SPM HD - позволяет измерять и детально анализировать состояние подшипников также и при очень низких скоростях вращения (единицы оборотов в минуту).

Временной сигнал в SPM HD дает дополнительные возможности для анализа природы дефекта подшипников, например, путем анализа циклических изменений пиковых сигналов во время вращения подшипника при входе и выходе его дефектных элементов в зону нагрузки, а также в других случаях взаимосвязанных изменений интенсивности сигналов ударных импульсов в течение замеров.

Измерения на основе порядков скорости вращения в SPM HD существенно улучшают четкость и выраженность спектральных линий в случае об/мин, «плавающих» в течение замеров.

#### Дефект наружной обоймы

Подшипник направляющего вала. Пунктиром указаны линии, соответствующие дефекту наружной обоймы.

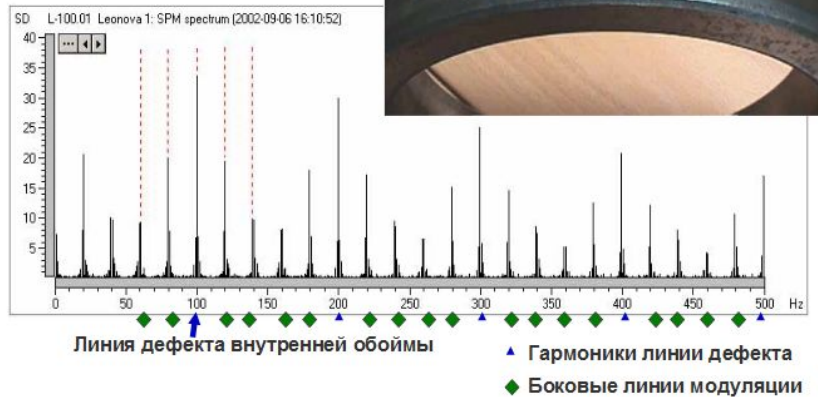
Линии спектра соответствуют расчетной частоте прохождения тел качения по дефекту наружной обоймы для данного типоразмера подшипника при данной скорости вращения.



### Дефект внутренней обоймы

Подшипник электродвигателя рафинера. Пунктиром и символами указаны линии, соответствующие дефекту внутренней обоймы.

Линии спектра соответствуют расчетной частоте прохождения тел качения по дефекту внутренней обоймы для данного типоразмера подшипника при данной скорости вращения с учетом изменений нагрузки на дефектную область в течение оборота вала.



Подшипник электродвигателя. Пунктиром и символами указаны линии, соответствующие повышенной нагрузке на подшипник из-за разболтанности / люфта / относительной свободы вращающихся деталей / проблемы с муфтой / дисбаланса ротора.

Линии спектра соответствуют скорости вращения вала, но не соответствуют расчетным частотам дефектов данного подшипника при данной скорости вращения. Дефект подшипника отсутствует. Но условия работы подшипника не являются оптимальными из-за повышенной нагрузки вследствие разболтанности / люфта / относительной свободы вращающихся деталей / проблемы с муфтой / дисбаланса ротора .

Большой зазор в подшипнике или слабая посадка его обоймы, возможна также общая разболтанность узла



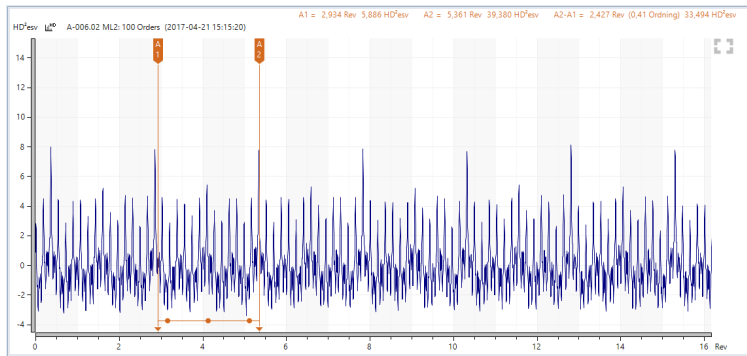
Подшипник роторного компрессора. Пунктиром указаны линии, соответствующие повышенной нагрузке на подшипник от 4-х заходного ротора.

Линии спектра соответствуют скорости вращения вала, умноженной на 4, что соответствует частоте нагрузки на подшипник от 4-х заходного ротора. Линии спектра не соответствуют расчетным частотам дефектов данного подшипника при данной скорости вращения. Дефект подшипника отсутствует. Но условия работы подшипника не являются оптимальными из-за повышенной нагрузки от ротора.

Повышенная нагрузка на подшипник роторного компрессора, производимая его 4-х заходным ротором

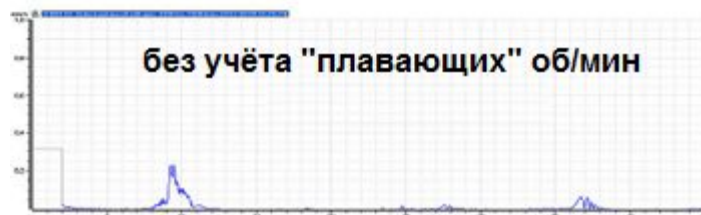


Временной сигнал в SPM HD дает дополнительные возможности для анализа природы дефектов подшипников, например, путем анализа циклических изменений пиковых сигналов во время вращения подшипника при входе и выходе его дефектных элементов в зону нагрузки, а также в других случаях взаимосвязанных изменений интенсивности сигналов ударных импульсов в течение замеров, как в результате наличия дефектов, так и в результате нормальных циклических изменений нагрузки.



Измерения на основе порядков скорости вращения в SPM HD существенно улучшают четкость и выраженность спектральных линий в случае об/мин, «плавающих» в течение замеров. Спектры ниже получены в результате измерений в одной и той же точке на оборудовании с регулируемой скоростью вращения, которая изменяется на 10% (от 550 до 600 об/мин) в течение достаточно длительного времени замера.

Верхний спектр получен без учёта «плавающих» об/мин и имеет существенное размытие линий в результате того, что об/мин изменялись в течение замера.



Нижний спектр получен в той же точке измерения в результате измерений на основе порядков об/мин, учитывающих «плавающие» об/мин с помощью датчика об/мин и специального алгоритма измерений. Спектр имеет четко выраженные линии несмотря на то, что об/мин изменялись в течение замера.

