

АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОТЫ СУДОВЫХ НАСОСОВ

Инженер-программист ВНИИ РА Звягин Константин Николаевич,
старший преподаватель Севмашвуза Ключин Николай Михайлович

В работе рассмотрен пример проектирования фильтра с конечной импульсной характеристикой для фильтрации полезного сигнала из зашумлённой высокочастотной выборки. Созданный фильтр применен к анализу сигнала, записанного акселерометрами, установленными на корпусе одноступенчатого центробежного насоса. Исследовано качество отфильтрованного сигнала.

В процессе эксплуатации судовых механизмов происходит много нештатных событий, таких как поломки их подвижных частей, выход из строя, неожиданные остановки, и другие сбои режимов эксплуатации. В ряде случаев такие события связаны с ошибками персонала, а иногда вызваны чисто техническими причинами. Среди таких причин основные – это внутренние скрытые дефекты, появляющиеся в процессе эксплуатации или при установке некачественных запасных частей, износ с течением времени, а также несоблюдение правил эксплуатации. Для предупреждения и мониторинга этих и других внутренних процессов рационально использовать неразрушающий внутренний контроль параметров механизмов. Систему такого контроля можно создать на основе измерения, оценки и анализа вибрационных характеристик эксплуатируемых механизмов. Именно эти характеристики могут дать мгновенный отклик на внутренние изменения в судовом механизме, а также послужить основой для анализа технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса.

Измерения проводились в лаборатории “Судовые энергетические установки” Севмашвуза г. Северодвинска на малом гидродинамическом стенде [1]. Использовался одноступенчатый центробежный насос ЦН-10/20М. Обратная частота колебалась в пределах 49,6÷49,8 Гц в зависимости от параметров электросети. Рабочее колесо насоса имело семь лопастей, поэтому лопастная частота была примерно равна 347,2÷348,6 Гц.

Для измерения вибрации применялся двухканальный анализатор спектра ZET 017-U2. В качестве датчика вибрации – акселерометр AP98. Датчики устанавливались во взаимно перпендикулярных направлениях в горизонтальной плоскости на корпусе в районе подшипников насоса и в плоскости рабочего колеса.

Запись сигнала проводилась с помощью программного обеспечения ZETLab Analiz. Данные измерения записывались в формате .wav.

Применим к записанным сигналам дискретное преобразование Фурье (ДПФ) с целью его анализа.

Исходный спектр ДПФ с прямоугольным окном размером 12500 замеров за полсекунды работы насоса (измерение номер 02/s090491) с частотой дискретизации 25000 Гц представлен на рис.1. По вертикальной оси отложен безразмерный модуль мощности насоса, по горизонтальной оси – частота в Гц.

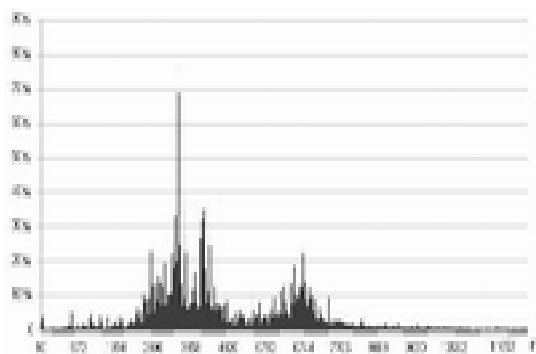


Рис.1. Модуль спектра работы насоса

На представленной спектрограмме видны наиболее мощные частотные составляющие, возникающие при исследуемом режиме работы, которые находятся в области 2000-7000 Гц.

Предположим, что нам нужно выделить для анализа частотную составляющую около 300÷400 Гц, отвечающую за появление некоторого сбоя в работе насоса. Это гораздо частота этой составляющей значительно ниже, чем частота вибрации и шума, сопровождающие работу механизма в обычном режиме.

Поэтому спроектируем фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтр) для

подавления высокочастотной составляющей. Применение такого фильтра поможет не обращать внимания на штатный режим работы насоса, а сосредоточиться только на фиксации отклонений от него.

Фильтры с конечной импульсной характеристикой описываются выражением:

$$y(n) = \sum_{i=0}^P b_i x(n-i),$$

где $x(n)$ – входной сигнал, $y(n)$ – выходной сигнал, b_i – коэффициенты фильтра, n – индекс выходного отсчета, P – порядок фильтра.

Формула для расчета импульсной характеристики (ИХ) $h(k)$ КИХ фильтра:

$$h(k) = \left(\frac{1}{N}\right) \left[\frac{\sin\left(\frac{\pi k K}{N}\right)}{\sin\left(\frac{\pi k}{N}\right)} \right] / [N \sin(\pi k / N)],$$

где N – размерность фильтра, количество точек, k – временной индекс от 0 до $N-1$, K – ширина полосы пропускания (количество единичных отсчетов, соответствующих полосе пропускания).

Импульсная характеристика фильтра на 1024 точки с полосой пропускания 52, рассчитанная по этой формуле, приведена на рис.2.

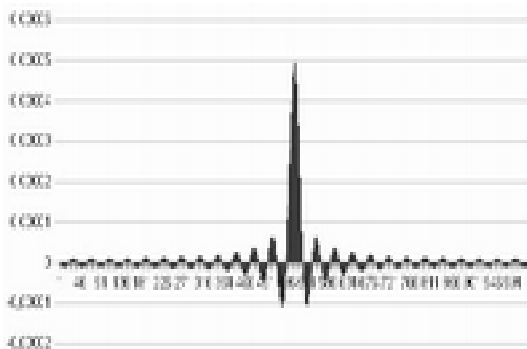


Рис.2. Импульсная характеристика фильтра

Здесь по горизонтальной оси отложен временной индекс, а по вертикальной оси – импульсная характеристика.

После применения этого фильтра запись, приведённая на рис. 1, приобретает вид, показанный на рис.3.

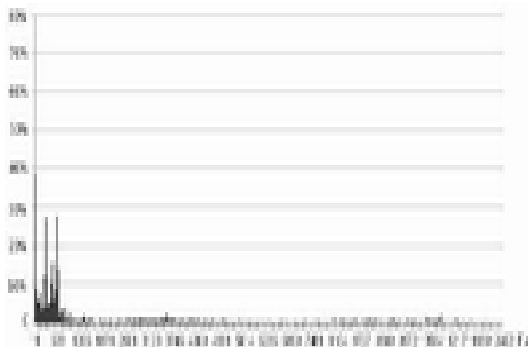


Рис.3. Вид спектра насоса после применения фильтра

На этом рисунке по горизонтальной оси отложена частота в Гц, по вертикальной оси – безразмерный модуль мощности насоса.

Рассмотрим только тот диапазон частот на рис.3, на котором сосредоточены оставшиеся значимые ординаты спектра (рис.4).

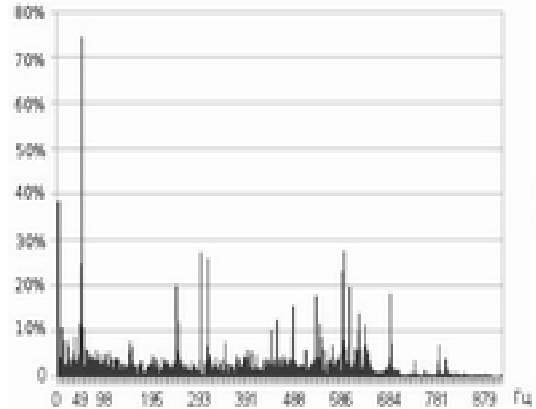


Рис.4. Отфильтрованная часть спектра насоса. Оси координат те же, что и на рис.3

Видно, что с помощью фильтрации ослаблена мощность ненужных в данном случае частот. При этом оказалась ослабленной и мощность полезного сигнала, но она значительно превосходит мощность составляющих, расположенных на частотах, находящихся вне полосы пропускания. Это позволяет эффективно проводить анализ отфильтрованного участка.

Исследуем качество использованного фильтра.

Для этого построим спектр импульсной характеристики (ИХ) рассмотренного фильтра с параметрами – окно размером 1024, частота 25000 Гц (см. рис.5).

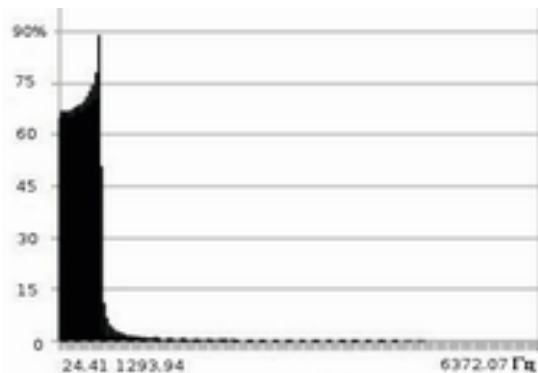


Рис.5. Спектр импульсной характеристики фильтра

На рис.5 видны пульсации в полосе пропускания, сосредоточенные в диапазоне частот этой полосы. Это искажает исходный сигнал при фильтрации. Можно улучшить характеристики КИХ фильтра с помощью окна [2]. Применим окно к исходной ИХ:

$$h_{new}(k) = w(k)h(k),$$

где $w(k)$ – оконная функция, $h(k)$ – исходная ИХ, $h_{new}(k)$ – получаемая ИХ.

Выберем окно Ханна, как наиболее простое и эффективное, для улучшения ИХ фильтра.

Спектральная характеристика фильтра с окном Ханна приведена на рис.6.

Рис.6. Спектральная характеристика фильтра с окном Ханна

Видно что характеристика полосы пропускания приобрела более плавный вид, флуктуации значительно уменьшились и пиковое искажение вблизи переходной полосы стало меньше. Но от резкого всплеска в конце полосы пропускания полностью избавиться не удалось. Тем не менее данный фильтр уже можно считать улучшенным по сравнению с исходным, так как оставшиеся флуктуации изменяют отфильтрованный сигнал в среднем не более, чем на 15%.

Анализируя характер изменения спектра импульсной характеристики, можно сделать предположение, что нам потребуется окно с более остроугольной формой, чем окно Ханна. Такому условию удовлетворяют окна: Ханна-Бартлетта, треугольное и экспоненциальное (см. рис. 7).

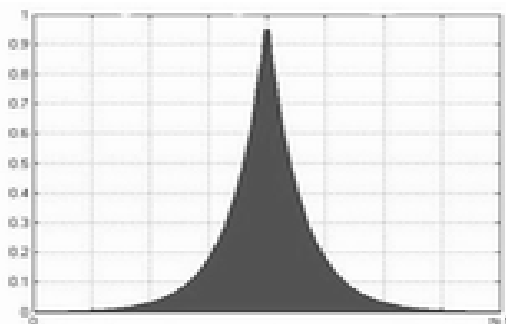


Рис. 7. Экспоненциальное окно

Для исследуемого КИХ фильтра наилучшие результаты получились при применении экспоненциального окна (см. рис.8).

Рис. 8. Спектральная характеристика фильтра с экспоненциальным окном

Видно, что ИХ фильтра значительно улучшилась. Флуктуации в полосе пропускания теперь не превышают 2%. Это – хороший показатель, так как допустимая погрешность инженерных расчетов в технике обычно составляет 5%. Однако мы заплатили за это более плавной и широкой переходной полосой по сравнению с исходной (см рис.5). Приведем полосу пропускания ИХ более крупно (см. рис. 9).

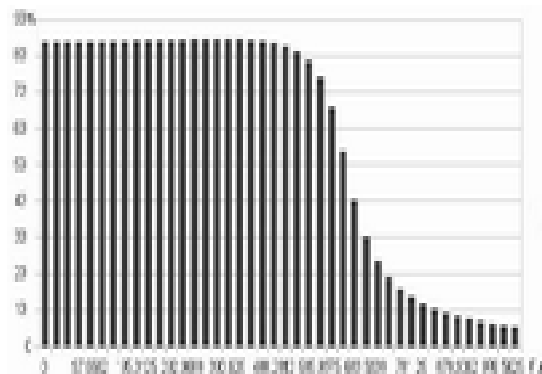


Рис. 9. Вид полосы пропускания в частотной области и части переходной зоны фильтра с экспоненциальным окном

Можно отметить, что на рис. 9 в полосе пропускания значения ИХ изменяются практически линейно. Эти изменения не превышают 2% от средней величины ординат на этом участке частот. На рис. 9 четко видна увеличившаяся и ставшая более полой переходная зона по сравнению с начальной ИХ КИХ фильтра.

Применим теперь фильтр с экспоненциальным окном к исходному сигналу, приведенному на рис.1. Результат приведен на рис.10.

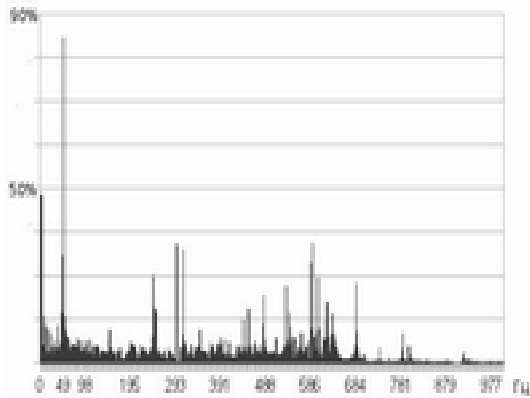


Рис. 10. ДПФ отфильтрованного сигнала с применением КИХ фильтра с экспоненциальным окном

По отношению к пиковым значениям спектра улучшение фильтра не дало сильного эффекта.

Можно сделать вывод, что для исследованного в работе типа сигнала, приведённого на рис.1, наилучшим образом проявил себя КИХ фильтр с полосой пропускания, приведённой на рис. 2. Однако для практического применения следует рекомендовать КИХ фильтр с улучшенной с помощью экспоненциального окна ИХ, так как он оставляет флуктуации в полосе пропускания значительно меньшие, чем в исходной ИХ КИХ

фильтра.

Для поиска особенностей работы судовых насосов в низкочастотной области при использовании измерительных устройств с широкой полосой пропускания, в нашем случае 0-25000 Гц, по результатам данной работы рекомендован КИХ фильтр со спектром ИХ, приведенной на рис. 8.

Литература:

1. Лычаков А.И., Ключин Н.М. Разработка стенда для проведения виброакустической диагностики насосных агрегатов. НПК СПбГМТУ "Океанотехника и геология: проблемы освоения шельфа". Сборник докладов. – Северодвинск, 2005. с.47-49.
2. Ричард Лайонс "Цифровая обработка сигналов", второе издание. Москва. Издательство БИНОМ 2006г.
3. http://ru.wikipedia.org/wiki/Фильтр_с_конечной_импульсной_характеристикой

