

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Е.Ю. Шелковников, И.Л. Охильков, К.Ю. Петухов

Институт механики УрО РАН,
Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова
г. Ижевск

В статье рассмотрены вопросы вибродиагностики погружного электродвигателя для нефтяных скважин, Разработана система диагностики, в которой реализован эффективный метод экономии системных ресурсов.

Ключевые слова: погружной электродвигатель, диагностика, блок телеметрии, алгоритм Герцеля.

Известно, что рыночная стоимость нефти непосредственно зависит от сложности ее добычи и необходимости частого обслуживания добывающих агрегатов. Поэтому оснащение нефтедобывающего оборудования современными системами диагностики, направленными на повышение долговечности его использования, является актуальным. Одним из основных агрегатов нефтедобывающего оборудования, требующих диагностики, является погружной электродвигатель, в связи с испытываемыми большими нагрузками [1]. В рассматриваемом двигателе наиболее характерными являются следующие дефекты: дефект вкладыша, дефект шейки, возрастание зазора в подшипнике по радиальной оси, изгиб вала, перекос, изменение формы вала [1]. Вышеуказанные дефекты имеют ярко выраженные признаки, хорошо заметные на спектре сигнала виброускорения [2]. Поэтому, располагая данными, полученными в форме сигналов ускорения, можно воспользоваться возможностью изучить низкоамплитудные высокочастотные составляющие для идентификации дефектов. Задача вибродиагностики может быть решена на основе получения данных от датчиков ускорения, размещенных на корпусе двигателя, с последующим спектральным анализом и выявлением дефектов. Анализ основывается на выявлении характеристических гармоник в спектре вибрации и их взаимного расположения.

Основная проблема при разработке системы диагностики погружного электродвигателя состоит в том, что блок телеметрии погружен в скважину на глубину от 3 до 6 километров. Жесткие условия окружающей среды существенно сокращают номенклатуру возможных технических средств для решения

задач диагностики ввиду ограниченного объема памяти и невысокого быстродействия устройств, которые могут эксплуатироваться в таких условиях. Невозможность расширения памяти связана с ограничением размеров устройства, а применение современных цифровых сигнальных процессоров (в которых реализованы алгоритмы цифровой обработки сигналов) невозможно из-за жестких условий эксплуатации и сложных схем обвязки, требующих значительного увеличения размеров устройства. Таким образом, необходимо разработать систему диагностики на основе данных о виброускорении корпуса двигателя с использованием алгоритмов цифровой обработки, оптимизированных для применения в низкопроизводительных микроконтроллерах.

В настоящее время в качестве основного арифметико-логического устройства, установленного на платах функциональных частей блока погружной телеметрии, применяется контроллер Atmega168, работающий на частоте 20МГц, оснащенный оперативной памятью (RAM) 1Kb и памятью программ (Flash) 16Kb. Для передачи используется промышленный Hart протокол, позволяющий передавать 1байт в секунду. Для разрабатываемого блока предусмотрено окно времени для передачи, равное 2 минутам, что ограничивает максимальный объем данных до 128байт.

Процесс вибродиагностики можно разделить на три этапа: первоначально необходимо получить спектр виброускорения с требуемой точностью, затем определить частоту вращения вала двигателя, и, наконец, зная частоту вращения, и предполагая инерционность системы (скорость вращения не может за краткий срок претерпеть больших изменений), необходимо вычислить амплитуды гар-

моник с частотами, определяемыми частотой вала, и сделать вывод о состоянии агрегата.

Определение основной частоты вращения вала основывается на ярко выраженной «линейчатости» спектра виброускорения (т.е. наличии высоко-амплитудных гармоник в осевом направлении на частотах, кратных частоте вращения). Ввиду малого объема памяти и необходимости получить только частоту вращения, можно сократить частотный диапазон. Основная частота вращения двигателя находится в диапазоне 20..65Гц. Согласно теоремы Котельникова [3], частота дискретизации должна быть, по крайней мере, вдвое больше, чем верхняя частота сигнала (т.е. есть должна превышать 130Гц).

Применение быстрого преобразования Фурье требует количества отсчетов, равного степени числа 2. Для сохранения результата необходимо, как минимум 2 ячейки памяти на каждый отсчет (мнимая и действительная часть комплексного числа), что ограничивает в целом число отсчетов до 256. Поэтому целесообразно применить модифицированный алгоритм Герцеля [4], позволяющий вычислять гармоники с заданной частотой. Ячейка цифрового фильтра с бесконечной импульсной характеристикой для данного алгоритма приведена на рисунке 1.

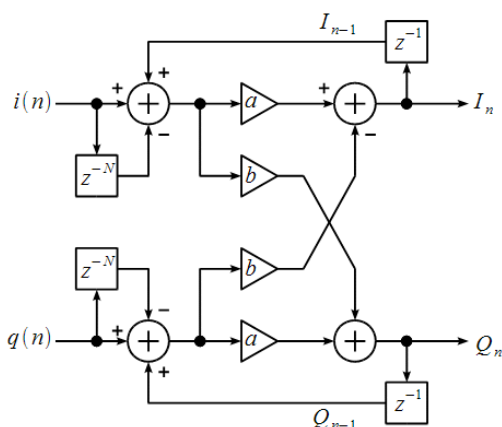


Рисунок 1 – Ячейка цифрового фильтра с бесконечной импульсной характеристикой для алгоритма Герцеля

Коэффициенты а и b для каждого номера гармоники вычисляются по формулам:

$$a = \cos\left(\frac{2\pi}{N} k_0\right); \quad b = \sin\left(\frac{2\pi}{N} k_0\right),$$

где k_0 – номер гармоники.

Данные коэффициенты могут быть рассчитаны заранее и записаны в EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory), что позволяет исключить их расчет

во время выполнения алгоритма. При этом номер гармоники определяется по формуле:

$$k_0 = \frac{N \cdot f_0}{1} = f_0 \cdot dt,$$

где – число отсчетов;

f_0 – частота; – временной интервал дискретизации.

Анализ показал, что если рассматривать только гармоники для целевого диапазона $F=[8..70]$ Гц, то общий объем данных будет определяться согласно неравенства:

$$N + 3 \cdot (70N \cdot dt - 8N \cdot dt) < 1000.$$

Откуда:

$$N < \frac{1000}{1 + 186 \cdot dt}.$$

Погрешность определения частоты находится по формуле:

$$\Delta F_{\min} = \frac{1}{N \cdot dt}.$$

Значения погрешностей $\Delta F_{\min}$ для различных dt и N приведены в таблице 1.

Таблица1 – Значения $\Delta F_{\min}$ для различных dt и N

dt	N	$\Delta F_{\min}$
0.005	517	0.387
0.006	469	0.355
0.007	432	0.331
0.008	399	0.313

Повысить точность определения частоты можно путем увеличения числа сохраняемых отсчетов за счет сокращения памяти, требуемой для хранения промежуточных данных. Эта цель достигается путем вычисления гармоник на выходе пакетами по n штук. В этом случае для хранения этих данных потребуется всего $2n$ ячеек памяти. Для выбора интервала опроса и количества отсчетов был проведен анализ зависимостей минимально различимой частоты от числа отсчетов и интервала опроса, который показал, что наибольшую точность дает деление процесса вычисления на 305 частей при интервале дискретизации 0,007с. В этом случае погрешность $\Delta F_{\min}$ составит 0,206Гц, что существенно ниже, чем в варианте без пакетного деления.

С использованием вышеописанных принципов была разработана математическая модель системы и проведены ее исследования для двигателя с заданной частотой

вращения 40Гц. При этом учитывалась размерность единицы данных памяти контроллера (8 байт), что определило максимальное хранимое значение 256, а также необходимость округления всех значений до целочисленных.

На рисунке 2 изображены спектры, полученные методом быстрого преобразования Фурье и в результате применения разработанного алгоритма.

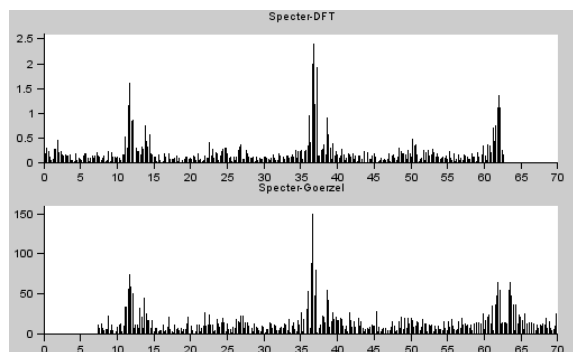


Рисунок 2 – Спектры входного тестового сигнала

Незначительные искажения спектра вызваны ошибками округления. Из данного спектра можно выявить наличие дефекта шейки вала (низкочастотные гармоники) и проскальзывание ротора (частота вращения примерно равняется 37.5Гц, что немного меньше заданной частоты питающего напряжения).

Таким образом, разработана система

диагностики погружного электродвигателя, в которой реализован эффективный метод экономии системных ресурсов при необходимости получения спектра сигнала в заданном частотном диапазоне. Выполнено моделирование работы системы, которое показало незначительное снижение точности в отличие от классического алгоритма быстрого преобразования Фурье при значительном снижении требований к ресурсам памяти. Подобный подход может быть применен при разработке оборудования в условиях ограниченных вычислительных возможностей, где не требуется высокая точность работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Русов В.А. Спектральная вибродиагностика. – Пермь: ПВФ «Вибро-Центр», 1996. – 120с.
2. Вибродиагностика для начинающих и специалистов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.vibration.ru/v_defekt.shtml. – Загл. с экрана.
3. Опленгеймер А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. – М.: Техносфера, 2006. – 856с.
4. Теория и практика цифровой обработки сигналов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dsplib.ru/content/goertzelmod/goertzelmod.html>. – Загл. с экрана.

Шелковников Евгений Юрьевич – д.т.н., профессор, тел.: (3412) 58-53-33, e-mail: evshelk@mail.ru; **Охильков Иван Львович** – магистрант; **Петухов Константин Юрьевич** – к.т.н., доцент.