

УДК 621.313.17

## ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРАЦИИ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Е.Ю. Шелковников, И.Л. Охильков

В статье обоснована актуальность разработки систем вибродиагностики погружного электродвигателя. Рассмотрен способ бесконтактного определения частоты вращения вала двигателя, ориентированный на применение в низкопроизводительных высокотемпературных микропроцессорах. Приведены результаты экспериментальных исследований спектра вибросигналов и работы алгоритма ФАПЧ.

**Ключевые слова:** погружной электродвигатель, диагностика, блок телеметрии, виброускорение, фазовая автоподстройка частоты

### Введение

В настоящее время большая часть нефтедобывающих скважин оснащается телеметрическими системами, позволяющими поддерживать работу погружного насоса в оптимальном режиме [1]. Подобные системы дают возможность осуществлять многочисленные измерения параметров пластовой жидкости и корректировать работу погружного электродвигателя в зависимости от контролируемых параметров. Основная проблема контроля состоит в высокой температуре внутри скважины, вызванной геотермальным градиентом температуры при увеличении глубины. Так, на глубине от трех до шести километров, на которую погружен блок телеметрии, температура может достигать до 150 градусов. Поэтому номенклатура возможных алгоритмов и программных средств для решения задач диагностики погружного электродвигателя значительно ограничена в связи с небольшим объемом памяти и невысоким быстродействием устройств, которые могут эксплуатироваться в таких условиях. Отсутствие возможности расширения памяти связано с ограничением размеров устройства, а применение современных цифровых сигнальных процессоров (в которых реализованы алгоритмы цифровой обработки сигналов) неприемлемо из-за жестких условий эксплуатации и сложных схем обрaмления, требующих значительного увеличения размеров устройства. Поэтому разработка системы вибродиагностики погружного электродвигателя на основе информации о виброускорении его корпуса с использованием алгоритмов цифровой обработки, оптимизированных для применения в низкопроизводительных микроконтроллерах, является актуальной.

### Постановка задачи

Рисунок 1 иллюстрирует стандартную структуру скважины. Она состоит из наземной части, представленной в виде станции

управления 1 и подземной части, состоящей из насоса 4, электродвигателя 5 и блока погружной телеметрии 6. Подача добытой нефти осуществляется через насосно-компрессионную трубу 3, а питание двигателя и связь блока телеметрии с наземной частью – через силовую кабель 2.

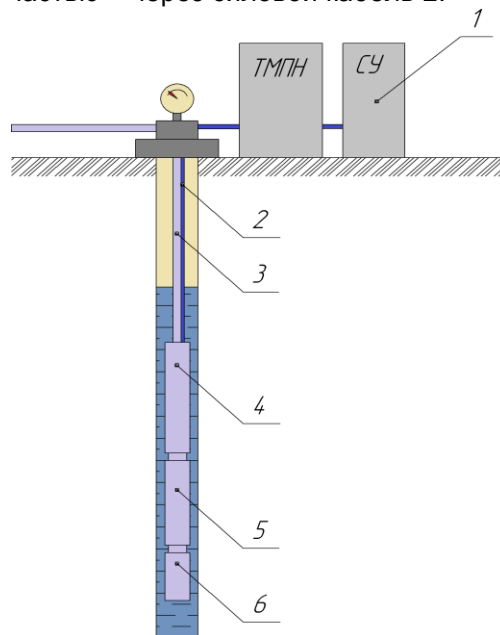


Рисунок 1 – Структура скважины

Одним из основных агрегатов нефтедобывающего оборудования, требующих диагностики, является погружной электродвигатель, в связи с испытываемыми им большими нагрузками [2]. Структура электродвигателя представлена на рисунке 2.

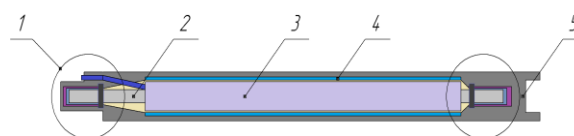


Рисунок 2 – Структура погружного электродвигателя

### РАЗДЕЛ III. ПРИМЕНЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

В состав стандартного электродвигателя входят опорные подшипники скольжения 1, вал двигателя 2, обмотки двигателя 3, корпус двигателя 4 и монтажный фланец 5, к которому крепится блок телеметрии. Состав подшипника скольжения, используемого в погружном двигателе, приведен на рисунке 3.

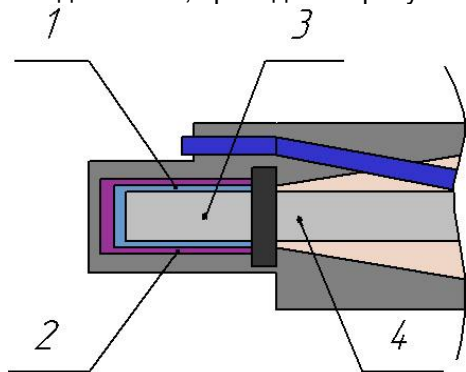


Рисунок 3 – Состав подшипника скольжения

Для подшипников скольжения наиболее характерными являются следующие дефекты: истончение масляного клина 1, дефект вкладыша 2, дефект шейки 3, возрастание зазора в подшипнике по радиальной оси, изгиб вала 4, перекос, изменение формы вала [2]. Все эти дефекты имеют ярко выраженные признаки, хорошо заметные на спектре сигнала виброускорения [3]. Следует отметить, что частота вращения асинхронного двигателя отличается от частоты питающего напряжения в зависимости от нагруженности агрегата.

Задача вибродиагностики разделяется на два этапа: первоначально необходимо определить частоту вращения вала двигателя и затем, предполагая инерционность системы (скорость вращения не может за краткий промежуток времени претерпеть больших изменений), вычислить амплитуды гармоник с частотами, определяемыми частотой вала, и передать их на поверхность.

Наиболее часто используемым способом контроля частоты вращения вала двигателя является введение датчика Холла либо магнита с катушкой. В погружном двигателе такой вариант применить нельзя ввиду ослабления конструкции (т.е. добавления новых частей, которые могут привести к поломке), что неприемлемо для оборудования, предназначенного для длительного погружения. Целесообразно использовать бесконтактный способ измерения частоты вращения вала. Лучшим решением задачи в данном случае является использование вибрации агрегата, при этом (в условиях жесткой сцепки блока

телеметрии с погружным электродвигателем) обеспечивается полная передача вибрации с двигателя на датчик вибрации, расположенный на печатной плате внутри блока.

Для реализации вибрационной диагностики агрегата можно проводить анализ сигналов либо виброускорения, либо виброскорости, при этом использование сигналов виброускорения обеспечивает экспоненциальный рост их амплитуды с увеличением частоты [1]. Поэтому, располагая данными, полученными в форме сигналов виброускорения, можно использовать их низкоамплитудные высокочастотные составляющие для идентификации перекосов и дисбалансов вала. Задача вибродиагностики электродвигателя может быть решена на основе сбора данных от датчиков ускорения, размещенных внутри блока телеметрии, с последующим спектральным анализом и выявлением дефектов электродвигателя. Анализ основывается на выявлении характеристических гармоник в спектре вибрации и их взаимного расположения.

#### Вибродиагностика погружного двигателя

В настоящее время в качестве основного арифметико-логического устройства, установленного на платах функциональных частей блока погружной телеметрии, применяется контроллер *Atmega168*, работающий на частоте 16МГц, оснащенный оперативной памятью (RAM) 1Kb и памятью программ (Flash) 16Kb. В качестве датчика ускорения применяется датчик ADXL203, обладающий чувствительностью 1В/г в диапазоне измеряемых ускорений  $\pm 1,7g$ .

Для определения частоты вращения ротора обычно используют либо метод обратного счета сигнала с выхода детектора перехода через ноль, либо метод фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) этого сигнала. В данном случае целесообразно применить метод ФАПЧ [5], так как он имеет значительно более высокую точность при длительной работе, за счет того, что счет частоты продолжается непрерывно, во время работы всего алгоритма. При этом ФАПЧ позволяет отфильтровать высокочастотный шум. Также к преимуществам ФАПЧ можно отнести отсутствие необходимости хранить большие массивы чисел и оперировать ими, что немало важно для низкопроизводительных микроконтроллеров.

Особенностью реализации алгоритма ФАПЧ на высокотемпературном микроконтроллере является отсутствие возможно-

## ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРАЦИИ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

сти работать в режиме реального времени с синусоидальными функциями (из-за слабой вычислительной мощности). Поэтому целесообразно использовать детектор перехода через ноль с гистерезисом, реализованным программно на основе аналого-цифрового преобразователя, который преобразует синусоидальный входной сигнал в меандр. Использование гистерезиса позволяет отфильтровать низкоамплитудный высокочастотный шум. Выходом системы ФАПЧ в этом случае является ШИМ-генератор, встроенный в микроконтроллер.

Также в связи с тем, что угол наклона блока телеметрии заранее неизвестен, то и сдвиг постоянной составляющей выхода датчика вибрации (вызванной влиянием гравитационного поля Земли) заранее также предсказать нельзя. Таким образом, положение блока должно определяться автоматически программным способом, исходя из чего детектор нуля целесообразно реализовать на базе АЦП с программной предобработкой сигнала.

На рисунке 4 представлены осциллограммы, иллюстрирующие работу фазового компаратора ФАПЧ.

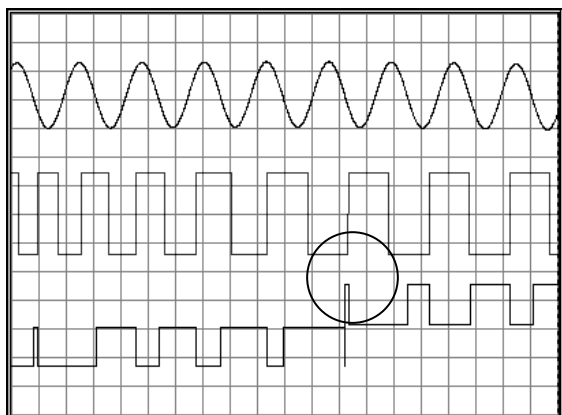


Рисунок 4 – Осциллограммы работы фазового компаратора

Верхний график представляет собой сигнал на входе ФАПЧ; средний график – на выходе ФАПЧ; нижний график – сигнал ошибки, формируемый фазовым компаратором. Для обеспечения плавного характера изменения сигнала ошибки, и, как следствие, устойчивой работы алгоритма, сигнал необходимо проинтегрировать. Следует отметить, что длительность сигнала ошибки уменьшается с приближением к точке перехода сигнала ошибки из состояния «фаза запаздывает» в состояние «фаза опережает» (отмечена кругом на рисунке 4), поэтому после интегрирования сигнал ошибки изменяется приблизи-

тельно по синусоидальному закону. Признаком захвата частоты является равенство нулю сигнала ошибки. При этом, частота ФАПЧ вычисляется согласно формуле:

$$F_{PLL} = \frac{F_{CPU}}{K(F_{PLL})}, \quad (1)$$

где  $F_{CPU}$  – частота тактового сигнала процессора;  $K(F_{PLL})$  – коэффициент деления, зависящий от частоты.

Для исследования возможности измерения характеристик вибрации электродвигателя на базе используемого аппаратного обеспечения необходимо провести испытания датчика на рабочем двигателе. Также для наиболее эффективной работы алгоритма ФАПЧ нужно в качестве входного сигнала использовать то направление вибрации двигателя, на котором гармоника основного тона наиболее выражена (по сравнению с другими направлениями). Для этого необходимо исследовать спектры выходных сигналов со всех направлений вибрации.

Для решения данной задачи разработан алгоритм дискретизации сигналов вибрации с направлений вибрации X и Y в режиме реального времени в течении 10 секунд на частоте 3 кГц с передачей информации на ПЭВМ. Такие параметры дискретизации позволяют получать спектры сигналов до частоты 1,5 кГц с шагом 0,1 Гц [4]. Максимальная частота выбрана, исходя из предположения, что основные вибрационные процессы в крупных механических системах ограничены частотами около 1 кГц. Полученные данные используются для построения спектров сигналов с использованием алгоритма преобразования Фурье на ПЭВМ.

Передача данных на ПЭВМ осуществляется посредством COM порта. Для увеличения скорости дискретизации применено сжатие данных по следующей схеме: для передачи применяется режим 7N1, т.е. 7 бит данных +1 стоповый бит. При этом при каждой дискретизации формируются 4 пакета данных: первый пакет используется в качестве метки синхронизации, второй бит передает младшие 7 бит результата первого канала АЦП, третий пакет – младшие 7 бит результата второго канала АЦП, четвертый пакет – 3 старших бита обоих каналов АЦП. Такой способ передачи позволяет максимально утилизировать порт передачи. Обратное раскодирование реализуется средствами ПЭВМ.

Предложенные алгоритмы ФАПЧ и дискретизации реализованы на базе специальной печатной платы телеметрии, включаю-

### РАЗДЕЛ III. ПРИМЕНЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

щей датчик ускорения, два фильтра низких частот для каналов X и Y на частоты 1,2 кГц, микросхему преобразования уровней ТТЛ в логические уровни СОМ-порта ЭВМ, микросхему стабилизатора питания и микропроцессор.

#### Результаты и их обсуждение

Методика эксперимента заключается в следующем. Печатная плата телеметрии крепится к горизонтально ориентированному погружному двигателю, затем производится монтаж проводов питания, проводов сочленения платы с ПЭВМ посредством СОМ-порта. На первом этапе эксперимента исследуется характер вибрации электродвигателя (который включается на частоте питающего напряжения 50 Гц), для чего подается команда с ПЭВМ на начало контроля сигналов виброускорения с одновременной записью результатов в текстовый файл. Далее осуществляется распаковка файла и анализ спектров сигналов в математическом пакете SciLab. На втором этапе выполняется проверка работы алгоритма ФАПЧ.

Результаты оцифровки полученных сигналов и построения их спектров показаны на рисунке 5. В левой части рисунка приведены формы сигналов вибрации по осям X и Y (где на вертикальной оси отображаются коды АЦП, на горизонтальной оси – время). В правой части рисунка показаны формы спектров сигналов по осям X и Y соответственно (где на вертикальной оси отображаются амплитуды гармоник, а на горизонтальной оси – частоты). Для более детального анализа рассмотрены 0,2 секунды входного сигнала и первые 500 Гц спектра сигналов вибрации.

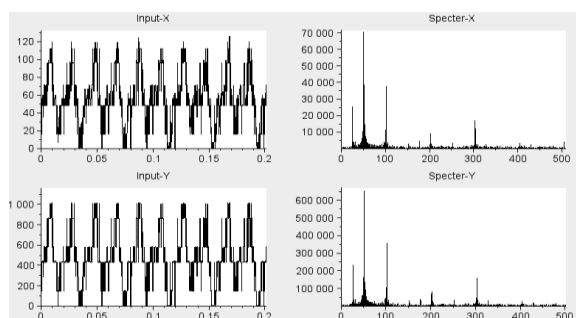


Рисунок 5 – Результаты оцифровки и спектры вибросигналов по осям X и Y

Анализ полученных результатов показал, что сигнал в осевом направлении (Y) имеет ту же форму, что и сигнал по радиальной оси (X), но при этом усилен примерно в 6 раз. Гармонический состав (исходя из спектров,

построенных для обоих каналов) примерно одинаков. Также за счет более низкой амплитуды сигнала радиальной вибрации относительно осевой, на нем более заметно «зашумление». Исходя из этого, для измерения частоты вращения вала двигателя наиболее эффективным является выбор канала вибрации осевого направления, для которого при использовании алгоритма ФАПЧ получено совпадение частот входного и выходного сигнала с погрешностью ~0,09 Гц за 42 секунды. Таким образом, результаты эксперимента показали высокую точность работы алгоритма даже при работе с зашумленным сигналом.

В заключение можно отметить следующее. В работе предложен эффективный метод бесконтактного определения частоты вращения вала электродвигателя, ориентированный на применение в низкопроизводительных высокотемпературных микропроцессорах. Метод может быть применен при разработке оборудования в условиях ограниченных вычислительных возможностей, где требуется сохранить надежность контроля объекта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шелковников, Е.Ю. Исследование системы диагностики погружного электродвигателя/ Е.Ю. Шелковников, И.Л. Охильков, К.Ю. Петухов // Ползуновский Альманах. – 2013. – №1. – С.87-89.
2. Руссов, В.А. Спектральная вибродиагностика /В.А. Руссов. – Пермь: ПФФ «Вибро-Центр». – 1996. –120с.
3. Lynn, D. Выявление дефектов подшипников качения с помощью анализа вибрации / Пер.с англ. И.Р. Шейняк, под ред. В.А.Смирнова [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.vibration.ru/v\\_defekt.shtml](http://www.vibration.ru/v_defekt.shtml), свободный (дата обращения: 09.03.2014)
4. Оппенгеймер, А. Цифровая обработка сигналов/ А. Оппенгеймер, Р. Шафер. –М: Техносфера. – 2006. – 856с.
5. Цифровой контур ФАПЧ (digital PLL) и его свойства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dsplib.ru/content/dpll/dpll.html>, свободный (дата обращения: 09.03.2014).
6. Контур фазовой автоподстройки частоты и его основные свойства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dsplib.ru/content/pll/pll.html>, свободный (дата обращения: 09.03.2014).

Д.т.н., зав. лаб. Шелковников Е.Ю., магистрант Охильков И.Л. – (3412) 21-89-55, [iit@udman.ru](mailto:iit@udman.ru) - Институт механики УрО РАН.