

А. Н. Китабов, В. П. Токарев

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

В статье рассмотрены вопросы диагностики погружного электродвигателя. Произведен качественный анализ существующих систем и методов диагностирования погружных электродвигателей, определены достоинства и недостатки различных систем диагностики. Рассмотрены основные источники механической и электромагнитной вибрации погружных электродвигателей. Изложена концепция построения информационно-измерительной системы диагностики на основе распределенных средств измерения. *Погружной электродвигатель; экспериментальная скважина; вибрация; температура; спектр; измерительная система; акселерометр*

В большинстве скважин России с высоким дебитом для добычи нефти используют установки электроцентробежного насоса (УЭЦН). В состав данной установки входит погружной электродвигатель (ПЭД), выполняющий функцию привода. ПЭД является маслозаполненным асинхронным электродвигателем [1].

Преимуществом УЭЦН является ее высокая эффективность. Кроме того, работа УЭЦН достаточно легко поддается автоматизации и телеуправлению.

Эксплуатация УЭЦН сопровождается отказами ПЭД, причинами которых являются:

протяженная конструкция (до 18 м) при малом поперечном сечении (до 127 мм), что снижает его жесткость;

тяжелые условия эксплуатации, связанные с наличием в пластовой жидкости различных примесей (солеотложения, искусственные и натуральные механические примеси, асфальтосмолопарафиновые осадки), что приводит к засорению насоса и, как следствие, перегрузке ПЭД;

- неудовлетворительный отвод тепла от корпуса ПЭД, что приводит к перегреву обмоток статора;

- коррозия корпуса и нарушение герметизации ПЭД.

- Устранение отказов ПЭД в процессе эксплуатации является сложным и дорогим процессом и включает в себя:

- проведение дорогостоящих работ по подъему оборудования;

- экономические потери в связи с простоем рентабельной скважины;

- необходимость проведения ремонта или замены отказавшего ПЭД.

В целях увеличения срока безотказной работы ПЭД и своевременного выявления дефектов, повышаются требования к их техническому обслуживанию (ТО) на предприятиях нефтедобывающего профиля. Одним из аспектов повышения качества ТО является проведение приемосдаточных испытаний с целью проверки соответствия параметров требуемым техническим характеристикам с получением корректной информации о техническом состоянии ПЭД.

Практика эксплуатации ПЭД показывает, что повышение срока службы, надежности и увеличение межремонтного периода за счет своевременной диагностики, оценки и прогнозирования технического состояния дает значительно больший экономический эффект, чем улучшение других технико-экономических показателей: КПД, коэффициента мощности, коэффициента использования и т. д.

В связи с этим растет интерес к системам, позволяющим оценить техническое состояние оборудования перед спуском его для добычи нефти. В настоящее время существуют системы, предназначенные для диагностики электрических машин, способные производить измерения различных параметров (вибрация, температура) в нескольких точках оборудования. Однако не рассматривались вопросы создания многоканальных и многоточечных систем диагностики ПЭД, которые позволяют осуществить контроль технического состояния непосредственно в рабочей среде. Поэтому разработка информационно-измерительной системы диагностики ПЭД на основе распределенных средств измерения является актуальной задачей.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- рассмотреть существующие методы и средства диагностики ПЭД;

- провести анализ параметров, необходимых для оценки технического состояния ПЭД;
- разработать систему диагностирования на основе распределенных средств измерения.

1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПЭД

В настоящее время отсутствует единая концепция диагностирования ПЭД, но существуют и успешно применяются отдельные методики. В основном они выполняются на основании анализа показаний контрольно-измерительных приборов при периодических обходах и по результатам испытаний при проведении плановых и внеплановых ремонтов ПЭД. Относительно большие сроки между испытаниями не позволяют выявлять повреждения на ранней стадии их возникновения, т. е. не могут быть зафиксированы своевременно. Методы и средства диагностики ПЭД несколько отличаются от методов и средств диагностики стандартных электродвигателей, поскольку имеют ряд технологических и эксплуатационных особенностей, указанных во введении. Они различаются как по структуре и составу систем диагностики, так и по измеряемым и анализируемым параметрам, в результате чего существует много методик определения и прогнозирования технического состояния погружного электрооборудования.

Существует разнообразие технических реализаций систем диагностики ПЭД. Это связано с монополизированностью рынка систем диагностики погружного оборудования и каждая нефтяная компания вправе предъявлять все более жесткие требования к продукции и соответственно выбирать наиболее достойный и приемлемый на ее взгляд вид и конкретный образец системы.

Наличие на рынке широкого выбора систем диагностики обусловлено различным применяемым оборудованием в каждой компании в зависимости от условий эксплуатации и особенностей конкретного месторождения, а также финансовыми возможностями.

Наиболее общая классификация систем диагностики заключается в разделении их на системы, предназначенные для тестирования ПЭД на поверхности Земли и для тестирования ПЭД в экспериментальной скважине. Каждый вид систем актуален, так как у каждого есть свои преимущества перед другим видом, которые невозможно реализовать в других системах.

Тестирование ПЭД на поверхности земли проводится преимущественно в специализированных горизонтальных стендах диагностики, предназначенных для проведения наиболее

полных и комплексных испытаний по количеству измеряемых параметров и, следовательно, формированию результата диагностики с наибольшей достоверностью. Такие стенды занимают большие площади и существуют на предприятиях в виде отдельных цехов.

Лидерами в производстве данного типа оборудования является: ООО «Камтехнопарк» и ЗАО «Нововет-Пермь». Кроме этих предприятий производством испытательных стендов занимаются ЗАО «Мехта», НПЦ «Динамика» [2, 3].

Принцип работы у всех видов горизонтальных стендов практически одинаков и отличается незначительно с учетом особенностей технических решений конкретного производителя. Тестируемый ПЭД устанавливается на ложементы, маслопроводами подключается маслосистема, на головку ПЭД монтируется измерительная головка, подключается кабельный ввод. Далее после заполнения ПЭД маслом производится испытание.

Кроме того, наземные испытания ПЭД проводятся с помощью портативных анализирующих систем, основанных на измерении и обработке параметров вибрации отдельных точек оборудования. Такие системы используются для оперативного контроля состояния оборудования и дают лишь приближенные результаты, так как в таких анализаторах предусмотрена стандартная интерпретация и обработка результатов, присущая большинству электрических машин [4].

Подземные испытания ПЭД производят в так называемой экспериментальной скважине, предназначенной для проведения приемосдаточных испытаний нефтяного оборудования и, в частности, УЭЦН. Она представляет собой обычную скважину с колонной насосно-компрессионных труб, располагается в ремонтных цехах, но, в отличие от промысловой скважины, ее глубина определяется габаритными размерами тестируемого оборудования. Диаметр же обсадной колонны сохраняется таким же, как и промысловой скважины. Экспериментальная скважина при испытаниях ПЭД заполняется трансформаторным маслом для более полной имитации рабочих условий и, в частности, теплоотвода. Кроме того, применение экспериментальной скважины позволяет учитывать взаимное влияние функционирующих агрегатов УЭЦН и их взаимодействие с эксплуатационной колонной.

При испытаниях в такой скважине производят полное подключение и спуск ПЭД, а измерения производятся с помощью портативного

переносного одноточечного прибора, который производит замер параметра в области головки ПЭД, так как основная часть его расположена в скважине. Чаще всего используются приборы для измерения вибрации.

Такие испытания наименее информативны с количественной точки зрения, но в результате их возможно получить информацию при наиболее полной имитации реальных условий благодаря тому, что двигатель находится в рабочем (вертикальном) расположении и его омывает жидкость наиболее близкая по свойствам к флюиду, который омывает ПЭД при добыче нефти из промысловой скважины.

Выше были рассмотрены системы для проведения приемо-сдаточных испытаний, которые проводятся с определенной периодичностью и перед спуском установки в рабочую скважину. Кроме вышеперечисленных, существуют системы погружной телеметрии, которые контролируют параметры ПЭД на протяжении всего промежутка времени его работы.

Самыми известными производителями указанных систем являются ОАО «Алнас», ЗАО «Электрон» и ООО «Борец» [5–7].

Такие системы необходимы практически во всех случаях применения ПЭД, так как они дают информацию о режимах работы, параметрах контроля в режиме реального времени и позволяют с помощью соответствующей наземной анализирующей аппаратуры сделать вывод о техническом состоянии ПЭД в каждый момент времени. Такие данные позволяют предвидеть и оперативным вмешательством в процесс управления добычей предотвращать нежелательные отказы оборудования в рабочей скважине.

Обобщив полученные в результате анализа данные о видах систем, можно сделать вывод о достоинствах и недостатках каждого вида.

Системы для тестирования ПЭД на поверхности земли имеют следующие достоинства:

- возможность проведения всесторонних испытаний ПЭД за счет того, что вся его поверхность доступна для подключения измерительной и анализирующей аппаратуры;

- не требуют использования специальных (стойких к коррозии) корпусов датчиков, так как они не соприкасаются с активной жидкостью трехфазного флюида;

- более безопасны с точки зрения непредвиденного отказа и не требуют дорогостоящего аварийного извлечения в случае поломки.

В свою очередь системы для тестирования ПЭД в экспериментальной скважине обеспечивают:

- вертикальное расположение испытуемого ПЭД в скважине придает ему рабочее положение;

- нахождение ПЭД в жидкости, приближенной по свойствам к водонефтегазовому трехфазному флюиду, который омывает его при реальной работе.

- Системы для тестирования на поверхности земли обладают следующими недостатками:

- нехарактерное горизонтальное расположение ПЭД на ложементы испытательного стенда;

- нахождение ПЭД в воздушной среде, которая не имитирует реальные условия эксплуатации.

Для существующих систем тестирования в скважине недостатком является отсутствие датчиков по всей поверхности ПЭД, так как основная его часть находится в скважине.

При вышеприведенном анализе достоинств и недостатков систем не были затронуты портативные системы наземной диагностики, так как они в настоящее время редко используются для оценки технического состояния погружного оборудования на поверхности земли.

2. ПАРАМЕТРЫ КОНТРОЛЯ ПЭД В ПРОЦЕССЕ ИСПЫТАНИЯ

При проектировании систем диагностики ПЭД необходимо контролировать те параметры, которые позволят дать достоверную оценку его технического состояния. Анализ возможных параметров контроля показал, что наиболее информативными для данного типа оборудования являются вибрация и температура [8].

Оценка температуры необходима для определения и анализа периодов работы и остановки двигателя для охлаждения, так как рассеиваемая мощность плохо отводится от корпуса двигателя из-за низкой теплопроводности омывающего флюида. Определение правильных периодов работы заключается в отключении двигателя при достижении максимальной температуры, установленной документацией, что позволяет наиболее эффективно использовать двигатель и снизить вероятность его отказа из-за перегрева [8].

С точки зрения современной диагностики уровень вибрации является одним из основных критериев оценки качества и надежности электрических машин и, в частности, ПЭД. Повышение уровня вибрации свидетельствует об оп-

ределенных дефектах изготовления или недоработках ПЭД, причем некоторые дефекты могут быть обнаружены только по результатам вибрационных испытаний. Введение контроля вибрации ПЭД перед спуском в скважину позволяет следить за стабильностью технологии изготовления машин и получать обобщенную характеристику их качества.

Определение влияния отдельных факторов и источников повышенной вибрации на работу ПЭД и изучение вибрационных характеристик являются в настоящее время актуальными проблемами. К факторам, оказывающим влияние на виброактивность, относятся дисбаланс вращающихся частей ротора, податливость конструкции (динамическая жесткость), некоторые конструктивные решения подшипниковых узлов и технология их изготовления.

Источники вибрации в зависимости от протекающих физико-механических процессов можно разделить на механические и магнитные [9]. Также при рассмотрении источников повышенной вибрации отдельно рассматривают подшипниковый узел. Общие положения диагностики электродвигателей по вибрации отражены в [10, 11]. Некоторые примеры диагностики электрических машин описаны в [12, 13].

2.1. Механические источники вибрации

Наиболее часто встречающийся дефект ПЭД – механическая неуравновешенность ротора (дисбаланс). Данный факт обусловлен, прежде всего, большой длиной ротора и, как следствие – сложностью процесса его балансировки.

При вращении ротора с дисбалансом в каждом поперечном сечении, имеющем отклонение размеров, возникает центробежная сила, вызывающая нагрузки на опоры. Причинами возникновения дисбаланса являются:

нарушение технологии производства и балансировки;

разрушение и износ частей ротора;

нарушение посадок деталей.

Сигнал вибрации, измеренный у двигателя с дисбалансом, имеет период, соответствующий частоте вращения ротора (50 Гц), и имеет форму близкую к синусоидальной (рис. 1).

Уровни амплитуд более высоких гармоник (относительно частоты вращения) значительно ниже. Кроме того, при механическом дисбалансе амплитуда и фаза вибрации на частоте вращения ротора стабильны во времени [10, 13].

Следующий механический дефект, который встречается в ПЭД – расцентровка валов ротора.

Данный дефект обуславливается нарушением соосности последних.

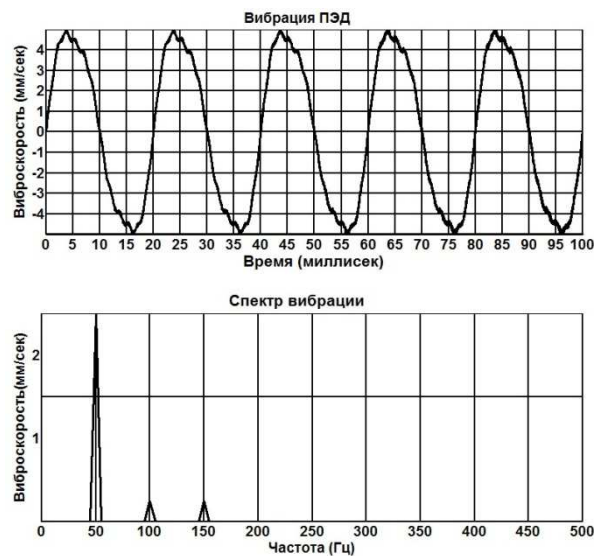


Рис. 1. Форма сигнала вибрации и его спектр при механическом дисбалансе ротора

Наличие расцентровки сопровождается увеличением вибрации на подшипнике с двух сторон, в результате чего происходит соответствующее изменение спектра вибрации с характерным увеличением амплитуды второй гармоники (рис. 2) [9]. Кроме того, для увеличения достоверности диагностики расцентровки следует сравнивать фазы, измеренные на разных подшипниковых опорах [13]. При отсутствии данного дефекта сигналы будут иметь сдвиг фазы равный нулю, в то время как при расцентровке наблюдается сдвиг фазы сигнала.

К распространенным механическим дефектам относится также ослабление посадки деталей ротора на валу [10, 13]. Данный дефект обуславливается увеличением зазора посадочных отверстий подшипников и подробнее будет рассмотрен при анализе источников вибрации подшипникового узла.

Последним распространенным источником механической вибрации являются различного рода задевания, которые могут быть связаны с недостаточным радиальным зазором, эксцентриситетом ротора и т.д. Данный дефект необходимо диагностировать на ранних стадиях его развития, так как в месте задевания может образоваться фрикционная выработка и, следовательно, усложнится процесс идентификации сопутствующих неисправностей.

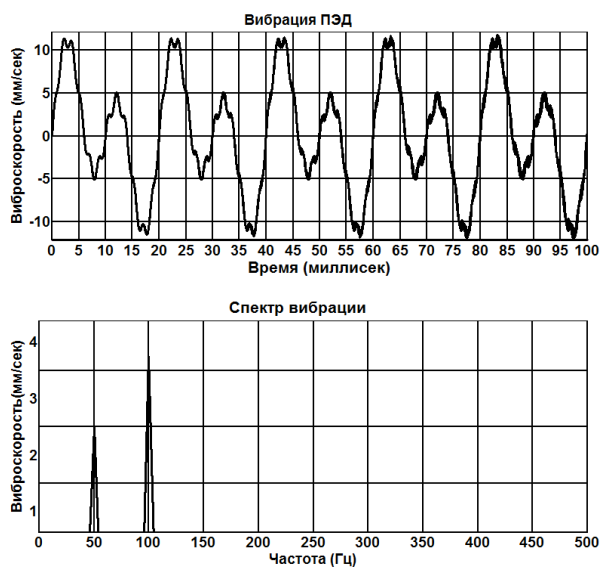


Рис. 2. Форма сигнала вибрации и его спектр при расцентровке валов ротора

Во время работы ПЭД с таким дефектом характерно наличие ударных импульсов, которые просматриваются на временной реализации вибросигнала. Кроме того, происходит значительное изменение спектра сигнала (рис. 3) с появлением широкого спектра синхронных составляющих. Их наличие объясняется тем, что задевание синхронизировано с фазой вращения ротора. В сигнале могут присутствовать и несинхронные компоненты, обусловленные нестационарностью процесса задевания.

2.2. Вибрации подшипникового узла

В большинстве моделей ПЭД используются подшипники скольжения. С целью обеспечения высокой надежности работы оборудования состояние подшипников скольжения нуждается в постоянном контроле. Основные дефекты подшипников ПЭД в процессе эксплуатации:

- увеличенный зазор;
- нарушение несущей способности смазочного слоя;
- неидеальность рабочих поверхностей подшипника.

Сложным, с точки зрения протекания физических процессов, является дефект, связанный со смазочным слоем. Несущая способность представляет собой нелинейную функцию, зависящую от величины зазора между валом и антифрикционным вкладышем. С одной стороны тонкий слой масла повышает несущую способность подшипника, а с другой – снижает устойчивость к динамическим нагрузкам.

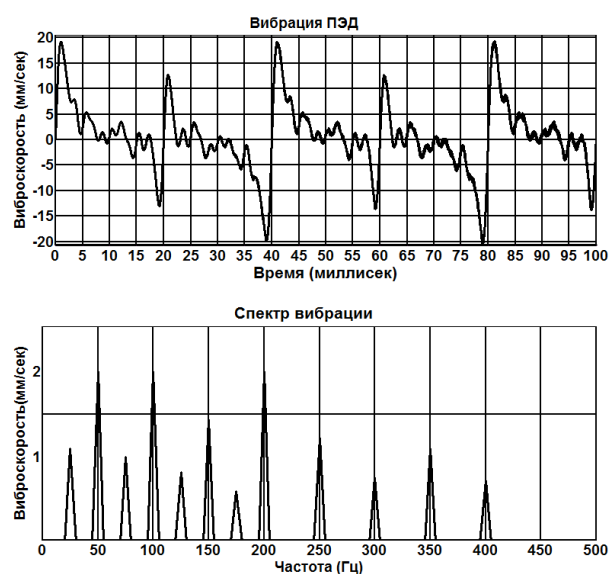


Рис. 3. Форма сигнала вибрации и его спектр при задевании

Появление вибрации данного рода является следствием одной из следующих причин:

- нагрузка на подшипник не соответствует несущей способности смазочного слоя;
- изменение параметров смазочного слоя (давление, температура, вязкость);
- влияние сторонних сил, способных возбуждать колебания масла [9].

В спектре сигнала вибрации, измеренного в зоне подшипника с недостатком несущей способности смазки, появляется гармоника, соответствующая частоте от 0,42 до 0,48 от оборотной. Вибрация на данной частоте является показателем относительной скорости перемещения масла в зазоре. Средняя скорость движения масла в зазоре подшипника, в идеальном случае, должна равняться половине частоты вращения вала. Снижение значения скорости относительно номинальной обусловлено перемещением масла в боковые зазоры. Изменение в частотном спектре сигнала составляющей на указанной частоте является характеристикой качества масляного слоя (рис. 4).

Часто встречающимся дефектом подшипника ПЭД является увеличение величины зазора. В процессе эксплуатации ПЭД происходит постепенное увеличение зазоров в подшипниках, что в свою очередь находит отражение в спектре сигнала вибрации. Данный дефект является одной из разновидностей дефекта «ослабление посадки деталей ротора» и имеет аналогичные диагностические признаки. Спектр сигнала вибрации при значительно увеличенном зазоре в подшипнике содержит большое количество гармоник, кратных оборотной частоте (рис. 5).

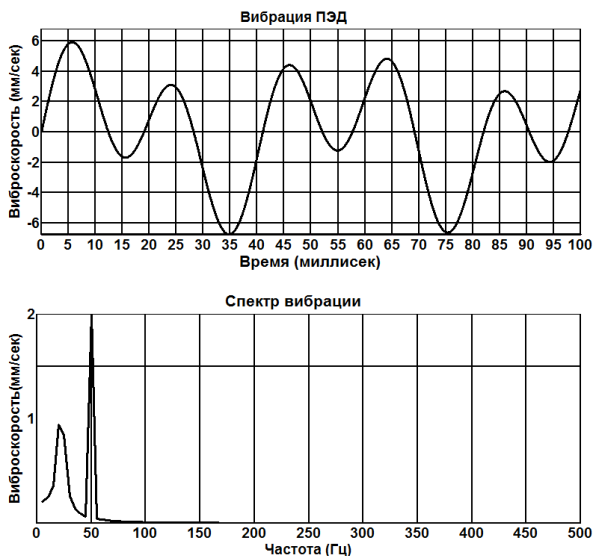


Рис. 4. Форма сигнала вибрации и его спектр при нарушениях несущей способности смазочного слоя

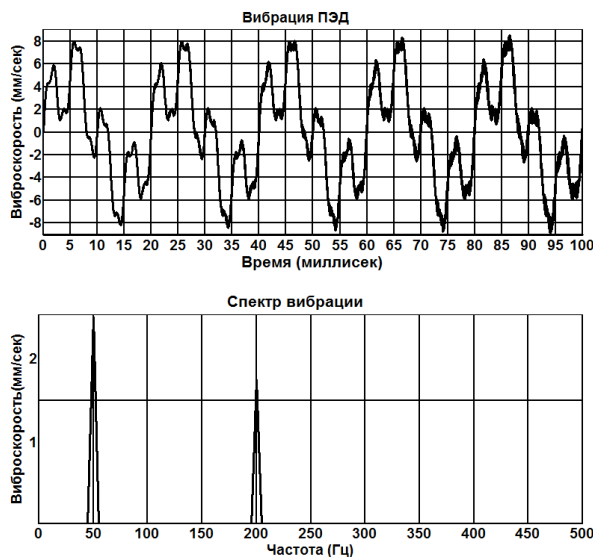


Рис. 6. Форма сигнала вибрации и его спектр при неправильной установке баббитового вкладыша

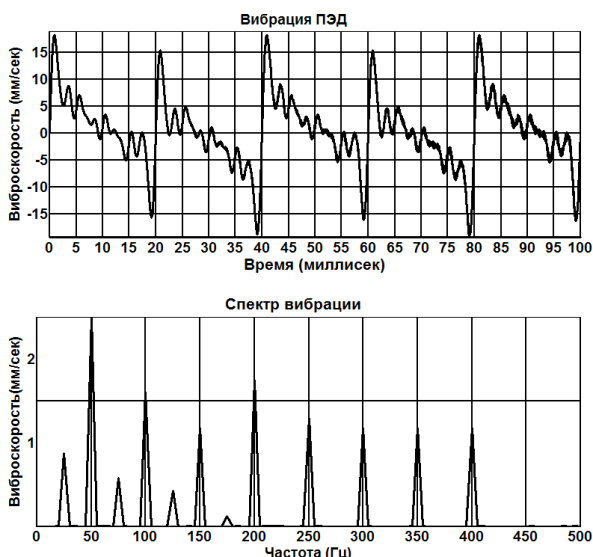


Рис. 5. Форма сигнала вибрации и его спектр при увеличенном зазоре в подшипнике

Рассмотрим неправильную установку подшипника (баббитовых вкладышей, их перекося или подвижность). В спектре сигнала вибрации дефект проявляется увеличением составляющей на оборотной частоте вращения. Аналогичный спектр наблюдается при дисбалансе ротора, но при применении сегментных баббитовых вкладышей в спектре появляется дополнительная составляющая на частоте, равной произведению числа вкладышей на оборотную частоту, в результате чего дефект становится легко распознаваемым.

На рис. 6 представлен спектр сигнала вибрации подшипника скольжения с неправильной установкой четырехсегментного баббитового вкладыша.

В процессе работы шейка вала изнашивается и приобретает эллиптичность. При работе такого подшипника толщина масляного слоя будет непрерывно изменяться (модулироваться параметрами эллиптичности шейки вала). В соответствии с этим спектр сигнала будет иметь составляющие на частоте, равной произведению оборотной частоты ротора с порядком эллиптичности шейки вала.

2.3. Электромагнитные источники вибрации

Электромагнитные источники повышенной вибрации ПЭД имеют более сложную природу по сравнению с источниками вибрации, рассмотренными выше. Вибрация такого происхождения определяется магнитной проводимостью воздушного зазора и изменением магнитодвижущей силы.

Отличительной особенностью всех источников вибрации электромагнитного происхождения является их равномерное распределение в пространстве и отсутствие конкретной точки приложения возмущающей силы [13].

Электромагнитная вибрация может стать следствием асимметрии электрических и магнитных цепей, а также появления нелинейности сопротивления магнитных цепей. На состояние электромагнитной системы ПЭД и, следовательно, на величину вибрации могут оказывать влияние условия эксплуатации (число пусков, качество питающего напряжения и т. д.).

При одновременном существовании дефектов механической и электромагнитной природы происходит модуляция сигнала вибрации.

Глубина модуляции показывает уровень развития дефекта электромагнитной системы. Сигнал вибрации в таком случае имеет три составляющие: несущую с частотой вращения ротора (f_1) и две боковые частоты, равные соответственно сумме ($f_1 + 2s$) и разности ($f_1 - 2s$) частоты вращения ротора и удвоенному значению частоты скольжения.

Электромагнитная вибрация имеет свойство мгновенно пропадать при отключении ПЭД от сети. По величине падения общего уровня вибрации в этот момент можно судить о вкладе электромагнитных дефектов в общий сигнал вибрации [13].

Наиболее распространенные дефекты, вызывающие появление электромагнитной вибрации:

- несимметрия электрических цепей;
- несимметрия магнитных цепей;
- нарушение структуры пазов ротора.

Одним из самых распространенных дефектов ПЭД является электрическая несимметрия ротора, что связано с обрывом одного или нескольких стержней ротора и, как следствие, приводит к увеличению электрического сопротивления. Появление данного дефекта обусловлено протеканием, в момент пуска ПЭД, пусковых токов, многократно превышающих по величине номинальное значение тока.

В случае появления в цепи ротора дефектного стержня, тяговое усилие двигателя в момент прохождения мимо полюса уменьшится, в результате чего частота вращения ротора снизится. После прохождения дефектного стержня мимо полюса пройдет исправный стержень и произойдет ускорение ротора. Данный процесс приводит к модуляции сигнала вибрации и сопровождается появлением боковых гармоник вокруг частоты вращения ротора ($f_1 \pm 2s$). По величине отношения уровней вибрации на указанных частотах можно установить наличие электрической несимметрии. Помимо этого, данный дефект диагностируется наличием дисбаланса тока в обмотках.

В процессе проектирования ПЭД распределение магнитного потока предполагается симметричным, но вследствие неправильной сборки или эксплуатации симметрия цепей нарушается. Чаще всего несимметрию магнитных цепей вызывает неравномерность воздушного зазора и замыкания витков. Эксцентриситет зазора приводит к появлению магнитной вибрации, что является характерным для ПЭД как асинхронной машины, вследствие малой величины воздушного зазора. Эксцентриситет зазора сопро-

вождается амплитудной модуляцией сигнала, содержащего низкочастотные гармоники (кратные частоте вращения ротора), сигналом с частотой электромагнитных процессов ($f_{ЭМ} = 100$ Гц).

Одним из дефектов пазовой структуры ротора является отсутствие одного или нескольких ферромагнитных зубцов. Это приводит к наведению импульсов в обмотке статора с частотой, равной произведению частоты вращения ротора на число ферромагнитных зубцов в статоре.

Отметим, что диагностирование дефектов электромагнитной системы является сложной задачей по причине сходства диагностических признаков.

3. КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ПЭД

Система диагностики погружного электродвигателя – это совокупность аппаратных и программных средств для проведения комплексных испытаний ПЭД с учетом всех его особенностей, позволяющая максимально точно определить его техническое состояние в момент диагностирования и прогнозировать дальнейшую его динамику.

При анализе современных существующих систем диагностики были выявлены преимущества и недостатки систем каждого вида. На их основе сделан вывод о наиболее целесообразном использовании экспериментальной скважины при проведении испытаний ПЭД.

Предлагаемая система состоит из двух частей: наземной и погружной. Погружная часть системы представляет собой совокупность измерительных модулей (ИМ), которые располагаются по всей длине ПЭД в наиболее ответственных и информативных местах, таких как подшипниковые узлы, узлы пята. Проектирование погружной части системы для эксплуатации в такой среде накладывает некоторые ограничения на габаритные параметры ИМ. ИМ является относительно законченной частью подсистемы и представляет собой совокупность аппаратных и программных решений на данном уровне. В его состав входят: датчик вибрации, датчик температуры, нормирующие преобразователи, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), микроконтроллер, микросхема преобразования интерфейсов, а также стабилизатор напряжения для питания всех вышеперечисленных элементов [8, 14].

Среди известных и широко используемых преобразователей вибрации можно отметить

индукционные и пьезоэлектрические. Данные преобразователи имеют широкий частотный диапазон и высокую точность измерения, но не позволяют использовать их в качестве датчиков рассматриваемого случая диагностирования ввиду значительных габаритных размеров, поскольку разница между диаметрами экспериментальной скважины и ПЭД равна 20 мм. Кроме того, необходимо устанавливать нормирующие устройства (масштабирующий усилитель, усилитель заряда) на небольшом расстоянии от преобразователя вибрации.

Широкое развитие и прогресс микроэлектроники позволил создать новый класс измерительных преобразователей вибрации – интегральные акселерометры. Данный тип датчиков имеет небольшие габаритные размеры, позволяющие использовать их в рассматриваемом случае.

Рассматривалось несколько видов интегральных акселерометров: пленочные пьезоэлектрические, объемные и поверхностные. Пленочные пьезоэлектрические интегральные акселерометры выпускает компания Atochem Sensors – акселерометры серии АСН. Объемные интегральные акселерометры производит компания Lucas NovaSensor – акселерометры серии НАС. Поверхностные интегральные акселерометры выпускает компания Analog Devices – акселерометры серии ADXL, а также компания Motorola – акселерометры серии ММА [15].

Наиболее информативным параметром при испытаниях ПЭД является радиальная вибрация. Поэтому для реализации системы необходимо использовать одноосный акселерометр. Для разрабатываемой системы измерения вибрации целесообразно использовать интегральные акселерометры Analog Devices (ADXL 103) с точки зрения цены, доступности, качества и габаритов [15].

Выходным сигналом данного датчика является постоянное напряжение в диапазоне $2,5 \pm 1,7$ В, что является удобным для дальнейшей обработки с помощью современной микропроцессорной техники.

Аналогичные ограничения накладываются на температурный датчик. В связи с этим предлагается использовать полупроводниковый датчик интегрального исполнения. Различают несколько типов датчиков:

- датчики с аналоговым выходом (по току или по напряжению);
- датчики с цифровым выходом;
- термометры с ШИМ выходом.

Датчики температуры с ШИМ выходом были разработаны для применения в условиях повышенного уровня шума. Они представляют собой обычный аналоговый датчик температуры, дополненный в выходном каскаде широтно-импульсным модулятором (длительность импульса пропорциональна температуре при постоянном периоде). В настоящее время область применения данных датчиков ограничена ввиду вытеснения их датчиками с последовательными интерфейсами, взаимодействие с которыми осуществляется гораздо проще, если учесть, что большинство микроконтроллеров и программируемой логики, как правило, содержат несколько типов последовательных интерфейсов.

Цифровые термометры являются наиболее высокоинтегрированными датчиками температуры. В выходном каскаде они содержат последовательный интерфейс передачи информации, что дает возможность стандартизировать протокол обмена информацией.

Датчики температуры с аналоговым выходом формируют сигнал напряжения или тока, линейно зависящий от температуры. Наличие в современных микроконтроллерах встроенного АЦП и источника опорного напряжения делает привлекательным использование данной группы датчиков температуры. Основные причины: низкая стоимость аналоговых датчиков, использование одной линии ввода-вывода микроконтроллера и простота съема информации.

Наиболее распространенными и доступными на российском рынке электронных компонентов являются датчики температуры фирмы Analog Devices. Для предлагаемой системы оптимальным с точки зрения удобства дальнейшей обработки сигнала является использование термометров с аналоговым выходом. Примерами таких датчиков могут служить TMP35, TMP36, TMP37 фирмы Analog Devices.

Выбранные датчики не оснащены встроенной электронной схемой, формирующей выходной сигнал в определенном формате, и их не удастся напрямую подключить к микроконтроллеру, АЦП, системе индикации или другой регистрирующей аппаратуре. Обычно сигнал на выходе датчика бывает либо слишком зашумленным, либо очень слабым, либо содержит нежелательные составляющие. В дополнение к этому, его формат может не соответствовать формату системы приема данных. Для подключения датчика к процессорному устройству, как правило, требуется промежуточное согласующее устройство (нормирующий преобразователь). Выходной сигнал необходимо преобразовать к определенному формату перед тем, как

подать в устройство обработки данных (подключить к нагрузке). Схема согласования сигналов часто называется интерфейсом между датчиком и последующими устройствами, ее основная цель – преобразование сигнала датчика в формат, совместимый с нагрузкой.

Входные сигналы стандартных электронных устройств обработки данных, таких как АЦП, частотные модуляторы, различные регистраторы и т. д., должны быть гораздо выше, чем выходные сигналы датчика. Поэтому для подключения датчиков к таким устройствам требуются промежуточные усилители с коэффициентами усиления по напряжению.

Усилители, как правило, являются одной из составных частей интерфейсных схем. В настоящее время чаще всего используются усилители, построенные на основе операционных усилителей и пассивных дискретных компонентов.

Назначение усилителей не ограничивается только функцией увеличения амплитуды сигнала. Они могут также использоваться для согласования устройств по импедансу, для улучшения соотношения сигнал/шум, в качестве фильтров и изоляторов между входами и выходами.

Выходной сигнал с акселерометра представляет собой напряжение постоянного тока, лежащее в диапазоне $2,5 \text{ В} \pm 1,7 \text{ В}$. Анализ вибрационной активности ПЭД показывает, что до 95% вибрации лежит в диапазоне частот до 1 кГц. Величина выходного сигнала является достаточно большой для подачи его на АЦП, следовательно, усиление сигнала не требуется. Стоит отметить, что кроме задачи синтеза фильтра нижних частот (ФНЧ) необходимо привести импеданс датчика к более низкому значению, так как в его выходной цепи стоит резистор номиналом 33 кОм.

Выходной сигнал с полупроводникового датчика температуры также представляет собой напряжение постоянного тока, лежащее в диапазоне от 100 до 2000 мВ. Данный датчик не требует частотной коррекции, но его сигнал целесообразней всего усилить до значений опорного напряжения АЦП.

Для построения нормирующих преобразователей обоих датчиков необходимо по одному операционному усилителю (ОУ). На первом необходимо синтезировать ФНЧ с частотой среза 1 кГц для акселерометра. Частота среза выбрана исходя из частотного диапазона вибрации, вызванной дефектами механической системы и подшипникового узла. На втором ОУ – усилитель напряжения для датчика температуры.

После нормирования сигналы с датчиков поступают на АЦП. Широкое распространение микроконтроллеров с интегрированным АЦП позволяет решить задачу аналогово-цифрового преобразования и процессорной обработки с помощью одного электронного компонента. Наиболее широкое распространение получили микроконтроллеры со встроенным АЦП фирмы Atmel семейства Mega. Кроме того, в данных микроконтроллерах существует большой выбор интерфейсов (в том числе универсальный синхронный / асинхронный приемопередатчик USART). В результате чего появляется возможность передавать данные по стандарту RS232. Но данный интерфейс не обеспечивает поддержку длинного кабеля (ограничение 15 м). В свою очередь существуют разнообразные микросхемы преобразования интерфейса из RS232 в RS485 [8, 14]. Структурная схема ИМ представлена на рис. 7.

Очевидна целесообразность использования интерфейса RS485 в качестве основы коммуникации погружной и наземной частей системы. Для этого сигнал с выхода микроконтроллера (приемопередатчик USART) подается на микросхему преобразования интерфейса и затем по длинной линии поступает на наземную часть системы. Наиболее широкое применение получили преобразователи RS232/RS485 фирмы MAXIM.

Наземная часть системы необходима для измерения вибрации в одной точке электродвигателя, получения значений токов и напряжений, приема данных от всех ИМ, а также для комплексной обработки полученной информации и представления результата испытания оператору.

Рассмотренные датчики вибрации в составе ИМ для погружной части не способны обеспечить требуемую динамику, точность измерения и чувствительность для оценки некоторых причин неисправностей ПЭД. Это, прежде всего, дефекты электромагнитной системы ПЭД, которые связаны с модуляцией и, следовательно, с необходимостью точной идентификации боковых гармоник. Положительным моментом диагностирования электромагнитных дефектов является независимость величины и мощности вибрационного сигнала от точки измерения (данные дефекты являются распределенными и одинаково хорошо диагностируются по всей поверхности ПЭД). Поэтому целесообразно установить дополнительный датчик вибрации на поверхности ПЭД, которая остается вне экспериментальной скважины.

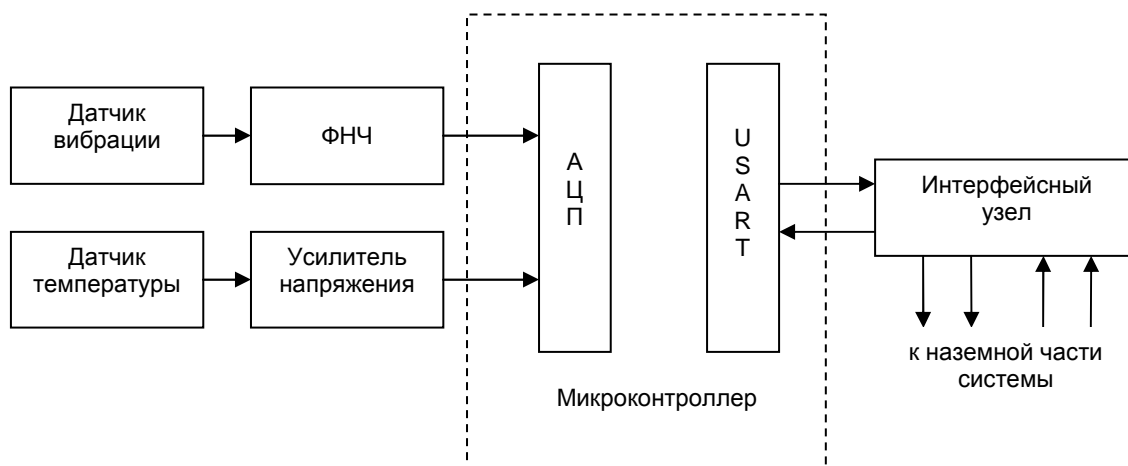


Рис. 7. Структурная схема измерительного модуля

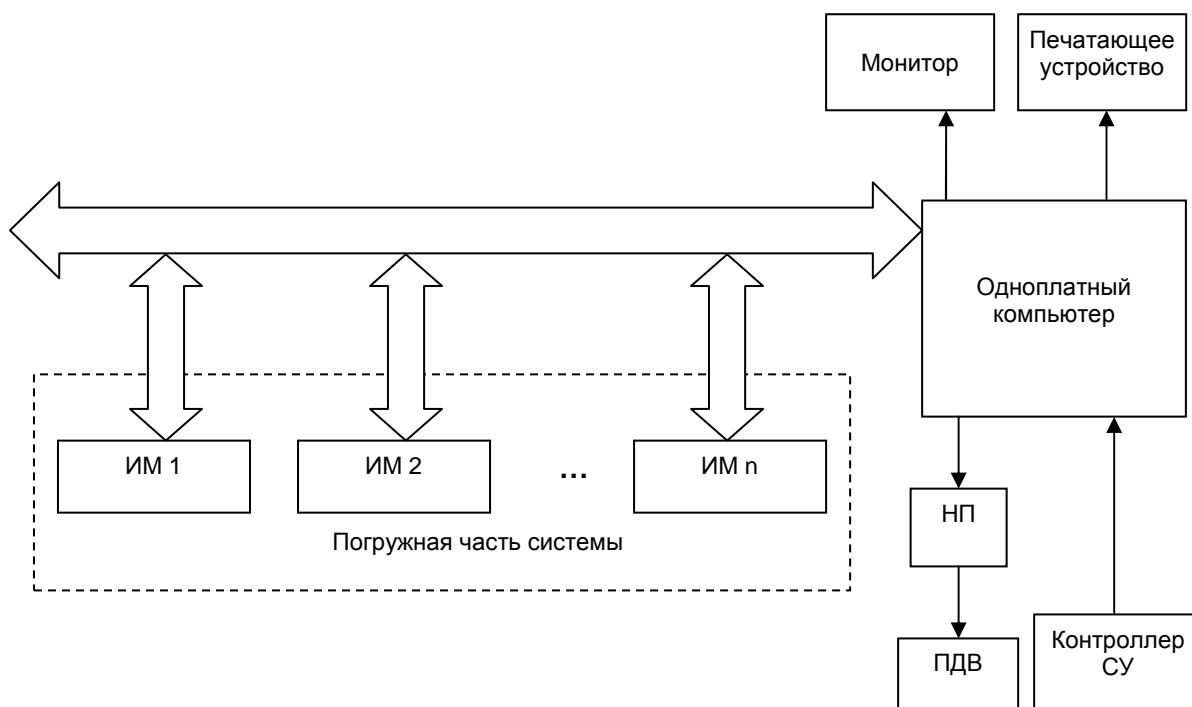


Рис. 8. Структурная схема информационно-измерительной системы диагностики ПЭД

На этот датчик уже не накладываются ограничения по габаритным размерам. И в качестве этого датчика можно использовать высокоточный и высокочувствительный пьезоэлектрический датчик вибрации.

Значения токов и напряжений можно получить из контроллера управления, который в большинстве случаев работает со станцией управления. Данной устройством выполняет функции контроля за состоянием электродвигателя по таким параметрам, как напряжение пи-

тания, ток по фазам, $\cos \varphi$, полезная мощность. Кроме того, он обеспечивает аварийное отключение оборудования на основании заранее заданных уставок. Контроллер имеет выходы типа RS485 и RS232, что обеспечивает его синхронизацию как с обычными персональными компьютерами, так и с современными образцами промышленных одноплатных компьютеров.

Заключительным элементом в системе является одноплатный компьютер со встроенным приемопередатчиком RS485 и необходимым программным обеспечением. Данное устройство производит комплексную обработку всей полученной информации, представление результатов на экране оператора, печать отчетов, а также обеспечивает передачу информации об испытаниях. Структурная схема описанной системы представлена на рис. 8.

С измерительных модулей (ИМ) информация о вибрации и температуре поступает посредством шины RS485 в одноплатный компьютер. На это же устройство приходит сигнал с пьезоэлектрического датчика вибрации (ПДВ), предварительно обработанный нормирующим преобразователем (НП). С контроллера станции управления (СУ) поступают значения токов, напряжений и мощности. В одноплатном компьютере происходит совместная обработка всех полученных данных, после чего результат выводится на средство визуального отображения (например, монитор) и на печатающее устройство.

Данная структура системы диагностики является достаточно гибкой и позволяет легко ее изменять в соответствии с конкретной задачей и возможностями предприятия.

4. ВЫВОДЫ

Обоснована необходимость применения диагностических средств для повышения качества ТО ПЭД. Проведен качественный анализ существующих систем диагностики ПЭД. Выявлены преимущества и недостатки систем каждого вида. Аргументирована необходимость использования экспериментальной скважины при проведении испытаний ПЭД.

Определены параметры полей вибрации и температуры в качестве источников информации о техническом состоянии ПЭД. Необходимость контроля температуры поверхности ПЭД обусловлена плохим отводом тепла от корпуса двигателя. Информация о температуре ПЭД позволяет определить периоды работы и остановки двигателя и снизить вероятность отказа в процессе эксплуатации. Контроль уровня вибрации позволяет судить как об общем техниче-

ском состоянии ПЭД, так и о состоянии отдельных его узлов.

Проведен анализ причин и источников повышенной вибрации ПЭД. Выявлены основные источники механических, электромагнитных и подшипниковых вибраций. По характерным особенностям спектра сигнала вибрации определены диагностические признаки каждого из дефектов.

Для проведения испытаний ПЭД в экспериментальной скважине предложена информационно-измерительная система диагностики на основе распределенных средств измерения. Работа системы основана на измерении параметров вибрации и температуры в нескольких точках ПЭД. Это позволяет исследовать каждый узел ПЭД в отдельности, что значительно упрощает процесс диагностики, повышает достоверность результата испытания, а также идентифицирует расположение неисправного узла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абдулин Ф. С.** Добыча нефти и газа: учеб. пособие. М.: Недра, 1983. 256 с.
2. **Новомет** [Электронный ресурс]. [2010] URL: <http://www.novomet.ru/> (дата обращения: 25.09.2010).
3. **НПЦ Динамика** [Электронный ресурс]. [2010] URL: <http://www.dynamics.ru/> (дата обращения: 25.09.2010).
4. **Китабов А. Н., Токарев В. П.** Анализ современных систем диагностики погружных электродвигателей // *Электромеханика, электромеханические комплексы и системы: межвуз. науч. сб. / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; под ред. Ф. А. Гизатуллина.* Уфа: УГАТУ, 2010. С. 102–105.
5. **Производственная компания Борец** [Электронный ресурс]. [2009] URL: <http://www.borets-company.ru/> (дата обращения: 12.09.2010).
6. **ЗАО Электон** [Электронный ресурс]. [2009] URL: <http://www.elektion.ru/> (дата обращения: 12.09.2010).
7. **ОАО Алнас** [Электронный ресурс]. [2007] URL: <http://www.alnas.ru/> (дата обращения: 25.09.2010).
8. **Китабов А. Н.** Система измерения вибрации и температуры погружного электродвигателя // *Мавлютовские чтения: сб.тр. в 5 т. Т. 2 / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; под ред. Р. А. Бадамшина.* Уфа: УГАТУ, 2009. С. 106–108.
9. **Китабов А. Н.** Обнаружение неисправностей погружного электродвигателя по вибрационным параметрам // *Мавлютовские чтения: сб.тр. в 5 т. Т. 2 / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; под ред. Р. А. Бадамшина.* Уфа: УГАТУ, 2010. С. 107–108.
10. **Гольдин А. С.** Вибрация роторных машин. М.: Машиностроение, 1999. 344 с.

11. **Шубов И. Г.** Шум и вибрация электрических машин. Л., 1986. 208 с.

12. **Барков А. В., Баркова Н.А.** Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: учеб. пособие. СПб.: Изд. Центр СПбГМТУ, 2004, 152 с.

13. **Ширман А. Р., Соловьев Б. С.** Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. М., 1996. 276 с.

14. **Китабов А. Н., Токарев В. П.** Многоточечная система диагностики погружного электродвигателя // Электронные устройства и системы: межвуз. науч. сб. / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; под ред. Г. В. Миловзорова. Уфа: УГАТУ, 2010. С. 268–272.

15. **Китабов А. Н.** Возможности применения акселерометров для оценки технического состояния погружного оборудования // Мавлютовские чтения: сб.тр. в 5 т. Т. 2 / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; под ред. Р. А. Бадамшина. Уфа: УГАТУ, 2009. С. 108–109.

ОБ АВТОРАХ

Китабов Андрей Николаевич, магистрант каф. авиац. приборостроения. Дипл. бакалавр техн. и техн. по приборостроению (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. диагностики погружного оборудования; инф. систем для нефтяных компаний.

Токарев Владимир Петрович, доц. той же каф. Дипл. инж.-электромех. (УАИ, 1970). Канд. техн. наук по элементам и системам управления (УАИ, 1975). Иссл. в обл. систем для измерения температур, расхода веществ, тепловой энергии.