

УХТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности»

На правах рукописи



ШИЧЁВ ПАВЕЛ СЕРГЕЕВИЧ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ
РЕСУРСОопРЕДЕЛЯЮЩИХ УЗЛОВ ПРОМЫСЛОВЫХ КОНСОЛЬНЫХ
ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ МЕТОДОМ АНАЛИЗА
СПЕКТРОВ ТОКА ИХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

Специальность 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (нефтегазовая отрасль)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Игорь Юрьевич Быков

Ухта – 2020

Содержание

Введение.....	4
1. Анализ метода определения состояний ресурсопределяющих узлов консольных ЦНА по параметрам спектров тока их электродвигателей	10
1.1 Характерные повреждения и методы определения состояний ресурсопределяющих узлов консольных ЦНА.....	10
1.2 Методики определения состояния узлов ЦНА по параметрам спектров тока их электродвигателей и вибрационному критерию.....	27
1.3 Методы математического моделирования для исследования диагностических параметров	35
1.4 Реализация метода определения состояний узлов ЦНА анализом спектров тока их электродвигателей.....	39
1.5 Выводы по главе.....	42
2. Методики исследований по определению предельных состояний ресурсопределяющих узлов ЦНА.....	44
2.1 Диагностические параметры и вибрационный критерий определения состояний подшипников качения и сопряжения валов.....	44
2.2 Экспериментальная установка и методика экспериментального исследования.....	45
2.3 Исследование диагностических параметров с помощью имитационного моделирования.....	58
2.4 Выводы по главе.....	66
3. Результаты экспериментального исследования по определению предельных состояний ресурсопределяющих узлов ЦНА	67
3.1 Диагностические параметры изменения состояний подшипников качения и сопряжения валов	67
3.2 Пороговые значения диагностических параметров для определения предельных состояний подшипников качения и сопряжения валов	71
3.3 Выводы по главе.....	78

4. Результаты исследования диагностических параметров определения состояний узлов ЦНА на основе его имитационной модели	79
4.1 Результаты моделирования	79
4.2 Проверка адекватности имитационной модели	84
4.3 Выводы по главе	88
5. Методика определения предельных состояний ресурсопределяющих узлов промышленных консольных ЦНА анализом амплитудных спектров тока их электродвигателей	89
5.1 Область применения Методики	89
5.2 Порядок реализации Методики	90
5.3 Аппаратурное обеспечение Методики	103
5.4 Выводы по главе	111
Заключение	113
Список сокращений	115
Список терминов и определений	116
Список литературы	117
Приложение А	133
Приложение Б	134
Приложение В	135
Приложение Г	139
Приложение Д	147
Приложение Е	152
Приложение Ж	163

Введение

Актуальность темы исследования. Эксплуатация на промышленных объектах, в том числе на объектах нефтегазовых промыслов, динамического оборудования, к которому относятся консольные центробежные насосные агрегаты (ЦНА) предусматривает организацию системы их технического обслуживания и ремонта (ТОиР), включающей в себя мониторинг технического состояния ЦНА, проводимого с целью обнаружения и отслеживания изменения состояния узлов и агрегатов в целом.

Своевременное определение момента времени достижения узлами и агрегатами предельных состояний, характеризующих выработку их ресурса, является важнейшей производственной задачей, решаемой в рамках реализации системы ТОиР и направленной на предупреждение отказов и эффективное планирование ремонтов ЦНА.

Анализ статистики показывает, что узлами, в значительной степени определяющими ресурс консольных ЦНА, являются подшипники качения и сопряжение валов, достижение которыми предельных состояний, при развитии в них повреждений, приводит к отказам агрегатов в 26% и 19% случаев соответственно.

Основываясь на анализе работ отечественных и зарубежных исследователей в области мониторинга технического состояния динамических машин можно выделить метод, базирующийся на анализе параметров амплитудных спектров тока, потребляемого электродвигателем агрегата, позволяющий эффективно решать задачи определения состояния узлов консольных ЦНА.

В свою очередь, разработка метода для его использования с целью определения предельных состояний ресурсопределяющих узлов промысловых консольных ЦНА, принимая во внимание необходимость исследования подходов к предварительному определению пороговых значений диагностических параметров и учету при этом изменений рабочих характеристик агрегата, является актуальной научно-технической задачей.

Степень разработанности темы. Вопросам разработки методов и организации мероприятий по ТОиР ЦНА, в том числе мониторингу их технического состояния, посвящены работы Ю. Д. Земенкова, В. Н. Ивановского, А. Г. Гумерова, А. М. Акбердина, М. А. Берлина, А. Г. Толстова, И. А. Биргера, В. М. Кравченко, Е. А. Богданова, А. С. Гольдина, А. А. Коршака, В. М. Писаревского, А. Р. Ширмана.

Для определения технического состояния узлов консольных ЦНА разрабатываются методы и методики контроля, основанные на анализе рабочих характеристик насоса, параметров шума, смазки, температуры, вибрации, и электрических параметров. При этом отмечается тенденция к росту заинтересованности исследователей к разработке метода анализа электрических параметров ЦНА, в частности амплитудных спектров сигналов тока и напряжения цепей питания их электродвигателей, что объясняется высокой информативностью и удобством реализации метода.

Результаты исследований по обеспечению применения обозначенного метода для определения технического состояния узлов ЦНА представлены в работах В. А. Петухова, Н. Н. Матаева, М. Г. Баширова, Р. Н. Сафина, В. Н. Шикунова, А. В. Самородова, А. В. Баркова, Parasuram P. Harihara, Alexander G. Parlos. Авторами представлены диагностические признаки неисправностей и параметры мониторинга. Предложено использовать параметры спектров тока двигателя в алгоритмах, основанных на обработке сигналов и анализе моделей, для обнаружения неисправностей в ЦНА, в частности, подшипников насоса и двигателя. Уделено внимание изучению влияния на диагностические параметры отклонений рабочих характеристик насоса, а также, рассмотрены подходы к определению пороговых значений параметров мониторинга в процессе накопления диагностических данных, и предложены решения по аппаратурному обеспечению измерительных систем.

При этом в настоящий момент отсутствуют обоснованные предложения по установлению первоначальных пороговых значений диагностических параметров для определения предельных состояний узлов консольных ЦНА перед

проведением процедур мониторинга их технического состояния, а также требует изучения воздействия на диагностические параметры отклонений рабочих и конструктивных характеристик агрегатов.

Цель работы.

Выявление закономерностей воздействия изменений технического состояния ресурсопределяющих узлов консольных ЦНА на амплитудный спектр тока их электродвигателей для разработки научно обоснованных технических решений по определению предельных состояний узлов.

Задачи исследования:

1. Анализ метода определения состояний ресурсопределяющих узлов консольных ЦНА по параметрам спектров тока их электродвигателей.

2. Формирование методик исследований по определению предельных состояний ресурсопределяющих узлов ЦНА.

3. Экспериментальное определение предельных состояний ресурсопределяющих узлов ЦНА.

4. Оценка диагностических параметров при изменении рабочих характеристик ЦНА на основе его имитационной модели.

5. Разработка методики определения предельных состояний ресурсопределяющих узлов промышленных консольных ЦНА анализом амплитудных спектров тока их электродвигателей.

Соответствие паспорту специальности.

Представленная диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (нефтегазовая отрасль), а именно области исследования: «Разработка и повышение эффективности методов технического обслуживания, диагностики, ремонтпригодности и технологии ремонта машин и агрегатов в целях обеспечения надежной и безопасной эксплуатации и продления ресурса» (п. 7).

Научная новизна:

1. Определены функциональные зависимости относительных амплитуд частотных составляющих спектра тока приводного электродвигателя и среднего

квадратического значения виброскорости от величины расцентровки валов насоса и двигателя и значения зазоров в подшипниках качения консольного ЦНА, позволяющие устанавливать первоначальные пороговые значения диагностических параметров при реализации процедур определения состояния узлов агрегатов.

2. Предложен подход к уточнению пороговых значений диагностических параметров в амплитудном спектре тока приводного электродвигателя с помощью относительных коэффициентов регрессии при изменении рабочих параметров консольного ЦНА в процессе определения состояния ресурсопределяющих узлов агрегатов.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Получены зависимости диагностических параметров в спектре тока электродвигателя и параметра общего уровня вибрации консольного ЦНА от показателей технического состояния сопряжения валов и подшипников качения, позволяющие установить пороговые значения диагностических параметров при определении состояния узлов консольных ЦНА.

2. Выявлено отклонение пороговых значений диагностических параметров при изменении рабочих параметров консольного ЦНА и предложен подход к уточнению пороговых значений при определении состояний узлов агрегата.

3. Разработана методика определения предельных состояний сопряжений валов и подшипников качения консольных ЦНА, включающая в себя порядок проведения, рекомендации и предложения по аппаратурному обеспечению мобильных и полустационарных измерительных систем.

4. Результаты исследования внедрены в учебный процесс в форме учебно-методического пособия для проведения занятий лекционного и лабораторного типов по направлениям подготовки «Технологические машины и оборудование», «Нефтегазовое дело» в рамках дисциплин «Диагностика нефтегазопромыслового оборудования», «Проблемы диагностики в области эксплуатации технологических комплексов нефтяных и газовых промыслов».

Методология и методы исследования.

При выполнении диссертационной работы применен научный анализ, экспериментальное исследование и компьютерное моделирование на основе имитационной модели. Эксперимент проведен с использованием методов контроля технического состояния по параметрам амплитудного спектра тока электродвигателя и вибрации. Имитационная модель основана на аналитических выражениях теории электромеханики и электрогидравлических аналогий. Результаты измерений и моделирования обработаны по методам математической статистики и численным методам вычислений.

Положения, выносимые на защиту.

1. Пороговые значения диагностических параметров, устанавливаемые на основе экспериментально выявленной связи параметров амплитудных спектров тока и вибрации, позволяют определить текущее техническое состояние ресурсоопределяющих узлов консольных ЦНА.

2. Относительные коэффициенты регрессии, определенные компьютерным моделированием, позволяют уточнить пороговые значения диагностических параметров технического состояния узлов при изменении рабочих параметров консольных ЦНА.

3. Определение предельных состояний узлов консольных ЦНА реализуется в соответствии с разработанной методикой, устанавливающей порядок проведения мониторинга, общие требования и рекомендации по его аппаратурному обеспечению.

Степень достоверности и апробация результатов работы.

Достоверность результатов работы обеспечивается применением сертифицированного и поверенного измерительного оборудования, использованием известных методов математической статистики и численных методов при подготовке к измерениям и обработке результатов эксперимента и компьютерного моделирования. В целом авторские результаты качественно совпадают с результатами, представленными в независимых источниках по тематике диссертационной работы.

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на Международных молодежных научных конференциях «Севергеоэкотех» (УГТУ, г. Ухта, 2015-2019 гг.), Международных семинарах «Рассохинские чтения» (УГТУ, г. Ухта, 2016 г., 2018 г., 2019 г.), Научно-технических конференциях молодежи АО «Транснефть-Север» (г. Ухта, 2013 г. и 2014 г.), Международной Научно-технической конференции молодежи АО «Транснефть-Север» (г. Ухта, 2017 г.), Республиканских молодежных инновационных конвентах «Молодежь-Будущему Республики Коми» (УГТУ, г. Ухта, 2015 г. и 2017 г.).

Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач исследования, разработке экспериментальной установки, выполнении обработки и интерпретации экспериментальных данных и результатов компьютерного моделирования, апробации результатов исследования, подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, из них 4 – в изданиях «Перечня ведущих периодических изданий ВАК» по специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (нефтегазовая отрасль), одно учебно-методическое пособие, получен патент на полезную модель.

Объем и структура работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и семи приложений, изложена на 163 страницах, содержит 74 рисунка, 39 таблиц. Список литературы включает 131 наименование.

1. Анализ метода определения состояний ресурсопределяющих узлов консольных ЦНА по параметрам спектров тока их электродвигателей

1.1 Характерные повреждения и методы определения состояний ресурсопределяющих узлов консольных ЦНА

Центробежные насосные агрегаты (ЦНА) консольного типа широко применяются на нефтегазовых промыслах в системах обеспечения функционирования комплексов по добыче, транспортировке, подготовке газа, нефти и воды, используемой в системах поддержания пластового давления (ППД).

Консольные ЦНА используются в качестве основных агрегатов станций водозабора систем водоснабжения и в блоках очистки и приготовления буровых растворов циркуляционных комплексов буровых установок. На дожимных насосных и компрессорных станциях, установках подготовки нефти и газа, установках очистки пластовых вод и станциях водозабора систем ППД нефтегазовых промыслов консольные ЦНА применяют как вспомогательные в составе технологических комплексов, в том числе, как циркуляционные в системах отопления и в качестве основных и подпитывающих в системах пожаротушения [47, 55].

Надежное функционирование ЦНА обеспечивается надежностью их конструктивных элементов. Надежность, являющаяся важнейшим технико-экономическим показателем качества любого технического устройства или системы, определяется, как свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения, транспортирования [26].

Одной из ключевых временных характеристик надежности объекта является его ресурс, представляющий собой суммарную наработку от начала эксплуатации или ее возобновления после ремонта до момента достижения объектом

предельного состояния, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна [26].

Достижение некоторыми функционально значимыми узлами ЦНА предельных состояний определяет переход в предельное состояние всего агрегата в целом, что соответствует выработке им своего ресурса и обозначает необходимость проведения ремонтно-восстановительных работ.

Дальнейшая эксплуатация агрегата в предельном состоянии сопряжена с высоким риском выхода его из строя и наступлением отказа, который характеризует потерю агрегатом способности выполнять заданную функцию [109].

1.1.1 Повреждения узлов, определяющих ресурс консольных ЦНА

Согласно статистическим данным [45,80], основными причинами достижения ЦНА предельного состояния и возникновения их отказов по объектам нефтегазовых промыслов являются: дефекты уплотнений насосов, дефекты подшипников, нарушение соосности валов, дефекты элементов корпуса, валов агрегатов, рабочих колес насосов. Долевое распределение причин отказов промысловых ЦНА представлено диаграммой на рисунке 1.1.

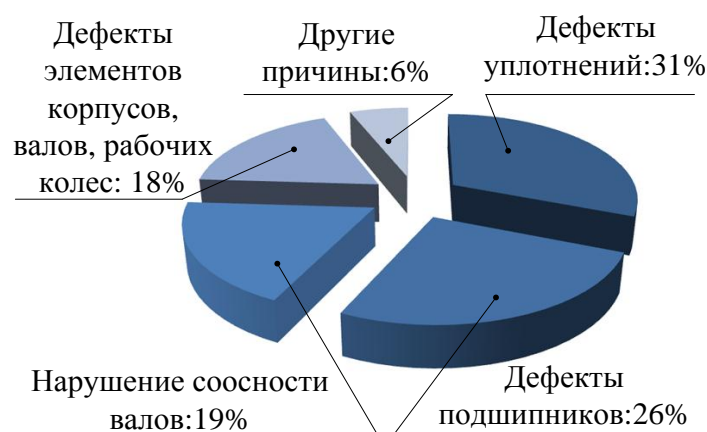


Рисунок 1.1. Причины отказов промысловых ЦНА

Дефекты щелевых уплотнений, использующихся для разделения области всасывания от области нагнетания и торцевых уплотнений, необходимых для исключения утечек в месте выхода вала из корпуса насоса занимают значительную долю из общей совокупности причин вывода насосных агрегатов из эксплуатации – 31%. К тому же, состояние уплотнений определяет объемный

КПД насоса и как быстро изнашивающийся узел, уплотнения характеризуют работоспособность насоса в целом. Объемные потери при износе уплотнений могут снизить общий КПД насоса на 2,5% [45].

При этом дефекты уплотнений нельзя отнести ни к критическим, при наличии которых эксплуатация агрегата невозможна, или недопустима по условиям безопасности и надежности [10,53], ни к трудноопределяемым, а их эффективное диагностирование сводится к анализу параметрических показателей работы насоса. Основным индикатором состояния торцевых уплотнений является значение утечек, измеряемое объемным способом, а критериями определения износа щелевых уплотнений является падение величины напора, обуславливаемое нарушением распределения давления и потока в области рабочего колеса, и рост потребляемой мощности вследствие увеличения мощности гидравлического торможения колеса и возникновения дополнительных осевых усилий на ротор [45,58,110].

Техническому состоянию подшипников уделяется наиболее пристальное внимание при проведении процедур технической диагностики на промышленных ЦНА, поскольку подшипники в наибольшей степени определяют ресурс ЦНА, что объясняется высокой вероятностью отказа агрегата (26% случаев) при достижении подшипниками предельных состояний [14,45,63,80,103].

В промышленных консольных ЦНА используются подшипники качения, как наиболее распространенный элемент опор вращения роторного оборудования [50]. В основу работы подшипников качения положен принцип трения качения между сопрягаемыми деталями.

Подшипники качения имеют ряд достоинств, определяющих их преимущественное использование в сравнении с подшипниками скольжения, в том числе и при конструировании консольных ЦНА: пониженные требования к смазке, что упрощает обслуживание и снижает износ при интенсивных изменениях режима работы (пуск, динамичный рост и снижение частоты вращения), меньшие осевые габариты, широкий размерный ряд, массовость

производства, хорошая взаимозаменяемость и, относительно, низкая стоимость [49,50].

Эскиз конструкции подшипника качения представлен на рисунке 1.2. Конструктивно подшипник состоит из внешнего (1) и внутреннего (2) колец (обойм) и, располагаемых между кольцами, тел качения (3), разделяемых сепаратором (4) (см. рисунок 1.2).

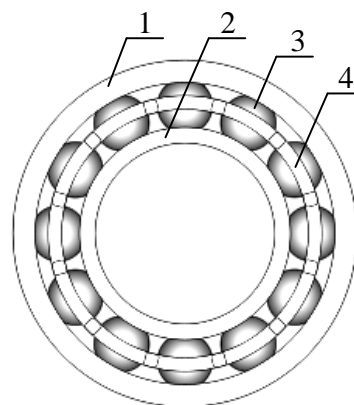


Рисунок 1.2 – Подшипник качения

Подшипники качения изготавливают из высокопрочных подшипниковых сталей с термической обработкой.

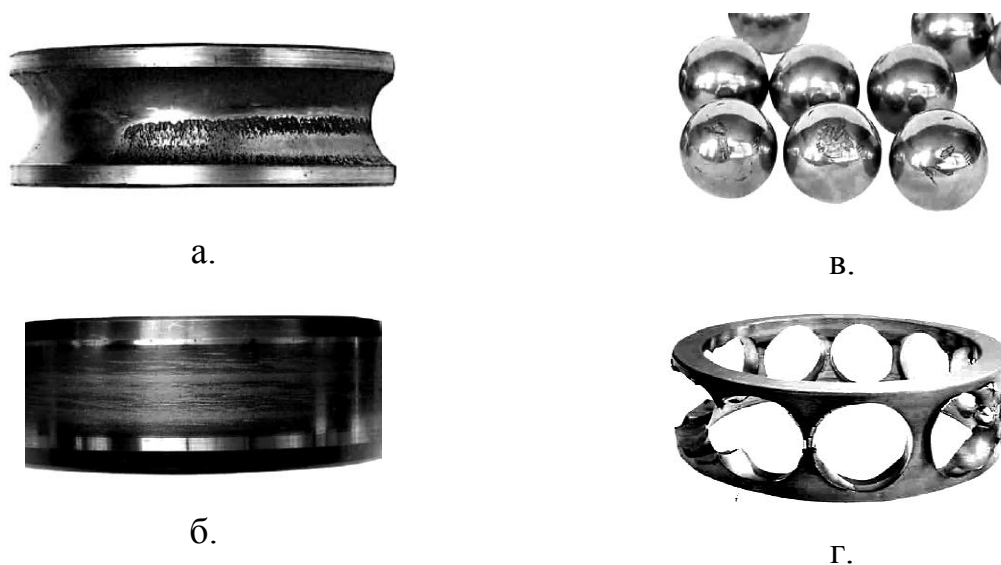
Кольца и тела качения изготавливаются, как правило, из шарикоподшипниковых высокоуглеродистых хромистых сталей и цементируемых легированных сталей, а в случае их работы при повышенных температурах и в агрессивных средах, изготавливаются их жаропрочных и коррозионно-стойких сталей. Сепараторы, по причине их работы в условиях интенсивного изнашивания вследствие трения скольжения с телами качения и кольцами, производят из антифрикционных материалов, например штамповкой из мягкой углеродистой стали, обладающей хорошими антифрикционными свойствами, либо, при высокой скорости вращения, из текстолита, фторопласта, дуралюмина, латуни и бронзы [49,50].

Согласно данным [56], не более 10 % подшипников качения полностью отрабатывают проектный срок службы. При этом, по данным статистики [103], основными причинами выхода из строя подшипников качения являются: нарушения смазки – 40%, нарушения сборки и установки – 30%, нарушения условий эксплуатации, повышенная вибрация – 20%, естественный износ – 10%.

Достижению подшипником предельного состояния предшествует изменение его состояния по причинам зарождения и развития повреждений, которые, условно, можно разделить на две группы: дефекты изготовления и

сборки подшипниковых узлов и дефекты эксплуатации. Данные группы включают в себя множественные дефекты, отличающиеся по принадлежности к элементу подшипника и по характеру возникновения и проявления. Это могут быть дефекты колец, тел качения, сепараторов, снижение жесткости в местах посадок, превышение номинальных значений зазоров, перекосы подшипника, всевозможные нарушения, связанные с обеспечением смазки подшипника [103].

К наиболее распространенным повреждениям подшипников качения следует отнести следующие: абразивный износ и усталостное выкрашивание дорожек внутреннего и наружного колец, тел качения, внутренней поверхности гнезд сепаратора, трещины и разрывы перемычек сепаратора [15,89]. В работе [19] основным последствием износа подшипников отмечается контактная эрозия поверхностей качения. На рисунке 1.3 представлены иллюстрации элементов подшипников качения при различных повреждениях [84].



а – усталостное выкрашивание внутреннего кольца,

б – абразивный износ дорожки качения,

в – выкрашивание материала тела качения, г – разрушение сепаратора

Рисунок 1.3 – Элементы подшипника качения при различных видах изнашивания

В работе [98] представлены результаты дефектоскопии подшипников качения, экспериментально подвергающихся ускоренному износу. Определено, что увеличение радиального и осевого зазоров в подшипнике в среднем до 24,7%, было вызвано выкрашиванием материала на беговых дорожках внутреннего и

наружного кольца, коррозионно-механических износом поверхностей трения тел качения и износом боковых стенок гнезд сепаратора.

Следует отметить, что при работе подшипника качения, сопровождающейся его износом, наблюдаются нарушения микро- и макрогеометрии элементов подшипника, которые, даже при небольших значениях, существенно влияют на точность подшипника, которая характеризуется величиной относительных смещений внутреннего и наружного колец при вращении [89].

Чрезмерный износ подшипников, способствующий периодическому смещению вала с оси вращения, приводит к росту величины несоосности валов агрегата, являющейся характеристикой состояния сопряжения валов муфтой, и определяемой как несовпадение осей валов в зоне сопряжения. Несоосность, также может быть вызвана погрешностями при посадке полумуфт на валы, некачественной центровкой валов перед вводом агрегата в эксплуатацию, нарушением центровки в процессе работы из-за прогибов вала и просадки фундамента, трещинами в теле полумуфты, износом отверстия в полумуфте под вал, нарушением геометрии полумуфты, увеличенным отверстием под упругий элемент (в случае упругой втулочно-пальцевой муфты) [19,63].

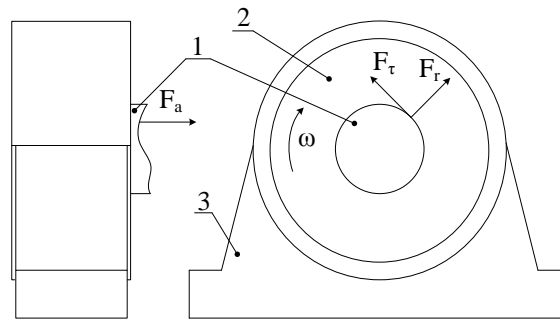
При повышенной несоосности валов растут динамические нагрузки на подшипниковые опоры и элементы муфты, повышается вибрация машины, и могут возникать изгибные деформации вала, что сокращает ресурс полумуфт, элементов их соединения и, в особенности, подшипников [3,19,50,63].

На рисунке 1.4 показаны встречающиеся виды несоосности валов.

Появление и развитие рассмотренных повреждений подшипников и несоосности валов являются причинами роста в агрегате колебательных сил, преимущественно, механической природы, следующих видов [3,10,19,106]:

- центробежная сила (определяется смещенным центром масс);
- кинематическая сила (определяется движением тел по неровностям);
- параметрическая сила (определяется переменной жесткостью тел);
- ударная сила (определяется упругим взаимодействием и отклонением тел);

погрешностей изготовления, наблюдаются периодические изгибные колебания вала, приводящие к динамическим нагрузкам на подшипниковые опоры, определяющим деформацию элементов подшипника в зоне контакта с валом.



1 – вал; 2 – подшипник; 3 – корпус

Рисунок 1.5 – Направления действия сил в подшипниковой опоре

Центробежная сила инерции, действующая на опоры, определяется угловой скоростью вращения нескомпенсированных масс ротора – ω , значением этих масс – m и радиусом окружности вращения масс – r [52]:

$$F_{u,u} = m \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t). \quad (1.1)$$

С увеличением значения центробежных сил интенсивно возрастает степень износа подшипников, наблюдается рост вибрации агрегата с периодом колебаний, соответствующем частоте вращения ротора [19,50,103].

При вращении ротора в подшипниках имеют место силы трения, кинематические, ударные и параметрические силы в месте сопряжения деталей, проявляющиеся вследствие наличия неровностей, повреждений в местах трения, особенностей работы механизма подшипника и значительно усиливающиеся с появлением и ростом несоосности валов агрегата.

Векторы действия этих сил могут иметь радиальную, осевую и тангенциальную составляющие (см. рисунок 1.5). В связи с возможностью действия вышперечисленных сил в касательном направлении к поперечному сечению вала, они определяют переменные напряжения от кручения в валах, крутильные колебания вала, связанные с угловой деформацией его линии в направлении действия силы.

Крутильные колебания вала, помимо вибрации, обуславливают наличие пульсации крутящего момента на валу машины, поскольку при кручении внутренние касательные силы полностью приводятся к крутящему моменту, а напряжения от кручения вала связывается с крутящим моментом следующим соотношением [51]:

$$\tau_k = \frac{M}{W_k} = \frac{M}{(\pi \cdot d^3 / 16)} \approx \frac{M}{0,2 \cdot d^3}, \quad (1.2)$$

где M – крутящий момент на валу;

W_k – полярный момент сопротивления сечения вала;

d – диаметр вала.

Стоит отметить, что влияние радиальной силы, создаваемой при вращении ротора, обеспечивает рост контактных напряжений в подшипнике и дополнительную модуляцию ударных, кинематических сил и сил трения в зоне контакта [3,19,51].

Таким образом, изменение состояния подшипников консольных ЦНА из-за повреждений, в частности усталостного выкрашивания и абразивного износа поверхностей дорожек качения, тел качения, разрушения сепаратора, сопровождаемых увеличением радиальных и осевых зазоров в подшипнике, приводит к росту механических колебательных сил [3,103], что определяет повышение динамических нагрузок на опору, рост уровня вибрации и колебания крутящего момента на валу агрегата.

В свою очередь, ухудшение состояния сопряжения валов ЦНА, характеризующееся ростом несоосности валов, также приводит к нарастанию механических колебательных сил в агрегате и вибрации, преимущественно, на оборотных частотах вращения вала, а также колебаниям крутящего момента на валу. К тому же, вызывая изгибные деформации вала, связанные с ней колебания, и увеличение динамических сил в опоре, несоосность определяет повышенный износ подшипников агрегата [3,19,50,63].

1.1.2 Методы определения состояний узлов консольных ЦНА

Установление текущего состояния узлов работающих ЦНА обеспечивается при проведении процедур мониторинга технического состояния, реализуемого в рамках системы ТОиР оборудования на предприятии. Преимущественное использование методов мониторинга, позволяющих по факту в режиме реального времени без вывода из эксплуатации агрегата определить состояние ресурсоопределяющих узлов, является очевидным. Такие методы обеспечивают минимизацию вероятности внезапных отказов оборудования, что способствует росту надежности и безопасности протекания технологических процессов производств, в том числе и с экономической точки зрения. Кроме того, рассматриваемые методы диагностики позволяют предприятиям эффективно организовывать систему ППР на основе сочетания регламентированного ремонта и ремонта по техническому состоянию, что используется для большей части оборудования предприятий, в том числе и для консольных ЦНА на нефтегазовых промыслах. В этом случае базу структуры ремонтного цикла ЦНА составляют мероприятия по регламентированному ремонту основной части узлов агрегата с установленными сроками. Сроки ремонтов по техническому состоянию отдельных узлов, которыми могут являться подшипники и сопряжение валов, определяются дополнительно [113].

Реализация системы ППР с выполнением ремонтов по техническому состоянию позволяет снизить объемы ремонта, оптимизировать его сроки и обеспечить дифференцированный подход к обслуживанию оборудования, имеющего различную степень износа узлов. По некоторым данным внедрение ремонтов по техническому состоянию может принести выгоду предприятию эквивалентную 30% от общей стоимости эксплуатируемого оборудования [10,63].

Процедуры оценки текущего состояния узлов машин без вывода из эксплуатации заключаются в проведении работ по регистрации, как правило, косвенных параметров, опосредованно характеризующих техническое состояние, а также в выполнении анализа полученных диагностических данных для определения вида, глубины развития дефекта и прогнозирования остаточного срока сохранения агрегатом работоспособного состояния [53]. Мониторинг

состояния, в общем случае, регламентируется государственными стандартами, руководящими документами и технологическими регламентами предприятий [27,36,42,43], и реализуется различными методами, предусматривающими обработку характерных косвенных диагностических параметров.

В соответствии с [43] основными анализируемыми параметрами при выполнении процедуры мониторинга состояния насосов и, связанных с ними, приводных электродвигателей являются следующие: температура узлов, напор и расход жидкости насоса, электрические параметры двигателя, потребляемая мощность, шум, вибрация, расход и давление масла, частицы износа в смазке.

По результатам анализа ряда источников можно кратко представить методы определения состояний узлов электроприводных консольных ЦНА без вывода из работы [106].

Контроль шумов

Предполагает мониторинг параметров шума, физически представляющего собой распространение упругих волн акустического диапазона, источниками которых, при работе насосных агрегатов, могут, быть явления механического, гидродинамического и электромагнитного характеров [63,91].

Контроль уровня шума может осуществляться при проведении плановых диагностических контролей насосов и электродвигателей в соответствии с требованиями нормативно-технической документации, в том числе ГОСТ 6134-2007, ГОСТ 11929-87, ГОСТ 23941-2002 [21,24,29].

Контроль смазки

Анализ смазки заключается в оценке взаимосвязей размеров, отношения размеров, формы и концентрации частиц изнашиваемых деталей, обнаруживаемых в смазке, с характером износа (трение, срез, усталостное изнашивание), типом дефекта и остаточным временем работы механизма [44,63]. Также анализ смазки предусматривает регулярный мониторинг качества смазочного материала и проверка его триботехнических свойств на соответствие требованиям ГОСТ 30858-2003 и ГОСТ Р 50740-95 [28,37].

При плановом и оперативном контроле технического состояния центробежных насосных агрегатов анализом частиц в смазке информативно определяется степень износа подшипниковых узлов [43].

Контроль рабочих характеристик

Заключается в сравнении базовых рабочих характеристик насосного агрегата (зависимости значений напора (напорная характеристика), мощности и КПД от значений подачи насоса), полученных после монтажа, или капитального ремонта с фактическими, которые подвергаются изменению в процессе эксплуатации агрегата в связи с увеличением гидравлических, механических и объемных потерь в насосе по причине износа торцевых и щелевых уплотнений, рабочего колеса, проточной части корпуса и других элементов агрегата, изменение условий перекачки [45,61,110].

Параметрическая диагностика, в первую очередь, имеет своей целью оценку энергоэффективности эксплуатации и прогнозирование момента времени неприемлемого снижения КПД и вывода агрегата из эксплуатации в ремонт [80].

Температурный контроль

Реализуется контактными способами контроля температуры поверхности и бесконтактными способами мониторинга параметров температурного поля для проверки работоспособности узлов насосных агрегатов, определения механических и электромагнитных неисправностей [63,110].

Температурный контроль центробежных насосных агрегатов проводится в рамках оперативного и планового диагностических контролей с учетом требований ГОСТ 6134-2007 (ИСО 9906:2007), РД 13-04-2006, РД 34.45-51.300-97, ГОСТ 8024-90 [29,30,70,73].

Вибрационный контроль

Мониторинг и анализ вибрационных параметров являются основными и обязательными мероприятиями в рамках оперативных и плановых диагностических контролей технического состояния насосного оборудования. Контроль вибрации позволяет оценить качество изготовления, монтажа и техническое состояние оборудования: наличие чрезмерных зазоров в

сопряжениях, деформацию и износ деталей, просадку фундаментов, нарушение центровки валов, ослабление креплений и т.д. [1,5,6,10,44,103].

Общие положения о вибрационной диагностике, технические требования к средствам контроля, точкам измерения и способам расположения измерительной аппаратуры, нормированию диагностических параметров, порядку сбора и анализа данных устанавливаются соответствующими нормативными документами [33,39,40,41,81,88].

Контроль параметров амплитудного спектра тока электродвигателя

В настоящее время активно изучается и представляет практическую значимость метод оценки технического состояния электроприводных динамических машин, в том числе консольных ЦНА, входящий в состав группы методов электрического неразрушающего контроля и базирующийся на регистрации и анализе электрических характеристик объекта диагностики [25], который предусматривает использование в качестве диагностических данных параметров сигналов фазных (линейных) токов и напряжений цепи питания электродвигателя, получаемых путем представления данных сигналов в различных формах, в том числе, в форме амплитудного спектра сигнала.

Вопросу оценки технического состояния различных узлов электроприводов и связанных с ними динамических машин с помощью анализа форм сигналов токов и напряжений электродвигателей посвящено множество работ отечественных и зарубежных авторов, в том числе В. С. Петухова, А. В. Баркова, В. М. Кравченко, М. Г. Баширова, Т. А. Глазыриной, В. А. Рогачева, А. В. Самородова, В. Н. Шикунова, А. Hernandez-Solis, S. R. Shaw, Parasuram P. Harihara, Christopher Laughman, Zhipeng Feng, By Valeria Cristina Maria Nascimento Leite, Gojko M. Joksimovic и других.

В работе [65] с помощью конечно-элементного моделирования обозначена возможность определения обрыва стержня короткозамкнутого ротора электродвигателя по форме кривой остаточного пускового тока и коэффициентам вейвлет-преобразования с использованием алгоритма выделения из сигнала тока основной составляющей. Также задача диагностики дефектов короткозамкнутой

обмотки высоковольтных асинхронных электродвигателей решается в работе [17] путем выделения признаков в компонентах вейвлет-разложения осциллограмм модуля обобщенного вектора тока статора при пуске двигателя и реализации диагностической системы на основе нечеткой логики. По результатам исследований, изложенных в работах [92,93], определяются диагностические признаки межвитковых замыканий в обмотках статора в спектре огибающих осциллограмм токов статора и механических дефектов подшипников электродвигателя в амплитудных спектрах обобщенного вектора тока. Неисправность типа эксцентриситета ротора электродвигателя исследована по анализу частотных составляющих спектров тока фазы обмотки статора [86] и по временным характеристикам фазных токов электродвигателя в режиме пуска [101]. Сведения об определении частот диагностических признаков неисправностей обмоток статора, ротора, повреждениях подшипников, статического и динамического эксцентриситетов ротора электродвигателя при анализе спектров статорного тока содержатся в работе [7].

В трудах зарубежных авторов [114] излагаются подходы к определению дефектов ротора и межвитковых замыканий в обмотках асинхронных машин по характеристикам огибающих общего сигнала тока статора трех фаз двигателя при изменении момента сопротивления на валу. В работах [116,120] определены частотные компоненты амплитудного спектра тока статора двигателя, реагирующие на изменение состояния подшипников качения при их деградации загрязнением и последующим отказом в условиях варьирования нагрузки на валу [120], а также при изменении габаритов углубления в дорожке качения наружного кольца подшипника [116]. Результаты другого исследования [128] содержат количественную оценку диагностических признаков развития дефекта наружной обоймы подшипника качения асинхронного двигателя мощностью 370 Вт в форме сквозного отверстия трех различных диаметров. Признаки определены в графиках квадрата огибающей спектра суммарного сигнала фазных токов статора двигателя. Также изучению возможностей определения такого дефекта в наружной обойме подшипника асинхронного двигателя мощностью 3 кВт по

параметрам амплитудного спектра тока статора посвящена работа [129]. В статье [115] представлены итоги компьютерного моделирования и эксперимента по оценке степени развития эксцентриситета ротора синхронной машины по диагностическим параметрам в форме вектора коэффициентов, получаемого обработкой спектра тока статора и вейвлет-преобразования сигнала тока. Авторами работы [121] проведены исследования по определению признаков повреждений внутренней и внешней обойм, тел качения подшипников асинхронных машин совместно в спектрах вибрации, тока статора и крутящего момента на валу. В работе [119] показана возможность установления текущего состояния подшипников качения двигателя по коэффициентам вейвлет-преобразования сигнала тока статора с приведением алгоритма анализа. По результатам исследований [118] при наличии и развитии коротких замыканий в статоре синхронного двигателя получены признаки в амплитудных спектрах сигналов и вейвлет-преобразованных сигналах тока статора и вибрации двигателя.

В рамках рассматриваемых работ исследуются диагностические параметры и признаки неисправностей исключительно электродвигателей в составе агрегатов. При этом возможные дефекты в приводимом механизме, в частности насосных установках, не рассматриваются.

Представленные в работах [75,76], а также в описаниях к изобретениям [78,79] результаты содержат диагностические признаки повреждений обмотки статора и ротора двигателя, эксцентриситета ротора, несоосности валов двигателя и механической нагрузки, повреждения подшипников качения, механические повреждения приводимого оборудования, в том числе насосных установок, с лопаточной частотой определяемые в амплитудных спектрах сигналов фазного тока, и в спектрах модуля обобщенного вектора фазных токов. В описании к способу [68] отмечается возможность эффективного использования инструментов анализа амплитудного спектра сигналов фазных токов при диагностике погружных электроцентробежных насосов. В работе [102] содержатся результаты исследований по оценке изношенности подшипников, наличия межвитковых и

межфазных замыканий в обмотках двигателей, определению режима работы электроприводных машинных агрегатов нефтегазовых производств по интегральному диагностическому параметру, формируемому по значениям коэффициентов амплитуд частотных составляющих тока и напряжения. Исследованию метода диагностики машинных агрегатов спектральным анализом тока и напряжения двигателя посвящены работы [4,90], в которых определяется интегральный диагностический параметр поврежденности агрегата при наличии дефектов подшипников, ухудшении состояния изоляции обмотки, наличии дефектов стержней ротора двигателя и повреждениях рабочего колеса насоса. Методика диагностирования механизмов с электроприводом, разработанная НОУ «Севзапучцентр» и ООО «Вибротехника» [2] содержит сведения о диагностических признаках дефектов электроприводов различного типа и приводимых механизмов, указания к определению пороговых значений признаков и порядок действий при выборе диагностической аппаратуры и реализации процедур диагностики, что определяет существенную практическую значимость работы.

Шведские исследователи в своей работе [117] определили диагностические признаки возникновения кавитации при работе ЦНА. Процедуры определения механических дефектов не описаны. В работе [131] рассматривается выявление дефектов зубьев шестерен редуктора, приводимого асинхронным двигателем, по составляющим амплитудного спектра и спектра огибающей сигнала тока статора двигателя. Представлена математическая модель формирования сигнала тока и экспериментальные исследования. Статья [126] содержит результаты по определению поврежденности рабочего колеса и подшипников центробежного насосного агрегата с помощью метода эмпирической модовой декомпозиции сигнала тока статора двигателя, а также построением и анализом спектра огибающей сигнала тока. Результаты работы [123] представляют возможность и алгоритм определения повреждения рабочего колеса центробежного насоса по токам фаз статора двигателя, представленным диаграммами в системе координат d - q , при разных уровнях закрытия крана на всасывающей линии. Исследования

[127] содержат теоретическое обоснование и экспериментальные результаты выявления дефектов рабочего колеса и внутреннего и наружного колец подшипника по отклонению среднего квадратического значения и изменению форм временных представлений сигналов тока статора. Авторами работы [122] показаны диагностические признаки в спектре тока статора двигателя и спектрах виброскорости, фиксируемой в трех направлениях на присоединительном фланце напорного трубопровода при возникновении повреждения во внутренней полости рабочего колеса центробежного насосного агрегата. Дана количественная оценка реакции различных частотных составляющих спектров на появление дефекта.

С точки зрения аппаратного и программного инструментария для реализации процедур диагностики насосных агрегатов методом анализа спектров тока электродвигателя разработано множество технических решений и предложений. В работах [2,4,68,77,78,79,90,95,96,102] содержатся не только алгоритмические аспекты метода, но и представлены рекомендации и указания по компоновке измерительных комплексов, элементами которых являются аппаратура и устройства утвержденного типа, серийно выпускаемые промышленностью, и функциональным возможностям ПО.

Тем не менее, существуют следующие предпосылки, определяющие необходимость дальнейшего развития метода:

- 1) Недостаточная проработка аппарата классификации технического состояния оборудования по пороговым значениям диагностических параметров, в частности, при оценке технического состояния агрегатов при наличии в нем механических неисправностей, наиболее существенно определяющих работоспособность машины, таких как неисправность подшипников и нарушение соосности валов. При этом существующие предложения по определению пороговых значений диагностических параметров общих для всех дефектов имеют расхождение. Так, по рекомендации [2] начальное пороговое значение диагностического параметра для определения дефекта в механизме среднего уровня определяется разностью амплитуд основной гармоники и информативной частотной составляющей в 40 дБ, а уровня сильного дефекта в 34 – 30 дБ. В свою

очередь в ГОСТ ISO 20958-2015 [32] отмечается предельная разность в амплитудах 50 дБ при определении некоторых дефектов высокого уровня.

2) Необходимость определения диагностических признаков неисправностей в агрегатах с учетом возможных изменений структурных параметров и режимов работы машины в соответствии с требованиями ГОСТ 27518-87 и ГОСТ Р ИСО 17359-2015 [27,43]. Под структурными параметрами понимаются особенности конструкции агрегата и его узлов, рабочие характеристики, режимные параметры и т.д.

1.2 Методики определения состояния узлов ЦНА по параметрам спектров тока их электродвигателей и вибрационному критерию

1.2.1 Методика определения состояния узлов ЦНА по параметрам спектров тока их электродвигателей

При анализе источников, содержащих требования и рекомендации по разработке методик определения технического состояния узлов консольных ЦНА анализом амплитудных спектров тока электродвигателя, установлено, что основные измерения выполняются по величине тока в одной фазе линии питания электродвигателя различными устройствами бесконтактного типа с дальнейшей аналого-цифровой обработкой информации о сигнале и анализом параметров амплитудного спектра.

В ГОСТ ISO 20958-2015 [32] содержатся общие указания и рекомендации по организации методик контроля технического состояния электродвигателей и приводимых механизмов анализом амплитудных спектров тока.

Измерения рекомендуется выполнять при полной нормальной нагрузке двигателя в фазном проводе непосредственно, либо во вторичной обмотке измерительного трансформатора с помощью токоизмерительных клещей. Уровень дефекта оценивается по разнице амплитуд между основной составляющей спектра тока и информативной составляющей на частоте дефекта.

Методика диагностирования механизмов с электроприводом по потребляемому току [2] может применяться для диагностики консольных ЦНА, поскольку предусматривает диагностику электродвигателей и механизмов с одной линией вала.

Основным измерением по методике [2] является фиксация параметров спектра тока в одной из фаз электродвигателя с помощью штатно установленного измерительного трансформатора, токовых клещей, или пояса Роговского. Дополнительные измерения тока проводятся в трех фазах и нейтральном проводе для расширения спектра определяемых неисправностей. Также отмечено, что постановка диагноза выполняется с учетом информации о несимметрии и нелинейных искажениях напряжения питания двигателя.

Нормируемыми диагностическими параметрами по имеющимся в методике диагностическим признакам дефектов выступают значения амплитуд информативных составляющих спектров тока отнесенных к амплитуде основной составляющей. Если для дефекта являются информативными две и более составляющих то конечное отношение определяется либо по амплитуде максимальной из информативных компонент, либо по среднему значению из амплитуд информативных составляющих.

Предлагается устанавливать два уровня дефектов: «предупреждение» и «опасность». Предельные значения диагностических параметров на начальном этапе рекомендуется определять в логарифмических единицах относительно значения основного тока: минус 40 дБ для среднего дефекта, минус 34 – 30 дБ для сильного. В дальнейшем пороговые значения уточняются в задаче групповой диагностики, и создается маска порогов.

Порядок выполнения методики предусматривает: выбор измерительных преобразователей и их установку, определение режима работы агрегата, определение вида системы диагностики (стационарная, переносная и др.), оптимизацию количества измерений в соответствии с типом системы и требованиями к периодичности контролей, выполнение измерений, накопление

результатов, постановку диагноза, прогноза и формирование отчетной документации.

Проанализировав ряд работ [2,4,68,77,78,79,90,95,96,102] и требования ГОСТ Р ИСО 17359-2015 [43] можно представить в обобщенной форме последовательность операций методики определения состояния узлов консольных ЦНА анализом амплитудного спектра тока двигателя на рисунке 1.6 [106].

На первом этапе в зависимости от значимости объекта контроля, его расположения, возможностей информационно-измерительной сети предприятия необходимо определить тип системы контроля: стационарная, установленная на постоянной основе с возможностью непрерывного мониторинга и анализа диагностических параметров в режиме реального времени, полустационарная и мобильная, позволяющие осуществлять контроль в периоды времени в зависимости от состояния оборудования и графиков контролей. Подробнее об измерительных системах контроля технического состояния рассмотренных типов представлено в параграфе 1.4.



Рисунок 1.6 – Порядок оценки состояния узлов ЦНА анализом спектров тока двигателя

Следующим шагом осуществляется выбор средств измерения сигналов и точек их размещения.

Измерение фазных токов в линиях питания электродвигателей диагностируемых агрегатов может выполняться бесконтактными измерительными преобразователями различной конструкции в том числе: токовые клещи с аналоговым выходным сигналом (см. рисунок 1.7 а), измерительные трансформаторы тока и датчики тока на эффекте Холла с нормируемым коэффициентом трансформации (см. рисунок 1.7 б), гибкие токовые трансформаторы на немагнитных каркасах (пояс Роговского) (см. рисунок 1.7. в) [2,32].

Примеры бесконтактных измерительных преобразователей показаны на рисунке 1.7.

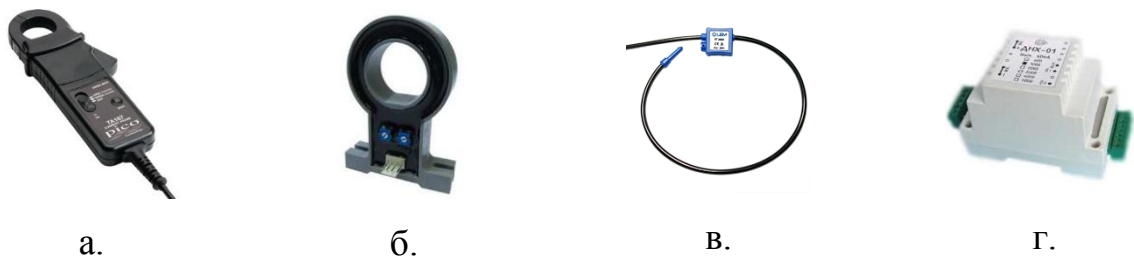


Рисунок 1.7 – Средства измерения сигналов тока и напряжения

Измерение напряжения может осуществляться датчиками напряжения трансформаторного типа и на эффекте Холла с пропорциональным выходом (см. рисунок 1.7 г), а также при помощи подключения делителей напряжения [2,90]. Выбор того, или иного типа первичного измерительного преобразователя (ПИП) обуславливается типом измерительной системы (стационарная/мобильная), необходимостью согласования параметров датчиков с параметрами вторичных измерительных устройств, эргономикой использования.

Точки размещения ПИП определяются на линии питания электродвигателя в коробке выводов электродвигателя, либо в распределительном узле. При этом преобразователи подключаются напрямую к жилам кабеля [2,32].

Предельные значения измеряемых тока и напряжения для ПИП определяются параметрами объекта контроля. Измерители тока должны быть рассчитаны на значение измеряемого тока не менее удвоенного значения

номинального тока электродвигателя [2]. Параметры входных цепей аппаратуры для аналого-цифрового преобразования сигналов должны согласовываться с выходными параметрами первичных преобразователей. Допустимая частота дискретизации преобразователей должна быть не менее удвоенного значения верхнего предела оцениваемого частотного диапазона спектров сигналов. Интерфейс выходных цепей преобразователей должен соответствовать требуемому типу интерфейса для подключения к индивидуальному компьютеру для диагностики, либо автоматизированному рабочему месту (АРМ) диспетчера.

Для снижения влияния на спектр тока помех, наводимых другими электроприемниками сети, при соответствующей возможности измерительные преобразователи размещаются ближе к контролируемому объекту в удалении от точки общего присоединения электроприемников (распределительного узла), в которой, при наличии подключенного электрооборудования-источников несинусоидальности напряжения наблюдается максимальное влияние помех на измеряемый сигнал [2,71].

В качестве диагностических параметров при анализе амплитудного спектра тока рекомендуется принимать значения амплитуд информативных частотных составляющих, отнесенные к значению амплитуды основной гармоники тока (коэффициенты частотных составляющих) [2,4,78,79,90,102]. Пороговые значения диагностических параметров, исходя из существующего уровня разработки метода, на начальном этапе диагностики можно определить согласно рекомендациям [2,32], а затем корректировать по мере накопления сведений о значениях диагностических параметров и динамике изменения технического состояния объекта контроля. Пороговые значения диагностических параметров должны корректироваться с учетом изменения структурных параметров контролируемого агрегата [27,43].

Согласно требованиям ГОСТ 27518-87, ГОСТ Р ИСО 13373-3-2016, ГОСТ Р ИСО 17359-2015 [27,41,43] должен быть определен режим работы агрегата, поскольку характеризующие данный режим параметры, являются существенными факторами изменения диагностических признаков неисправностей.

Оптимальная периодичность контролей определяется типом системы, значимостью объекта контроля и его текущим техническим состоянием. При использовании стационарной системы, аналогично методу вибрационной диагностики, можно выполнять как непрерывный сбор и анализ диагностических данных, так и периодический [40]. При использовании полустационарной и мобильной систем выполняется периодический сбор и анализ данных, который является вполне достаточным для машин небольших габаритов и мощности при оценке неисправностей подшипников и нарушения соосности валов [35]. Периодичность контролей для наиболее ответственных агрегатов варьируется от одного раза в два часа при оперативном контроле до раза в три месяца при плановом контроле всеми видами систем. Менее ответственные установки могут подвергаться контролю с периодичностью до трех лет. С развитием дефектов в оборудовании периодичность контролей сокращается.

С целью получения более достоверного значения диагностического параметра в условиях влияния на результат измерения флуктуаций частотных составляющих в спектрах сигналов и погрешностей средств измерения при выполнении контролей производят многократную запись значений диагностических параметров в течение некоторого интервала времени. Частота измерений определяется задаваемой точностью результата и погрешностью средств измерения [75,78,79].

Измерение сигналов токов производится либо в одной фазе линии питания двигателя, что является достаточным для определения большей части дефектов агрегата, либо во всех трех фазах линии питания для получения дополнительной информации о наличии несимметрии нагрузки в цепи статора и повышения информативности диагностических признаков межвитковых замыканий в обмотке статора и обрывах стержней ротора [2,32], а также для компенсации влияния основной составляющей напряжения промышленной частоты вследствие ее взаимной компенсации по трем фазам [68].

Измерение сигналов напряжений выполняется либо в одной фазе линии питания двигателя, той же, где установлены первичные преобразователи тока,

либо во всех трех фазах для определения искажений сигналов напряжения и тока от временных частотных составляющих и несимметрии напряжения питания [2,79,95].

Дальнейшие операции по обработке аналоговых сигналов, поступающих с первичных измерительных преобразователей, такие как фильтрация сигналов и аналого-цифровое преобразование выполняются специализированным аппаратным обеспечением с техническими характеристиками, согласуемыми с параметрами других элементов измерительных каналов измерительных систем контроля.

Формирование спектров выполняется специализированным ПО в составе измерительной системы контроля с использованием алгоритмов дискретного, а также быстрого преобразования Фурье (ДПФ, БПФ) [8].

По полученным данным о значениях параметров амплитудных спектров сигналов тока и напряжения инструментарием ПО выполняется сравнение текущих значений диагностических параметров с пороговыми значениями, заложенными в базу данных программы, что позволяет определить наличие неисправности и оценить класс технического состояния объекта контроля по заранее заданным алгоритмам. Существующие алгоритмы позволяют автоматизировать процесс постановки диагноза по пороговым значениям параметров, обеспечить запись результатов обработки диагностической информации в базу данных для последующего анализа с целями уточнения диагноза, корректировки пороговых значений и выполнения прогнозирования технического состояния [2,4,78,79,90,95,103].

В соответствии с установленным классом технического состояния объекта и результатом прогнозирования принимается решение о дальнейшей эксплуатации с заданными режимами работы и определенной периодичностью контролей, либо выводе агрегата из эксплуатации.

1.2.2 Методика определения состояния узлов консольных ЦНА по вибрационному критерию

Учет текущих параметров вибрации при оценке состояния ЦНА в целом и его узлов является обязательным и требуется в рамках мониторинга технического состояния согласно государственным стандартам, регламентам предприятий и паспортам на агрегаты.

Диагностическими параметрами вибрационного контроля состояния узлов ЦНА могут выступать интегральные параметры полигармонического сигнала вибрации: средние квадратические значения (СКЗ) вибро- скорости, ускорения, перемещения, а также характеристики спектров, кепстров сигналов вибрации, и другие параметры, предусмотренные различными методиками вибромониторинга [103].

Наиболее используемым параметром оценки вибрации консольных ЦНА является СКЗ виброскорости. Это определяется сравнительной простотой технической реализации контролей по данному параметру, а также его высокой информативностью с точки зрения отражения энергии вибрации и разрушающей способности колебаний агрегатов в частотном диапазоне 10-1000 Гц [34].

В качестве измерительной аппаратуры используются приборы, содержащие детектор СКЗ и индикатор для считывания СКЗ измеряемой величины, а также приборы, содержащие либо детектор СКЗ, либо усредняющий детектор, но калиброванные для считывания параметров колебаний [40]. В мобильных системах средствами измерений выступают готовые скомпонованные приборы, включающие в себя ПИП вибрации, блок обработки сигнала с показывающим устройством и блок питания, общие требования к которым установлены в ГОСТ ISO 2954-2014 [33]. Примерами таких приборов являются: переносной комплект виброметра модель 687A01 производства PCB Piezotronics, Inc., США, измеряющий СКЗ вибрации с помощью промышленного акселерометра на магните, имеющий наушники для звукового мониторинга; цифровой виброметр AR63B производства SmartSensor, Россия, измеряющий СКЗ вибрации с помощью датчика на магнитном крепеже, либо контактного щупа, а также позволяющий измерять температуру.

Точками измерения СКЗ виброскорости являются зоны вблизи подшипниковых опор на корпусах насоса и электродвигателя ЦНА. Наиболее полным является измерение вибрации в трех взаимноперпендикулярных направлениях: вертикальная и горизонтальная радиальные и осевая составляющие. При этом в процессе эксплуатации достаточно выполнять измерения по двум радиальным составляющим [34,35].

На начальных этапах мониторинга для определения пороговых значений диагностических параметров выполняют расчет предельных СКЗ виброскорости для границ видов состояний в соответствующих частотных диапазонах с установкой предупредительных уровней и уровней останова по рекомендациям [34,40], а также пользуются, установленными в стандартах, значениями для машин, в том числе насосов и электродвигателей, с определенными характеристиками по [34,35,39,88].

За уровень вибрации принимается максимальное из измеренных значений параметра по всем точкам на корпусе в определенных условиях и установившемся режиме работы [34]. Аналоговые сигналы с датчиков поступают на входы устройств аналогово-цифровой обработки для регистрации и представления данных об измерениях в наглядной форме.

По результатам измерений определяется вид технического состояния агрегата и принимается решение о допустимости его дальнейшей эксплуатации без ограничений, с ограничением по времени, остановке агрегата, а также возможной корректировке периодов контроля на основании результатов прогноза изменения диагностического параметра во времени [34,35,40].

1.3 Методы математического моделирования для исследования диагностических параметров

Разработка и анализ моделей объектов контроля является эффективным инструментом при исследовании методов диагностики динамического оборудования. Моделирование позволяет формализовано описать наиболее

существенные свойства объекта в их взаимосвязях по параметрам и представить реакции объекта, выражаемые в значениях величин, свойственных рассматриваемому методу контроля, на воздействия по различным параметрам, свойственных данному объекту и зависящих от конструктивных особенностей объекта, режима работы, условий эксплуатации и других факторов.

1.3.1 Методы моделирования объектов контроля

На рисунке 1.8 представлены методы моделирования, используемые для анализа поведения динамического оборудования в рамках исследований методов контроля технического состояния [67,94].

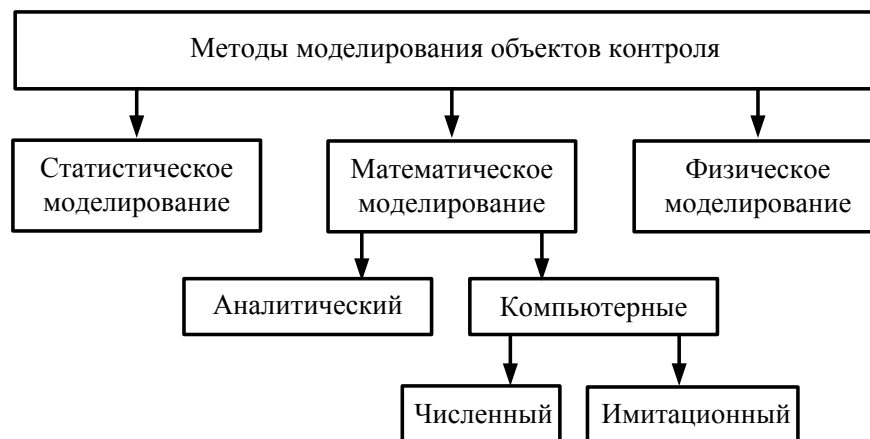


Рисунок 1.8 – Методы моделирования объектов контроля

Методы статистического моделирования предполагают построение моделей, основанных на выявляемых статистических закономерностях поведения объекта. Методы предполагают использование значительных объемов статистических данных и применение специализированного ПО для упрощения вычислительных операций [94]. Применительно к исследованиям методов контроля технического состояния динамических машин по электрическим параметрам статистическое моделирование применяется достаточно широко как с целью определения диагностических признаков деградиционных процессов в узлах оборудования и накопления базы данных, так и для апробации разработанных методик в реальных условиях на действующем оборудовании [66,68,90,102].

Физическое моделирование заключается в реализации экспериментальных исследований на модели физически подобной реальному объекту, но меньшей по

размерам. Методы позволяют исследовать поведение предполагаемого объекта без необходимости его воспроизведения в реальном размере. При этом методы имеют корректные результаты при строгом соблюдении физического подобия модели реальному объекту [94]. В рамках разработок методов контроля электрических параметров объектов физическое моделирование выполняется на специализированных лабораторных стендах [4,17,83,93].

На этапах теоретических исследований при разработке методов диагностики по электрическим параметрам эффективно используется математическое моделирование, реализуемое аналитическим и компьютерными методами. Такое моделирование позволяет выполнить предварительный анализ возможного поведения объекта при изменении параметров и воздействии учитываемых факторов без существенных затрат на реализацию моделирования. При этом стоит отметить сложность создания многопараметрических моделей, позволяющих учитывать значительное количество факторов [94].

Аналитический метод предполагает создание формализованных образов реальных объектов с применением алгебраических, дифференциальных, интегральных уравнений и логических условий. Компьютерное моделирование может выполняться численным и имитационным методами, с помощью которых возможно производить решения уравнений и имитировать поведения исследуемого объекта [67].

С помощью аналитического и численного методов моделирования разрабатываются и исследуются аналитические математические модели электродвигателей, позволяющие учитывать различные дефекты электромагнитной системы [12], изменение параметров двигателя в переходных режимах [125], неисправности при работе двигателя в составе центробежных насосных агрегатов [124].

Имитационное моделирование позволяет создать модель, с достаточной точностью описывающую реальный объект и проводить с ней эксперименты для изучения поведения объекта при определенных условиях. Метод имитационного моделирования позволяет выполнять сложные вычислительные операции за

относительно небольшое время, обладает хорошей повторяемостью, точностью, отличается наглядностью структуры модели и результата моделирования [94], что определяет предпочтительность его использования для моделирования множества процессов и объектов при наличии компьютерной техники с достаточной производительностью.

Применением инструментов имитационного моделирования в рамках разработок методик диагностики по электрическим параметрам исследуются электродвигатели и насосные агрегаты с учетом различных неисправностей составлением моделей методом конечных элементов [64,65], а также с использованием визуальных блок-диаграмм в виде направленных графов в графических средах имитационного моделирования, например, Matlab Simulink [17,86,90].

1.3.2 Имитационное моделирование объектов контроля построением визуальных блок-диаграмм

В распоряжение современного исследователя предоставляется несколько программных продуктов с графическим интерфейсом, позволяющих разрабатывать модели динамических объектов с использованием визуальных блок-диаграмм.

Программа Jigrein имеет функциональный интерфейс и позволяет строить визуальные схемы объектов моделирования, однако не предоставляет возможности работы с выходными данными модели [54].

Достаточно известный программный продукт Scilab имеет широкий спектр функций, в том числе разработку и анализ визуальных блок-диаграмм моделей при использовании приложения Xcos. Программе свойственна открытость, функциональность, поддержка языков программирования высокого уровня и т.д. При этом отмечается недостаток в разнообразии инструментария Xcos для создания блок-диаграмм сложных моделей [54].

Наиболее распространенным программным продуктом, обеспечивающим возможность создания визуальных блок-диаграмм сложных моделей объектов является Matlab с пакетом визуального программирования Simulink.

Преимуществом данного продукта является наиболее обширный набор инструментов для создания блок-диаграмм сложных динамических моделей, разнопланового анализа данных модели и оформления результатов анализа [54].

Simulink позволяет посредством организации определенных взаимосвязей между библиотечными визуальными блоками производить имитацию различных режимов работы систем, исследуя при этом происходящие в них структурные изменения, и, контролируя характер модуляции основных параметров модели [16]. На рисунке 1.9 представлен пример направленного объединения блоков в блок-диаграмму в программной среде Simulink Matlab R2015a (8.5.0.197613).

Библиотека Simulink включает в себя блоки математических операций различной сложности, блоки передаточных функций, блоки ввода параметров с различными свойствами и вывода в графических и числовых формах и многие другие.

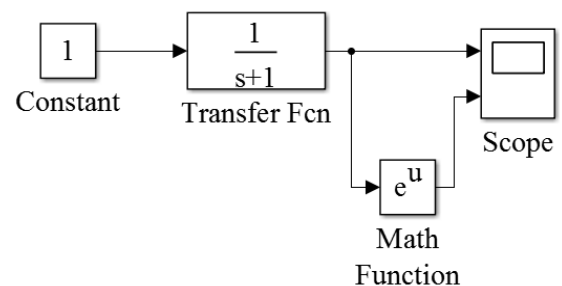


Рисунок 1.9 – Пример блок-диаграммы Simulink

Обширные возможности программной среды Matlab Simulink в решении задач анализа моделей сложных динамических объектов определяют ее использование в настоящей работе при исследовании метода анализа спектров тока электродвигателя ЦНА для определения состояний их узлов.

1.4 Реализация метода определения состояний узлов ЦНА анализом спектров тока их электродвигателей

В соответствии с методикой, представленной в параграфе 1.2, аппаратная часть измерительных систем для анализа спектров тока электродвигателя, в общем случае, должна включать в себя первичные измерительные преобразователи тока и напряжения, согласуемые с ними устройства для аналого-цифрового преобразования и обработки аналоговых и цифровых сигналов, индивидуальный компьютер, либо АРМ диспетчера. Далее рассмотрены

существующие технические решения по реализации аппаратурной части систем контроля.

Для оценки эксцентриситета ротора асинхронных электродвигателей по параметрам амплитудно-частотного спектра тока разработана система, состоящая из трансформатора и датчика тока, компьютера (ЭВМ) и устройства, содержащего элементы ввода/вывода, обработки аналоговых и цифровых сигналов, элементы питания, аналого-цифрового преобразования, памяти, преобразования интерфейсов, компонованные на единой плате в общем корпусе [86]. В работе [17] представлена система контроля повреждений ротора асинхронного электродвигателя, состоящая из платы с датчиками тока, резистивными делителями напряжения и оптоизолирующими измерительными усилителями, платы аналого-цифрового преобразования сигналов и компьютера.

Системы контроля технического состояния динамического оборудования с электроприводом, описанные в работах [2,4,68,77,78,79,90,95,96,102], можно представить обобщенной структурой, изображенной на рисунке 1.10. Представленная структура нашла отражение в описании полезной модели, разработанной автором в составе авторского коллектива [112].

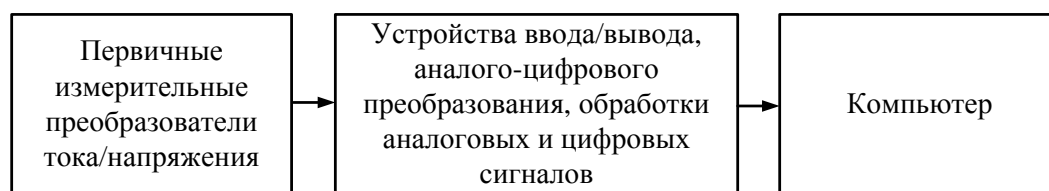


Рисунок 1.10 – Структура систем контроля технического состояния

В работе [77] в качестве первичных измерительных преобразователей предлагается использовать токоизмерительные клещи, производства фирмы Fluke, либо разъемные токовые датчики, а также делители напряжения, либо трансформаторы напряжения. Измерители должны иметь линейную амплитудно-частотную характеристику с отклонением от линейности в пределах ± 3 дБ в диапазоне 20 кГц. Устройством обработки сигналов является аналого-цифровой преобразователь с разрядностью не менее 14 разрядов. Данные передаются на компьютер для обработки.

Некоторые существующие системы контроля предусматривают использование в качестве устройств обработки сигналов измерительную аппаратуру, самостоятельно позволяющую реализовывать функции приема, обработки и представления результатов анализа сигналов тока и напряжения, тем не менее, подключаемую к компьютеру для выполнения алгоритма оценки технического состояния [4,102]. Измерительной аппаратурой являются: измерители и анализаторы показателей количества и качества электрической энергии AR5 [95,102], Ресурс-UF2М [4,95] и энерготестер ПКЭ [4], комплектующиеся первичными измерительными преобразователями видов токовых клещей классами точности 0,5 и 1, и проводами с зажимами типа «крокодил». В описании к изобретению [95] отмечается возможность использования аналого-цифрового преобразователя разрядностью не ниже 16 разрядов.

Диагностическая система, предложенная в работе [90], включает в себя бесконтактные датчики тока, делители напряжения, соединенные по схеме «звезда», компьютер и аналого-цифровой преобразователь Zet 210 с суммарной частотой дискретизации по всем каналам до 400 кГц, разрядностью 16 и динамическим диапазоном 84 дБ.

Аппаратурная реализация системы контроля технического состояния, представленная в работе [2], предполагает использование измерительных трансформаторов тока, токовых клещей и поясов Роговского (см. параграф 1.2) с верхней границей частотного диапазона не менее 10 кГц, показателями нелинейности функции преобразования и амплитудно-частотной характеристики не хуже 0,3% и 10% соответственно, а также делителей напряжения. Для анализа сигналов предлагается использовать анализаторы спектра с верхней границей частотного диапазона не менее 10 кГц и динамическим диапазоном не менее 70 дБ.

Надо отметить, что рассматриваемые технические решения по аппаратурному обеспечению контроля технического состояния оборудования методом анализа параметров спектров тока электродвигателей представляют

собой измерительные системы мобильного и полустационарного типов (см. параграф 1.2). При этом возможность создания стационарных систем с подключением в общую сеть предприятия обозначается [90], но детально не рассматривается.

1.5 Выводы по главе

1.5.1 Достижение предельных состояний подшипниками качения по причине развития в них повреждений, и сопряжением валов из-за роста расцентровки, определяет переход консольного ЦНА в целом к предельному состоянию и выработку им ресурса, что обеспечивает высокую вероятность отказа агрегата. Ухудшение состояний подшипников и сопряжения валов агрегата сопровождается ростом механических колебательных сил в узлах, и, как следствие, повышением уровня вибрации и колебаний крутящего момента на валу машины.

1.5.2 Для определения состояний узлов консольных ЦНА может эффективно применяться метод, основанный на анализе параметров амплитудных спектров тока электродвигателя. Метод имеет характерный алгоритм реализации, предусматривающий использование аппаратного обеспечения, серийно выпускаемого промышленностью, и достаточное методическое обеспечение. В свою очередь для эффективного применения метода с целью мониторинга состояния узлов консольных ЦНА необходимо исследовать подходы к определению первоначальных пороговых значений диагностических параметров при подготовке к мониторингу, в том числе, с учетом возможных отклонений рабочих и конструктивных параметров ЦНА.

1.5.3 Разработка и анализ математических моделей объектов является эффективным инструментом исследования методов мониторинга технического состояния динамического оборудования. Одним из наиболее прогрессивных методов математического моделирования для изучения параметров процессов в консольных ЦНА, применительно к разработке метода анализа спектров тока

электродвигателя, является метод имитационного моделирования с применением аппарата визуальных блок-диаграмм.

1.5.4 Имеющиеся технические решения по реализации метода анализа спектров тока электродвигателя для определения состояний узлов консольных ЦНА, в большинстве своем, предусматривают использование типовых элементов и модулей, выпускаемых серийно, komponуемых в составе мобильных и полустационарных систем по общим принципам и частным требованиям к техническим характеристикам.

2. Методики исследований по определению предельных состояний ресурсоопределяющих узлов ЦНА

2.1 Диагностические параметры и вибрационный критерий определения состояний подшипников качения и сопряжения валов

В параграфе 1.1 отмечено, что вибрация и колебания крутящего момента на валу ЦНА порождаются единым фактором – механическими колебательными силами различной природы. В свою очередь известно, что колебания и нелинейность крутящего момента сопротивления, вызванные механическими колебательными силами с радиальными и тангенциальными составляющими, на валу электродвигателя в составе агрегата связаны с токами статора двигателя [60,111] и являются причиной модуляции гармоник и частотных составляющих статорного тока [2,3,107], содержащих диагностическую информацию.

Связь параметров вибрации агрегата и модуляции статорного тока двигателя агрегата проиллюстрирована схемой на рисунке 2.1.

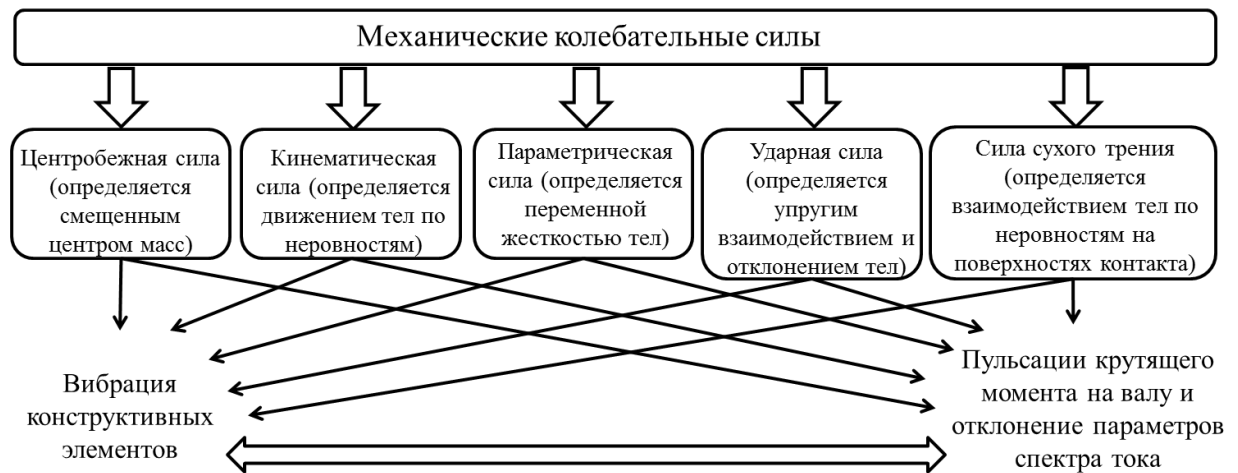


Рисунок 2.1 – Связь параметров вибрации и модуляции тока статора

Наличие единых факторов возникновения вибрации и модуляции статорного тока двигателя позволяет предполагать о существовании взаимосвязи между параметрами спектра тока и вибрационными критериями состояний узлов ЦНА [107].

В качестве диагностического параметра принимается относительное значение амплитуды частотных составляющих спектра статорного тока электродвигателя, а в качестве вибрационного критерия принимается СКЗ виброскорости агрегата. Выбор обусловлен высокой диагностической ценностью, изученностью и удобством использования обозначенных параметров, что описано в параграфе 1.2 настоящей работы.

Исследование совместного проявления диагностических признаков в спектре тока и уровне вибрации с определением выражений взаимосвязи между ними позволит организовать вибротоковый мониторинг состояний подшипников и сопряжения валов ЦНА удаленно без доступа к агрегату системами с одним измерительным каналом и бесконтактными датчиками, что упрощает определение состояний узлов труднодоступных машин, снижает трудоемкость контролей и затраты на измерительное оборудование. Связь параметров спектра тока с СКЗ виброскорости позволит на предварительном этапе контролей определить первоначальные пороговые значения параметров для границ видов технических состояний узлов ЦНА.

2.2 Экспериментальная установка и методика экспериментального исследования

2.2.1 Экспериментальная установка

Эксперимент выполнен в научно-производственной лаборатории ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет».

Экспериментальная установка разработана на базе консольного насосного агрегата К 20/30 с асинхронным электродвигателем АИР 100 S2 номинальной мощностью 4 кВт. Насосный агрегат смонтирован на бетонном фундаменте. Обвязка насосного агрегата обеспечивается запорными вентилями, соединенными с буферной емкостью посредством ПВХ спирально-витых шлангов серии 1610 L ВС-63. Внешний вид установки показан на рисунке 2.2.

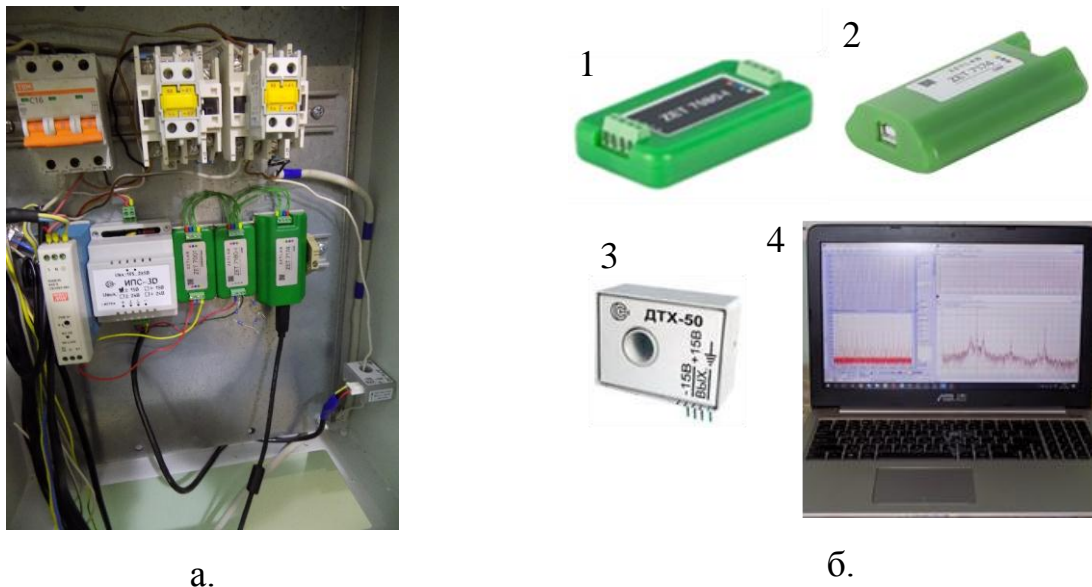
Сборка, разборка, монтаж и подключение установки в процессе эксперимента выполнены с учетом требований следующих документов: ГОСТ 22247-96, СТО 70238424.29.160.30.004-2009, ГОСТ Р 53672-2009, ГОСТ IEC 61010-1-2014, Правил устройства электроустановок (ПУЭ) 7-е издание, Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭ), Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок (ПОТЭУ) и руководств по эксплуатации насоса и электродвигателя [9,22,31,38,82,97].



Рисунок 2.2 – Общий вид экспериментальной установки

Комплект пусковой, защитной и измерительной аппаратуры смонтирован в настенном шкафу со смотровой дверцей. Канал измерения включает в себя датчик тока на эффекте Холла серии ДТХ-50, подключаемый к одной из фаз линии питания электродвигателя, измерительный модуль ZET 7180-I, преобразующий аналоговый сигнал с датчика в сигнал цифрового интерфейса CAN 2.0, соединитель измерительных линий ZET 7001 и преобразователь интерфейса ZET 7174, выход которого, посредством интерфейса USB 2.0, подключается к персональному компьютеру (ПК) (ноутбуку) с предустановленным ПО ZETLab, позволяющим выполнять анализ амплитудно-частотного спектра сигнала с записью результатов в файл программы, контроль действующих значений токов, вывод осциллограммы и множество других функций [117]. Питание

датчика обеспечивается блоком питания ИПС-3D с выходным напряжением $\pm 15\text{В}$, питание измерительного модуля и преобразователя интерфейса обеспечивается блоком питания +24 В. Комплект измерительной аппаратуры показан на рисунке 2.3.



а – смонтированная аппаратура в шкафу; б – аппаратура канала измерения
 1 – измерительный модуль; 2 – преобразователь интерфейса; 3 – датчик тока;
 4 – персональный компьютер

Рисунок 2.3 – Комплект измерительной аппаратуры

Контроль общего уровня вибрации агрегата выполнен с использованием портативного виброметра Smart Sensor AR63B, представленного на рисунке 2.4. Виброметр позволяет выполнить измерение СКЗ виброскорости в низкочастотном диапазоне: 10-1000 Гц.



Рисунок 2.4 – Портативный виброметр Smart Sensor AR63B

Выбор, подключение, наладка и эксплуатация аппаратуры выполнены с учетом требований стандартов [20,23,31], а также указаний руководств и инструкций по эксплуатации соответствующих средств измерений.

В таблице Б.1 Приложения Б представлены основные технические характеристики используемого измерительного оборудования.

Структура экспериментальной установки представлена на рисунке 2.5.

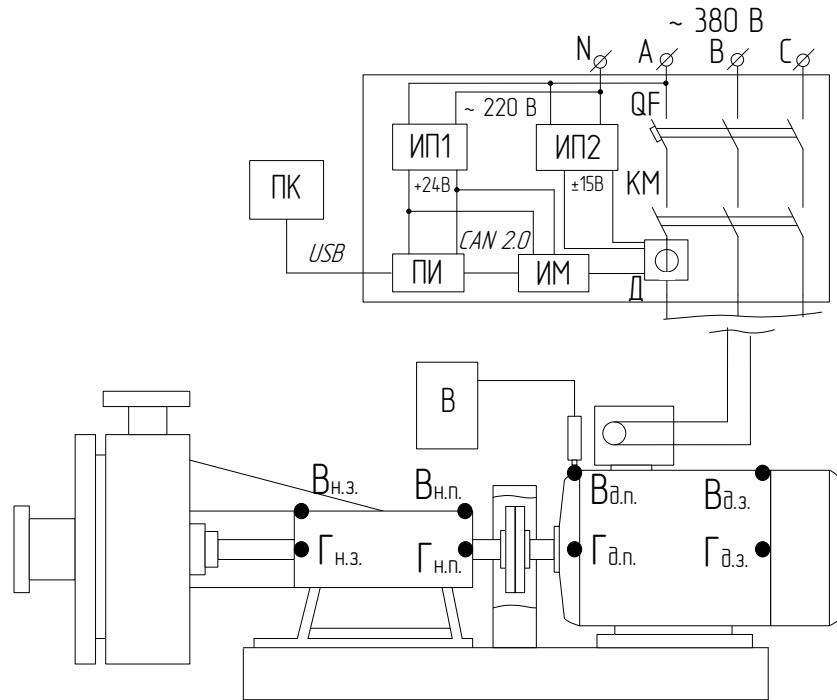


Рисунок 2.5 – Структура экспериментального комплекса

На рисунке 2.5 приняты следующие обозначения: Д – датчик тока; ИМ – измерительный модуль; ПИ – преобразователь интерфейса; ИП1,2 – источники питания +24 В и ±15В соответственно; ПК – персональный компьютер; QF – автоматический выключатель; КМ – силовые контакты контактора; В – портативный виброметр; $V_{н.п.}$, $V_{н.з.}$, $\Gamma_{н.п.}$, $\Gamma_{н.з.}$ – точки контроля соответственно вертикальной и горизонтальной составляющих вибрации переднего и заднего подшипников насоса; $V_{д.п.}$, $V_{д.з.}$, $\Gamma_{д.п.}$, $\Gamma_{д.з.}$ – точки контроля соответственно вертикальной и горизонтальной составляющих вибрации переднего и заднего подшипников электродвигателя [107].

2.2.2 Методика экспериментального исследования

Сформированный на основе последовательности операций оценки состояния узлов по анализу спектров тока двигателя, определенной в параграфе 1.2, порядок проведения экспериментального исследования представлен схемой на рисунке 2.6.

Компоновка измерительного оборудования выполнена согласно требованиям нормативной документации и изложена в предыдущем пункте 2.2.1.



Рисунок 2.6 – Порядок выполнения экспериментального исследования

С целью определения диагностических параметров определения состояния узлов в экспериментальном ЦНА реализовано искусственное создание повреждений различного уровня следующих, часто встречающихся, разновидностей: нарушение центровки валов насоса и электродвигателя, избыточный абразивный износ дорожек качения и повреждение сепаратора подшипников насоса и двигателя.

Нарушение центровки валов.

Для оценки уровня расцентровки использовано центровочное устройство с индикаторами часового типа, показанное на рисунке 2.7. Количественно, значение показателя расцентровки l в радиальном и осевом направлениях при эксперименте варьируется в диапазоне: $l = 0,12 \div 2,2$ мм (допустимое по руководству 0,12 мм). Показатель принимается по максимальному значению отклонения a , либо b , что проиллюстрировано на рисунке 2.8.



Рисунок 2.7 – Центровочное устройство

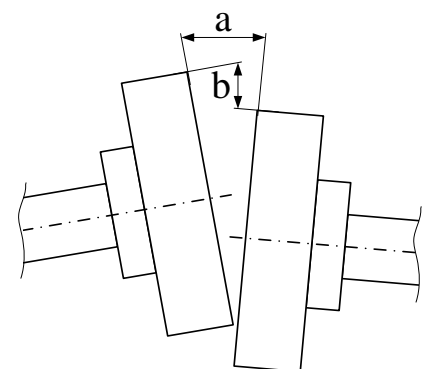


Рисунок 2.8 – К определению показателя расцентровки

Абразивный износ дорожек качения подшипников.

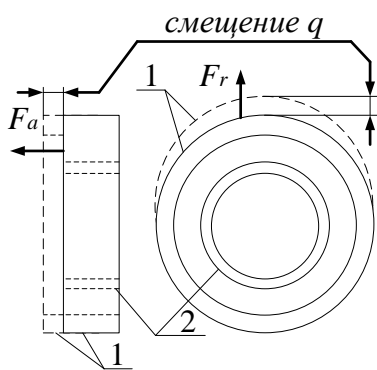
Экспериментальная оценка диагностического признака повышенного износа дорожек качения подшипников выполнена при установке в агрегат подготовленных подшипников с различным уровнем искусственно созданного абразивного износа дорожек качения.

В количественном отношении поврежденность q определена по максимальному значению смещения наружного кольца (1) относительно внутреннего (2) (люфт) при воздействии внешних сил в радиальном F_r и осевом F_a направлениях. Схема определения q , показана на рисунке 2.9 а.

В процессе эксперимента значение отклонения изменяется в пределах $q = 0,08 \div 0,55$ мм и контролируется закрепленным индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм.

Повреждение сепаратора подшипников качения насоса.

Неисправность сепаратора подшипников, показанная на рисунке 2.9 б, создается путем расклепывания и излома частей сепаратора с разными уровнями поврежденности. За максимальный уровень поврежденности принято состояние сепаратора при расклепывании двух секций.



а – схема определения уровня износа дорожек качения

б – повреждение сепаратора

Рисунок 2.9 – К определению поврежденности подшипников качения

Центровка валов при сборках и монтаже агрегата в процессе эксперимента выполнена центровочным устройством с индикаторами часового типа (см. рисунок 2.7). В соответствии с указаниями руководств по

эксплуатации уровень расцентровки не превышает 0,12 мм, за исключением эксперимента по расцентровке валов.

Измерение параметров спектра тока и вибрации.

В качестве токового диагностического параметра принято относительное значение амплитуды информативных частотных составляющих спектров тока: $A'_i = \frac{A_i}{A_{50}}$, где A_i, A_{50} – соответственно значения амплитуд информативной частотной составляющей и основной гармоники на частоте 50 Гц. Параметром, связанным с диагностическим и, характеризующим техническое состояние агрегата, является СКЗ виброскорости: $V_{СКЗ}$, мм/с.

Мониторинг и фиксация значений относительных амплитуд частотных составляющих спектра тока статора двигателя выполнены путем установки бесконтактных датчиков тока в точке одной из фаз на линии питания электродвигателя в щите питания и последующей обработке сигнала аппаратными и программными средствами с учетом рекомендаций ГОСТ ISO 20958-2015 [32] и методики диагностирования механизмов с электроприводом по потребляемому току [2].

Измерения СКЗ вибрации выполнены в двух взаимно-перпендикулярных радиальных направлениях на крышках подшипников насоса и электродвигателя агрегата в соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО 13373-1-2009, СА 03-001-05, ГОСТ Р 55265.7-2012 (ИСО 10816-7:2009). За общий уровень вибрации в рамках каждого измерения принято максимальное значение СКЗ виброскорости в любой точке контроля [39,40,88].

Согласно указаниям руководств по эксплуатации насоса и электродвигателя агрегата, а также ГОСТ 10816-1 [34] при работе насоса и проведении измерений вибрации необходимо обеспечить несовпадение значений собственной частоты колебаний фундамента с частотой вращения агрегата и частотой напряжения питания электродвигателя. Можно считать,

что данное условие выполняется, поскольку в процессе эксперимента, фиксируемые значения СКЗ вибрации несущих элементов фундамента вблизи подшипниковых опор не превышает 50% значения тех же вибрационных параметров соответствующих подшипников, фиксируемых в идентичных направлениях [34].

Определение необходимого объема измерений.

Для оценки достаточного объема измерений необходимого для получения надежных статистических параметров предварительно выполнены измерения объемом $n = 20$, представленные в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Предварительные измерения для определения объема выборок

№ измерения	A'_{100}	$V_{СКЗ}$, мм/с
1	0,616	3
2	0,646	3,2
3	0,636	3,2
4	0,645	3,5
5	0,648	3,3
6	0,654	2,5
7	0,660	3
8	0,673	2,6
9	0,661	2,8
10	0,678	2,6
11	0,676	2,9
12	0,676	2,9
13	0,678	2,9
14	0,673	2,9
15	0,668	3,1
16	0,672	3,2
17	0,675	2,9
18	0,661	3,0
19	0,678	3,0
20	0,670	2,8

При определении минимального объема выборок должна учитываться систематическая ошибка измерения, определяемая классом точности измерительной аппаратуры [46], или предельным значением основной приведенной погрешности.

Предельные значения основных приведенных погрешностей компонентов измерительного канала по току: датчик тока, измерительный

модуль, а также вибрметра приняты согласно паспортным данным, приведенным в таблице Б.1 Приложения Б. Общее значение для преобразователя интерфейса и ПО принято 2%.

Оценка границы погрешности измерительного канала по току (суммарного среднего квадратического отклонения (СКО) измеряемой величины) при последовательном одноканальном соединении средств измерений и измерительных устройств [48,85]:

$$\sigma_{\Sigma} = K \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2} = K \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{\gamma_i^2}{3}} = 1,2 \cdot \sqrt{\frac{1^2}{3} + \frac{1^2}{3} + \frac{2^2}{3}} = 1,67\%, \quad (2.1)$$

где $K = 1,2$ – поправочный коэффициент;

$\sigma_i = \frac{\gamma_i}{\sqrt{3}}$ – оценка границы i -ой составляющей относительной

погрешности (СКО для одного средства измерения) [48,72];

γ_i – предельное значение основной приведенной погрешности прибора.

По предварительно полученной выборке (см. таблицу 2.1) вычисляются:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}; W = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100\%, \quad (2.2)$$

где \bar{x} , S , W – выборочные среднее и среднее квадратическое отклонение, и коэффициент вариации.

В практике измерений считается достаточным выполнение требования [46]:

$$d \leq \frac{\delta}{2} = \frac{\sigma_{\Sigma}}{2}, \quad (2.3)$$

где d – граница доверительного интервала для оценок;

δ – систематическая ошибка измерений (в настоящей работе приравнивается к σ_{Σ}).

Необходимый объем измерения для достаточного уменьшения влияния случайной ошибки измерения при наличии систематической определяется по табличным значениям из [46] в соответствии с величиной: $\frac{d}{W}$.

Для предварительной выборки по параметру A'_{100} рассчитаны следующие значения: $\bar{x} = 0,662$; $S = 0,017$; $W = 2,53\%$; $d / W = 0,33$; $n_{\min} = 46$ при заданной надежности $\gamma = 0,95$.

Для выборки по параметру $V_{СКЗ}$: $\bar{x} = 4,4$; $S = 0,312$; $W = 7,07\%$; $d / W = 0,354$; $n_{\min} = 46$.

Таким образом, по результатам проверки требуется выполнить 46 измерений для каждого состояния объекта, т.е. частные выборки по уровням поврежденностей должны содержать минимум 46 значений параметров.

Оценка влияния сторонних помех на амплитудный спектр тока.

Известно, что в процессе диагностических обследований оборудования при анализе спектра сигнала тока двигателя существует вероятность проявления в спектре тока сторонних частотных составляющих, поступающих из питающей сети по причине наличия в ней электрооборудования с нелинейной вольт (вебер) – амперной характеристикой (выпрямители, инверторы, частотные преобразователи), аппаратов с электрической дугой и разрядом, установки с магнитными цепями в режиме насыщения [71,76,90,102]. При этом возможна модуляция диагностических параметров сторонними гармониками в сигнале, что без должного учета может стать причиной ложного заключения при определении технического состояния оборудования.

Для определения наличия сторонних гармоник в спектре тока предварительно зафиксирован амплитудный спектр тока линии питания неработающего двигателя той же фазы (фаза «А» на рисунке 2.5), ток которой измерялся в процессе эксперимента для оценки диагностических признаков дефектов. Измерения сигнала и анализ спектра тока выполнены

программно-аппаратурными средствами, описанными в параграфе 2.2 при включенном положении пускозащитной аппаратуры (автоматический выключатель и электромагнитный контактор) (см. рисунок 2.5) и отсоединении жил питающего кабеля от выводов обмотки статора двигателя. При этом между свободным концом фазы «А» и нейтральным проводником «N» включается ветвь из семи последовательно-соединенных силовых резисторов HL05006Z22R00JJ номинальным сопротивлением 22 Ом, мощностью 50 Вт и точностью $\pm 5\%$. Резисторы необходимы для обеспечения измерения сигнала тока в фазе, при этом, представляя собой нагрузку с активным характером сопротивления, резисторы не создают дополнительных искажений сигнала тока.

Амплитудный спектр тока фазы «А» линии питания неработающего электродвигателя агрегата представлен на рисунке 2.10.

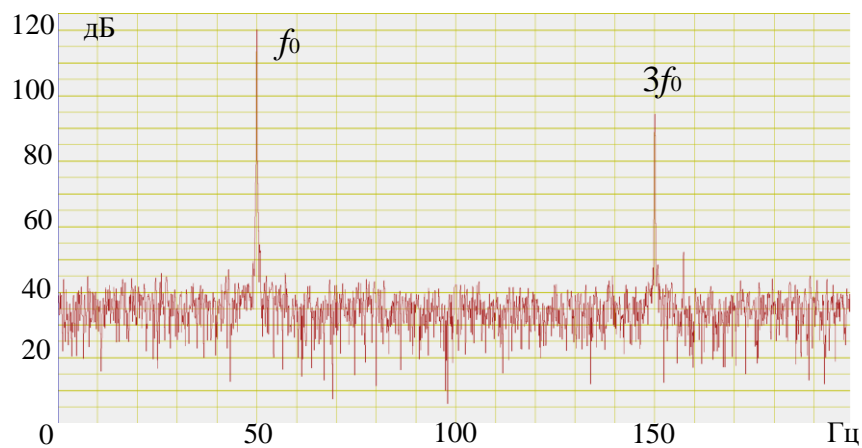


Рисунок 2.10 – Спектр фазного тока линии питания двигателя

В частотной области 0-200 Гц отмечается наличие сторонней гармоники кратной основной на частоте питания сети: $f_{cm} = 3f_0$. Остальные составляющие не выделяются и имеют уровень шумов.

Оценки спектров тока фазы линии питания неработающего электродвигателя выполнены в течение экспериментальных исследований непосредственно перед каждым запуском насосного агрегата. Наличие частотных составляющих в спектре тока на информативных частотах выявлено не было.

Математическая обработка данных.

По результатам измерений формируется база данных, представляющая собой совокупности значений диагностических параметров и параметра вибрации ЦНА, соответствующие различным уровням искусственно создаваемых дефектов.

Общие выборки значений измеряемых параметров, включающие в себя частные выборки по уровням дефектов (по опытам), получаются из исходных совокупностей измерений путем исключения грубых ошибок наблюдения по правилу трех сигм, которое определяет границы интервала практически возможных значений нормально распределенной величины: $[\bar{x} - 3\sigma; \bar{x} + 3\sigma]$, где \bar{x} – среднее статистическое значение величины, σ – среднее квадратическое отклонение [13].

Одним из признаков корректности полученных в процессе исследований данных является соответствие распределения измеряемой величины нормальному закону распределения [74,100]. В этой связи по всем частным выборкам выполнены проверки гипотез о соответствии величин параметров A_i' и $V_{СКЗ}$ нормальному закону распределения по критерию Шапиро-Уилка [57]:

$$W = \frac{1}{s^2} \cdot \left[\sum_{i=1}^k a_{n-i+1} (x_{n-i+1} - x_i) \right]^2 > W(\alpha), \quad (2.4)$$

где $s^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$; $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$;

n – объем выборки; $k = n / 2$;

a_{n-i+1} – табличные коэффициенты [57, табл. 64];

$W(\alpha)$ – критическое значение статистики [57, таблица 66];

α – уровень значимости (принимается 0,05).

Для подтверждения равнозначности измерений по опытам с различными уровнями неисправностей для отдельных узлов ЦНА выполнены проверки гипотез о равенстве дисперсий частных выборок по критерию Фишера (F -критерию) [13]:

$$F_{\text{набл}} = \frac{S_{\text{max}}^2}{S_{\text{min}}^2} < F_{\text{кр}}(\alpha; k_1; k_2), \quad (2.5)$$

где $S_{\text{min}}^2, S_{\text{max}}^2$ – соответственно минимальное и максимальное значения из рассматриваемых дисперсий;

$F_{\text{кр}}(\alpha; k_1; k_2)$ – критическое значение статистики [13, таблица 6];

α – уровень значимости (0,05);

$k_1 = n_1 - 1$ – число степеней свободы числителя;

$k_2 = n_2 - 1$ – число степеней свободы знаменателя.

По частным выборкам определены выборочные средние значения измеренных параметров и средствами Microsoft Excel определены зависимости полученных значений параметров от показателей уровней неисправностей в узлах видов: $A'_i = f(l)$, $A'_i = f(q)$, $V_{\text{СКЗ}} = f(l)$, $V_{\text{СКЗ}} = f(q)$. Установлены уравнения регрессии и коэффициенты корреляции.

Для проверки значимости коэффициентов корреляции между выборочными средними значениями параметров и показателями неисправностей используется следующее условие (при $n < 15$) [46,57]:

$$r^* = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}; \quad r = r^* \left[1 + \frac{1 - r^{*2}}{2(n-3)} \right]; \quad |r| \geq r_a, \quad (2.6)$$

где \bar{x}, \bar{y} – средние статистические значения параметров;

r_a – критическое значение коэффициента корреляции [57, таблица 217];

n – объем выборки.

Соотнесением уравнений регрессии для зависимостей по диагностическим параметрам и СКЗ виброскорости получены уравнения вида: $A'_i = f(V_{\text{СКЗ}})$, позволяющие определить пороговые значения диагностических параметров для границ классов состояний сопряжения валов и подшипников ЦНА согласно вибрационному критерию [88]: «Хорошо» – соответствует исправному состоянию агрегата (X), «Допустимо» – характеризует полностью работоспособное состояние агрегата при малой

вероятности отказа (Д), «Требуется принятия мер (ТПМ)» – допустимо при непродолжительной эксплуатации, «Недопустимо (НД)» – недопустимо при эксплуатации, требуется остановка. Границы установлены в соответствии с параметрами экспериментального агрегата, определяющими категорию классификации: $P_{\text{ном.н}} < 50$ кВт; $h_{\text{дв}} < 132$ мм, где $P_{\text{ном.н}}$ – номинальная мощность насоса, $h_{\text{дв}}$ – высота оси вращения электродвигателя. Поскольку для подобных насоса и двигателя по [88] устанавливаются различные пределы вибрационных параметров, для классификации приняты наименьшие предельные значения.

2.3 Исследование диагностических параметров с помощью имитационного моделирования

2.3.1 Обоснование необходимости моделирования при исследовании диагностических параметров

В соответствии с требованиями нормативно-технической документации в области контроля технического состояния оборудования, в том числе центробежных насосных агрегатов [27,41,43], при создании диагностического обеспечения любого изделия алгоритмы контроля состояния оборудования должны предусматривать учет рабочих и конструктивных параметров оборудования как факторов, существенно влияющих на диагностические параметры. Под рабочими параметрами центробежного насосного агрегата следует понимать рабочие характеристики, являющиеся выходными показателями процесса работы машины: развиваемое давление (напор), производительность, потребляемая мощность, частота вращения ротора. К конструктивным параметрам можно отнести: номинальную мощность агрегата, габариты конструктивных элементов насоса и электродвигателя, коэффициент быстроходности насоса, параметры жесткости элементов опор и т.д.

При эксплуатации центробежных насосных агрегатов в рамках большинства технологических процессов существует необходимость регулирования рабочих параметров агрегатов, для чего применяются различные методы: частичный перепуск воды с линии нагнетания в линию всасывания (байпасирование), регулировка проходного сечения напорного трубопровода задвижкой (дросселирование), обточка рабочего колеса насоса, изменение частоты вращения ротора (частотное регулирование). Первые два метода предполагают изменение напорной характеристики трубопровода, остальные – напорной характеристики насоса. С точки зрения энергоэффективности наиболее предпочтительным является метод частотного регулирования, однако, ввиду относительно высокой стоимости привода для его реализации, на сегодняшний день, остается достаточно распространенным метод дросселирования задвижкой на напорном патрубке, заключающийся в смещении рабочей точки пересечения характеристик насоса и трубопровода в сторону возрастания напора путем повышения гидравлического сопротивления трубопровода [11].

Поскольку при регулировании изменяются рабочие параметры агрегата, такие как развиваемые напор и производительность, необходимо учитывать возможность модуляции диагностических признаков дефектов в независимости от уровня их развития в агрегатах конкретного конструктивного исполнения [104,105].

В то же время диагностические признаки идентичных дефектов в агрегатах с разными конструктивными параметрами, например, номинальной мощностью, также могут существенно отличаться, поскольку, даже в случае рассмотрения геометрически и динамически подобных машин имеет место масштабный фактор, определяющий пропорциональную зависимость между однотипными параметрами и физическими величинами подобных машин [18,62,104,105].

В этой связи можно считать целесообразным постановку математического эксперимента с целью изучения подхода к уточнению

пороговых значений диагностических параметров при возможных изменениях рабочих и конструктивных параметров ЦНА с использованием инструментов имитационного моделирования.

2.3.2 Имитационная модель и параметры моделирования

Для исследования реакции диагностических параметров на изменение конструктивных параметров агрегата в качестве исходных данных модели приняты паспортные и расчетные значения параметров ряда одноступенчатых центробежных насосных агрегатов с насосами консольного типа серии «К» и асинхронными электродвигателями серии «АИР» с синхронной частотой вращения 3000 об/мин, в том числе, агрегат, который использован при постановке эксперимента: К20/30 (используемый в эксперименте), К80-65-160, К80-50-200, К100-65-200. Перечень рассматриваемых агрегатов определен исходя из следующих соображений:

– данные агрегаты являются представителями одной серии и идентичного конструктивного исполнения;

– согласно теориям динамического подобия для центробежных насосов и геометрического подобия для электрических машин данные агрегаты хоть и не являются в полной степени подобными, но имеют близкие по значению коэффициенты подобия. Так для насосов коэффициентом подобия считается коэффициент быстроходности – n_s , определяемый для центробежных насосов в диапазоне: 40-300 [11]. У рассматриваемых насосов коэффициенты быстроходности: $n_s = 63,35$ (К20/30); $n_s = 68,13$ (К80-65-160); $n_s = 78,59$ (К80-50-200); $n_s = 86,92$ (К100-65-200). Для электрических двигателей можно отметить, что закономерности геометрического подобия, т.е. наличие пропорциональных взаимосвязей параметров, выполняются с определенными отклонениями в рамках рассмотрения машин одного конструктивного ряда [18].

Обозначенные суждения позволяют предположить, что, в действительности, теоретические характеристики диагностических

признаков, полученные по результатам моделирования для принятого ряда агрегатов, будут иметь схожий вид с экспериментальной для агрегата К20/30, вследствие близости к подобию. При этом предполагается наличие масштабирования параметров зависимости по причине изменения рабочих и конструктивных параметров.

В качестве изменяющихся рабочих параметров для моделирования приняты параметры напорной характеристики насосного агрегата в относительных единицах: относительный развиваемый напор и производительность, поскольку, как отмечалось выше, на практике часто выполняется регулировка режима работы насоса изменением именно этих параметров.

Для имитирования наличия механической неисправности в моделируемом агрегате и проявления диагностического признака вводится параметр, характеризующий неисправность (параметр неисправности) в виде дополнительного вращающего момента сопротивления, изменяющего по гармоническому закону. Выбор данной величины в качестве диагностического параметра определен зависимостью электрических параметров двигателя от колебаний крутящего момента, которые являются следствием механических неисправностей в оборудовании и тесно связаны с вибрационными характеристиками агрегата, о чем отмечено в параграфе 2.1.

Перечень задаваемых параметров модели представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Задаваемые параметры модели

Тип параметров	Наименование параметра, единица измерения	Обозначение
Конструктивные насоса	номинальный напор, м	$H_{\text{ном}}$
	номинальная производительность, м ³ /ч	$Q_{\text{ном}}$
	номинальный полный КПД	$\eta_{\text{ном}}$
	расчетный угол нагрузки	$\gamma_{\text{р}}^{\text{ном}}$
	наружный диаметр рабочего колеса, м	D_2
Конструктивные	момент инерции ротора,	J

Тип параметров	Наименование параметра, единица измерения	Обозначение
электродвигателя	кг·м ²	
	число пар полюсов	p
	активные сопротивления обмоток статора и ротора, Ом	R_s, R_r
	собственные индуктивности обмоток статора и ротора, Гн	L_{si}, L_{ri}
	взаимная индуктивность между обмотками, Гн	L_m
Рабочие насоса	относительный действительный напор	$H_{д}^*$
	номинальная частота вращения ротора, рад/с	$\omega_{p,ном}$
Рабочие электродвигателя	номинальное фазное напряжение обмотки статора, В	$U_{ном}$
	номинальная частота напряжения питания, рад/с	$\omega_{ном}$

Примечание: порядок определения $\gamma_p^{ном}$ насоса по [62] и параметров модели электродвигателя: $R_s, R_r, L_{si}, L_{ri}, L_m$ по [99] представлены в Приложении В.

Модель центробежного насосного агрегата представляет собой математические описания центробежного насоса и асинхронной машины [104,105].

Центробежный насос описывается уравнениями по методу электрогидравлических аналогий, связывающими производительность, напор и мощность в абсолютных и относительных единицах, и расчетный угол нагрузки [62].

Асинхронный электродвигатель описывается системой уравнений в координатах α, β для потокосцеплений статора, преобразованных методом замены переменных путем выражения токов статора и ротора через индуктивности и потокосцепления, дополненную уравнениями определения электромагнитного момента и угловой скорости ротора [59,60].

Уравнения описания центробежного насоса:

$$\begin{aligned}
Q_D^* &= \sqrt{\left[\frac{\gamma_p^{\text{НОМ}}}{\sin \gamma_p^{\text{НОМ}}} - H_D^* \right] / \left(\frac{\gamma_p^{\text{НОМ}}}{\sin \gamma_p^{\text{НОМ}}} - 1 \right)}; \\
N_C^* &= \frac{1}{\eta_{\text{НОМ}}} \cdot [1 + (3 - 2 \cdot H_{\text{ДХХ}}^*) \cdot (Q_D^* - 1)]; \\
Q_D &= Q_D^* \cdot Q_{\text{НОМ}}; H_D = H_D^* \cdot H_{\text{НОМ}}; N_C = N_C^* \cdot N_{\text{ГИД}}; \\
N_{\text{ГИД}} &= \frac{Q_{\text{НОМ}} \cdot H_{\text{НОМ}} \cdot \rho}{102}; \\
M_c &= \frac{N_C}{\omega_p},
\end{aligned} \tag{2.7}$$

где Q_D^* – относительная действительная производительность насоса;

$H_{\text{ДХХ}}^*$ – относительный напор насоса в режиме холостого хода;

N_C^* – относительная потребляемая мощность насоса;

Q_D, H_D – действительные производительность и напор насоса;

$N_{\text{ГИД}}$ – гидравлическая мощность насоса;

M_c – момент сопротивления на валу насоса.

Уравнения описания асинхронного двигателя:

$$\begin{cases}
\psi_{s\alpha} = [u_{s\alpha} - \psi_{s\alpha} \cdot \left(\frac{R_s \cdot L_r}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \right) + \psi_{r\alpha} \cdot \left(\frac{R_s \cdot L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \right)] \cdot \frac{1}{s}; \\
\psi_{s\beta} = [u_{s\beta} - \psi_{s\beta} \cdot \left(\frac{R_s \cdot L_r}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \right) + \psi_{r\beta} \cdot \left(\frac{R_s \cdot L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \right)] \cdot \frac{1}{s}; \\
\psi_{r\alpha} = [-\psi_{r\alpha} \cdot \left(\frac{R_r \cdot L_s}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \right) + \psi_{r\alpha} \cdot \left(\frac{R_r \cdot L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \right) - p \cdot \omega_p \cdot \psi_{r\beta}] \cdot \frac{1}{s}; \\
\psi_{r\beta} = [-\psi_{r\beta} \cdot \left(\frac{R_r \cdot L_s}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \right) + \psi_{r\beta} \cdot \left(\frac{R_r \cdot L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \right) + p \cdot \omega_p \cdot \psi_{r\alpha}] \cdot \frac{1}{s}; \\
M_\alpha = 1,5 \cdot p \cdot \left(\frac{L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \right) \cdot (\psi_{s\beta} \cdot \psi_{r\alpha} - \psi_{s\alpha} \cdot \psi_{r\beta}); \\
\omega_p = p \cdot \frac{M_\alpha - M_c}{J} \cdot \frac{1}{s},
\end{cases} \tag{2.8}$$

где $\psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}, \psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}$ – потокосцепления статора и ротора по осям α, β ;

$u_{s\alpha}, u_{s\beta}$ – напряжения статора по осям;

$s = \frac{d}{dt}$ – оператор Лапласа.

Составляющая тока статора по одной из осей, содержащая информацию о диагностическом признаке выражается через потокосцепления и индуктивности:

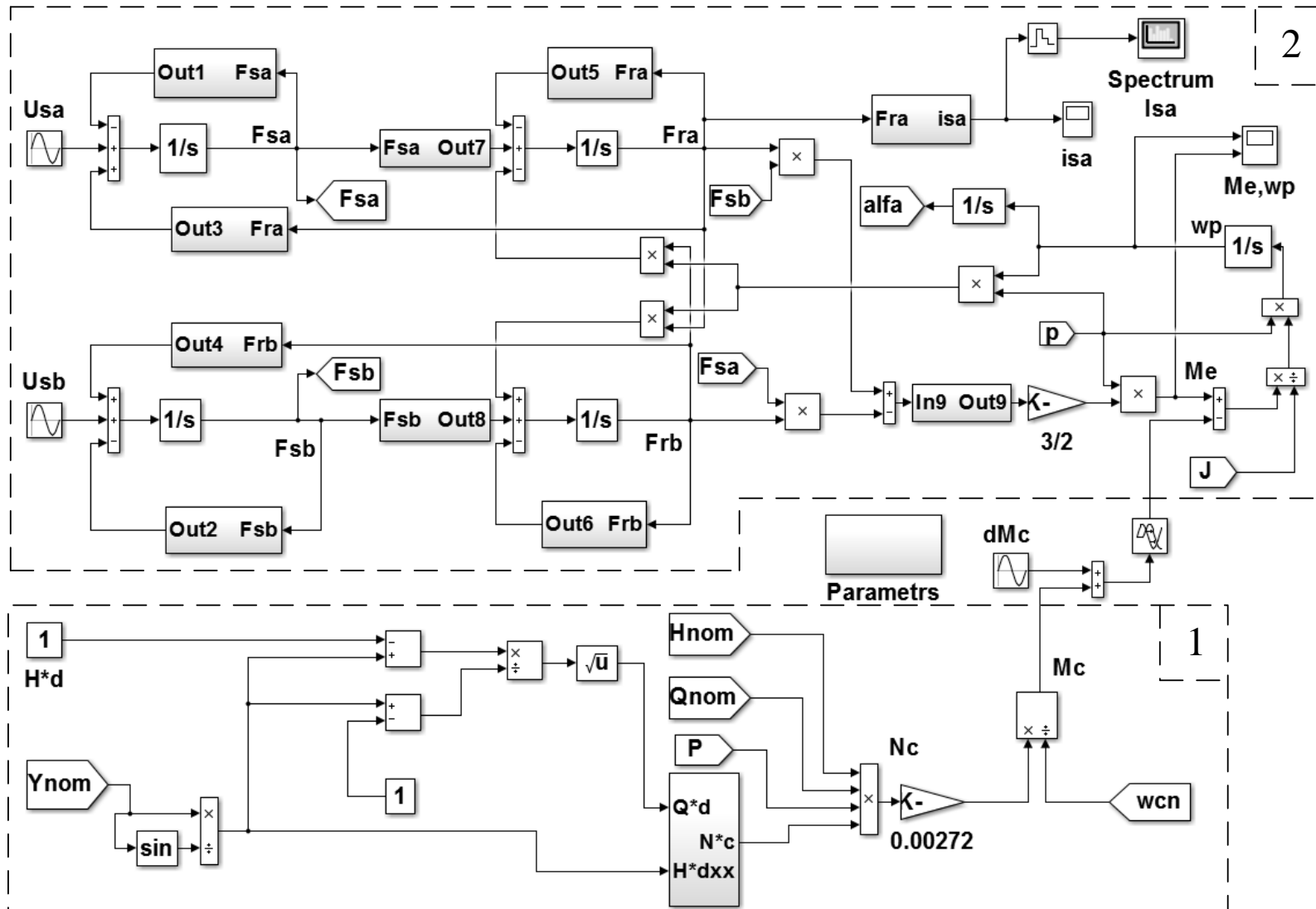
$$i_{s\alpha} = \Psi_{s\alpha} \cdot \frac{L_r}{L_s \cdot L_r - L_m^2} - \Psi_{r\alpha} \cdot \frac{L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2}. \quad (2.9)$$

Для создания имитационной модели используется программный комплекс Matlab R2015a (8.5.0.197613) с пакетом Simulink как один из наиболее эффективных инструментов наглядного построения и исследования имитационных моделей различных технических систем.

На рисунке 2.11 изображена полная имитационная модель центробежного насоса. Модель включает в себя совокупности блоков описывающих центробежный насос (1) и асинхронный электродвигатель (2), по ранее рассмотренным аналитическим зависимостям.

Связь между моделями насоса и двигателя обеспечивается путем соединения блоков определяющих электромагнитный момент двигателя « M_c » и момент сопротивления насоса « M_c ».

Как отмечалось, наличие механической неисправности в агрегате имитируется путем суммирования постоянной составляющей M_c с величиной переменного момента « dM_c ». В блоке « dM_c » типа Sine Wave задается амплитуда, начальная фаза и частота гармонических колебаний.



1 – блоки для описания центробежного насоса; 2 – блоки для описания электродвигателя

Рисунок 2.11 - Полная имитационная модель центробежного насосного агрегата

2.4 Выводы по главе

2.4.1 Ввиду зависимости параметров вибрации и спектра тока электродвигателя ЦНА от значений механических колебательных сил, характеризующих техническое состояние узлов, предполагается возможность определения взаимосвязи параметра вибрации с диагностическими параметрами спектра тока, которая позволит на предварительных этапах контролей определить первоначальные пороговые значения диагностических параметров для установления границ видов состояний узлов ЦНА.

2.4.2 Сформированная методика экспериментального исследования предполагает преднамеренное изменение состояний сопряжения валов и подшипников качения консольного ЦНА и устанавливает порядок измерений параметров спектра тока и вибрации и математической обработки данных.

2.4.3 При определении пороговых значений диагностических параметров следует учитывать возможность их отклонения при изменении рабочих параметров насоса по причине их регулирования дросселированием и подготовке операций мониторинга на модели агрегата другой мощности. Методика имитационного моделирования для изучения отклонения диагностических параметров содержит имитационную модель консольного ЦНА, основанную на аналитических выражениях теории электромеханики и электрогидравлических аналогий, перечень задаваемых параметров модели и порядок моделирования.

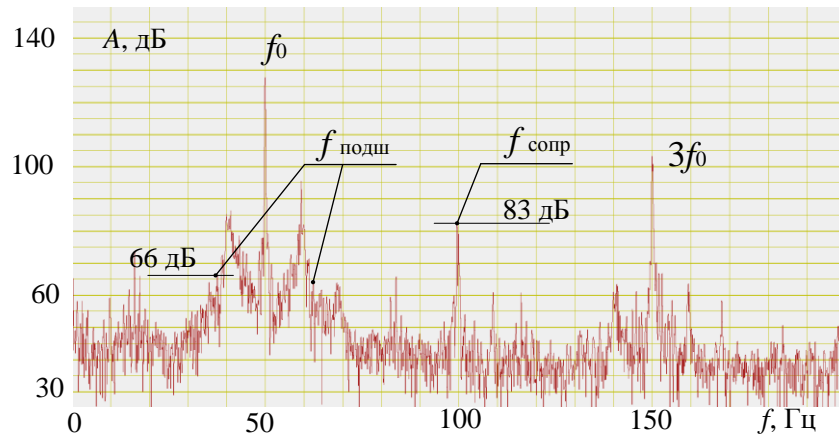
3. Результаты экспериментального исследования по определению предельных состояний ресурсопределяющих узлов ЦНА

3.1 Диагностические параметры изменения состояний подшипников качения и сопряжения валов

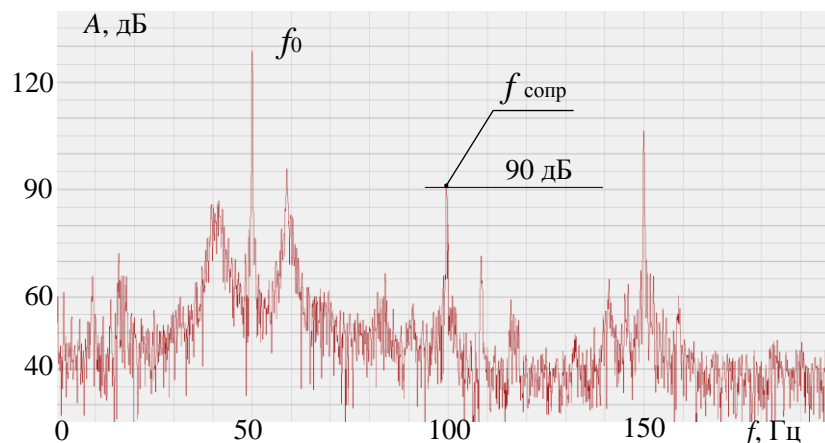
В процессе эксперимента получены амплитудные спектры сигнала фазного тока двигателя ЦНА при изменении состояний подшипников и сопряжения валов – расцентровке.

Пояснения к определению показателей изменения состояния узлов, в частности нарушения соосности валов и износа подшипников качения, даны в пункте 2.2.2.

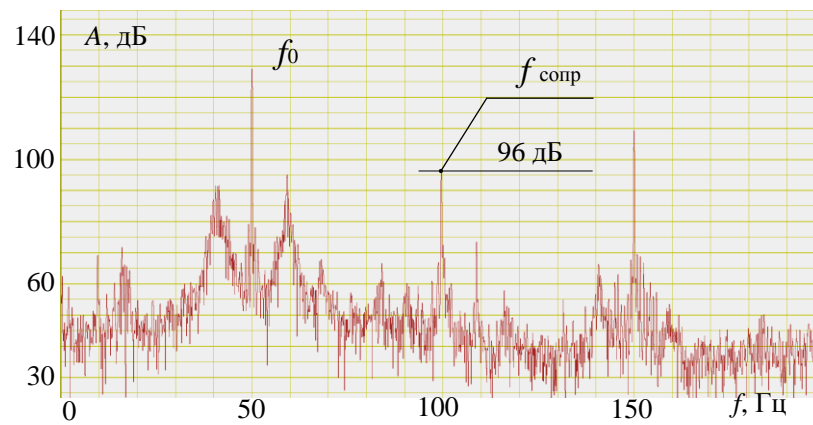
Примеры спектров тока, зафиксированных при разном уровне расцентровки валов представлены на рисунках 3.1 а, б, в.



а – узлы ЦНА без дефектов



б – расцентровка валов 0,8 и 1,1 мм



в – расцентровка валов 1,75 и 2,2 мм

Рисунок 3.1 – Амплитудные спектры тока двигателя ЦНА при расцентровке

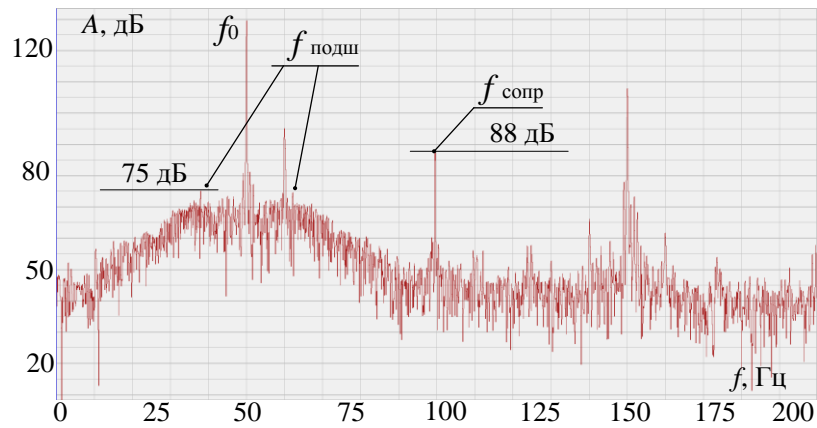
С увеличением величины расцентровки отмечен существенный рост амплитуды гармоника спектра на частоте: $f_{\text{сопр}} = f_0 + f_{\text{вр}}$, где f_0 – частота главной гармоники (50 Гц), $f_{\text{вр}}$ – частота вращения вала [107]. Данное наблюдение согласуется с исследованиями, проведенными коллективом НОУ «Севзапучцентр» и ООО «Вибротехника» [2]

Также при эксперименте зафиксировано повышение СКЗ виброскорости агрегата. Количественные значения диагностических параметров представлены в следующем параграфе.

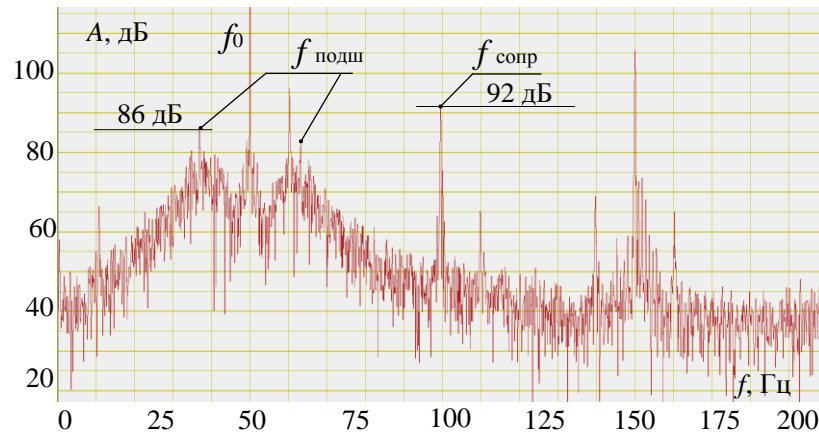
Примеры спектров тока, зафиксированных при разных показателях износа дорожек качения подшипников насоса представлены на рисунках 3.2 а, б.

По результатам эксперимента отмечен значительный рост амплитуд частотных составляющих спектра на частотах $f_{\text{подш}} = f_0 \pm f_{\text{вр}} / 3$, наблюдаемый при каждом увеличении значения показателя износа дорожек качения подшипников насоса [108]. Данное наблюдение согласуется с исследованиями [2], в которых на отмеченных частотах установлены автоколебания ротора механизма.

При этом отмечается увеличение общего уровня СКЗ виброскорости агрегата. Количественные значения диагностических параметров представлены в следующем параграфе ниже.



а – износ подшипников насоса 0,33 мм



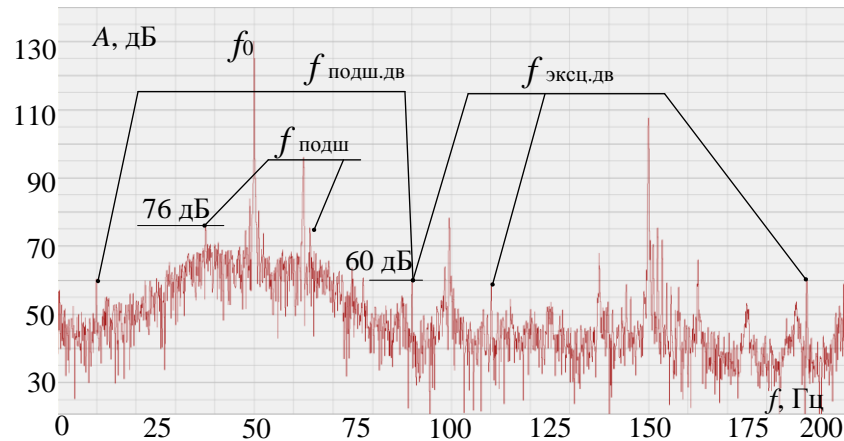
б – износ подшипников насоса 0,45 и 0,55 мм

Рисунок 3.2 – Амплитудные спектры тока двигателя ЦНА при износе подшипников насоса

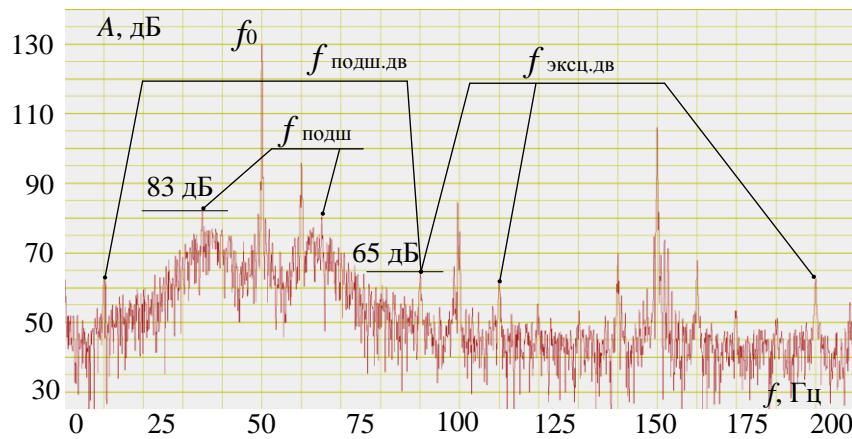
Пример спектров тока, зафиксированных при разных показателях износа дорожек качения подшипников электродвигателя представлены на рисунках 3.3 а, б.

При изменении состояния подшипников электродвигателя, аналогично подшипникам насоса, спектр тока содержит возрастающие составляющие на частотах $f_{\text{подш}} = f_0 \pm f_{\text{вр}} / 3$, а также $f_{\text{подш,дв}} = f_0 \pm 2f_{\text{с}}$, и $f_{\text{эксц,дв}} = kf_{\text{вр}} \pm 12f_{\text{ск}}$, где $f_{\text{с}} \approx 0,4f_{\text{вр}}$ – частота вращения сепаратора подшипника двигателя, $f_{\text{ск}} = sf_0 = (1 - \frac{pf_{\text{вр}}}{f_0}) \cdot f_0$ – частота скольжения ротора двигателя, $k = 2, 4$; p –число пар полюсов обмотки статора двигателя [108]. Частоты $f_{\text{подш,дв}}$ характеризуют автоколебания ротора в подшипниках двигателя, а $f_{\text{эксц,дв}}$ – динамический эксцентриситет ротора двигателя с насыщением сердечника [2]. Т. е. при изменении состояния подшипников двигателя, наряду с информативными составляющими на частотах $f_{\text{подш}}$, дополнительно реагируют составляющие на

частотах $f_{\text{подш.дв}}$ и $f_{\text{эксц.дв}}$, что позволяет отличить наличие износа в подшипниках двигателя.



а – износ подшипников двигателя 0,33 мм



б – износ подшипников двигателя 0,45 и 0,55 мм

Рисунок 3.3 – Амплитудные спектры тока двигателя ЦНА при износе подшипников двигателя

С ухудшением состояния подшипников помимо информативных составляющих $f_{\text{подш}}$ в спектре тока (рисунки 3.2, 3.3 а, б) наблюдается рост составляющей $f_{\text{сопр}}$, что может объясняться проявлением несоосности валов агрегата наряду с увеличением износа подшипников.

При наличии повреждения сепаратора любого уровня наблюдается рост амплитуды частотных составляющих спектра тока на частотах $f_{\text{подш}} = f_0 \pm f_{\text{вр}} / 3$, т.е. на частотах аналогичных информативным составляющим повышенного износа дорожек качения подшипников. При этом стоит отметить, что опыт диагностики повреждений сепаратора показывает множество возможных информативных частотных составляющих спектра на частотах уровнем выше крайней частоты спектра, получаемого экспериментальным оборудованием (200

Гц). Поэтому, результирующий класс технического состояния принято определять по уровню частотных компонент информативных и для износа дорожек и для дефекта сепаратора.

Таким образом, по результатам реализованного эксперимента, для последующего анализа можно обозначить информативные частотные составляющие спектра при определении состояний узлов консольного ЦНА, представленные в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Частоты информативных составляющих спектров

Рассматриваемый узел	Частоты информативных составляющих
1. Сопряжение валов агрегата	$f_{\text{сопр}} = f_0 + f_{\text{вр}}$
2. Подшипники насоса	$f_{\text{подш}} = f_0 \pm f_{\text{вр}} / 3$ к анализу принимается составляющая с наибольшей амплитудой в момент измерения
3. Подшипники электродвигателя	$f_{\text{подш}} = f_0 \pm f_{\text{вр}} / 3$ к анализу принимается составляющая с наибольшей амплитудой в момент измерения; дополнительно для локализации дефекта в двигателе: $f_{\text{подш,дв}} = f_0 \pm 2f_c$ $f_{\text{эксц,дв}} = 2f_{\text{вр}} \pm 12f_{\text{ск}}; f_{\text{эксц,дв}} = 4f_{\text{вр}} - 12f_{\text{ск}}$

Диагностический параметр состояния сопряжения валов определен на соответствующей информативной частоте $f_{\text{сопр}}$ и обозначается: $A'_{\text{сопр}}$.

Диагностический параметр состояния подшипников агрегата определен на соответствующей информативной частоте $f_{\text{подш}}$ и обозначается: $A'_{\text{подш}}$.

Диагностический параметр для локализации изменения состояния подшипников в двигателе: $A'_{\text{дв}} = \frac{A_{(f_{\text{подш,дв}} \cdot f_{\text{эксц,дв}})}}{A_{f_{\text{подш}}}}$, где $A_{(f_{\text{подш,дв}} \cdot f_{\text{эксц,дв}})}$ – среднее значение по амплитудам составляющих на частотах $f_{\text{подш,дв}}$, $f_{\text{эксц,дв}}$.

3.2 Пороговые значения диагностических параметров для определения предельных состояний подшипников и сопряжения валов

Установка пороговых значений диагностических параметров определяющих границы классов технического состояния узлов ЦНА выполняется с помощью выражений связи диагностических параметров с параметром вибрации вида: $A'_i = f(V_{СКЗ})$. При известных нормируемых значениях СКЗ виброскорости для ЦНА можно установить пороги для диагностического параметра.

Состояние сопряжения валов.

Общая выборка значений диагностических параметров и параметра вибрации, полученных при экспериментальном исследовании несоосности валов двигателя и насоса, а также расчетные характеристики по выборкам представлены в таблице Г.1 Приложения Г.

Проверка гипотез о нормальности распределения величин по выражению (2.4):

1) Опыт 1:

– гипотеза о нормальности распределения $A'_{СОПР}$:

$W = 0,937 > W(\alpha) = 0,924$ (при $\alpha = 0,05$), следовательно, нет оснований

отвергать гипотезу о нормальности распределения $A'_{СОПР}$;

– гипотеза о нормальности распределения $V_{СКЗ}$:

$W = 0,966 > W(\alpha) = 0,924$ (при $\alpha = 0,05$), следовательно, нет оснований

отвергать гипотезу о нормальности распределения $V_{СКЗ}$.

2) Опыт 2:

– для $A'_{СОПР}$: $W = 0,929 > W(\alpha) = 0,924$ (при $\alpha = 0,05$);

– для $V_{СКЗ}$: $W = 0,948 > W(\alpha) = 0,924$ (при $\alpha = 0,05$),

следовательно, нет оснований отвергать гипотезы;

3) Опыт 3:

– для $A'_{СОПР}$: $W = 0,941 > W(\alpha) = 0,924$ (при $\alpha = 0,05$);

– для $V_{СКЗ}$: $W = 0,926 > W(\alpha) = 0,924$ (при $\alpha = 0,05$),

следовательно, нет оснований отвергать гипотезы;

4) Опыт 4:

– для $A'_{\text{СОПР}}$: $W = 0,931 > W(\alpha) = 0,924$ (при $\alpha = 0,05$);

– для $V_{\text{СКЗ}}$: $W = 0,943 > W(\alpha) = 0,924$ (при $\alpha = 0,05$),

следовательно, нет оснований отвергать гипотезы;

5) Опыт 5:

– для $A'_{\text{СОПР}}$: $W = 0,927 > W(\alpha) = 0,924$ (при $\alpha = 0,05$);

– для $V_{\text{СКЗ}}$: $W = 0,934 > W(\alpha) = 0,924$ (при $\alpha = 0,05$),

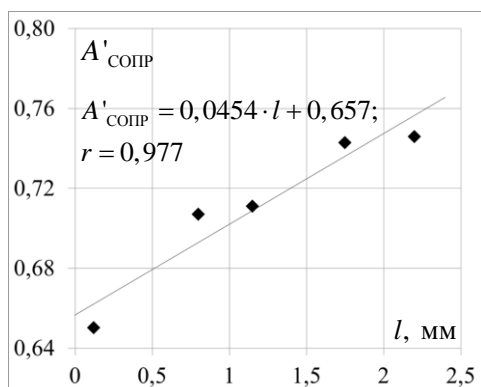
следовательно, нет оснований отвергать гипотезы;

Проверка гипотез о равенствах дисперсий по выражению (2.5):

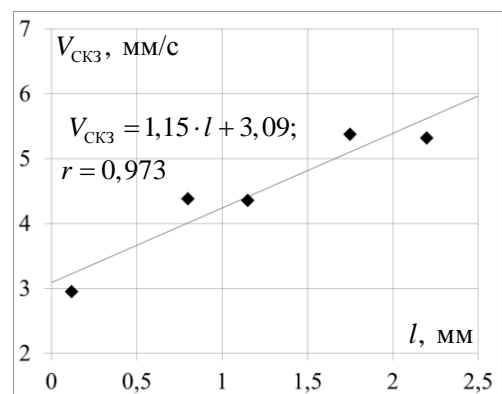
– гипотеза о равенстве дисперсий пяти выборок $S_1^2, S_2^2, S_3^2, S_4^2, S_5^2$ по параметру $A'_{\text{СОПР}}$: $F_{\text{набл}} = 1,858 < F_{\text{крит}}(\alpha; k_1; k_2) = 1,88$ (при $\alpha = 0,05$), следовательно, нет оснований отвергать гипотезу и различие между выборочными дисперсиями незначимо;

– гипотеза о равенстве дисперсий пяти выборок $S_1^2, S_2^2, S_3^2, S_4^2, S_5^2$ по параметру $V_{\text{СКЗ}}$: $F_{\text{набл}} = 1,439 < F_{\text{крит}}(\alpha; k_1; k_2) = 1,88$ (при $\alpha = 0,05$), следовательно, нет оснований отвергать гипотезу и различие между выборочными дисперсиями незначимо.

По имеющимся выборочным средним значениям $A'_{\text{СОПР}}$ и $V_{\text{СКЗ}}$ по пяти опытам с разным показателем расцентровки построены зависимости: $A'_{\text{СОПР}} = f(l)$, $V_{\text{СКЗ}} = f(l)$ и инструментами Microsoft Excel определены уравнения регрессии, представленные на рисунках 3.4 а,б.



а – зависимость $A'_{\text{СОПР}} = f(l)$



б – зависимость $V_{\text{СКЗ}} = f(l)$

Рисунок 3.4 – Значения $A'_{\text{СОПР}}$, $V_{\text{СКЗ}}$ при разных уровнях расцентровки

Вычисление и проверка значимости коэффициентов корреляции по выражению (2.6):

– для $A'_{\text{СОПР}} = 0,0454 \cdot l + 0,657$:

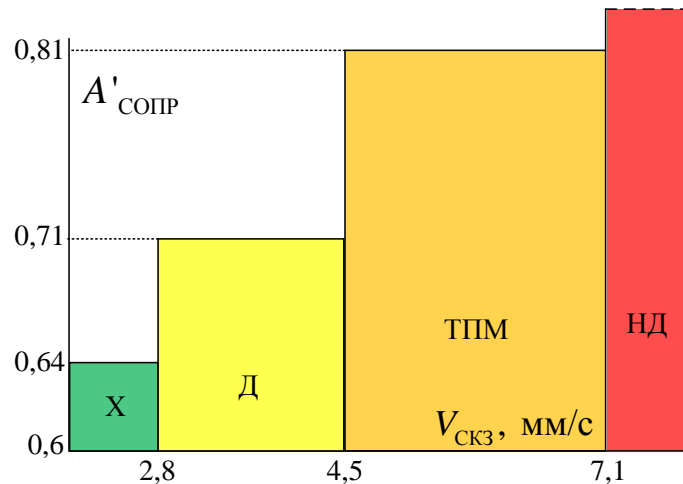
$|r| = 0,977 \geq r_a = 0,878$ (для $n = 5$, при $\alpha = 0,95$) [57, табл. 217];

– для $V_{\text{СКЗ}} = 1,15 \cdot l + 3,09$: $|r| = 0,973 \geq r_a = 0,878$.

Соотнесением полученных уравнений зависимостей $A'_{\text{СОПР}} = f(l)$, $V_{\text{СКЗ}} = f(l)$ определено выражение $A'_{\text{СОПР}} = f(V_{\text{СКЗ}})$:

$$A'_{\text{СОПР}} = 0,038V_{\text{СКЗ}} + 0,54, \quad (3.1)$$

которое позволяет установить пороговые значения $A'_{\text{СОПР}}$, соответствующие известным нормам на СКЗ виброскорости ($V_{\text{СКЗ}}$), и определяющие границы видов состояний сопряжения валов ЦНА. Графическое представление границ видов, соответствующих нормам по [88] отражено на рисунке 3.5.



X-«хорошо», Д-«допустимо», ТПМ-«требует принятия мер», НД-«недопустимо»

Рисунок 3.5 – Границы видов состояния сопряжения валов

Состояние подшипников качения.

Общая выборка значений диагностических параметров и параметра вибрации, полученных при экспериментальном исследовании повышенного абразивного износа дорожек качения подшипников, а также расчетные характеристики по выборкам представлены в таблице Г.2 Приложения Г.

Проверка гипотез о нормальности распределения величин по выражению (2.4):

1) Опыт 1:

– гипотеза о нормальности распределения $A'_{\text{ПОДШ}}$:
 $W = 0,938 > W(\alpha) = 0,924$ (при $\alpha = 0,05$), следовательно, нет оснований отвергать гипотезу о нормальности распределения $A'_{\text{ПОДШ}}$;

– гипотеза о нормальности распределения $V_{\text{СКЗ}}$:
 $W = 0,956 > W(\alpha) = 0,924$ (при $\alpha = 0,05$), следовательно, нет оснований отвергать гипотезу о нормальности распределения $V_{\text{СКЗ}}$;

2) Опыт 2:

– для $A'_{\text{ПОДШ}}$: $W = 0,954 > W(\alpha) = 0,924$ (при $\alpha = 0,05$);
 – для $V_{\text{СКЗ}}$: $W = 0,928 > W(\alpha) = 0,924$ (при $\alpha = 0,05$),
 следовательно, нет оснований отвергать гипотезы;

3) Опыт 3:

– для $A'_{\text{ПОДШ}}$: $W = 0,957 > W(\alpha) = 0,924$ (при $\alpha = 0,05$);
 – для $V_{\text{СКЗ}}$: $W = 0,929 > W(\alpha) = 0,924$ (при $\alpha = 0,05$),
 следовательно, нет оснований отвергать гипотезы;

4) Опыт 4:

– для $A'_{\text{ПОДШ}}$: $W = 0,942 > W(\alpha) = 0,924$ (при $\alpha = 0,05$);
 – для $V_{\text{СКЗ}}$: $W = 0,934 > W(\alpha) = 0,924$ (при $\alpha = 0,05$),
 следовательно, нет оснований отвергать гипотезы;

5) Опыт 5:

– для $A'_{\text{ПОДШ}}$: $W = 0,947 > W(\alpha) = 0,924$ (при $\alpha = 0,05$);
 – для $V_{\text{СКЗ}}$: $W = 0,94 > W(\alpha) = 0,924$ (при $\alpha = 0,05$),
 следовательно, нет оснований отвергать гипотезы.

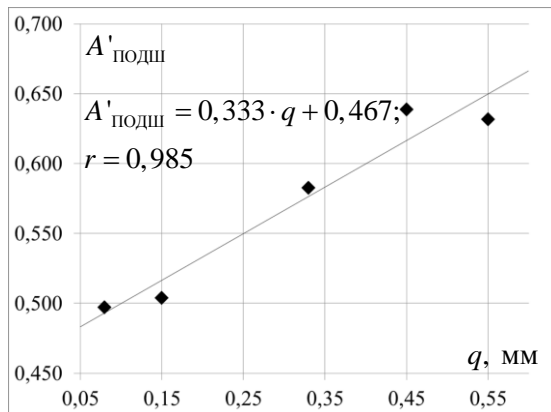
Проверка гипотез о равенствах дисперсий по выражению (2.5):

– гипотеза о равенстве дисперсий пяти выборок $S_1^2, S_2^2, S_3^2, S_4^2, S_5^2$ по параметру $A'_{\text{ПОДШ}}$: $F_{\text{набл}} = 1,699 < F_{\text{крит}}(\alpha; k_1; k_2) = 1,88$ (при $\alpha = 0,05$),

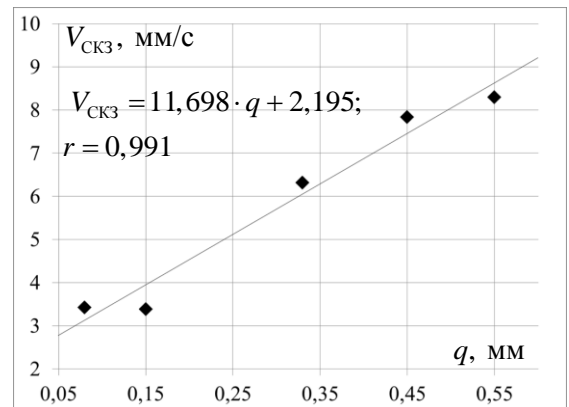
следовательно, нет оснований отвергать гипотезу и различие между выборочными дисперсиями незначимо;

– гипотеза о равенстве дисперсий трех выборок $S_1^2, S_2^2, S_3^2, S_4^2, S_5^2$ по параметру $V_{СКЗ}$: $F_{набл} = 1,647 < F_{крит}(\alpha; k_1; k_2) = 1,88$ (при $\alpha = 0,05$), следовательно, нет оснований отвергать гипотезу и различие между выборочными дисперсиями незначимо.

По имеющимся выборочным средним значениям $A'_{ПОДШ}$ и $V_{СКЗ}$ по пяти опытам с разным показателем поврежденности подшипников построены зависимости: $A'_{ПОДШ} = f(q)$, $V_{СКЗ} = f(q)$ и инструментами Microsoft Excel определены уравнения регрессии, представленные на рисунках 3.6 а,б.



а – зависимость $A'_{ПОДШ} = f(q)$



б – зависимость $V_{СКЗ} = f(q)$

Рисунок 3.6 – Значения $A'_{ПОДШ}$, $V_{СКЗ}$ при разной поврежденности подшипников

Вычисление и проверка значимости коэффициентов корреляции по выражению (2.6):

– для $A'_{ПОДШ} = 0,333 \cdot q + 0,467$:

$|r| = 0,985 \geq r_a = 0,878$ (для $n = 5$, при $\alpha = 0,95$) [57, табл. 217];

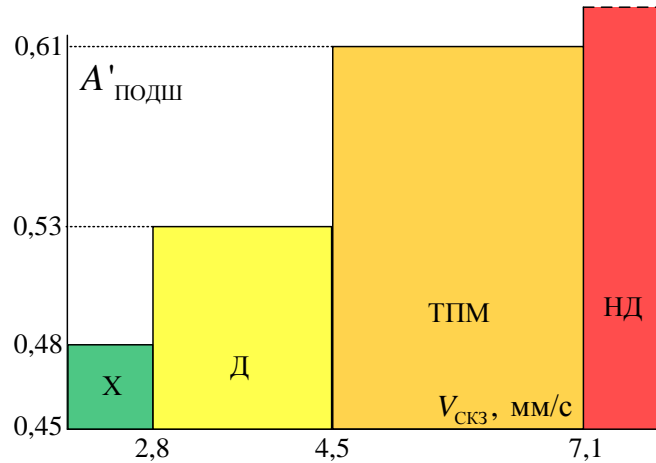
– для $V_{СКЗ} = 11,698 \cdot q + 2,195$: $|r| = 0,991 \geq r_a = 0,878$.

Соотнесением полученных уравнений зависимостей

$A'_{ПОДШ} = f(q)$, $V_{СКЗ} = f(q)$ определено выражение $A'_{ПОДШ} = f(V_{СКЗ})$:

$$A'_{ПОДШ} = 0,029V_{СКЗ} + 0,403, \quad (3.2)$$

которое позволяет установить пороговые значения $A'_{\text{подш}}$, соответствующие известным нормам на СКЗ виброскорости ($V_{\text{СКЗ}}$), и определяющие границы видов состояний подшипников качения ЦНА. Графическое представление границ видов, соответствующих нормам по [88] отражено на рисунке 3.7.



X-«хорошо», Д-«допустимо», ТПМ-«требует принятия мер», НД-«недопустимо»

Рисунок 3.7 – Границы видов состояния подшипников качения ЦНА

Для удобства, установленные пороговые значения диагностических параметров оценки состояния сопряжения валов и подшипников качения ЦНА, соответствующие нормам на вибрацию и определяющие виды состояния узлов, представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Границы видов технического состояния узлов ЦНА

Вид технического состояния агрегата	Пороговые значения вибрационного параметра, $V_{\text{СКЗ}}$, мм/с	Пороговые значения диагностического параметра, A'_i	
		$A'_{\text{сопр}}$	$A'_{\text{подш}}$
по СА 03-001-05, для ЭД с $h < 132$ мм			
Хорошо (X)	$< 2,8$	$< 0,64$	$< 0,48$
Допустимо (Д)	$< 4,5$	$< 0,71$	$< 0,53$
Требует принятия мер (ТПМ)	$< 7,1$	$< 0,81$	$< 0,61$
Недопустимо (НД)	$> 7,1$	$> 0,81$	$> 0,61$

Поскольку изменение состояния подшипников в электродвигателе дополнительно определяет отклонение $A'_{\text{дв}}$, становится возможным локализация изменения их состояния. Установить наличие, либо отсутствие изменения состояния подшипника электродвигателя можно по следующим принципам.

Если для данного агрегата контроль выполняется впервые, то изменение состояния подшипника двигателя определяется по значению параметра $A'_{\text{ДВ}}$ согласно следующему условию: если $A'_{\text{ДВ}} \geq 0,7$, то изменение состояния подшипника двигателя обнаружено, если $A'_{\text{ДВ}} < 0,7$, то не обнаружено.

Если для данного агрегата существуют предыдущие результаты измерений, то изменение состояния подшипника двигателя следует определить по росту значения $A'_{\text{ДВ}}$ относительно ближайшего предыдущего измерения.

3.3 Выводы по главе

3.3.1 Диагностическими параметрами определения состояния сопряжения валов экспериментального консольного ЦНА К 20/30 является относительная амплитуда составляющей спектра тока $A'_{\text{СОПР}}$ на частоте $f_{\text{сопр}}$, состояния подшипников качения насоса и электродвигателя – $A'_{\text{ПОДШ}}$ на частоте $f_{\text{подш}}$, выявления изменения состояния подшипников в электродвигателе – $A'_{\text{ДВ}}$, вычисляемый по составляющим на частотах $f_{\text{подш.дв}}$, $f_{\text{эксц.дв}}$.

3.3.2 Функциональные зависимости диагностических параметров и параметра вибрации от показателей состояния сопряжения валов (l), и подшипников качения (q) экспериментального ЦНА имеют следующие выражения:

$$A'_{\text{СОПР}} = 0,0454 \cdot l + 0,657, \quad V_{\text{СКЗ}} = 1,15 \cdot l + 3,09,$$

$$A'_{\text{ПОДШ}} = 0,333 \cdot q + 0,467, \quad V_{\text{СКЗ}} = 11,698 \cdot q + 2,195.$$

3.3.3 По выражениям связи диагностических параметров спектра тока и параметра общего уровня вибрации экспериментального ЦНА: $A'_{\text{СОПР}} = 0,038V_{\text{СКЗ}} + 0,54$, $A'_{\text{ПОДШ}} = 0,029V_{\text{СКЗ}} + 0,403$, установлены пороговые значения диагностических параметров, соответствующие границам видов технического состояния сопряжения валов и подшипников качения, обеспечивающие определение предельных состояний узлов консольного ЦНА.

4. Результаты исследования диагностических параметров определения состояний узлов ЦНА на основе его имитационной модели

4.1 Результаты моделирования

При экспериментальном исследовании, изложенном в главе 3, определены частотные составляющие сигнала тока статора двигателя информативные по различным видам дефектов. При имитации неисправности в процессе моделирования параметр dM_c задается с различной амплитудой и частотой, соответствующей частотам информативных составляющих изменений состояний узлов экспериментальной установки в спектре тока.

На рисунках 4.1 а, б изображены амплитудные спектры величины тока i_{sc} , полученные с использованием блока Spectrum Analyzer (см. рисунок 2.11) при задании dM_c с различными частотами ω_{dM_c} информативных составляющих.

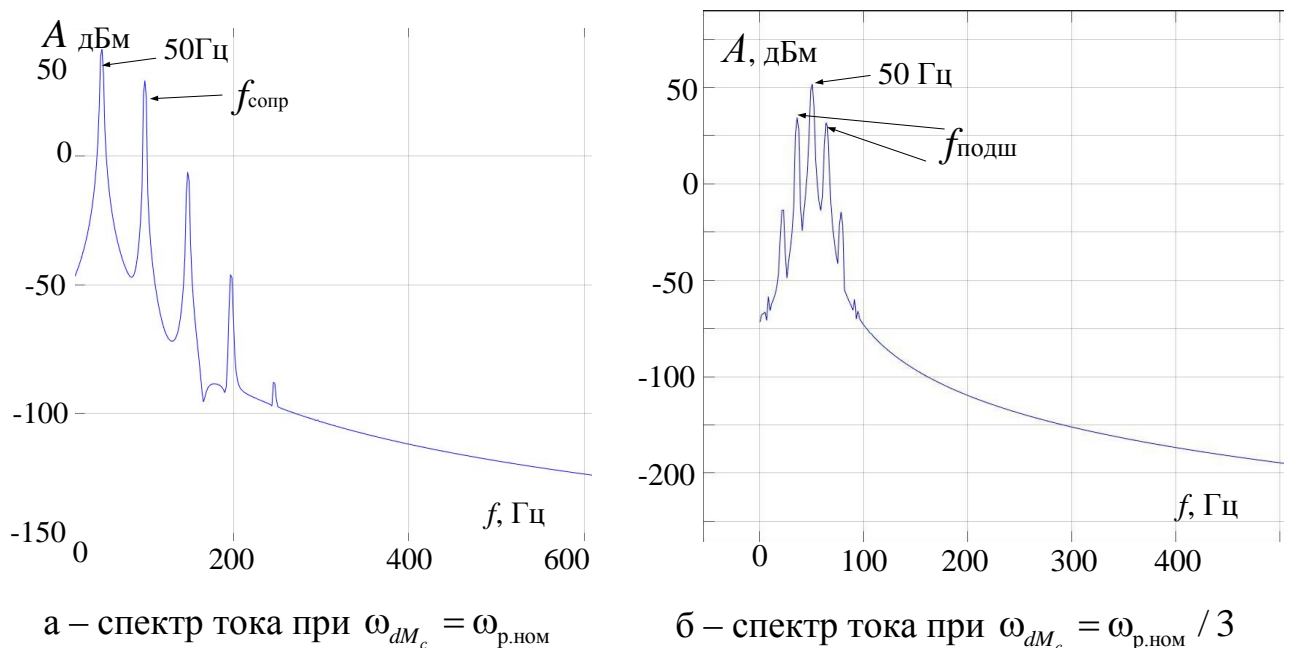


Рисунок 4.1 – Спектры тока при различных ω_{dM_c}

В результате задания dM_c различной амплитуды A_{dM_c} и частоты ω_{dM_c} , постоянном значении относительного напора H_d^* в моделях с конструктивными параметрами насосных агрегатов К 20/30, К80-65-160, К80-50-200, К100-65-200

получены зависимости $A'_{\text{СОПР}} = f(A_{dM_c})$ и $A'_{\text{ПОДШ}} = f(A_{dM_c})$, представленные на рисунках 4.2 а,б. Данные зависимостей приведены в таблице Д.1 Приложения Д.

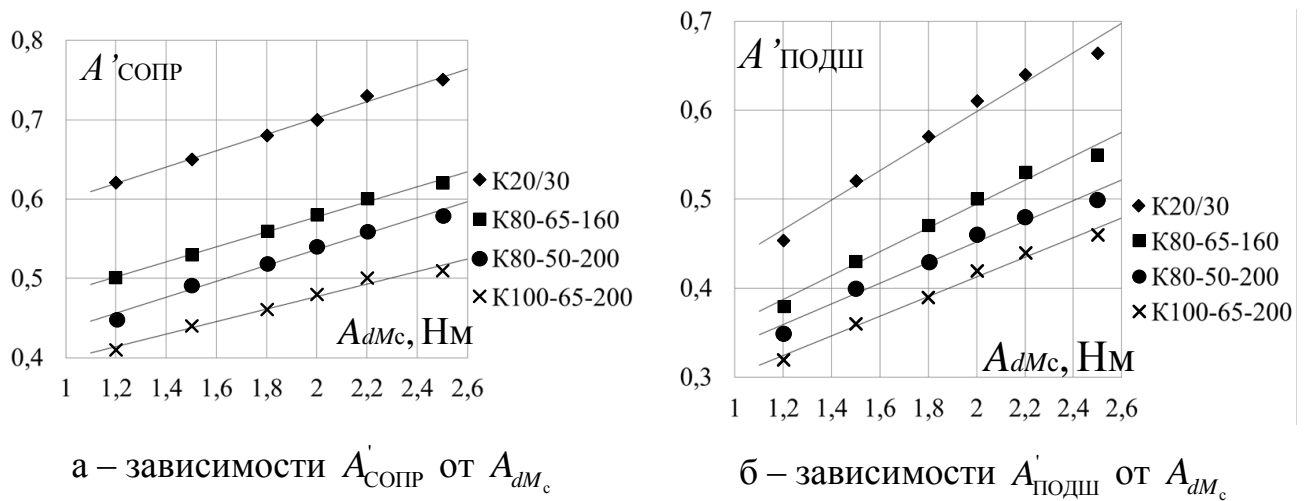


Рисунок 4.2 – Зависимости A'_i от A_{dM_c} для различных ω_{dM_c} , неизменном H_d^* при моделировании с параметрами ряда ЦНА

Далее моделирование выполнено по каждому ЦНА при изменении рабочего параметра H_d^* со значениями: 1; 1,05; 1,1; 1,14 (для К 80-65-160 – дополнительно 1,17) и получены зависимости $A'_{\text{СОПР}} = f(A_{dM_c})$ и $A'_{\text{ПОДШ}} = f(A_{dM_c})$, представленные на рисунках 4.3-4.6.

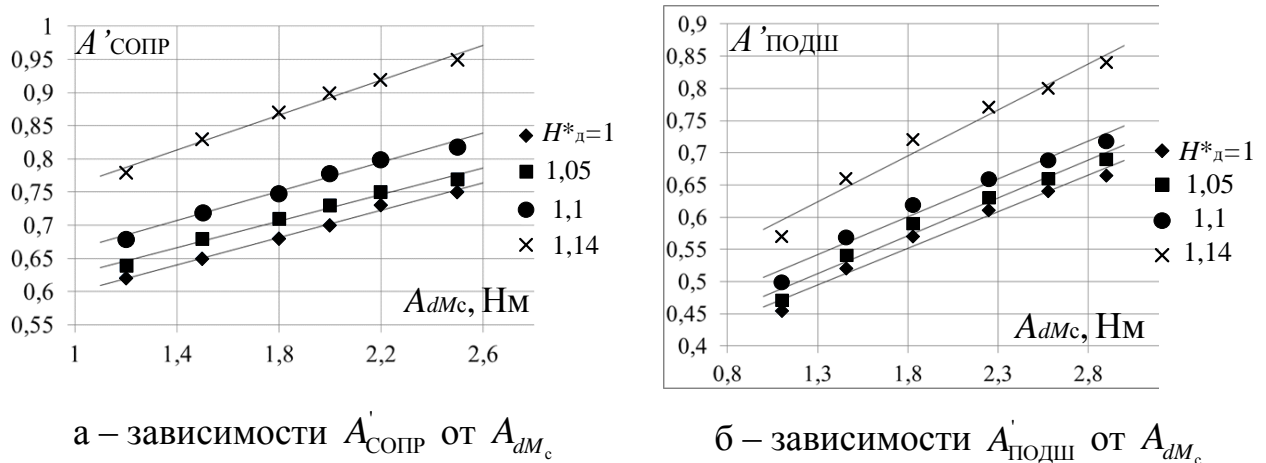
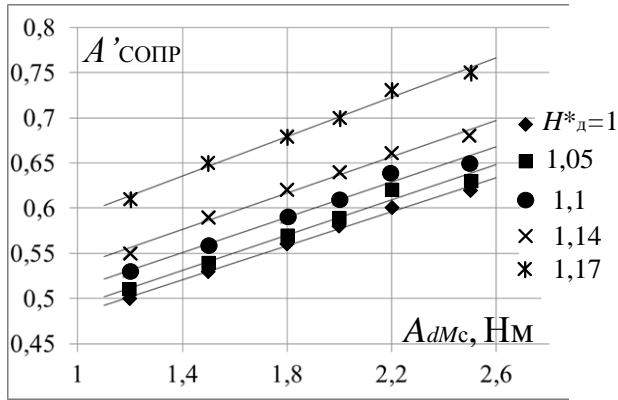
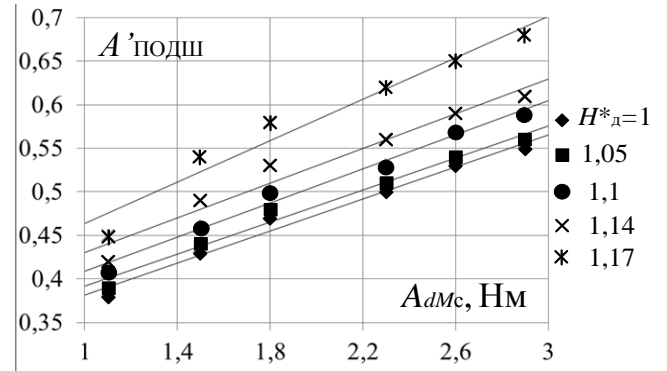


Рисунок 4.3 – Зависимости A'_i от A_{dM_c} для различных ω_{dM_c} и H_d^* при моделировании с параметрами ЦНА К 20/30

Полученные данные зависимостей для ряда ЦНА приведены в таблицах Д.2–Д.5 Приложения Д.



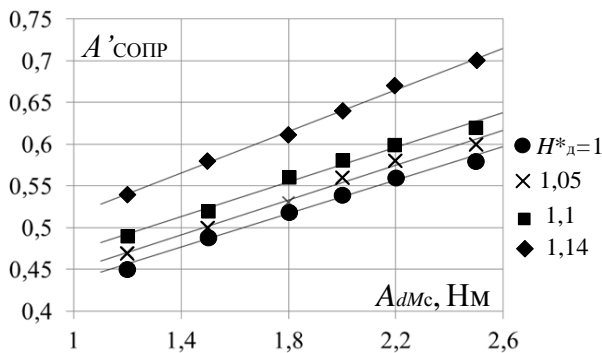
а – зависимости A'_{100} от A_{dM_c}



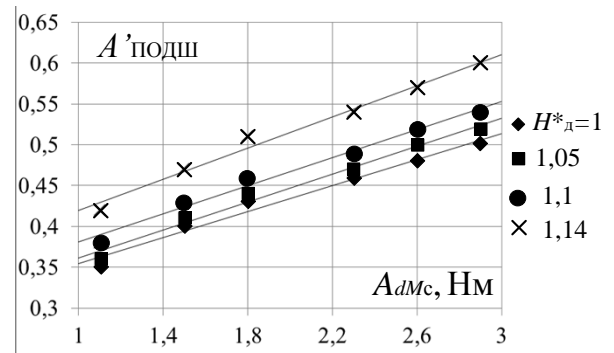
б – зависимости $A'_{36,64}$ от A_{dM_c}

Рисунок 4.4 – Зависимости A'_i от A_{dM_c} для различных ω_{dM_c} и H^*_D при моделировании с параметрами ЦНА К 80-65-160

Нижний предел изменения H^*_D равный единице позволяет задать в модели для расчета значение номинального напора, а дальнейшее увеличение H^*_D определено характерным смещением рабочей точки на напорной характеристике насоса в сторону роста напора при рассматриваемом способе регулирования режима работы – дросселировании.



а – зависимости A'_{100} от A_{dM_c}



б – зависимости $A'_{36,64}$ от A_{dM_c}

Рисунок 4.5 – Зависимости A'_i от A_{dM_c} для различных ω_{dM_c} и H^*_D при моделировании с параметрами ЦНА К 80-50-200

Верхний предел соответствует относительному значению напора холостого хода насоса при его работе на полностью закрытую задвижку.

Для всех зависимостей по различным частотам отмечается следующее:

– зависимости имеют линейный характер;

– имеет место характерное смещение зависимостей в координатной плоскости при изменении $H_{д}^*$ и задании параметров ряда ЦНА разной мощности, что обозначает отклонение диагностического параметра неисправности при изменении напора конкретного ЦНА и диагностике неисправностей в ряде агрегатов [107,108].

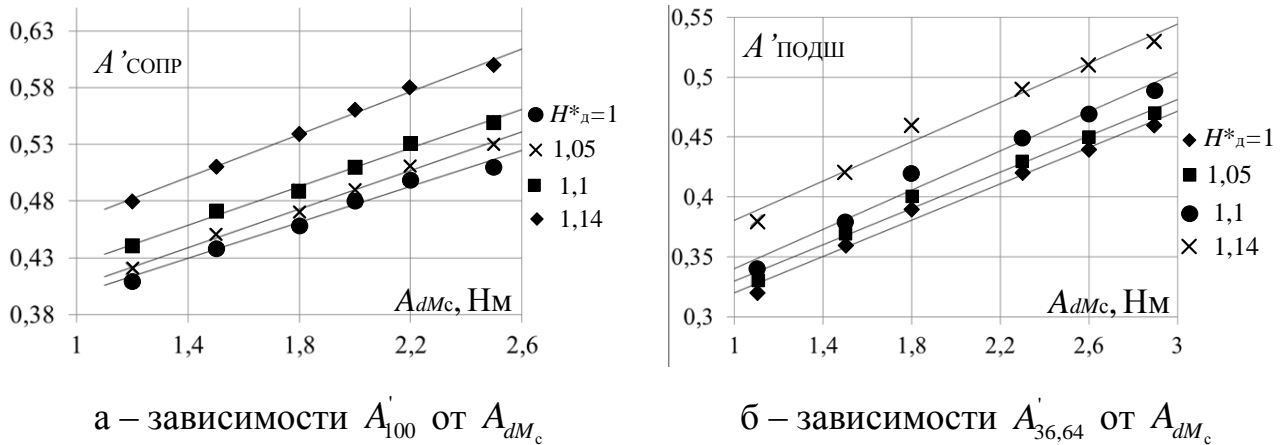


Рисунок 4.6 – Зависимости A'_i от $A_{дмс}$ для различных $\omega_{дмс}$ и $H_{д}^*$ при моделировании с параметрами ЦНА К 100-65-200

Инструментами Microsoft Excel для зависимостей определены уравнения регрессии, вычислены коэффициенты корреляции, относительные угловые коэффициенты и коэффициенты сдвига регрессии a' , b' , которые сведены в таблицы Д.6, Д.7 Приложения Д.

Полученные относительные коэффициенты регрессии позволяют выполнить корректировку уравнений зависимостей $A'_{сопр} = f(A_{дмс})$ и $A'_{подш} = f(A_{дмс})$ при изменении рабочего параметра $H_{д}^*$ и проведении диагностики агрегатов рассматриваемого ряда при постоянном значении $H_{д}^* = 1$.

Для подтверждения необходимости выполнения корректировки зависимостей при изменении рабочих и конструктивных параметров агрегатов осуществляется сравнение полученных линий регрессий и проверяется гипотеза H_0 : о статистической различимости линейных регрессий.

Сравниваемые регрессии признаются статистически различимыми, если отклоняется одна из трех гипотез: H'_0 – о неразличимости коэффициентов сдвига

линий регрессий ($b_1 = b_2$); H_0'' – о неразличимости угловых коэффициентов линий регрессий ($a_1 = a_2$); H_0''' – о равенстве остаточных дисперсий, вызванных отклонением точек от линий регрессии [57].

В первую очередь, для проверки гипотезы H_0'' с помощью F -критерия Фишера определяется статистика вида:

$$F_{\text{набл}} = \frac{S_1^2}{S_2^2} < F_{\text{кр}}(\alpha; f_1; f_2), \quad (4.1)$$

где $S^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i + b)]^2$ – дисперсия по выборке;

$$f_1 = n_1 - 2, f_2 = n_2 - 2.$$

В том случае если $F_{\text{набл}} < F_{\text{кр}}(\alpha; f_1; f_2)$, то гипотеза H_0'' принимается при уровне значимости α и остаточные дисперсии можно признать равными. В противном случае – гипотеза отклоняется.

При проверке гипотезы H_0''' с помощью t -критерия Стьюдента составляется статистика вида:

$$|t_a| \leq t_{\text{кр}}(\alpha; f), \quad (4.2)$$

где $f = n_1 + n_2 - 4$;

$$t_a = \frac{a_1 - a_2}{S^* \sqrt{\frac{1}{(n_1 - 1)S_{x1}^2} + \frac{1}{(n_2 - 1)S_{x2}^2}}};$$

$$S^* = \sqrt{\frac{(n_1 - 2)S_{x1}^2 + (n_2 - 2)S_{x2}^2}{n_1 + n_2 - 4}};$$

$$S_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2.$$

В том случае если $|t_a| \leq t_{\text{кр}}(\alpha; f)$, то гипотеза H_0''' принимается при уровне значимости α и угловые коэффициенты можно признать равными. В противном случае – гипотеза отклоняется.

При проверке гипотезы H_0' составляется статистика вида:

$$|t_b| \leq t_{\text{кр}}(\alpha; f), \quad (4.3)$$

где $t_b = \frac{\bar{b} - \tilde{b}}{\tilde{S}}$;

$$\tilde{S} = S^* \left\{ \frac{1}{(n_1 - 1)S_{x_1}^2 + (n_2 - 1)S_{x_2}^2} + \frac{1}{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)} \cdot \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right\};$$

$$\bar{b} = \frac{(n_1 - 1)S_{x_1}^2 b_1 + (n_2 - 1)S_{x_2}^2 b_2}{(n_1 - 1)S_{x_1}^2 + (n_2 - 1)S_{x_2}^2};$$

$$\tilde{b} = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}.$$

В том случае если $|t_b| \leq t_{\text{кр}}(\alpha; f)$, то гипотеза H_0' принимается при уровне значимости α и коэффициенты сдвига можно признать равными. В противном случае – гипотеза отклоняется.

Для проверки гипотезы H_0 к сравнению принимаются наиболее визуально различимые регрессии из общих ансамблей линий, рассматриваемых отдельно для $A'_{\text{СОПР}} = f(A_{\text{дм}_c})$ и $A'_{\text{ПОДШ}} = f(A_{\text{дм}_c})$ при изменении $H_{\text{д}}^*$ и изменении типа агрегата.

Результаты проверки статистической различимости линий регрессии представлены в Приложении Е.

4.2 Проверка адекватности имитационной модели

Известно, что математические модели должны в определенной степени соответствовать экспериментальным данным, что подтверждает их адекватность.

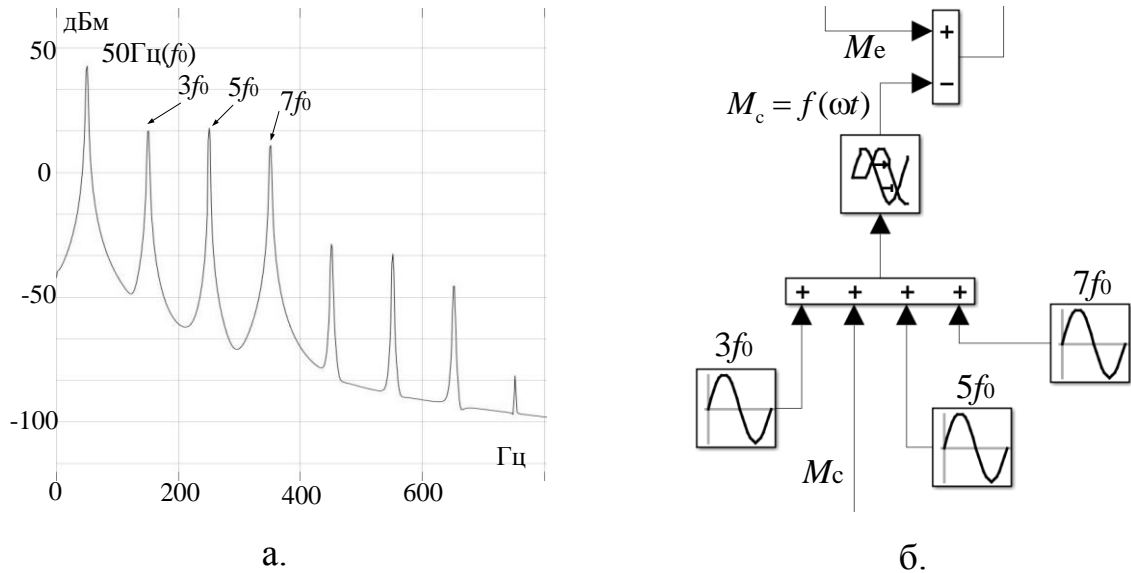
Поскольку экспериментальные и теоретические зависимости диагностического параметра от параметров, характеризующих неисправности, полученные в настоящей работе, имеют различные размерности по осям абсцисс их сравнение весьма затруднительно.

Поэтому для проверки модели, в частности для оценки ее корректности при изменении рабочих параметров моделируемого агрегата, рассмотрена подходящая

экспериментальная зависимость, представленная в работе [102], отражающая взаимосвязь коэффициента гармонических искажений амплитудного спектра сигнала тока фазы статора электродвигателя (THD) с показателем степени открытия задвижки на напорном трубопроводе насоса (0% – закрыта, 25, 50, 75, 100% - открыта). Экспериментальная установка по работе [102] представлена центробежным насосом марки 3Гр8 с коэффициентом быстроходности $n_s = 82,16$, близким по значению коэффициентам быстроходности для агрегатов, рассматриваемых в настоящей работе при моделировании, и приводным асинхронным электродвигателем А81-4 с синхронной частотой вращения 1500 об/мин.

Для моделирования приняты паспортные характеристики и определены необходимые конструктивные и режимные параметры, в том числе относительный напор холостого хода насоса: $H_{xx}^* = 1,1$ для определения диапазона изменения относительного напора, соответствующего степени открытия задвижки на напорном трубопроводе насоса. Состояние открытой задвижки: 100%, соответствует номинальному напору: $H_D^* = 1$, состояние закрытой задвижки: 0 %, соответствует напору холостого хода: $H_D^* = 1,1$.

Параметр THD в работе [102] в эксперименте с насосом 3Гр8 при регулировании положения задвижки в наибольшей степени, помимо основной гармоники, определяется тремя кратными гармониками амплитудно-частотного спектра: $f_3 = 3f_0; f_5 = 5f_0; f_7 = 7f_0$. Для получения в модели амплитудно-частотного спектра, изображенного на рисунке 4.7 а., соответствующего экспериментальному, в структуру модели введены дополнительные блоки, показанные на рисунке 4.7 б., позволяющие получить частотные составляющие в спектре тока, определяемые гармоническими колебаниями крутящего момента сопротивления различной частоты.



а – амплитудно-частотный спектр тока статора модели насосного агрегата;

б – совокупность блоков имитирующих колебания крутящего момента

Рисунок 4.7 – Амплитудно-частотный спектр и блоки модели

В таблице 4.1 содержатся данные, полученные в работе [102]. По результатам моделирования получена выборка значений зависимости THD от состояния задвижки на напорном трубопроводе насоса, представленная в таблице 4.2, и инструментами Microsoft Excel определены линии регрессии для экспериментальной и теоретической зависимостей THD спектра тока от состояния задвижки, показанные на рисунке 4.8.

Таблица 4.1 – Экспериментальная выборка

Степень открытия задвижки, %	0	25	50	75	100
THD , %	6,7	5,9	4,9	4,3	3,9

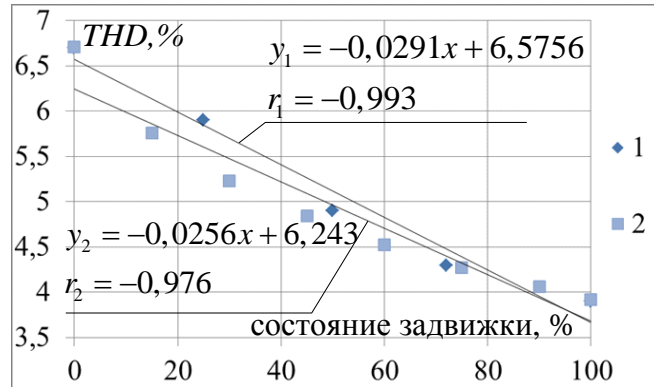
Таблица 4.2 – Теоретическая выборка по модели

Степень открытия задвижки, %	0	15	30	45	60	75	90	100
THD , %	6,7	5,8	5,2	4,8	4,5	4,3	4,1	3,9

Расчет коэффициентов корреляции и их проверка на значимость выполнены по выражению (2.6):

– для $y_1 = -0,0291x + 6,5756$: $|r_1| = 0,993 \geq r_a = 0,878$ (при $n = 5$, $\alpha = 0,95$) [57, табл. 217];

– для $y_2 = -0,0256x + 6,243$: $|r_2| = 0,976 \geq r_a = 0,707$ (при $n = 8$, $\alpha = 0,95$).



1 – экспериментальная зависимость по [102];

2 – теоретическая зависимость по модели

Рисунок 4.8 – Зависимости *THD* от состояния задвижки для насоса 3Гр8 с электродвигателем А81-4

Проверка адекватности модели заключается в количественной оценке соответствия теоретической выборки данных экспериментальной выборке посредством сравнения линейных регрессий, определенных по теоретическим и экспериментальным данным.

Выдвигается гипотеза H_0 : о статистической различимости линейных регрессий. Проверка выполняется по выражениям 4.1, 4.2, 4.3.

Гипотеза H_0''' при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $f_1 = 3$; $f_2 = 6$ принимается, поскольку: $F_{\text{набл}} = \frac{0,066}{0,051} = 1,28 < F_{\text{кр}}(\alpha; f_1; f_2) = 4,76$, и дисперсии S_1^2, S_2^2 можно признать статистически неразличимыми.

Гипотеза H_0'' при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $f = 9$ принимается, поскольку: $|t_a| = 0,06 \leq t_{\text{кр}}(\alpha; f) = 2,26$, и угловые коэффициенты a_1, a_2 можно признать неразличимыми.

Гипотеза H_0' при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $f = 9$ принимается, поскольку: $|t_b| = 1,336 \leq t_{кр}(\alpha; f) = 2,26$, и коэффициенты сдвига b_1, b_2 можно признать неразличимыми.

Поскольку все три гипотезы H_0', H_0'', H_0''' приняты, основную гипотезу H_0 о статистической различимости линейных регрессий можно отвергнуть и сравниваемые регрессии y_1 и y_2 можно считать статистически неразличимыми (эквивалентными), что определяет адекватность описания теоретической зависимостью экспериментальных данных.

4.3 Выводы по главе

4.3.1 Имитационным моделированием получены группы линейных зависимостей диагностических параметров в спектре тока от амплитуды колебаний крутящего момента сопротивления видов: $A'_{\text{СОПР}} = f(A_{\text{дм}_c})$ и $A'_{\text{ПОДШ}} = f(A_{\text{дм}_c})$, при изменении напора и производительности насоса для моделей с параметрами консольных ЦНА разной мощности.

4.3.2 Уточнение диагностического параметра в спектре тока в случае рассмотрения модели консольного ЦНА иной мощности, нежели экспериментально рассмотренный К 20/30, а также при относительных напоре и производительности насоса отличных от единицы выполняется с использованием относительных коэффициентов регрессии a', b' , установленных по группам зависимостей: $A'_{\text{СОПР}} = f(A_{\text{дм}_c})$ и $A'_{\text{ПОДШ}} = f(A_{\text{дм}_c})$, и является необходимой ввиду статистической различимости зависимостей.

4.3.3 Разработанная модель является адекватной в части оценки модуляции диагностического параметра спектра тока двигателя при изменении напора и производительности насоса, что подтверждается статистической неразличимостью линейных регрессий, полученных по экспериментальным данным работы [103] и результатам имитационного моделирования.

5. Методика определения предельных состояний ресурсопределяющих узлов промышленных консольных ЦНА анализом амплитудных спектров тока их электродвигателей

На основании установленной последовательности операций анализа спектра тока двигателя, представленной в параграфе 1.2 главы 1 настоящей работы, и с использованием положений, полученных при диссертационном исследовании, сформирована Методика определения предельных состояний подшипников и сопряжения валов ЦНА спектральным анализом тока электродвигателя.

При разработке Методики учтены указания нормативно-технической документации в области организации методов вибрационной и токовой диагностики насосного оборудования, а также рекомендации научно-исследовательских, проектных организаций и организаций-изготовителей измерительной аппаратуры.

5.1 Область применения Методики

Методика нацелена на дополнение, применяемых на объектах нефтегазовых промыслов, мероприятий по контролю технического состояния (КТС) в рамках организации системы ТОиР консольных ЦНА, эксплуатируемых в системах водоснабжения и блоках очистки и приготовления буровых растворов на буровых установках, во вспомогательных системах комплексов дожимных насосных и компрессорных станций, установок подготовки нефти и газа, установок и сооружений систем ППД, в том числе, в системах отопления и пожаротушения.

Методика может использоваться для постоянного, либо периодического планового, или внепланового мониторинга состояния подшипников качения и сопряжения валов ЦНА. При этом для организации полноценного КТС методика применяется совместно с другими методами контроля, устанавливаемыми паспортами на оборудование и регламентами предприятий, в том числе:

визуального, вибрационного, температурного контроля и контроля рабочих характеристик насоса.

Методика предназначена для использования на консольных ЦНА без частотно-регулируемого электропривода, функционирующем в стационарном продолжительном режиме, поскольку при разработке Методики воздействие на амплитудный спектр тока со стороны частного преобразователя не изучалось, и работа ЦНА в переходных режимах не рассматривалась.

5.2 Порядок реализации Методики

Предлагаемый порядок реализации Методики представлен на рисунке 5.1.

5.2.1 Компоновка аппаратурной части измерительной системы

Определение типа системы.

Предлагается два типа систем: мобильная (полностью автономная переносная) и полустационарная (частично устанавливаемая на месте в точках измерения). Целесообразность выбора типа системы определяется требованиями к периодичности контролей для конкретной машины и обеспеченностью агрегата существующими системами.

Выбор средств измерений.

Для компоновки системы первичными измерительными преобразователями (ПИП) используются бесконтактные преобразователи тока конструкций по типу токовых клещей



Рисунок 5.1 – Порядок реализации Методики

с аналоговым выходным сигналом и датчиков тока на эффекте Холла с нормируемым коэффициентом трансформации. Выходной сигнал преобразователей должен быть пропорциональным мгновенному значению измеряемого сигнала тока в сети.

1) Общие условия выбора ПИП:

– размеры открытия отверстия и закрытого состояния отверстия преобразователя должны соответствовать диаметру провода, либо габаритам токоведущей шины;

– значение измеряемого тока в линии питания двигателя должно составлять не более половины и не менее 30% значения верхнего предела измерительного преобразователя (условие определяется требованиями к измерительным приборам при контроле электрических параметров электродвигателей согласно ГОСТ 11828-86 и методики диагностирования механизмов с электроприводом [2,20]);

– предельное значение приведенной погрешности должно составлять не более 2% во всем диапазоне пределов измерений (условие определяется требуемой точностью измерений при оценке диагностических параметров и разделении видов состояний, рассмотренном в параграфе 3.2);

– пределы частотного диапазона измерения сигнала: нижний предел не более 5 Гц, верхний не менее 400 Гц (условие определяется необходимым частотным диапазоном спектра, содержащим информативные частотные компоненты, определенные в параграфе 3.1);

– допустимое сопротивление выходной измерительной цепи преобразователя должно согласовываться с входным сопротивлением устройства аналого-цифрового преобразования.

Полный перечень технических характеристик ПИП определяется конкретными условиями применения.

Для приема и преобразования аналогового сигнала с ПИП в цифровой сигнал интерфейса, согласуемого с компьютером используются модули аналого-цифрового преобразования, либо измерительные модули, соединенные с преобразователями интерфейсов.

2) Общие условия выбора устройств аналого-цифровой обработки сигналов:

– частота дискретизации должна быть не ниже 400 Гц (условие определяется необходимым частотным диапазоном спектра, содержащим информативные частотные компоненты, определенные в параграфе 3.1);

– устройство должно позволять получить частотное разрешение в диапазоне частот спектра 0-200 Гц не хуже 0,1 Гц (условие определяется частотами информативных составляющих спектра, определенными в параграфе 3.1);

– диапазон входного сигнала (по току, либо падению напряжения на входном сопротивлении) должен соответствовать предельным значениям выходного сигнала первичного измерительного преобразователя. При превышении верхнего предела входного диапазона сигналом с первичного преобразователя необходимо разделить сигнал на входе устройства путем включения дополнительного сопротивления параллельно во входную цепь устройства;

– устройство должно иметь выходной цифровой интерфейс USB, либо Ethernet для подключения к компьютеру.

Полный перечень технических характеристик устройств определяется конкретными условиями применения.

В качестве ПК для обработки диагностической информации при построении мобильных и полустационарных систем контроля предлагается использовать Netbook ввиду малых габаритов и достаточной производительности для функционирования стандартного ПО большинства устройств аналого-цифрового преобразования.

3) Общие условия выбора ПК:

– обязательно наличие разъемов интерфейсов USB, либо Ethernet для подключения устройств аналого-цифрового преобразования;

– конфигурация компьютера должна соответствовать требованиям ПО в частности к типу операционной системы, разрядности процессора и количеству ядер, объему оперативной памяти и памяти накопителей данных, параметрам

графического ускорителя и параметрам экрана, наличие периферийных устройств.

4) Общие условия выбора источников питания (ИП):

– выходное напряжение ИП должно соответствовать напряжению питания устройств системы контроля;

– пределы возможного отклонения выходного напряжения ИП не должны превышать $\pm 5\%$ (условие определяется требованием к электропитанию большинства первичных измерительных преобразователей – датчиков);

– номинальная мощность нагрузки ИП должна превышать суммарную мощность, потребляемую всеми устройствами измерительной системы.

Указания по установке, наладке и эксплуатации рассмотренного оборудования измерительной системы контроля содержатся в соответствующей технической документации к оборудованию. Технические требования к измерительному оборудованию и обеспечению безопасности при его эксплуатации содержатся в ГОСТ 22261-94, ГОСТ ИЕС 61010-1-2014 и ГОСТ 12.2.091-2012 [22,23,30]. Требования к параметрам измерительных приборов при измерениях электрических величин на электродвигателях устанавливаются по ГОСТ 11828-86 [20].

В рамках методики диагностики предлагаются готовые решения по компоновке систем диагностики мобильного и полустационарного типов, представленные в параграфе 5.2 ниже.

5.2.2 Определение условий проведения мониторинга

Точки установки измерительной аппаратуры.

Измерение сигнала тока выполняется по одной фазе линии питания электродвигателя с подключением ПИП к жиле кабеля питания согласно ГОСТ ISO 20958-2015 [32] и рекомендаций методики [2].

Поскольку, как правило, жилы кабеля заключены в общую оболочку, то точками установки первичного измерительного преобразователя являются коробка выводов двигателя, либо силовой щит, в котором двигатель подключается к сети. В свою очередь предпочтительно располагать датчик как

можно ближе по линии питания к электродвигателю после точки общего присоединения других электроприемников для минимизации влияния на сигнал сторонних помех согласно РД 153-34.0-15.502-2002 [71].

При организации полустационарной системы установка устройств аналого-цифровой обработки и устройств питания выполняется в измерительных шкафах в местах, определяемыми удобством размещения, соответствием климатических условий допустимым для аппаратуры и близостью к электрической сети для питания устройств. Шкаф предпочтительно размещать на незначительном удалении от точки установки ПИП.

Периодичность контролей.

Первоначально периодичность контролей мобильными и полустационарными системами для конкретного агрегата, в случае отсутствия отметок о корректировке периодичности по результатам текущего контроля, определяется категорией ответственности машины и варьируется в пределах от одного раза в три месяца до трех раз в месяц согласно рекомендациям ГОСТ Р ИСО 13373-1-2009 [40] и методики [2]. В дальнейшем при реализации методики мониторинга возможна корректировка интервалов контролей по результатам анализа изменения диагностических параметров во времени и показателей прогнозирования, о чем подробнее изложено в пункте 5.1.4.

5.2.3 Установка пороговых значений диагностических параметров

Установка первоначальных пороговых значений диагностических параметров, определяющих виды технических состояний узлов ЦНА на предварительных этапах мониторинга, выполняется на основе базовых аналитических выражений, связывающих параметры спектра с СКЗ виброскорости агрегата. Выражения корректируются при отклонении рабочих характеристик насоса, либо использовании Методики на консольных ЦНА других номинальных мощностей.

Базовые выражения определены для ЦНА марки К 20/30 с электродвигателем АИР 100 S2 номинальной мощностью 4 кВт, насос которого функционирует с номинальными рабочими характеристиками.

Пороговые значения параметра для определения состояния подшипников.

Пороговые значения параметра спектра тока для определения состояния подшипников устанавливаются по выражению:

$$A'_{\text{подш}} = 0,029V_{\text{СКЗ}} + 0,403, \quad (5.1)$$

где $V_{\text{СКЗ}}$ – СКЗ виброскорости ЦНА (мм/с).

Подстановкой в выражение значений СКЗ виброскорости ЦНА, нормируемых регламентами эксплуатирующих организаций, а также стандартами, например: СА 03-001-05, ГОСТ ИСО 10816-3-99, ГОСТ Р 55265.7-2012 [35,39,88], устанавливаются пороговые значения по параметру спектра тока.

В случае использования Методики на консольных ЦНА других мощностей и при отклонении рабочих характеристик насоса следует выполнить корректировку базового выражения путем умножения коэффициентов уравнения на относительные коэффициенты регрессии, установленные для конкретных моделей ЦНА и значений относительного напора – $H_{\text{д}}^*$ (значение по отношению к номинальному).

Коэффициентами уравнения (5.1) вида: $y = ax + b$, являются угловой (a) и сдвига (b).

В таблице Д.7 Приложения Д содержатся относительные коэффициенты регрессии a' , b' для пересчета выражения (5.1) с целью использования Методики на других ЦНА, работающих с номинальными рабочими характеристиками насосов. При необходимости можно расширить перечень ЦНА проведением дополнительных исследований.

При использовании Методики на ЦНА с отклонением рабочих характеристик насосов от номинальных следует сначала получить выражение для ЦНА по таблице Д.7 Приложения Д, затем дополнительно пересчитать коэффициенты выражения для напора, наиболее близкого к развиваемому насосом ЦНА по таблице Д.6 Приложения Д.

Пороговые значения параметра для определения состояния сопряжения валов.

Пороговые значения параметра спектра тока для определения состояния подшипников устанавливаются по выражению:

$$A'_{\text{сопр}} = 0,038V_{\text{СКЗ}} + 0,54. \quad (5.2)$$

Установка пороговых значений и их корректировка при изменениях рабочих характеристик насоса и применении Методики на других консольных ЦНА выполняется так же, как это описано ранее для определения состояния подшипников.

5.2.4 Измерение диагностических параметров и результат мониторинга

Подготовка измерительной системы.

Непосредственно перед проведением измерений производится подключение измерительной системы к объекту контроля.

Персонал, выполняющий работы по подключению измерительной аппаратуры к цепи питания электродвигателя, должен пройти проверку знаний требований безопасности, предъявляемых к организации и выполнению работ в электроустановках, и иметь соответствующую группу допуска по электробезопасности согласно ПОТЭЭ [82].

При использовании измерительных систем мобильного типа, где в качестве ПИП применяются разъемные токовые клещи, остановка ЦНА и отключение электродвигателя не требуется.

В случае использования полустационарной системы и неразъемных датчиков тока требуется остановка ЦНА, отключение жилы кабеля питания двигателя, монтаж датчика на жиле кабеля, подключение жилы и пуск агрегата. В таком случае следует рассмотреть возможность монтажа системы при плановом ТО, или ремонтах, когда предусматривается остановка агрегата.

После установки ПИП системы, и запуска ЦНА в случае его остановки, следует подать питание на измерительную схему и проконтролировать выход аппаратуры в штатный режим.

Измерения и анализ данных.

В течение интервала времени контроля рекомендуется выполнить запись не менее чем девяти файлов с данными спектров для получения более достоверного значения диагностического параметра в условиях влияния на результат измерения флуктуаций частотных составляющих в спектрах сигналов и погрешностей средств измерения.

По каждому зафиксированному спектру тока определить значения диагностических параметров. Фактическое значение диагностического параметра, принимаемое к дальнейшему анализу, определяется как среднее значение из измеренных в процессе операции контроля.

Сравнением вычисленных значений параметров $A'_{\text{подш}}$ и $A'_{\text{сопр}}$ с пороговыми определить вид технического состояния по каждому узлу и установить наличие, либо отсутствие изменения состояния подшипника электродвигателя по условиям: $0,7 \leq A'_{\text{дв}}$; $A'_{\text{дв}} < 0,7$, либо по отклонению $A'_{\text{дв}}$ (см. параграф 3.2).

Прогноз осуществляется по предыстории изменения диагностического параметра на краткосрочный период (до 6 месяцев) [87]. При этом период прогноза не превышает период предыстории измерений [60].

1) При непродолжительной истории измерений диагностических параметров ЦНА (до пяти процедур контроля) прогнозировать изменение параметра следует по наибольшей скорости его изменения между процедурами контроля во всей предыстории – $S_{\text{макс}}$ [87].

Значение $S_{\text{макс}}$ определяется максимальным отношением модуля разности между последующим и предыдущим значениями параметра к интервалу времени между измерениями:

$$S_{\text{макс}} = \max \left[\frac{|A'_i - A'_{i-1}|}{\tau_{ki}} \right], \quad (5.3)$$

где A'_i, A'_{i-1} – последующее и предыдущее значения параметра на интервале;

τ_{ki} – время между измерениями на интервале.

Линия тренда диагностического параметра является проекцией прямой между двумя измерениями в предыстории, имеющей наибольшее приращение – $S_{\text{макс}}$, выводимой из точки последнего измерения и продолжаемой до пересечения с границей перехода из текущего класса технического состояния в следующий.

В том случае если линия тренда пересекает границу класса до точки следующего по плану контроля, то ближайшее время измерения определяется пересечением трендом границы класса и может быть рассчитано:

$$\tau_k = \frac{A'_{i(\text{границы})} - A'_{i(\text{факт})}}{S_{\text{макс}}}, \quad (5.4)$$

где $A'_{i(\text{границы})}$, $A'_{i(\text{факт})}$ – соответственно предельное для границы класса и фактическое значения диагностического параметра.

Если линия тренда пересекает границу класса после времени следующего по плану контроля и до времени последующего за ним, то с момента ближайшего планового контроля интервал измерений сокращается. Сокращение интервалов контролей определяется текущим классом технического состояния ЦНА и скоростью нарастания диагностического параметра согласно [40] по следующим принципам:

- если состояние ЦНА характеризуется как «Хорошо», или «Допустимо», и $S_{\text{макс}}$ определяет дальнейшее изменение диагностического параметра более чем на 25% то интервал между измерениями следует сократить в пределах 48 часов;

- если состояние ЦНА характеризуется как «Требуется принятия мер» и диагностический параметр имеет восходящий линейный тренд, то интервал между измерениями также следует сократить в пределах 48 часов.

Если линия тренда не имеет положительного наклона (диагностический параметр не имеет приращения) то пересматривать плановое время последующего контроля не следует.

2) При накоплении истории измерений (пять и более процедур контролей) тренд диагностического параметра следует определять по последним пяти

измерениям с дальнейшей корректировкой угла наклона функции линейного тренда (скользящий тренд-анализ).

Выполняется усреднение измеренных значений параметров предыстории по формуле экспоненциального сглаживания:

$$A'_{in(сгл)} = \alpha A'_{in} + (1 - \alpha) A'_{i(n-1)(сгл)}, \quad (5.5)$$

где α – постоянная сглаживания (0,1-0,5);

A'_{in} , $A'_{in(сгл)}$ – не сглаженное и сглаженное значения параметра;

$A'_{i(n-1)(сгл)}$ – сглаженное предыдущее значение параметра.

Коэффициенты функции a и b определяются по значениям параметра в предыстории по методу наименьших квадратов [13]:

$$a = \frac{m \sum A'_{in(сгл)} \cdot \tau_n - \sum A'_{in(сгл)} \sum \tau_n}{m \sum \tau_n^2 - (\sum \tau_n)^2}, \quad (5.6)$$

$$b = \frac{\sum \tau_n^2 \sum A'_{in(сгл)} - \sum \tau_n \sum A'_{in(сгл)} \cdot \tau_n}{m \sum \tau_n^2 - (\sum \tau_n)^2}, \quad (5.7)$$

где m – объем измерений;

τ_n – время измерения параметра $A'_{in(сгл)}$.

По имеющейся функции $A'_i = a \cdot \tau + b$ определяется прогнозируемое значение A'_i при времени τ .

Корректировка интервалов контролей по линии тренда выполняется по принципам, изложенным выше в пункте 1).

5.2.5 Формирование отчета и принятие решения о дальнейшей эксплуатации ЦНА

Содержание формы отчета рекомендуется определять в соответствии с указаниями ГОСТ Р ИСО 17359-2015 [43].

По результатам мониторинга на основе сведений о фактических и прогнозируемых состояниях узлов принимается решение о дальнейшей неограниченной эксплуатации, сокращении интервала контроля, проведении дополнительных процедур контроля, выводе ЦНА в ремонт.

5.2.6 Проверка результата, анализ диагностической истории машины и корректировка пороговых значений диагностических параметров

В процессе контролей рекомендуется оценивать соответствие данных о состоянии узлов, полученных по Методике, с результатами мониторинга по другим методам диагностики. Кроме того, при ближайших ТО и ремонтах желательно оценить достоверность результатов определения состояния узлов, установленных по Методике. В случае несоответствия данных мониторинга фактически установленным состояниям узлов, и с учетом сравнения с результатами других методов контроля, следует корректировать принятые пороговые значения диагностических параметров. Корректировку пороговых значений можно выполнять по алгоритму, представленному на рисунке 5.2.

После принятия первоначальных пороговых значений выполняются периодические измерения. При достижении хотя бы одним из диагностических параметров в спектре тока значения, характеризующего вид состояния «Недопустимо», ЦНА останавливается и выполняется проверка соосности валов, либо подшипников качения в рамках процедур ТОиР. В случае обнаружения сильных повреждений подшипников, либо уровня расцентровки валов агрегата, что соответствует предельным значениям соответствующих диагностических параметров, корректировка порогов не требуется. При этом состояние узлов оценивается с учетом заводских указаний по допустимому уровню несоосности валов агрегата и характеристикам подшипников, например, допустимым зазорам. Если поврежденность подшипников, либо расцентровка валов не существенны, либо не обнаружены, то с учетом последнего, измеренного перед остановкой, значения СКЗ виброскорости агрегата принимается решение:

– При нормальном значении вибрации следует скорректировать пороги в сторону увеличения, поскольку агрегат был остановлен ошибочно и существенных повреждений не обнаружено; увеличение порогов зависит от установленных состояний узлов, но не рекомендуется увеличивать пороги более чем на 25% от первоначального значения.

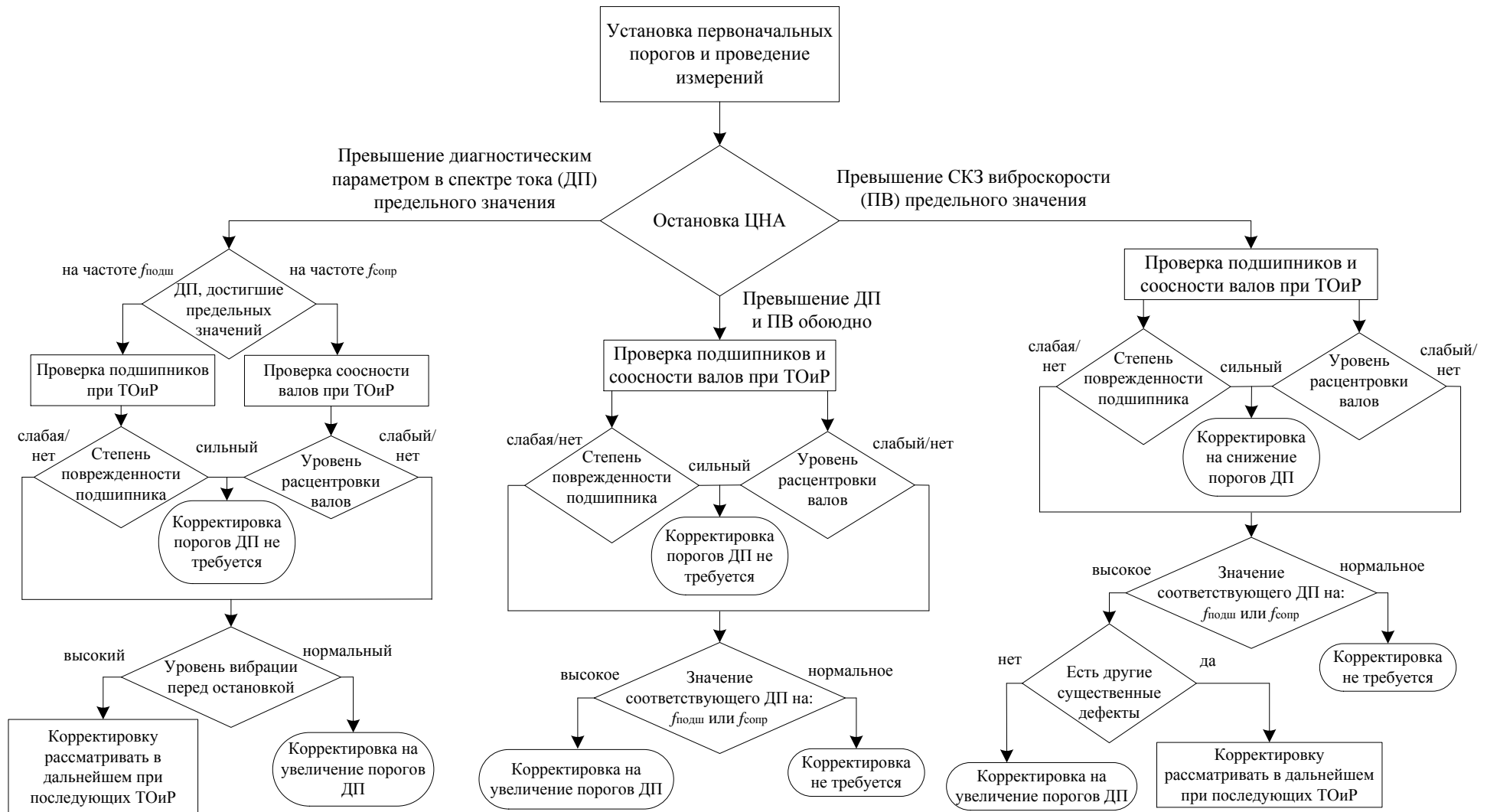


Рисунок 5.2 – Алгоритм корректировки пороговых значений диагностических параметров

– При высоком значении вибрации корректировка не выполняется, поскольку рост диагностических параметров мог быть вызван иными неисправностями и подтверждение необходимости корректировки требует дальнейшего накопления данных.

Если остановка агрегата выполнена по значению СКЗ виброскорости, то в процессе дальнейших мероприятий по ТОиР при выявлении сильной степени поврежденности подшипников или высокого уровня расцентровки валов агрегата пороги диагностического параметра снижаются, поскольку определенные существенные ухудшения состояний узлов не были своевременно отслежены по спектру тока. Снижение порогов рекомендуется выполнять не более чем на 25%. В случае слабых поврежденности подшипников или расцентровки валов, либо их отсутствии, в зависимости от последнего зафиксированного значения диагностического параметра на определенной частоте принимается решение:

– при нормальных значениях корректировка не требуется, поскольку нет существенного ухудшения состояния рассматриваемых узлов;

– при высоких значениях, если отмечено наличие существенного ухудшения состояния других узлов агрегата, то корректировку следует рассмотреть в дальнейшем после накопления данных, если по другим узлам не отмечено проблем, то необходимо увеличить пороги диагностических параметров, поскольку их близость к предельных значениям не оправдана, при этом рекомендуется увеличивать не более чем на 25%.

После остановки агрегата по причине обоюдного достижения хотя бы одним из диагностических параметров в спектре тока и СКЗ виброскорости ЦНА значений, характеризующих вид состояния «Недопустимо», и выявлении сильной степени поврежденности подшипников или высокого уровня расцентровки валов агрегата пороги соответствующего диагностического параметра не корректируются. Если обнаружено слабое ухудшение состояния узлов, либо его отсутствие решение принимается с учетом последнего зафиксированного значения диагностического параметра на определенной частоте:

– при нормальных значениях корректировка не требуется;

– при высоких значениях необходимо увеличить пороги диагностических параметров, при этом рекомендуется увеличивать не более чем на 25%.

5.3 Аппаратурное обеспечение Методики

5.3.1 Рекомендации по обеспечению мобильных систем мониторинга

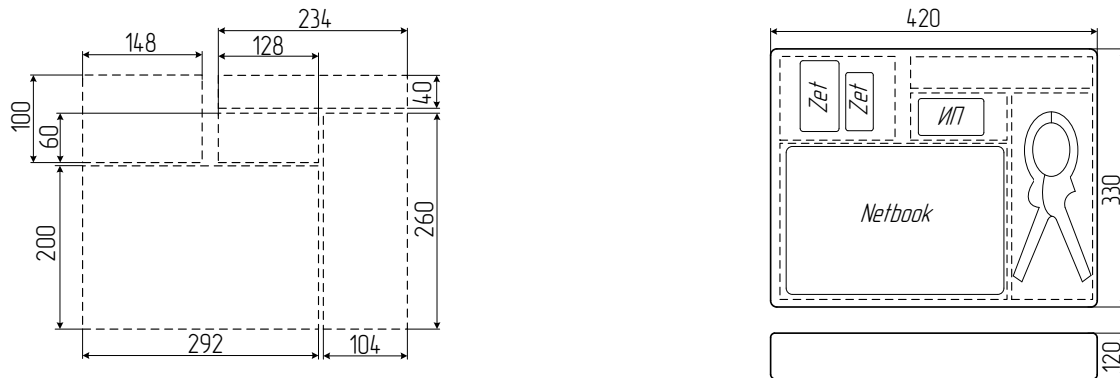
В качестве ПИП сигнала тока для мобильной системы предлагается использовать разъемные токоизмерительные клещи с аналоговым выходным сигналом по току. Клещи должны иметь возможность получения значения выходного сигнала, пропорционального мгновенному значению входного сигнала.

Для реализации автономного питания устройств в составе мобильных систем контроля предлагается использовать портативные ИП с соответствующим выходным напряжением и возможностью перезарядки от сети.

Элементы мобильной измерительной системы контроля предлагается размещать в переносном герметичном ударопрочном кейсе. Материал наружной стороны оболочки кейса должен обладать достаточной стойкостью к механическим и атмосферным воздействиям. Внутренняя область кейса должна быть изготовлена из демпфирующих материалов и иметь отдельные секторы для обеспечения требуемой фиксации приборов и исключения их соударений при переноске. В секторе для размещения компьютера должно предусматриваться наличие отверстий для обеспечения вентиляции. Для разделения внутренней и внешней областей должны использоваться уплотнения для обеспечения герметичности кейса. Эргономичность использования кейса должна обеспечиваться элементами для удобной переноски: ручка, съемные ремешки.

Ниже рассмотрена компоновка мобильной измерительной системы контроля на базе измерительного модуля и преобразователя интерфейса марки Zet производства ЗАО «Электронные технологии и метрологические системы» (компания ZETLAB) [130]. Аналогичные устройства использованы при проведении экспериментальных исследований в настоящей работе (см. параграф

2.2). На рисунках 5.3 а,б представлены эскизы кейса с размещенным в нем оборудованием.



а – размеры внутренних секторов кейса

б – внешние размеры кейса и размещение оборудования

Рисунок 5.3 - Эскизы кейса с размещенным оборудованием

Обозначенные габаритные размеры являются минимально-рекомендуемыми при компоновке системы одним измерительным каналом и компьютером с диагональю экрана 10,1 дюймов. Габариты могут варьироваться в зависимости от размеров аппаратуры и количества измерительных каналов.

Структурная схема соединений измерительной аппаратуры представлена на рисунке 5.4.

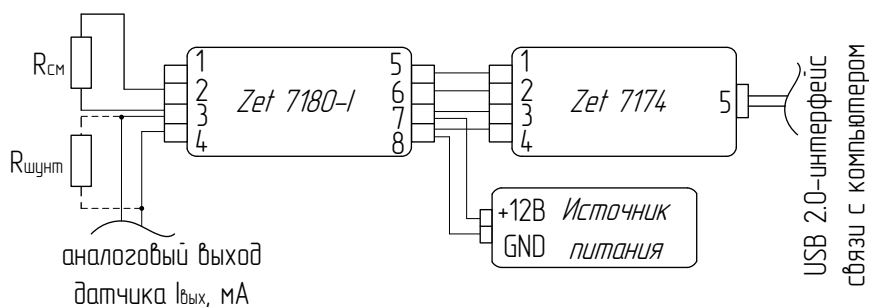


Рисунок 5.4 – Структурная схема соединений измерительной аппаратуры

В таблице 5.1 представлены описания контактов, обозначенных на схеме.

Таблица 5.1 – Описания контактов измерительной аппаратуры

Обозначение контакта на схеме	Тип контакта	Назначение контакта
Измерительный модуль Zet 7080-I		
1	+ 24 В	Питание подключаемых датчиков
2	+ 5 В	Используется только для задания

Обозначение контакта на схеме	Тип контакта	Назначение контакта
		смещения
3	GND	Общий («земля»)
4	SIG	Сигнал с датчика
5	CAN 2.0 линия «H»	Цифровой канал связи с преобразователем интерфейса
6	CAN 2.0 линия «L»	
7	+ (9 ÷ 24) В	Питание модуля
8	GND	Общий («земля»)
Преобразователь интерфейса Zet 7174		
1	CAN 2.0 линия «H»	Цифровой канал связи с измерительным модулем
2	CAN 2.0 линия «L»	
3	+ (9 ÷ 24) В	Питание преобразователя
4	GND	Общий («земля»)
5	USB 2.0	Интерфейс связи с компьютером

Сопротивление $R_{\text{шунт}}$ в схеме включается в цепь в случае превышения значением входного аналогового сигнала установленных пределов для измерительного модуля и рассчитывается [130]:

$$R_{\text{шунт}} = \frac{120}{N - 1}, \quad (5.8)$$

где 120 – сопротивление токоизмерительного резистора, встроенного в измерительный модуль (входное сопротивление модуля);

N – коэффициент, пропорциональный увеличению пределов для измерительного модуля.

Сопротивление $R_{\text{см}}$ позволяет задать смещение и включается в случае подключения датчика с двухполярным выходным сигналом. Рассчитывается $R_{\text{см}}$ следующим образом [130]:

$$R_{\text{см}} = \frac{3,8}{I_{\text{p-p}} / 2}, \quad (5.9)$$

где $I_{\text{p-p}}$ – размах входного сигнала.

В качестве вышеуказанных сопротивлений рекомендуется использовать прецизионные резисторы с точностью $\pm 0,1\%$ для минимизации влияния колебаний сопротивления на точность измерения.

5.3.2 Рекомендации по обеспечению полустационарных систем мониторинга

Полустационарные измерительные системы мониторинга предусматривают частичный монтаж измерительной аппаратуры стационарно в зоне присоединения первичных измерительных преобразователей к объекту контроля с обеспечением возможности подключения портативного измерительного оборудования через организованные каналы связи.

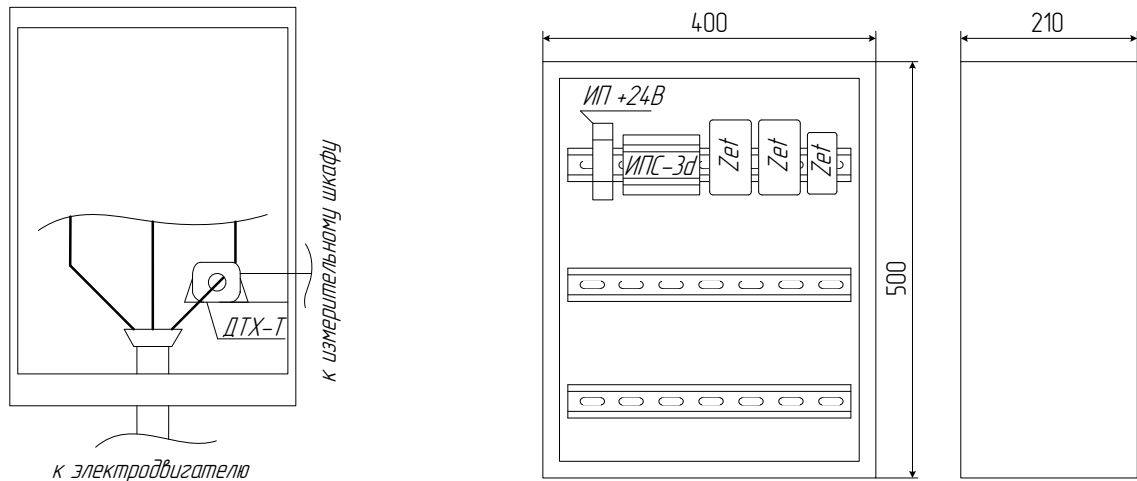
При реализации Методики системой полустационарного типа точкой присоединения первичных преобразователей является ближайший к объекту контроля распределительный узел (силовой щит, ячейка распределительного устройства), в котором имеется возможность использовать для подключения отдельный фазный провод кабеля. Вблизи от точки присоединения необходимо выполнить монтаж и наладку части системы, включающей в себя измерительную аппаратуру для преобразования сигнала и накопления информации с целью последующего анализа, а также источники питания для измерительной аппаратуры.

В качестве первичного измерительного преобразователя полустационарных систем предлагается использовать неразъемные токовые датчики на эффекте Холла типа ДТХ-Т со значением выходного сигнала по току пропорциональным мгновенному значению измеряемого тока в проводнике. Датчики предлагается располагать в распределительном узле на одной из фаз кабеля линии питания электродвигателя. Питание датчика напряжением $\pm 15\text{В}$ обеспечивается источником питания датчиков ИПС-3Д.

Эскизы компоновки одного канала полустационарной системы контроля представлены на рисунках 5.5 а, б.

Часть измерительной системы для преобразования и накопления информации о сигнале предлагается реализовать устройствами производства ZETLAB: измерительный модуль Zet 7080-I, преобразователь интерфейса Zet 7174 и автономный регистратор Zet 7173. Питание устройств обеспечивается источником питания (ИП) с выходным напряжением +24 В. Автономный

регистратор Zet 7173 осуществляет непрерывную запись сигналов, поступающих от измерительного модуля по интерфейсу CAN 2.0, на внешний накопитель типа microSD. Для последующего чтения накопленных данных регистратор подключается к компьютеру по интерфейсу USB 2.0, либо напрямую используется накопитель microSD.



а – установка датчика тока в силовом щите б – установка измерительного оборудования в шкафу

Рисунок 5.5 – Эскизы установки датчика тока в силовом щите и измерительного оборудования в шкафу

Структурная схема соединений измерительной аппаратуры представлена на рисунке 5.6.

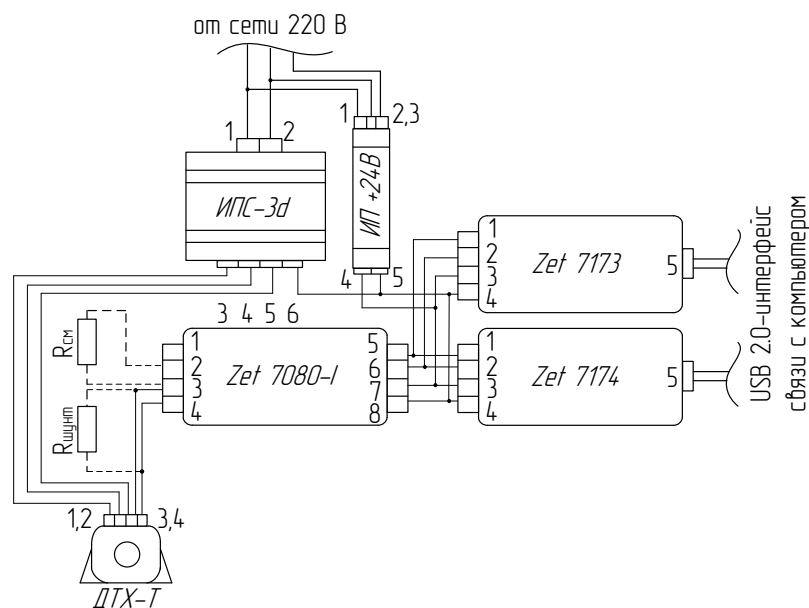


Рисунок 5.6 – Структурная схема соединений измерительной аппаратуры

В таблице 5.2 представлены описания контактов, обозначенных цифрами на схеме.

Таблица 5.2 – Описания контактов измерительной аппаратуры

Обозначение контакта на схеме	Тип контакта	Назначение контакта
Датчик тока ДТХ-Т		
1	+15 В	Питание датчика от источника ИПС-3D
2	- 15 В	
3	Общий	Общий («земля»)
4	Выход	Выход сигнала с датчика
Измерительный модуль Zet 7080-I		
1	+ 24 В	Питание подключаемых датчиков
2	+ 5 В	Используется только для задания смещения
3	GND	Общий («земля»)
4	SIG	Сигнал с датчика
5	CAN 2.0 линия «H»	Цифровой канал связи с преобразователем интерфейса
6	CAN 2.0 линия «L»	
7	+ (9 ÷ 24) В	Питание модуля
8	GND	Общий («земля»)
Преобразователь интерфейса Zet 7174; автономный регистратор Zet 7173		
1	CAN 2.0 линия «H»	Цифровой канал связи с измерительным модулем
2	CAN 2.0 линия «L»	
3	+ (9 ÷ 24) В	Питание преобразователя
4	GND	Общий («земля»)
5	USB 2.0	Интерфейс связи с компьютером
Источник питания датчиков ИПС-3D		
1	L	Подключение фазного провода сети
2	N	Подключение нейтрального провода сети
3	+15 В	Питание датчика тока ДТХ-Т
4	- 15 В	
5	GND	Общий («земля»)
6		
Источник питания ИП +24В		
1	L	Подключение фазного провода сети
2	N	Подключение нейтрального провода сети
3	GND	Подключение заземляющего провода сети
4	+24 В	Питание измерительной аппаратуры
5	GND	Общий («земля»)

Расчет обозначенных на схеме на рисунке 5.6 сопротивлений $R_{шунт}$ и $R_{см}$ выполняется по формулам 5.8, 5.9.

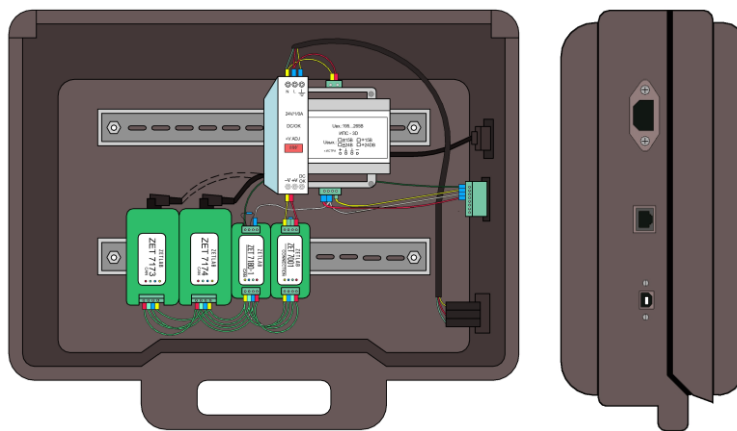
5.3.3 Решение по аппаратурному обеспечению Методики

В рамках диссертационного исследования разработаны варианты компоновок измерительной системы в переносном пластиковом кейсе с использованием схемы полустационарной системы.

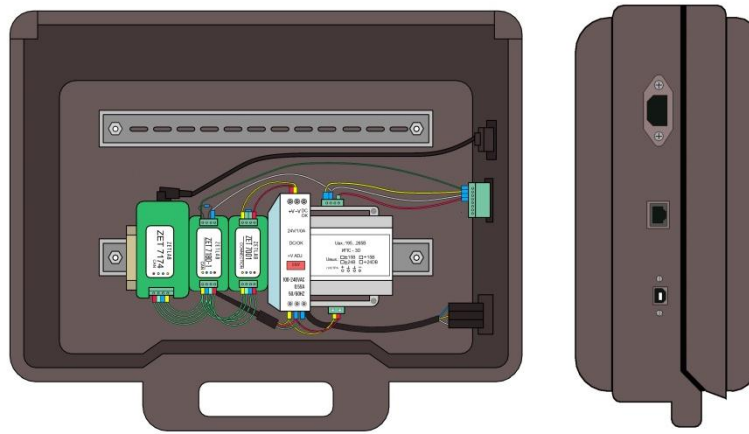
По первому варианту система укомплектована ПИП типа ДТХ-50, измерительным модулем ZET 7180-I, автономным регистратором Zet 7173, соединителем измерительных линий ZET 7001, преобразователем интерфейса ZET 7174, ИП ИПС-3D $\pm 15\text{В}$, и ИП $+24\text{ В}$, комплектом проводов для внешних соединений аппаратурной части в кейсе с сетью 220 В, датчиком тока и ПК. Наличие автономного регистратора позволяет проводить запись сигнала продолжительное время без присутствия специалиста и подключения ПК. Настройка регистратора, измерительного модуля и преобразователя интерфейса выполняется на ПК согласно руководствам по эксплуатации.

По второму варианту система не содержит автономного регистратора Zet 7173 и предназначена для периодических измерений специалистом во время подключения ПК.

На рисунках 5.7 а, б представлены компоновки по двум вариантам аппаратуры в кейсе и вид кейса сбоку со встроенными разъемами для подключения кабелей питания, USB type b для связи с ПК и витой пары с джеком RJ-45 (8p8c) для подключения ПИП (датчика) (ПИП не показан).



а – компоновка системы с автономным регистратором



б – компоновка системы без автономного регистратора

Рисунок 5.7 – Внешний вид кейса с измерительной аппаратурой

Технические характеристики измерительной аппаратуры представлены в таблице Б.1 Приложения Б.

Цветовая маркировка соединительных проводов системы в кейсе представлена в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Цветовая маркировка проводов измерительной системы

Модуль системы	Цвет провода	Назначение
ИП ИПС-3D ±15В	Со стороны 4-х контактного клеммника	
	Красный	«+» питание датчика
	Желтый	«-» питание датчика
	Серый	«Общий/земля»
	Со стороны 2-х контактного клеммника	
	Красный	«L» питание ИП ИПС
Желтый	«N» питание ИП ИПС	
ИП +24 В	Со стороны 3-х контактного клеммника	
	Красный	«L» питание ИП
	Синий	«N» питание ИП
	Желтый	«Земля»
	Со стороны 2-х контактного клеммника	
	Красный	«+» питание соединителя
Желтый	«-» питание соединителя	
ZET 7180-I	Зеленый	«Сигнал/выход» с датчика
	Серый	«Общий/земля»
ZET 7174 ZET 7173	Черный	USB type b

Примечание – модули ZET 7174, ZET 7180-I, ZET 7001 поставляются изготовителем в штатной компоновке с соединениями проводами светло-зеленого цвета для обмена данными по интерфейсу CAN 2.0 (наконечники синий / зеленый – линия «Н» / «L») и питания (красный / желтый – «+ (9 ÷ 24)» / «Земля»).

Использование системы предполагает установку ПИП, подключение ИП системы к сети 220В, настройку аппаратуры с помощью ПО на ПК, и проведение измерений.

ПИП позволяет проводить измерения на ЦНА с электродвигателями, потребляемый ток в фазе которых составляет не более 25 А.

Коэффициент трансформации ПИП, определяющий отношение измеряемого тока в цепи к выходному току датчика, равен 2000.

Сопротивление выходной цепи датчика должно изменяться в пределах от 5 до 360 Ом.

Диаметр отверстия ПИП под токовую жилу 10 мм.

Снятие изоляции с провода в месте размещения датчика не требуется.

Закрепление датчика не должно привести к деформации и нарушению целостности корпуса.

Измерительный модуль ZET 7180-I представляет собой цифровой интеллектуальный датчик с функцией метрологического диагностического самоконтроля при использовании специализированного ПО ZetView.

Условиями эксплуатации измерительной аппаратуры определены следующие допустимые показатели внешних факторов:

- температура воздуха: от 5 до 35 °С;
- относительная влажность воздуха: до 85% при 20 °С, до 90% при 25 °С;
- атмосферное давление: от 630 до 800 мм.рт.ст.

Номиналы необходимых прецизионных резисторов сопротивлений шунта и смещения рассчитываются по формулам 5.8, 5.9.

5.4 Выводы по главе

5.4.1 Сформированный порядок выполнения Методики определения предельных состояний подшипников качения и сопряжения валов консольных ЦНА спектральным анализом тока электродвигателя содержит перечень процедур, указания и рекомендации по компоновке измерительных систем,

определению условий мониторинга, установке и корректировке пороговых значений, измерениям и анализу диагностических параметров, постановке диагноза, прогноза и завершающим этапам мониторинга. Титульный лист утвержденной Методики представлен в Приложении Ж.

5.4.2 В рамках Методики предложены рекомендации и технические решения по аппаратурному обеспечению мониторинга измерительными системами мобильного и полустационарного типов с описанием перечней комплектующей аппаратуры, схем и маркировок соединений, условий эксплуатации аппаратуры.

Заключение

1. По результатам анализа статистики выявления повреждений узлов консольных ЦНА и методов обнаружения повреждений установлено, что узлами, значительно определяющими ресурс консольных ЦНА, являются их подшипники качения и сопряжения валов, эффективное определение предельных состояний которых может выполняться с помощью метода, основанного на анализе параметров амплитудных спектров тока электродвигателей агрегатов. Метод имеет характерный алгоритм реализации, предусматривающий использование аппаратного обеспечения, серийно выпускаемого промышленностью, и достаточное методическое обеспечение. При этом для организации применения метода в целях мониторинга состояний узлов консольных ЦНА необходимо исследовать подходы к определению первоначальных пороговых значений диагностических параметров при подготовке к мониторингу, в том числе, с учетом возможных отклонений рабочих и конструктивных параметров ЦНА.

2. В качестве основы подхода к определению первоначальных пороговых значений диагностических параметров при подготовке к мониторингу предложена взаимосвязь параметра вибрации с диагностическими параметрами спектра тока, для экспериментального исследования которой сформирована методика, содержащая этапы по измерению и анализу параметров спектров тока и вибрации консольного ЦНА К 20/30. Оценку возможных отклонений пороговых значений, по причинам регулирования режима работы насоса и проведению мониторинга на консольных ЦНА других мощностей, принято выполнить на основе модели агрегата с помощью эффективного метода имитационного моделирования с применением аппарата визуальных блок-диаграмм.

3. Экспериментально установлены диагностические параметры на характерных частотах в спектре тока для определения состояний сопряжения валов ($A'_{\text{СОПР}}$) и подшипников качения ($A'_{\text{ПОДШ}}$) консольного ЦНА К 20/30. Дополнительно установлен параметр $A'_{\text{ДВ}}$ для уточнения изменения состояния

подшипников в электродвигателе. Получены линейные зависимости диагностических параметров и параметра общего уровня вибрации агрегата от показателей состояния сопряжения валов (l) и подшипников качения (q), по которым определены выражения связи параметров спектра тока и СКЗ виброскорости, позволяющие установить пороговые значения диагностических параметров для границ видов состояний узлов ЦНА.

4. При помощи имитационного моделирования получены зависимости диагностических параметров в спектре тока от параметров имитации изменения состояний узлов: $A'_{\text{СОПР}} = f(A_{\text{дм}_c})$ и $A'_{\text{ПОДШ}} = f(A_{\text{дм}_c})$, при изменении напора и производительности насоса для моделей с параметрами консольных ЦНА разной мощности. По результатам анализа зависимостей получены относительные коэффициенты регрессии a' , b' , которые предлагается использовать для уточнения пороговых значений диагностических параметров при возможных отклонениях рабочих и конструктивных параметров ЦНА в процессе определения состояния их узлов.

5. Разработана методика определения предельных состояний ресурсопределяющих узлов промышленных консольных ЦНА анализом амплитудных спектров тока их электродвигателей, в которой содержатся указания и рекомендации по выполнению процедур мониторинга, а также технические решения по его аппаратурному обеспечению с описанием перечней комплектующей аппаратуры, схем и маркировок соединений, условий эксплуатации.

Список сокращений

ИП – источник питания.

ПИП – первичный измерительный преобразователь.

ПК – персональный компьютер.

ПО – программное обеспечение.

ППД – поддержание пластового давления.

СКЗ – среднее квадратическое значение.

ТОиР – техническое обслуживание и ремонт.

ЦНА – центробежный насосный агрегат.

КТС – контроль технического состояния.

Список терминов и определений

диагностический параметр: Параметр объекта, используемый при его диагностировании (контроле) (по ГОСТ 20911-89).

измерительная система: Совокупность средств измерений и других средств измерительной техники, размещенных в разных точках объекта измерения, функционально объединенных с целью измерений одной или нескольких величин, свойственных этому объекту (по РМГ 29-2013 ГСИ).

отказ: Событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта (по ГОСТ 27.002-2015).

первичный измерительный преобразователь: Средство измерений, предназначенное для преобразования информации о контролируемой величине в форму, удобную для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи.

пороговое значение диагностического параметра: Значение диагностического параметра, соответствующее переходу состояния объекта контроля из одного вида в другой.

предельное состояние: Состояние объекта, в котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно (по ГОСТ 27.002-2015).

рабочие характеристики насоса: Величины напора (давления) в линии нагнетания и производительности, развиваемые насосом агрегата.

сопряжение валов: Узел соединения валов насоса и электродвигателя агрегата.

Примечание – состояние сопряжения валов характеризуется показателем несоосности валов консольного ЦНА.

Список литературы

1. Аверьянов, Г. С. Анализ источников вибраций, возникающих в насосных агрегатах, и пути повышения эффективности вибрационной защиты элементов конструкций зданий и сооружений [Текст] / Г. С. Аверьянов, В. Н. Бельков, Ю. А. Бурьян, А. Б. Корчагин, Ю. П. Комаров // Омский научный вестник. – 2012. – №1 (107). – С. 43-46.

2. Барков, А. В. Методика диагностирования механизмов с электроприводом по потребляемому току [Текст] / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. А. Борисов, В. В. Федорищев Д. В. Грищенко. – Санкт-Петербург: НОУ «Севзапучцентр», 2012. – 68 с.

3. Баркова, Н. А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Расчет основных частей вибрации узлов машин, параметров измерительной аппаратуры и практическая экспертиза [Текст] / Н. А. Баркова, А. А. Борисов. – Санкт-Петербург: СПбГМТУ, 2009. – 111 с.

4. Баширов, М. Г. Разработка интегральных критериев для оценки технического состояния и ресурса машинных агрегатов нефтегазового производства [Текст] / М. Г. Баширов, И. С. Миронова // Научные труды НИПИ «Нефтегаз» ГНКАР. – 2015. – №1. – С. 46-55.

5. Белкин, А. П. Моделирование вибросостояния и прогнозирование остаточного ресурса электродвигателей магистральных насосных агрегатов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.19 / А. П. Белкин. – Тюмень, 2010. – 132 с.

6. Белкин, А. П. Совершенствование методов оценки остаточного ресурса электродвигателей магистральных насосных агрегатов по параметрам вибрации и износа [Текст] / А. П. Белкин // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2013. – №1(9). – С. 88-93.

7. Беляев, П. В. Диагностические признаки неисправностей в спектре токов статора асинхронного двигателя [Текст] / П. В. Беляев, Д. С. Садаев // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность!. – 2015. – №1. – С. 123-128.

8. Бендат, Дж., Пирсол, А. Применения корреляционного и спектрального анализа [Текст] / Дж. Бендат, А. Пирсол; пер. с англ. – Москва: Мир, 1983. – 312 с.
9. Библия электрика: ПУЭ, МПОТ, ПТЭ. – Москва: Эксмо, 2012. – 752 с.
10. Богданов, Е. А. Основы технической диагностики нефтегазового оборудования [Текст]: учебное пособие для вузов / Е. А. Богданов. – Москва: Высш. шк., 2006. – 279 с.
11. Быстрицкий, Г. Ф. Энергосиловое оборудование промышленных предприятий [Текст]: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений: учеб. пособие для сред. проф. образования / Г. Ф. Быстрицкий. – Москва: Издательский центр «Академия», 2003. – 304 с.
12. Вейнреб, К. Диагностика ротора асинхронного двигателя методом спектрального анализа токов статора [Текст] / К. Вейнреб // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2013. – №4. – С. 133-154.
13. Волкова, И. И. Вероятностные методы исследования зависимостей в нефтяной и газовой промышленности [Текст]: учеб. пособие / И. И. Волкова, Е. В. Пластинина, О. М. Прудникова, Е. В. Хабаева. – Ухта: УГТУ, 2014. – 135 с.
14. Гареев, Р. Р. Совершенствование методов оценки технического состояния насосного и вентиляционного оборудования на установках комплексной подготовки газа [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Р. Р. Гареев. – Уфа, 2014. – 201 с.
15. Генкин, М. Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов [Текст] / М. Д. Генкин, А. Г. Соколова. – Москва: Машиностроение, 1987. – 288 с.
16. Герман-Галкин, С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК [Текст] / С. Г. Герман-Галкин. – Санкт-Петербург: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.
17. Глазырина, Т. А. Совершенствование методов диагностики асинхронных двигателей на основе анализа потребляемых токов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Т. А. Глазырина. – Томск, 2012. – 119 с.

18. Гольдберг, О. Д. Проектирование электрических машин [Текст]: учебник для вузов / О. Д. Гольдберг, Я. С. Гурин, И. С. Свириденко; под. ред. О. Д. Гольдберга. – Москва: Высш. шк., 1984. – 431 с.
19. Гольдин, А. С. Вибрация роторных машин [Текст] / А. С. Гольдин. – 2-е изд. исправл. – Москва: Машиностроение, 2000. – 344 с.
20. ГОСТ 11828-86. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний [Текст]. – Введ. 1987-07-01. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 62 с.
21. ГОСТ 11929-87 (СТ СЭВ 828-77). Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний. Определение уровня шума [Текст]. – Введ. 1988-01-01. – Москва: Издательство стандартов, 1988. – 45 с.
22. ГОСТ 22247-96. Насосы центробежные консольные для воды. Основные параметры и размеры. Требования безопасности. Методы контроля [Текст]. – Введ. 1997-01-01. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 1997. – 20 с.
23. ГОСТ 22261-94. Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия [Текст]. – Введ. 1996-01-01. – Москва: Стандартинформ, 2007. – 69 с.
24. ГОСТ 23941-2002. Шум машин. Методы определения шумовых характеристик. Общие требования [Текст]. – Введ. 2003-01-01. – Москва: Издательство стандартов, 2002. – 13 с.
25. ГОСТ 25315-82. Контроль неразрушающий электрический. Термины и определения [Текст]. – Введ. 1983-07-01. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2005. – 3 с.
26. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения [Текст]. – Введ. 2017-03-01. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 63 с.
27. ГОСТ 27518-87. Диагностирование изделий. Общие требования [Текст]. – Введ. 1989-01-01. – Москва: Стандартинформ, 2009. – 8 с.
28. ГОСТ 30858-2003. Триботехнические требования и показатели. Принципы обеспечения. Общие положения [Текст]. – Введ. 2006-01-01. – Москва: Стандартинформ, 2005. – 13 с.

29. ГОСТ 6134-2007 (ИСО 9906:1999) Насосы динамические. Методы испытаний [Текст]. – Введ. 2008–06–01. – Москва: Стандартинформ, 2008. – 109 с.

30. ГОСТ 8024-90. Аппараты и электротехнические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Нормы нагрева при продолжительном режиме работы и методы испытаний [Текст]. – Введ. 1991–01–01. – Москва: Издательство стандартов, 1990. – 19 с.

31. ГОСТ ИЕС 61010-1-2014. Безопасность электрических контрольно-измерительных приборов и лабораторного оборудования. Часть 1. Общие требования [Текст]. – Введ. 2015–09–01. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 136 с.

32. ГОСТ ISO 20958-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя [Текст]. – Введ. 2016–10–01. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 27 с.

33. ГОСТ ISO 2954-2014 Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Требования к средствам измерений [Текст]. – Введ. 2015–11–01. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 23 с.

34. ГОСТ ИСО 10816-1-97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования [Текст]. – Введ. 1999–07–01. – Москва: Издательство стандартов, 1998. – 29 с.

35. ГОСТ ИСО 10816-3-99. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15000 мин⁻¹ [Текст]. – Введ. 2000–07–01. – Москва: Стандартинформ, 2005. – 22 с.

36. ГОСТ Р 27.605-2013. Надежность в технике. Ремонтопригодность оборудования. Диагностическая проверка [Текст]. – Введ. 2014–06–01. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 43 с.

37. ГОСТ Р 50740-95. Триботехнические требования и показатели. Принципы обеспечения. Общие положения [Текст]. – Введ. 1996-01-01. – Москва: Издательство стандартов, 1995. – 11 с.

38. ГОСТ Р 53672-2009. Арматура трубопроводная. Общие требования безопасности [Текст]. – Введ. 2011-01-01. – Москва: Стандартинформ, 2010. – 57 с.

39. ГОСТ Р 55265.7-2012 (ИСО 10816-7:2009). Вибрация. Контроль состояния машин по измерениям вибрации на невращающихся частях. Часть 7. Насосы динамические промышленные [Текст]. – Введ. 2013-12-01. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 32 с.

40. ГОСТ Р ИСО 13373-1-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 1. Общие методы [Текст]. – Введ. 2011-01-01. – Москва: Стандартинформ, 2010. – 70 с.

41. ГОСТ Р ИСО 13373-3-2016. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 3. Руководство по диагностированию по параметрам вибрации [Текст]. – Введ. 2017-12-01. – Москва: Стандартинформ, 2017. – 36 с.

42. ГОСТ Р ИСО 13381-1-2011. Контроль состояния и диагностика машин. Прогнозирование технического состояния. Часть 1. Общее руководство [Текст]. – Введ. 2012-12-01. – Москва: Стандартинформ, 2012. – 28 с.

43. ГОСТ Р ИСО 17359-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Общее руководство [Текст]. – Введ. 2016-12-01. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 34 с.

44. Гриб, В. В. Анализ современных методов диагностирования компрессорного оборудования нефтегазохимических производств [Текст] / В. В. Гриб, А. Г. Соколова, А. П. Еранов, В. М. Давыдов, Р. В. Жуков // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2002. – №10. – С.57-65.

45. Гумеров, А. Г. Эксплуатация оборудования нефтеперекачивающих станций [Текст] / А. Г. Гумеров, Р. С. Гумеров, А. М. Акбердин. – Москва: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2001. – 475 с.

46. Гусейнзаде, М. А. Методы математической статистики в нефтяной и газовой промышленности [Текст] / М. А. Гусейнзаде, Э. В. Калинина, М. Б. Добкина. – Москва: Недра, 1979. – 340 с.

47. Двинин, А. А. Типовые центробежные насосы в нефтяной промышленности [Текст] : учебное пособие / А. А. Двинин, А. А. Безус. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2010. – 232 с.

48. Денисенко, В. Суммирование погрешностей измерений в системах автоматизации [Текст] / В. Денисенко // Современные технологии автоматизации. – 2012. – №1. – С. 92-100.

49. Иванов, М. Н. Детали машин [Текст]: учебник для машиностроительных специальностей вузов / М. Н. Иванов, В. А. Финогенов. – 12-е изд. испр. – Москва: Высш. шк., 2008. – 408 с.

50. Иосилевич, Г. Б. Детали машин [Текст]: учебник для студентов машиностроит. спец. вузов / Г. Б. Иосилевич. – Москва: Машиностроение, 1988. – 366 с.

51. Иосилевич, Г. Б. Прикладная механика [Текст]: для студентов вузов / Г. Б. Иосилевич, П. А. Лебедев, В. С. Стреляев. – Москва: Машиностроение, 1985. – 576 с.

52. Исакович, М. М. Устранение вибраций электрических машин [Текст] / М. М. Исакович [и др.]. – Ленинград: Энергия, 1969. – 216 с.

53. Калекин, В. С. Основы технической диагностики нефтегазового оборудования [Текст]: учеб. пособие / В. С. Калекин, В. В. Токарев. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – 152 с.

54. Карандеев, Д. Ю. Анализ программных обеспечений, позволяющих моделировать сложные технические системы [Электронный ресурс] / Д. Ю. Карандеев // Современная техника и технологии. – 2015. – № 12. – Режим доступа: <http://technology.snauka.ru/2015/12/8366>.

55. Карелин, В. Я. Насосы и насосные станции [Текст]: Учеб. для вузов / В. Я. Карелин, А. В. Минаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Стройиздат, 1986. – 320 с.
56. Ключев, В. В. Неразрушающий контроль [Текст]. В 7 т. Т. 7. Вибродиагностика / В. В. Ключев и [др.]. – Москва: Машиностроение, 2007. – 732 с.
57. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников [Текст] / А. И. Кобзарь. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
58. Колпаков, Л. Г. Центробежные насосы магистральных нефтепроводов [Текст] / Л. Г. Колпаков. – Москва: Недра, 1985. – 184 с.
59. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин [Текст]: Учеб. для вузов / И. П. Копылов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высшая школа, 2001с – 327 с.
60. Копылов, И. П. Электрические машины [Текст]: Учеб. для вузов / И. П. Копылов. – 2-е изд., перераб. – Москва: Высш. шк.;Логос, 2000. – 607 с.
61. Коршак, А. А. Диагностика объектов нефтеперекачивающих станций [Текст]: Учебное пособие / А. А. Коршак, Л. Р. Байкова. – Уфа: ДизайнПолиграф-Сервис, 2008. – 176 с.
62. Костышин, В. С. Моделирование режимов работы центробежных насосов на основе электрогидравлической аналогии [Текст]: монография / В. С. Костышин. – Иваново-Франковск, 2000. – 163 с.
63. Кравченко, В. М. Техническое диагностирование механического оборудования [Текст]: Учебник / В. М. Кравченко, В. А. Сидоров, В. Я. Седуш. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2009. – 459 с.
64. Купцов, В. В. Разработка метода диагностирования АД на основе конечно-элементной модели [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / В. В. Купцов. – Магнитогорск, 2010. – 136 с.
65. Купцов, В. В. Разработка методики токовой диагностики асинхронных двигателей по осциллограммам нестационарных режимов работы [Текст] / В. В.

Купцов, А. С. Горзунов, А. С. Сарваров // Вестник южно-уральского государственного университета. Серия: энергетика. – 2009. – №12. – С. 60-67.

66. Лукьянов, С. И. Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования [Текст] / С. И. Лукьянов, А. С. Карандаев, С. А. Евдокимов, А. С. Сарваров, М. Ю. Петушков, В. Р. Храмшин // Вестник магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2014. – №1(45). – С. 129-136.

67. Майер, Р. В. Компьютерное моделирование [Электронное учебное издание на компакт-диске]: учебно-методическое пособие для студентов педагогических вузов / Р. В. Майер. – Глазов: Глазов. гос. пед. ин-т, 2015. – 24,3 Мб.

68. Матаев, Н. Н. Способ определения технического состояния электропогружных установок для добычи нефти [Текст]: пат. 2213270 Рос. Федерация: МПК F04D 13/10, F04D 15/00 / Н. Н. Матаев, С. Г. Кулаков, С. А. Никончук; заявитель и патентообладатель ООО «ГРЭЙ». – №2001135903/06; заявл. 26.12.2001; опубл. 27.09.2003, Бюл. №27. – 2 с.

69. Машиностроение. Энциклопедия [Текст]. Том I-3. В 2-х книгах. Книга 2. Динамика и прочность машин. Теория механизмов и машин / А. В. Александров, Н. А. Алфутов, В. В. Астанин [и др.]; Под общ. ред. К. С. Колесникова. – Москва: Машиностроение, 1995. – 624 с.

70. Методические рекомендации о порядке проведения теплового контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах. Серия 28. Выпуск 11 [Текст]: РД-13-04-2006. – 2-е изд., испр. – Москва: ЗАО «Научно-технический центр исследования проблем промышленной безопасности», 2010. – 32 с.

71. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Часть 2. Анализ качества электрической энергии [Текст]: РД 153-34.0-15.502-2002. – Москва: ЗАО «Энергосервис», 2003. – 64 с.

72. Методические указания. Характеристики погрешности средств измерений в реальных условиях эксплуатации. Методы расчета [Текст]: РД 50-453-84: срок введ. в действие установлен с 01.01.1986. – Москва: Издательство стандартов, 1986. – 152 с.

73. Объем и нормы испытаний электрооборудования [Текст]: РД 34.45-51.300-97; Под общ. ред. Б. А. Алексеева, Ф. Л. Когана, Л. Г. Мамиконянца. – 6-е изд., с изм. и доп. – Москва: Из-во НЦ ЭНАС, 2004. – 256 с.

74. Пантелеев, В. А. Статистические основы моделирования [Текст]: монография / В. А. Пантелеев. – Ухта: УГТУ, 2008. – 116 с.

75. Петухов, В. С. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока [Текст] / В. С. Петухов, В. А. Соколов // Новости электротехники. – 2005. – №1(31). – С. 50-52.

76. Петухов, В. С. Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов парка тока и напряжения [Текст] / В. С. Петухов // Новости электротехники. – 2008. – № 1(49).

77. Петухов, В. С. Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов парка тока и напряжения. Измерительный комплекс [Текст] / В. С. Петухов // Новости электротехники. – 2008. – № 2(50).

78. Петухов, В. С. Способ диагностики электродвигателей переменного тока и связанных с ними механических устройств [Текст]: пат. 2300116 Рос. Федерация: МПК G01R 31/34 / В. С. Петухов, В. А. Соколов, О. А. Григорьев, С. Н. Великий, А. А. Михель; заявитель и патентообладатель ООО «Центр электромагнитной безопасности». – №2005110648/28; заявл. 13.04.2005; опубл. 27.05.2007, Бюл. №15. – 16 с.

79. Петухов, В. С. Способ диагностики электродвигателя переменного тока и связанных с ним механических устройств [Текст]: пат. 2339049 Рос. Федерация: МПК G01R 31/34 / В. С. Петухов; заявитель и патентообладатель В. С. Петухов. – №2007107715/28; заявл. 02.03.2007; опубл. 20.11.2008, Бюл. №32. – 2 с.

80. Писаревский, В. М. Эксплуатация и диагностика насосных агрегатов магистральных нефтепроводов [Текст]: учеб. пособие / В. М. Писаревский. – Москва: Нефть и газ, 2004. – 126 с.

81. ПНСТ 168-2016/ISO/DIS 13373-9. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Методы диагностирования электродвигателей [Текст]. – Срок действ. – с 2017–12–01 до 2020–12–01. – Москва: Стандартиформ, 2017. – 28 с.

82. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок. Серия 17. Выпуск 53 [Текст]. – Москва: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2013. – 192 с.

83. Прудников, А. Ю. Экспериментальная проверка способа диагностирования эксцентриситета ротора асинхронного двигателя [Текст] / А. Ю. Прудников, В. В. Боннет, А. Ю. Логинов, В. В. Потапов // Вестник КрасГАУ. – 2015. – №11. – С. 73-77.

84. Ревизия и дефектовка подшипников и их узлов. Подбор, замена, диагностика, эксплуатация [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://1rti.ru/podbor-zamena-diagnostika-jekspluatacija/reviziya-i-defektovka-podshipnikov-i-ih-uzlov/>.

85. РМГ 62-2003. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Оценивание погрешности измерений при ограниченной исходной информации [Текст]. – Введ. 2005–01–01. – Москва: Стандартиформ, 2008. – 20 с.

86. Рогачев, В. А. Диагностирование эксцентриситета ротора асинхронных электродвигателей по гармоническому составу тока статора [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / В. А. Рогачев. – Новочеркасск, 2008. – 159 с.

87. Розенберг, Г. Ш. Вибродиагностика [Текст] : монография / Г. Ш. Розенберг, Е. З. Мадорский, Е. С. Голуб, [и др.]; Под ред. Г. Ш. Розенберга. – Спб.: ПЭИПК, 2003. – 284 с.

88. СА 03-001-05. Стандарт ассоциации. Центробежные насосные и компрессорные агрегаты опасных производств. Эксплуатационные нормы вибрации [Текст]. – Введ. 2005–02–01. – Москва, 2005. – 48 с.

89. Савченко, А. Л. Исследование износа радиально-упорных шарикоподшипников [Текст] / А. Л. Савченко, Н. Т. Минченя // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2006. – №3. – С. 60-64.

90. Самородов, А. В. Разработка электромагнитного спектрального метода оценки поврежденности взрывозащищенных машинных агрегатов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / А. В. Самородов. – Уфа, 2012. – 159 с.

91. Санников, А. А. Вибрация и шум технологических машин и оборудования лесного комплекса [Текст]: монография / А. А. Санников [и др.]; Под ред. А. А. Санникова. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2006. – 145 с.

92. Сафин, Н. Р. Диагностика повреждений подшипников асинхронных двигателей в условиях горнодобывающих предприятий [Текст] / Н. Р. Сафин, В. А. Прахт, В. А. Дмитриевский // Горный журнал. – 2017. – №1. – С. 60-64.

93. Сафин, Н. Р. Разработка методики токовой диагностики асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором [Текст] / Н. Р. Сафин, В. А. Прахт, В. А. Дмитриевский // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XIX Бенардосовские чтения). Материалы Международной научно-технической конференции. – 2017. С. 138-143.

94. Сироткин, М. Е. Методы моделирования производственных процессов предприятия машиностроения [Текст] / М. Е. Сироткин // Наука и образование. – 2011. – №8. – 15 с.

95. Способ диагностики механизмов и систем с электрическим приводом [Текст]: пат. 2431152 Рос. Федерация: МПК G01R 31/34 / И. Р. Кузеев, М. Г. Баширов, И. В. Прахов, Э. М. Баширова, А. В. Самородов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет». – №2009143292/28; заявл. 23.11.2009; опубл. 10.10.2011, Бюл. №28. – 19 с.

96. Способ диагностики технического состояния электропривода по оценке динамики его параметров [Текст]: пат. 2546993 Рос. Федерация: МПК G01R 31/34 / В. Н. Волков, А. В. Кожевников; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет». - №2013146260/28; заявл. 16.10.2013; опубл. 10.04.2015, Бюл. №10. – 8 с.

97. СТО 70238424.29.160.30.004-2009. Электродвигатели напряжением до 1000 В мощностью от 0,1 до 100 кВт. Общие технические условия на капитальный ремонт. Нормы и требования [Текст]. – Введ. 2010–01–11. – Москва: НП «ИНВЭЛ», 2010. – 24 с.

98. Сундуков, А. Е. Анализ вибрационного состояния подшипников качения в процессе их износа [Текст] / А. Е. Сундуков, Е. В. Сундуков // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королева. – 2006. – №2-1(10). – С. 85-89.

99. Терехин, В. Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1) [Текст]: учебное пособие / В. Б. Терехин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 292 с.

100. Толстов, А. Г. Техническая диагностика. Принципы принятия решений при обработке опытов [Текст] / А. Г. Толстов. – Москва: ООО «Газпром экспо», 2010 – 232 с.

101. Чернов, Д. В. Функциональная диагностика асинхронных электродвигателей в переходных режимах работы [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.01 / Д. В. Чернов. – Ульяновск, 2005. – 18 с.

102. Шикунов, В. Н. Разработка методов повышения безопасности эксплуатации машинных агрегатов нефтегазовых производств с электрическим приводом [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / В. Н. Шикунов. – Уфа, 2008. – 146 с.

103. Ширман, А. Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования [Текст] / А. Р. Ширман, А. Б. Соловьев. – Москва, 1996. – 276 с.

104. Шичёв, П. С. Моделирование неисправного состояния центробежного насосного агрегата и оценка электромагнитных диагностических признаков [Текст] / П. С. Шичёв // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2018. – №2(128). – С. 100-106.

105. Шичёв, П. С. Определение диагностических признаков неисправного состояния центробежного насосного агрегата в спектре тока электродвигателя [Текст] / П. С. Шичёв, З. Х. Ягубов // Контроль. Диагностика. – 2017. – №6. – С. 50-57.

106. Шичёв, П. С. Анализ методов технической диагностики механических дефектов центробежных насосных агрегатов [Текст] / П. С. Шичёв, И. Ю. Быков, З. Х. Ягубов, В. И. Сёмин // Инженер-нефтяник. – 2019. №1. С. 45-50.

107. Шичёв, П. С. Оценка диагностических параметров электропараметрического метода контроля соосности валов центробежных насосных агрегатов [Текст] / П. С. Шичёв, И. Ю. Быков, З. Х. Ягубов // Контроль. Диагностика. – 2019. №5 (251). С. 38-45.

108. Шичёв, П. С. Диагностический параметр контроля дефектов подшипников качения центробежного насосного агрегата [Текст] / П. С. Шичёв, И. Ю. Быков, З. Х. Ягубов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2019. №8. С. 37-43.

109. Шишмарев, В. Ю. Надежность технических систем [Текст]: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. Ю. Шишмарев. – Москва: Издательский центр «Академия», 2010. – 304 с.

110. Эксплуатация насосно-силового оборудования на объектах трубопроводного транспорта [Текст]: учебное пособие / Ю. Д. Земенков [и др.]; под общей ред. Ю. Д. Земенкова. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2010. – 456 с.

111. Ягубов, З. Х. Об исследовании процесса обнаружения дефектов насосно-компрессорного оборудования по гармоническому составу тока статора электродвигателя [Электронный ресурс] / З. Х. Ягубов, П. С. Шичёв, Е. В. Тетеревлева, И. А. Дементьев // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2015. № 4. С. 473-496. – Режим доступа: <http://ogbus.ru/>.

112. Ягубов, З. Х. Устройство технической диагностики электроприводного насосно-компрессорного оборудования [Текст]: пат. 165733 Рос. Федерация: МПК G01R 31/34 / З. Х. Ягубов, Э. З. Ягубов, П. С. Шичёв, К. Г. Игнатъев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет». – №2015152678/28; заявл. 08.12.2015; опубл. 10.11.2016, Бюл. №31. – 2 с.

113. Ящура, А. И. Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования [Текст]: Справочник / .А. И. Ящура. – Москва: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 504 с.

114. Aderiano M. da Silva, Richard J. Povinelli, Nabeel A. O. Demerdash. Induction machine broken bar and stator short-circuit fault diagnostics based on three-phase stator current envelopes // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. vol. 55, no. 3. P. 1310-1318.

115. Bashir Mahdi Ebrahimi, Mehrgan Javan Roshtkhari, Jawad Faiz, Seyed Vahid Khatami. Advanced Eccentricity Fault Recognition in Permanent Magnet Synchronous Motors Using Stator Current Signature Analysis // IEEE Transactions on industrial electronics. – 2014. vol. 61, no. 4. P. 2041-2052.

116. Bram Corne, Bram Vervisch, Stijn Derammelaere, Sérgio M. A. Cruz, Jos Knockaer, Jan Desmet. Single Point Outer Race Bearing Fault Severity Estimation using Stator Current Measurements // IEEE International electric machines and drives conference (IEMDC). Miami, FL. 2017.

117. Hernandez-Solis A., Carlsson F. Diagnosis of submersible centrifugal pumps: a motor current and power signature analysis // European power electronics and drivers Journal. – 2010. – vol. 20-1.

118. Hong Liang, Yong Chen, Siyuan Liang, Chengdong Wang. Fault Detection of Stator Inter-Turn Short-Circuit in PMSM on Stator Current and Vibration Signal // Applied Sciences. – 2018. vol. 8. P. 1-11.

119. Levent Eren, Michael J. Devaney. Bearing Damage Detection via Wavelet Packet Decomposition of the Stator Current // IEEE Transactions on industrial electronics. – 2004. vol. 53, no. 2. P. 431-436.

120. Makoto Kanemaru, Mitsuru Tsukima, Toshihiko Miyauchi, Kazufumi Hayashi. Bearing Fault Detection in Induction Machine Based on Stator Current Spectrum Monitoring // IEEJ Journal of Industry Applications. – 2018. vol. 7, no.3. P. 282–288.

121. Martin Blödt, Pierre Granjon, Bertrand Raison, Gilles Rostaing. Models for Bearing Damage Detection in Induction Motors Using Stator Current Monitoring // IEEE Transactions on industrial electronics. – 2008. vol. 55, no. 4. P. 1813-1822.

122. Mehran Jahangiri, Seyed Alireza Seyed Roknizadeh. Clogged Impeller Diagnosis in the Centrifugal Pump Using the Vibration and Motor Current Analysis // Journal of Applied and Computation Mechanics. – 2018. vol. 4 (4). P. 310-317.

123. Muhammad Irfan, Alwadie A., Adam Glowacz. Design of a Novel Electric Diagnostic Technique for Fault Analysis of Centrifugal Pumps // Applied Sciences. – 2019. vol. 9. P. 1-13.

124. Parasuram P. Harihara, Alexander G. Parlos. Fault diagnosis of centrifugal pumps using motor electrical signals // IntechOpen. – 2012. DOI: 10.5772/26439.

125. S. R. Shaw, S. B. Leeb. Identification of induction motor parameters from transient stator current measurements // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1999. vol. 46. P. 139-149.

126. Samir Alabied, Usama Haba, Alsadak Daraz, Fengshou Gu, Andrew D. Ball. Empirical Mode Decomposition of Motor Current Signatures for Centrifugal Pump Diagnostics // 2018 24th International Conference on Automation and Computing (ICAC). Newcastle upon Tyne, United Kingdom. 2018. pp. 1-6. DOI: 10.23919/ICOnAC.2018.8749109.

127. Samir Alabied, Osama Hamomd, Alsadak Daraz, Fengshou Gu, Andrew D. Ball. Fault Diagnosis of Centrifugal Pumps based on the Intrinsic Time-scale Decomposition of Motor Current Signals // 2017 23rd International Conference on Automation and Computing (ICAC). University of Huddersfield, Huddersfield, UK. 2017. DOI: 10.23919/ICOnAC.2017.8082027.

128. Valeria Leite, Jonas Guedes Borges da Silva, Germano Lambert Torres, G.F.C. Veloso, Luiz Eduardo Borges da Silva, E. L. Bonaldi, Levy Lacerda de Oliveira.

Bearing Fault Detection in Induction Machine Using Squared Envelope Analysis of Stator Current // Bearing Technology. – 2017. DOI: 10.5772/67145. – Available from: <https://www.intechopen.com/books/bearing-technology/bearing-fault-detection-in-induction-machine-using-squared-envelope-analysis-of-stator-current>.

129. Xiangjin Song, Jingtao Hu, Hongyu Zhu, Jilong Zhang. Effects of the Slot Harmonics on the Stator Current in an Induction Motor with Bearing Fault // Mathematical Problems in Engineering. – 2017. Article ID 2640796. DOI: 10.1155/2017/2640796. 11 p.

130. ZETLAB [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://zetlab.com/>.

131. Zhipeng Feng, Xiaowang Chen, Ming J. Zuo. Induction Motor Stator Current AM-FM Model and Demodulation Analysis for Planetary Gearbox Fault Diagnosis // IEEE Transactions on industrial informatics. – 2019. vol. 15, no. 4. P. 2386-2394.

Приложение А

Акт о внедрении результатов диссертационного исследования в учебный процесс



Настоящим актом подтверждается факт внедрения с 16.09.2019 г. результатов, полученных в ходе выполнения диссертационного исследования, в образовательный процесс, реализуемый в ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет» по направлению подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование», профилю «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов», направлению 15.04.02 «Технологические машины и оборудование», программе «Технологические процессы, машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов», направлению 21.03.01 «Нефтегазовое дело», профилю «Эксплуатация и обслуживание технологических объектов нефтегазового производства» в рамках дисциплины «Диагностика нефтегазопромышленного оборудования», и направлению подготовки 21.04.01 «Нефтегазовое дело», программе «Проектирование, эксплуатация и диагностика технологических процессов и объектов нефтегазового производства» в рамках дисциплины «Проблемы диагностики в области эксплуатации технологических комплексов нефтяных и газовых промыслов».

На основе результатов диссертационного исследования подготовлено и издано учебно-методическое пособие «Оценка технического состояния ресурсоопределяющих узлов промышленных центробежных насосных агрегатов методом анализа спектров тока электродвигателя» под авторством И. Ю. Быкова, П. С. Шичёва объемом 4,5 печ. л. для обеспечения занятий лекционного и лабораторного типов.

В рамках лекционных занятий изучается теоретический материал в области оценки технического состояния ресурсоопределяющих узлов консольных центробежных насосных агрегатов, эксплуатируемых на нефтегазовых промыслах. Лабораторный цикл, проводимый согласно методике экспериментальных исследований, включает в себя работы по темам: «Оценка состояния сопряжения валов ЦНА при нарушении соосности смешанного типа», «Оценка состояния подшипников насоса ЦНА при износе дорожек качения», «Оценка состояния подшипников электродвигателя ЦНА при износе дорожек качения».

И. о. зав. кафедрой МОНиТП, канд. техн. наук

Директор СТИ, канд. техн. наук

Директор БИК

Д. А. Борейко

И. В. Курта

И. А. Злобин

Рисунок А.1 – Акт о внедрении результатов исследования

Приложение Б

Основные технические характеристики средств измерений
экспериментального комплекса

Таблица Б.1 – Основные технические характеристики измерительного
оборудования экспериментального комплекса

Параметр, единица измерения	Значение
Датчик тока ДТХ-50	
Диапазон измеряемых токов, А	0-50
Основная приведенная погрешность измерения, % не более	1
Нелинейность выходной характеристики, % не более	0,1
Напряжение питания, В	±15 (±5%)
Диапазон температур, °С	-20 ÷ 70
Измерительный модуль ZET 7180-I	
Диапазоны входных сигналов, мА	4-20, 0-20, 0-5
Основная приведенная погрешность измерения, % не более	1
Максимальная частота дискретизации, Гц	400
Напряжение питания, В	+9 ÷ +24 В
Диапазон температур, °С	-40 ÷ 100
Преобразователь интерфейса ZET 7174	
Интерфейс подключения к датчикам	CAN 2.0
Интерфейс подключения к ПК	USB 2.0
Скорость обмена данными, кбит/с	100,300,1000
Напряжение питания, В	+9 ÷ +24 В
Диапазон температур, °С	-40 ÷ 60
Потребляемая мощность, Вт	1,5
Виброметр AR63B	
Диапазоны измеряемых значений вибрации	Виброскорость: -0,1 ÷ 199мм/с
	Виброускорение: -0,1 ÷ 199м/с ²
	Виброперемещение: 0,001 ÷ 1,99мм
Частотные диапазоны измерения, кГц	Виброскорость: 0,01 ÷ 1(НЧ)
	Виброускорение: 0,01 ÷ 1(НЧ); 1 ÷ 15(ВЧ)
	Виброперемещение: 0,01 ÷ 1(НЧ)
Точность, %	±5%
Максимальный выходной сигнал, В	~2
Напряжение питания, В	+9
Диапазон температур, °С	0 ÷ 40

Приложение В

Порядок расчета параметров моделей насоса и электродвигателя

В.1 Определение расчетного угла нагрузки насоса

Расчетный угол нагрузки центробежного насоса определяется по формуле:

$$\gamma_p^{\text{НОМ}} = \pi \cdot \left(1 - \frac{k_{\text{Др}}}{H_{*0} \cdot \mu_H \cdot \eta_{\Gamma}^{\text{НОМ}}}\right) \mu_Q \cdot \eta_0^{\text{НОМ}},$$

где $k_{\text{Др}} = \frac{m_{\text{Др}}^2 - 1}{m_{\text{Др}}^2}$;

$$m_{\text{Др}} = \frac{D_{2\text{E}}}{D_{1\text{Eр}}} = \frac{D_{2\text{E}} [\lg(D_{1\text{E}} / D_{2\text{E}}) + 1,3]^2}{D_{1\text{E}}};$$

$D_{2\text{E}} = D_2 \sqrt{L}$; $D_{1\text{E}} = D_1 \sqrt{L}$ – эквивалентные диаметры рабочего колеса насоса;

D_1, D_2, L – диаметры внутренний и внешний рабочего колеса соответственно, количество рабочих ступеней давления;

$$H_{*0} = k_{\text{Др}} \left(\frac{\pi D_{2\text{E}} n^{\text{НОМ}}}{60}\right)^2 \frac{1}{g H_{\text{Д}}^{\text{НОМ}}} \quad \text{– относительный напор холостого хода}$$

идеального насоса;

$H_{\text{Д}}^{\text{НОМ}}, n^{\text{НОМ}}, g$ – номинальный действительный напор насоса, номинальная частота вращения ротора, ускорение свободного падения соответственно;
 $\mu_H = 0,8; \mu_Q = 0,9$ – коэффициенты снижения напора от конечного числа лопастей и объемного сжатия рабочего потока соответственно;

$$\eta_{\Gamma}^{\text{НОМ}} = 1 - \frac{0,42}{[\lg(4500 \sqrt[3]{\frac{Q_{\text{Д}}^{\text{НОМ}}}{n^{\text{НОМ}} \eta_0^{\text{НОМ}}}}) - 0,172]^2} \quad \text{– гидравлический КПД насоса;}$$

$Q_{\text{Д}}^{\text{НОМ}}$ – номинальная действительная производительность насоса;

$$\eta_o^{\text{НОМ}} = \frac{1}{1 + 0,68n_s^{-0,66}} - \text{объемный КПД насоса};$$

$$n_s = 3,65n^{\text{НОМ}} \sqrt[4]{\left(\frac{Q_{\text{Д}}^{\text{НОМ}}}{M}\right)^2 \left(\frac{L}{H_{\text{Д}}^{\text{НОМ}}}\right)^3} - \text{коэффициент быстроходности};$$

M – количество рабочих потоков насоса.

В.2 Расчет параметров модели электродвигателя

Активные сопротивления цепей статора R_s и ротора R_r рассчитываются по формулам:

$$R_s = \frac{U_{\text{НОМ}}^2 (1 - s_{\text{НОМ}})}{2c_1 (1 + c_1 / s_k) m_k (P_{\text{НОМ}} + \Delta P_{\text{мех}})}; R_r = \frac{(P_{\text{НОМ}} + \Delta P_{\text{мех}}) m_k}{3(1 - s_{\text{НОМ}}) i_k^2 I_{\text{НОМ}}^2},$$

где $U_{\text{НОМ}}, I_{\text{НОМ}}$ – номинальные линейное напряжение и ток обмотки статора;

$$s_{\text{НОМ}} = \frac{n_c - n_{\text{НОМ}}}{n_c} - \text{номинальное скольжение};$$

$n_c, n_{\text{НОМ}}$ – синхронная частота вращения магнитного поля статора и номинальная частота вращения ротора соответственно;

$$c_1 = 1 + \frac{L_{1s}}{L_m} - \text{конструктивный коэффициент (предварительно задается в}$$

диапазоне [1,02 ... 1,05], далее, посредством итераций, достигается совпадение принимаемого и рассчитываемого по индуктивностям значений);

$$s_k = (m_{\text{max}} + \sqrt{m_{\text{max}}^2 - 1}) s_{\text{НОМ}} - \text{критическое скольжение};$$

$$m_{\text{max}} = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{НОМ}}} - \text{отношение максимального (критического) и номинального}$$

моментов;

$$P_{\text{НОМ}} + \Delta P_{\text{мех}} = P_{\text{НОМ}} \left[1 + \left(\frac{1}{\eta_{\text{НОМ}}} - 1 \right) \frac{1}{6} \right] - \text{мощность с учетом механических}$$

потерь;

$$P_{\text{НОМ}}, \eta_{\text{НОМ}} - \text{номинальные мощность и КПД двигателя};$$

$m_k = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{НОМ}}}$ – отношение пускового и номинального моментов;

$i_k = \frac{I_k}{I_{\text{НОМ}}}$ – отношение тока короткого замыкания (пускового) к

номинальному току;

Собственные индуктивности L_s, L_r , индуктивности рассеяния L_{ls}, L_{lr} статора и ротора и взаимная индуктивность L_m рассчитываются по формулам:

$$L_s \cong L_r = \frac{1}{2pf_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}I_{\text{НОМ}} (\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{\text{НОМ}}} - \cos \varphi_{\text{НОМ}} s_{\text{НОМ}} / s_k)};$$

$$L_{ls} \cong L_{lr} = \frac{1}{4pf_{\text{НОМ}}} \cdot \sqrt{\left(\frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}i_k I_{\text{НОМ}}}\right)^2 - (R_s + R_r)^2};$$

$$L_m = L_s - L_{ls},$$

где $f_{\text{НОМ}}, \cos \varphi_{\text{НОМ}}$ – номинальные частота напряжения питания и коэффициент мощности двигателя;

p – число пар полюсов двигателя.

Приложение Г

Экспериментальные выборки значений диагностических параметров

Таблица Г.1 – Общая выборка значений $A'_{\text{СОПР}}$ и $V_{\text{СКЗ}}$ при несоосности валов

№ частной выборки	№ измерения	$A'_{\text{СОПР}}$	$V_{\text{СКЗ}}$, мм/с	№ частной выборки	№ измерения	$A'_{\text{СОПР}}$	$V_{\text{СКЗ}}$, мм/с
1	1	0,625	3	3	116	0,702	3,8
	2	0,646	3,2		117	0,725	4,0
	3	0,636	3,2		118	0,721	4,2
	4	0,645	3,5		119	0,702	4,6
	5	0,648	3,3		120	0,696	4,6
	6	0,654	2,5		121	0,705	4,6
	7	0,660	3		122	0,714	3,8
	8	0,673	2,6		123	0,708	4,9
	9	0,661	2,8		124	0,697	4,8
	10	0,652	2,6		125	0,722	4,8
	11	0,669	2,9		126	0,718	4,1
	12	0,632	2,9		127	0,713	4,2
	13	0,660	2,9		128	0,711	4,1
	14	0,664	2,9		129	0,726	3,8
	15	0,668	3,1		130	0,688	4,4
	16	0,638	3,2		131	0,71	4,5
	17	0,675	2,9		132	0,718	3,8
	18	0,661	3,0		133	0,72	4,8
	19	0,657	3,0		134	0,709	4,5
	20	0,670	2,8		135	0,713	4,4
	21	0,631	3,3		136	0,704	4,3
	22	0,657	3,0		137	0,696	4,4
	23	0,674	3,3		138	0,696	4,1
	24	0,639	2,7		139	0,731	5,3
	25	0,635	3,3		140	0,743	5,6
	26	0,659	3,3		141	0,756	5,6
	27	0,626	2,6		142	0,746	5,5
	28	0,664	2,8		143	0,74	5,8
	29	0,663	2,6		144	0,725	5,7
	30	0,647	2,7		145	0,733	5,6
	31	0,652	2,6		146	0,752	5,3
	32	0,646	2,5		147	0,746	5,1
	33	0,665	3,4		148	0,752	5,6
	34	0,627	2,7		149	0,734	5,8
	35	0,638	2,8		150	0,746	5
	36	0,651	3,2		151	0,748	5,8
	37	0,664	3,0		152	0,735	5,2
	38	0,631	3,2		153	0,745	5,2

№ частной выборки	№ измерения	$A'_{\text{СОПР}}$	$V_{\text{СКЗ}},$ мм/с	№ частной выборки	№ измерения	$A'_{\text{СОПР}}$	$V_{\text{СКЗ}},$ мм/с
	39	0,619	2,7		154	0,725	5,5
	40	0,668	3,0		155	0,746	5,2
	41	0,641	2,8		156	0,74	5,3
	42	0,664	3,1		157	0,759	5,3
	43	0,633	2,6		158	0,733	5,7
	44	0,636	2,8		159	0,754	5,1
	45	0,646	2,8		160	0,725	5,3
	46	0,639	3,4		161	0,741	4,9
2	47	0,722	4,9	5	162	0,738	5,4
	48	0,691	3,9		163	0,733	5,3
	49	0,705	4,5		164	0,736	5,5
	50	0,701	4		165	0,738	5,8
	51	0,704	4,8		166	0,735	4,9
	52	0,704	4,8		167	0,746	5,1
	53	0,721	4,5		168	0,756	5
	54	0,708	4		169	0,759	5,2
	55	0,695	5		170	0,737	5,1
	56	0,705	3,9		171	0,734	5,7
	57	0,72	4,9		172	0,759	5
	58	0,717	4,6		173	0,733	5,2
	59	0,709	4,4		174	0,759	5,4
	60	0,714	4,4		175	0,748	5,3
	61	0,693	3,8		176	0,742	5,3
	62	0,711	4,2		177	0,735	5
	63	0,712	4,9		178	0,747	5,7
	64	0,706	4,7		179	0,76	5,8
	65	0,722	3,8		180	0,733	5,8
	66	0,703	4		181	0,746	4,9
	67	0,691	4,6		182	0,746	5,3
	68	0,724	4,5		183	0,739	5,7
	69	0,703	5		184	0,755	5,4
	70	0,705	3,8		185	0,726	5,4
	71	0,724	4,9		186	0,728	5,4
	72	0,721	4,5		187	0,729	5,1
	73	0,724	4,7		188	0,730	5,1
	74	0,724	4,9		189	0,731	5,3
	75	0,69	4,1		190	0,732	5,5
	76	0,695	4		191	0,734	5,6
	77	0,699	4,7		192	0,735	4,9
	78	0,719	3,9		193	0,735	5,3
	79	0,707	4		194	0,736	5,8
	80	0,707	4,5		195	0,737	5,2
	81	0,701	4		196	0,738	5,3
	82	0,698	4,2		197	0,738	5,1
	83	0,698	4,4		198	0,739	5,8
	84	0,705	4,1		199	0,740	5,8
85	0,692	5	200	0,740	5,2		

№ частной выборки	№ измерения	$A'_{\text{СОПР}}$	$V_{\text{СКЗ}},$ мм/с	№ частной выборки	№ измерения	$A'_{\text{СОПР}}$	$V_{\text{СКЗ}},$ мм/с
	86	0,71	4,1		201	0,741	4,9
	87	0,723	4,9		202	0,742	4,9
	88	0,709	4,2		203	0,743	5,7
	89	0,711	3,8		204	0,733	5,2
	90	0,69	3,9		205	0,745	5,7
	91	0,698	4,4		206	0,746	5,5
	92	0,692	4,5		207	0,746	5,7
3	93	0,701	4,6		208	0,762	5,7
	94	0,695	4,5		209	0,746	5,7
	95	0,721	4,9		210	0,747	5,8
	96	0,691	4,6		211	0,747	4,9
	97	0,726	4,2		212	0,747	5,1
	98	0,696	4,2		213	0,758	5,5
	99	0,708	3,9		214	0,748	5,3
	100	0,724	3,8		215	0,748	5,3
	101	0,717	4,4		216	0,749	5,8
	102	0,725	4,1		217	0,750	4,9
	103	0,726	4,8		218	0,751	5,0
	104	0,722	4,4		219	0,752	5,4
	105	0,72	4,6		220	0,753	5,2
	106	0,719	3,9		221	0,753	5,5
	107	0,715	4,3		222	0,755	5,0
108	0,715	4,6	223		0,756	5,1	
109	0,709	4,8	224	0,757	5,3		
110	0,722	4,5	225	0,761	4,9		
111	0,699	4,6	226	0,762	5,2		
112	0,699	4,3	227	0,763	5,2		
113	0,724	4,3	228	0,764	5,1		
114	0,72	4,8	229	0,765	5,3		
115	0,698	4,2	230	0,768	5,0		

Примечание: частная выборка 1 – по опыту с максимальным значением расцентровки 0,12 мм; частная выборка 2 – 0,8 мм; частная выборка 3 – 1,15 мм; частная выборка 4 – 1,75 мм; частная выборка 5 – 2,2 мм.

Расчетные характеристики для проверки гипотез:

1) Частная выборка 1:

По параметру $A'_{\text{СОПР}}$:

$$s^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 0,0103; \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 0,65; S_1^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - (\bar{x})^2 = 0,00023.$$

По параметру $V_{\text{СКЗ}}$:

$$s^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 3,303; \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 2,951; S_1^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - (\bar{x})^2 = 0,073.$$

2) Частная выборка 2:

По параметру $A'_{\text{СОПР}}$:

$$s^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 0,0053; \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 0,707; S_2^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - (\bar{x})^2 = 0,00015.$$

По параметру $V_{\text{СКЗ}}$:

$$s^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 7,086; \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 4,383; S_2^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - (\bar{x})^2 = 0,1056.$$

3) Частная выборка 3:

По параметру $A'_{\text{СОПР}}$:

$$s^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 0,0055; \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 0,711; S_3^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - (\bar{x})^2 = 0,000123.$$

По параметру $V_{\text{СКЗ}}$:

$$s^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 4,707; \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 4,356; S_3^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - (\bar{x})^2 = 0,1027.$$

4) Частная выборка 4:

По параметру $A'_{\text{СОПР}}$:

$$s^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 0,0044; \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 0,743; S_4^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - (\bar{x})^2 = 0,000167.$$

По параметру $V_{\text{СКЗ}}$:

$$s^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 3,609; \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 5,374; S_4^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - (\bar{x})^2 = 0,0802.$$

5) Частная выборка 5:

По параметру $A'_{\text{СОПР}}$:

$$s^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 0,0056; \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 0,746; S_5^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - (\bar{x})^2 = 0,000123.$$

По параметру $V_{\text{СКЗ}}$:

$$s^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 3,696; \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 5,317; S_5^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - (\bar{x})^2 = 0,082.$$

Таблица Г.2 – Общая выборка значений $A'_{\text{СОПР}}$ и $V_{\text{СКЗ}}$ при повышенном износе дорожек качения подшипников

№ частной выборки	№ измерения	$A'_{\text{СОПР}}$	$V_{\text{СКЗ}}$, мм/с	№ частной выборки	№ измерения	$A'_{\text{СОПР}}$	$V_{\text{СКЗ}}$, мм/с
1	1	0,487	3,2	3	116	0,608	6,1
	2	0,482	3		117	0,569	6,5
	3	0,493	3,5		118	0,59	6,6
	4	0,491	2,9		119	0,586	6,3
	5	0,492	3,3		120	0,592	5,9
	6	0,490	3,4		121	0,57	6,4
	7	0,490	3,7		122	0,563	5,9
	8	0,506	3,4		123	0,552	6,2
	9	0,489	3,5		124	0,591	6,4
	10	0,498	2,9		125	0,556	6,7
	11	0,498	3,2		126	0,571	6,2
	12	0,488	2,8		127	0,554	6,1
	13	0,498	3,3		128	0,579	6,9
	14	0,471	3,6		129	0,607	6,8
	15	0,489	3,8		130	0,606	6,1
	16	0,519	3,7		131	0,573	6,4
	17	0,509	3,6		132	0,574	6,5
	18	0,483	3,7		133	0,602	6,4
	19	0,509	3,3		134	0,603	6,2
	20	0,484	3,7		135	0,606	6,4
	21	0,490	3,5		136	0,586	6,4
	22	0,537	3,8		137	0,557	6,7
	23	0,502	3,7		138	0,605	6,3
	24	0,502	3,5	4	139	0,622	8,4
	25	0,521	3,0		140	0,659	7,4
	26	0,497	3,7		141	0,625	7,6

№ частной выборки	№ измерения	$A'_{\text{СОПР}}$	$V_{\text{СКЗ}},$ мм/с	№ частной выборки	№ измерения	$A'_{\text{СОПР}}$	$V_{\text{СКЗ}},$ мм/с
2	27	0,499	3,1	5	142	0,636	7,8
	28	0,496	3,7		143	0,642	7,8
	29	0,481	3,5		144	0,619	7,3
	30	0,509	3,7		145	0,655	8,3
	31	0,480	3,5		146	0,63	7,3
	32	0,514	3,6		147	0,636	7,8
	33	0,508	3,4		148	0,658	8,3
	34	0,470	3,0		149	0,659	7,6
	35	0,520	3,5		150	0,63	8,2
	36	0,484	3,5		151	0,634	7,5
	37	0,517	3,6		152	0,624	8,4
	38	0,512	3,2		153	0,626	8
	39	0,474	3,4		154	0,62	7,4
	40	0,497	3,6		155	0,649	7,4
	41	0,473	3,2		156	0,65	7,6
	42	0,519	3,9		157	0,644	8,1
	43	0,493	3,0		158	0,616	8,3
	44	0,488	3,4		159	0,626	7,6
	45	0,52	3,1		160	0,631	8,4
	46	0,495	3,7		161	0,642	7,6
	47	0,489	3,1		162	0,627	8,1
	48	0,534	3,2		163	0,648	7,8
	49	0,528	3,4		164	0,654	7,5
	50	0,47	3,3		165	0,641	8,1
	51	0,483	3		166	0,621	7,6
	52	0,509	3,9		167	0,643	7,4
	53	0,496	3,3		168	0,631	7,6
	54	0,523	3,4		169	0,636	8,2
	55	0,474	3,7		170	0,65	7,5
	56	0,497	3,3		171	0,641	7,8
	57	0,511	3,3		172	0,634	7,4
	58	0,497	3,3		173	0,634	8,1
	59	0,506	3,3		174	0,655	7,4
	60	0,487	3,3		175	0,641	8,2
	61	0,506	3,7		176	0,658	7,8
	62	0,513	3,2		177	0,658	7,9
	63	0,496	3,5		178	0,621	8,3
	64	0,524	3,8		179	0,652	8,3
	65	0,487	3,7		180	0,66	7,5
	66	0,524	3,3		181	0,646	7,9
	67	0,475	3,4		182	0,627	8,1
	68	0,489	3		183	0,638	8,1
	69	0,5	3,1		184	0,627	7,4
	70	0,483	3		185	0,651	8,7
	71	0,5	3,5		186	0,656	8,7
	72	0,528	3,2		187	0,637	8,8
73	0,524	3,2	188	0,627	8,3		

№ частной выборки	№ измерения	$A'_{\text{СОПР}}$	$V_{\text{СКЗ}},$ мм/с	№ частной выборки	№ измерения	$A'_{\text{СОПР}}$	$V_{\text{СКЗ}},$ мм/с
	74	0,532	3,1		189	0,651	8,6
	75	0,472	3,2		190	0,640	8,3
	76	0,539	3,5		191	0,623	8,3
	77	0,493	3,4		192	0,622	8,2
	78	0,505	3,4		193	0,621	8,1
	79	0,511	4		194	0,643	8
	80	0,523	3,5		195	0,618	8,3
	81	0,481	3,1		196	0,612	8,1
	82	0,511	3,6		197	0,621	7,9
	83	0,507	3,2		198	0,657	8,8
	84	0,482	3,9		199	0,619	8,9
	85	0,538	3		200	0,637	8,0
	86	0,526	3,2		201	0,623	8,9
	87	0,476	3,7		202	0,653	8,4
	88	0,517	3,1		203	0,614	8,2
	89	0,472	3,1		204	0,619	7,8
	90	0,523	3,3		205	0,628	8,1
	91	0,488	3,9		206	0,632	8,2
	92	0,526	3,9		207	0,65	8,2
	3	93	0,586		5,7	208	0,624
94		0,586	6,7	209	0,614	7,9	
95		0,608	6,5	210	0,623	8,0	
96		0,576	6,3	211	0,637	8,9	
97		0,561	6,3	212	0,648	8,4	
98		0,604	6,1	213	0,634	8,1	
99		0,592	6,8	214	0,613	7,9	
100		0,569	6	215	0,625	8,3	
101		0,578	5,9	216	0,615	8,6	
102		0,581	6,1	217	0,657	8,4	
103		0,589	6,3	218	0,626	8,0	
104		0,567	6,2	219	0,635	8,4	
105		0,573	6,7	220	0,622	7,8	
106		0,588	5,9	221	0,636	8,1	
107		0,607	5,9	222	0,614	8,2	
108		0,562	6,3	223	0,634	8,4	
109		0,6	5,9	224	0,637	8,3	
110		0,577	6,7	225	0,634	8,0	
111		0,575	6,1	226	0,64	7,8	
112		0,565	6,5	227	0,644	8,5	
113		0,585	5,9	228	0,625	8,7	
114		0,585	6,2	229	0,617	8,2	
115		0,578	6,6	230	0,639	8,6	

Примечание: частная выборка 1 – по опыту с максимальным значением смещения в подшипнике – 0,08 мм; частная выборка 2 – 0,15 мм; частная выборка 3 – 0,33 мм; частная выборка 4 – 0,45 мм; частная выборка 5 – 0,55 мм.

Расчетные характеристики для проверки гипотез:

1) Частная выборка 1:

По параметру $A'_{\text{СОПР}}$:

$$s^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 0,0103; \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 0,497; S_1^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - (\bar{x})^2 = 0,00023.$$

По параметру $V_{\text{СКЗ}}$:

$$s^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 3,4202; \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 3,42; S_1^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - (\bar{x})^2 = 0,076.$$

2) Частная выборка 2:

По параметру $A'_{\text{СОПР}}$:

$$s^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 0,0182; \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 0,504; S_2^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - (\bar{x})^2 = 0,000286.$$

По параметру $V_{\text{СКЗ}}$:

$$s^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 3,492; \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 3,3804; S_2^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - (\bar{x})^2 = 0,0776.$$

3) Частная выборка 3:

По параметру $A'_{\text{СОПР}}$:

$$s^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 0,0121; \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 0,582; S_3^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - (\bar{x})^2 = 0,00027.$$

По параметру $V_{\text{СКЗ}}$:

$$s^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 4,002; \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 6,307; S_3^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - (\bar{x})^2 = 0,0889.$$

4) Частная выборка 4:

По параметру $A'_{\text{СОПР}}$:

$$s^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 0,00758; \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 0,639; S_4^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - (\bar{x})^2 = 0,000168.$$

По параметру $V_{\text{СКЗ}}$:

$$s^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 5,633; \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 7,828; S_4^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - (\bar{x})^2 = 0,1252.$$

5) Частная выборка 5:

По параметру $A'_{\text{СОПР}}$:

$$s^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 0,0078; \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 0,631; S_5^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - (\bar{x})^2 = 0,000174.$$

По параметру $V_{\text{СКЗ}}$:

$$s^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 4,459; \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 8,29; S_5^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - (\bar{x})^2 = 0,099.$$

Приложение Д

Данные моделирования для ряда ЦНА

Таблица Д.1 – Выборки значений зависимостей $A'_{\text{СОПР}} = f(A_{\text{дм}_c})$ и $A'_{\text{ПОДШ}} = f(A_{\text{дм}_c})$ для ряда ЦНА при $H_{\text{д}}^* = 1$

Агрегат	$A_{\text{дм}_c}, \text{Нм}$					
	1,2	1,5	1,8	2	2,2	2,5
	$A'_{\text{СОПР}}$					
К 20/30	0,62	0,65	0,68	0,7	0,73	0,75
К 80-65-160	0,5	0,53	0,56	0,58	0,6	0,62
К 80-50-200	0,45	0,49	0,52	0,54	0,56	0,58
К 100-65-200	0,41	0,44	0,46	0,48	0,5	0,51
Агрегат	$A_{\text{дм}_c}, \text{Нм}$					
	1,1	1,5	1,8	2,3	2,6	2,9
	$A'_{\text{ПОДШ}}$					
К 20/30	0,454	0,52	0,57	0,61	0,64	0,664
К 80-65-160	0,38	0,43	0,47	0,5	0,53	0,55
К 80-50-200	0,35	0,4	0,43	0,46	0,48	0,5
К 100-65-200	0,32	0,36	0,39	0,42	0,44	0,46

Таблица Д.2 – Выборки значений зависимостей $A'_{\text{СОПР}} = f(A_{\text{дм}_c})$ и $A'_{\text{ПОДШ}} = f(A_{\text{дм}_c})$ для разных $H_{\text{д}}^*$ при моделировании с параметрами ЦНА К20/30

$H_{\text{д}}^*$	$A_{\text{дм}_c}, \text{Нм}$					
	1,2	1,5	1,8	2	2,2	2,5
	$A'_{\text{СОПР}}$					
1	0,62	0,65	0,68	0,7	0,73	0,75
1,05	0,64	0,68	0,71	0,73	0,75	0,77
1,1	0,68	0,72	0,75	0,78	0,8	0,82
1,14	0,78	0,83	0,87	0,9	0,92	0,95
$H_{\text{д}}^*$	$A_{\text{дм}_c}, \text{Нм}$					
	1,1	1,5	1,8	2,3	2,6	2,9
	$A'_{\text{ПОДШ}}$					
1	0,454	0,52	0,57	0,61	0,64	0,664
1,05	0,47	0,54	0,59	0,63	0,66	0,69
1,1	0,5	0,57	0,62	0,66	0,69	0,72
1,14	0,57	0,66	0,72	0,77	0,8	0,84

Таблица Д.3 – Выборки значений зависимостей $A'_{\text{СОПР}} = f(A_{\text{дм}_c})$ и $A'_{\text{ПОДШ}} = f(A_{\text{дм}_c})$ для разных $H_{\text{д}}^*$ при моделировании с параметрами ЦНА К80-65-160

$H_{\text{д}}^*$	$A_{\text{дм}_c}, \text{Нм}$					
	1,2	1,5	1,8	2	2,2	2,5
	$A'_{\text{СОПР}}$					
1	0,5	0,53	0,56	0,58	0,6	0,62
1,05	0,51	0,54	0,57	0,59	0,62	0,63
1,1	0,53	0,56	0,59	0,61	0,64	0,65
1,14	0,55	0,59	0,62	0,64	0,66	0,68
1,17	0,61	0,65	0,68	0,7	0,73	0,75
$H_{\text{д}}^*$	$A_{\text{дм}_c}, \text{Нм}$					
	1,1	1,5	1,8	2,3	2,6	2,9
	$A'_{\text{ПОДШ}}$					
1	0,38	0,43	0,47	0,5	0,53	0,55
1,05	0,39	0,44	0,48	0,51	0,54	0,56
1,1	0,41	0,46	0,5	0,53	0,57	0,59
1,14	0,42	0,49	0,53	0,56	0,59	0,61
1,17	0,45	0,54	0,58	0,62	0,65	0,68

Таблица Д.4 – Выборки значений зависимостей $A'_{\text{СОПР}} = f(A_{\text{дм}_c})$ и $A'_{\text{ПОДШ}} = f(A_{\text{дм}_c})$ для разных $H_{\text{д}}^*$ при моделировании с параметрами ЦНА К80-50-200

$H_{\text{д}}^*$	$A_{\text{дм}_c}, \text{Нм}$					
	1,2	1,5	1,8	2	2,2	2,5
	$A'_{\text{СОПР}}$					
1	0,45	0,49	0,52	0,54	0,56	0,58
1,05	0,47	0,5	0,53	0,56	0,58	0,6
1,1	0,49	0,52	0,56	0,58	0,6	0,62
1,14	0,54	0,58	0,61	0,64	0,67	0,7
$H_{\text{д}}^*$	$A_{\text{дм}_c}, \text{Нм}$					
	1,1	1,5	1,8	2,3	2,6	2,9
	$A'_{\text{ПОДШ}}$					
1	0,35	0,4	0,43	0,46	0,48	0,5
1,05	0,36	0,41	0,44	0,47	0,5	0,52
1,1	0,38	0,43	0,46	0,49	0,52	0,54
1,14	0,42	0,47	0,51	0,54	0,57	0,6

Таблица Д.5 – Выборки значений зависимостей $A'_{\text{СОПР}} = f(A_{\text{дм}_c})$ и $A'_{\text{ПОДШ}} = f(A_{\text{дм}_c})$ для разных $H_{\text{д}}^*$ при моделировании с параметрами ЦНА К100-65-200

$H_{\text{д}}^*$	$A_{\text{дм}_c}, \text{Нм}$					
	1,2	1,5	1,8	2	2,2	2,5
	$A'_{\text{СОПР}}$					
1	0,41	0,44	0,46	0,48	0,5	0,51
1,05	0,42	0,45	0,47	0,49	0,51	0,53
1,1	0,44	0,47	0,49	0,51	0,53	0,55
1,14	0,48	0,51	0,54	0,56	0,58	0,6
$H_{\text{д}}^*$	$A_{\text{дм}_c}, \text{Нм}$					
	1,1	1,5	1,8	2,3	2,6	2,9
	$A'_{\text{ПОДШ}}$					
1	0,32	0,36	0,39	0,42	0,44	0,46
1,05	0,33	0,37	0,4	0,43	0,45	0,47
1,1	0,34	0,38	0,42	0,45	0,47	0,49
1,14	0,38	0,42	0,46	0,49	0,51	0,53

Таблица Д.6 – Уравнения регрессии и относительные коэффициенты по зависимостям $A'_{\text{СОПР}} = f(A_{\text{дм}_c})$ и $A'_{\text{ПОДШ}} = f(A_{\text{дм}_c})$ при изменении $H_{\text{д}}^*$

Значение $H_{\text{д}}^*$	Уравнение регрессии (коэффициент корреляции)	Относительные коэффициенты регрессии	
		Угловой, a'	Сдвига, b'
ЦНА К 20/30			
зависимости для $A'_{\text{СОПР}}$ при $\omega_{\text{дм}_c} = \omega_{\text{р.ном}}$			
1	$y = 0,103x + 0,4961$ ($r = 0,997$)	1	1
1,05	$y = 0,1003x + 0,5261$ ($r = 0,994$)	0,974	1,06
1,1	$y = 0,1102x + 0,5527$ ($r = 0,994$)	1,07	1,114
1,14	$y = 0,1311x + 0,6302$ ($r = 0,995$)	1,27	1,27
зависимости для $A'_{\text{ПОДШ}}$ при $\omega_{\text{дм}_c} = \omega_{\text{р.ном}} / 3$			
1	$y = 0,1138x + 0,3466$ ($r = 0,987$)	1	1
1,05	$y = 0,1176x + 0,3591$ ($r = 0,999$)	1,03	1,04
1,1	$y = 0,1176x + 0,3891$ ($r = 0,999$)	1,03	1,12
1,14	$y = 0,1427x + 0,4384$ ($r = 0,999$)	1,25	1,27
ЦНА К 80-65-160			
зависимости для $A'_{\text{СОПР}}$ при $\omega_{\text{дм}_c} = \omega_{\text{р.ном}}$			
1	$y = 0,0943x + 0,389$ ($r = 0,996$)	1	1
1,05	$y = 0,0973x + 0,395$ ($r = 0,993$)	1,03	1,02
1,1	$y = 0,0973x + 0,415$ ($r = 0,989$)	1,03	1,07
1,14	$y = 0,1003x + 0,436$ ($r = 0,994$)	1,06	1,12

Значение H_d^*	Уравнение регрессии (коэффициент корреляции)	Относительные коэффициенты регрессии	
		Угловой, a'	Сдвига, b'
1,17	$y=0,109x+0,483$ ($r = 0,993$)	1,16	1,24
зависимости для $A'_{\text{ПОДШ}}$ при $\omega_{dM_c} = \omega_{p.ном} / 3$			
1	$y=0,0921x+0,29$ ($r = 0,984$)	1	1
1,05	$y=0,0921x+0,3$ ($r = 0,993$)	1	1,03
1,1	$y=0,0982x+0,31$ ($r = 0,987$)	1,07	1,07
1,14	$y=0,1x+0,33$ ($r = 0,986$)	1,09	1,14
1,17	$y=0,119x+0,345$ ($r = 0,989$)	1,3	1,19
ЦНА 80-50-200			
зависимости для $A'_{\text{СОПР}}$ при $\omega_{dM_c} = \omega_{p.ном}$			
1	$y=0,1x+0,336$ ($r = 0,995$)	1	1
1,05	$y=0,104x+0,35$ ($r = 0,996$)	1,04	1,04
1,1	$y=0,104x+0,37$ ($r = 0,998$)	1,04	1,1
1,14	$y=0,125x+0,39$ ($r = 0,996$)	1,25	1,16
зависимости для $A'_{\text{ПОДШ}}$ при $\omega_{dM_c} = \omega_{p.ном} / 3$			
1	$y=0,08x+0,275$ ($r = 0,989$)	1	1
1,05	$y=0,09x+0,28$ ($r = 0,991$)	1,13	1,02
1,1	$y=0,09x+0,3$ ($r = 0,992$)	1,13	1,1
1,14	$y=0,096x+0,32$ ($r = 0,987$)	1,2	1,16
ЦНА 100-65-200			
зависимости для $A'_{\text{СОПР}}$ при $\omega_{dM_c} = \omega_{p.ном}$			
1	$y=0,079x+0,319$ ($r = 0,998$)	1	1
1,05	$y=0,085x+0,32$ ($r = 0,999$)	1,08	1
1,1	$y=0,085x+0,34$ ($r = 0,997$)	1,08	1,07
1,14	$y=0,094x+0,37$ ($r = 0,998$)	1,2	1,16
зависимости для $A'_{\text{ПОДШ}}$ при $\omega_{dM_c} = \omega_{p.ном} / 3$			
1	$y=0,076x+0,244$ ($r = 0,988$)	1	1
1,05	$y=0,076x+0,254$ ($r = 0,992$)	1	1,04
1,1	$y=0,082x+0,258$ ($r = 0,984$)	1,08	1,06
1,14	$y=0,082x+0,298$ ($r = 0,998$)	1,08	1,22

Таблица Д.7 – Уравнения регрессии и относительные коэффициенты по зависимостям $A'_{\text{СОПР}} = f(A_{dM_c})$ и $A'_{\text{ПОДШ}} = f(A_{dM_c})$ для ряда насосных агрегатов

Агрегат	Уравнение регрессии	Относительные коэффициенты регрессии	
		Угловой, a'	Сдвига, b'
зависимости для $A'_{\text{СОПР}}$ при $\omega_{dM_c} = \omega_{p.ном}$			
К 20/30	$y = 0,103x + 0,4961$ ($r = 0,997$)	1	1
К 80-65-160	$y = 0,0943x + 0,389$ ($r = 0,997$)	0,916	0,784

Агрегат	Уравнение регрессии	Относительные коэффициенты регрессии	
		Угловой, a'	Сдвига, b'
К 80-50-200	$y = 0,1003x + 0,3361 (r = 0,995)$	0,974	0,678
К 100-65-200	$y = 0,0793x + 0,3186 (r = 0,998)$	0,77	0,642
зависимости для $A'_{\text{ПОДШ}}$ при $\omega_{dM_c} = \omega_{p.\text{ном}} / 3$			
К 20-30	$y = 0,1138x + 0,3466 (r = 0,987)$	1	1
К 80-65-160	$y = 0,0935x + 0,2909 (r = 0,999)$	0,82	0,84
К 80-50-200	$y = 0,0808x + 0,273 (r = 0,999)$	0,71	0,79
К 100-65-200	$y = 0,0774x + 0,2425 (r = 0,999)$	0,68	0,7

Приложение Е

Результаты проверки статистической различимости линий регрессии моделей

1) Проверка для выборок $A'_{\text{СОПР}} = f(A_{\text{дм}_c})$ при изменении $H_{\text{д}}^*$ для ряда ЦНА.

1.1) Для проверки по ЦНА К 20/30 принимаются регрессии со следующими функциями:

- $y = 0,103x + 0,4961$ (при $H_{\text{д}}^* = 1$);
- $y = 0,1311x + 0,6302$ (при $H_{\text{д}}^* = 1,14$).

По принятым функциям при задании параметра x в диапазоне исходных выборок: [1,2; ... 2,5] получены выборки различной размерности (таблицы Е.1, Е.2), по данным которых определяются параметры статистик для проверки гипотез.

Таблица Е.1 – Выборка по функции $y = 0,103x + 0,4961$

Параметр выборки	Значения параметров					
$x, (A_{\text{дм}_c})$	1,2	1,5	1,8	2	2,2	2,5
$y, (A'_{\text{СОПР}})$	0,6197	0,6506	0,6815	0,7021	0,7227	0,7536

Таблица Е.2 – Выборка по функции $y = 0,1311x + 0,6302$

Параметр выборки	Значения параметров							
$x, (A_{\text{дм}_c})$	1,1	1,2	1,5	1,7	1,8	2	2,2	2,5
$y, (A'_{\text{СОПР}})$	0,7741	0,7872	0,8265	0,8527	0,8658	0,892	0,9182	0,9575

Гипотеза H_0^m при уровне значимости $\alpha = 0,05$, $f_1 = f_2 = 4$ принимается, поскольку: $F_{\text{набл}} = 2,78 < F_{\text{кр}}(\alpha; f_1; f_2) = 6,39$, и дисперсии S_1^2, S_2^2 можно признать статистически неразличимыми.

Гипотеза H_0'' при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $f = 10$ принимается, поскольку: $|t_a| = 0,32 \leq t_{кр}(\alpha; f) = 2,228$, и угловые коэффициенты a_1, a_2 можно признать неразличимыми.

Гипотеза H_0' при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $f = 10$ отвергается, поскольку: $|t_b| = 3,208 > t_{кр}(\alpha; f) = 2,228$, и коэффициенты сдвига b_1, b_2 признаются различимыми.

Поскольку гипотеза H_0' отвергается, то гипотеза H_0 о статистической различимости линейных регрессий принимается.

1.2) Для проверки по ЦНА К 80-65-160 принимаются регрессии со следующими функциями:

- $y = 0,0943x + 0,389$ (при $H_{д}^* = 1$);
- $y = 0,109x + 0,4832$ (при $H_{д}^* = 1,17$).

По принятым функциям при задании параметра x в диапазоне исходных выборок: $[1,2; \dots 2,5]$ получены выборки различной размерности (таблицы Е.3, Е.4), по данным которых определяются параметры статистик для проверки гипотез.

Таблица Е.3 – Выборка по функции $y = 0,0943x + 0,389$

Параметр выборки	Значения параметров					
$x, (A_{дМ_c})$	1,2	1,5	1,8	2	2,2	2,5
$y, (A'_{СОПР})$	0,50216	0,5173	0,55144	0,5742	0,59696	0,6311

Таблица Е.4 – Выборка по функции $y = 0,109x + 0,4832$

Параметр выборки	Значения параметров							
$x, (A_{дМ_c})$	1,1	1,2	1,5	1,7	1,8	2	2,2	2,5
$y, (A'_{СОПР})$	0,6029	0,6138	0,6465	0,6683	0,6792	0,7010	0,7228	0,7555

Гипотеза H_0''' при уровне значимости $\alpha = 0,05$, $f_1 = f_2 = 4$ принимается, поскольку: $F_{набл} = 5,37 < F_{кр}(\alpha; f_1; f_2) = 6,39$, и дисперсии S_1^2, S_2^2 можно признать статистически неразличимыми.

Гипотеза H_0'' при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $f = 10$ принимается, поскольку: $|t_a| = 0,07 \leq t_{кр}(\alpha; f) = 2,228$, и угловые коэффициенты a_1, a_2 можно признать неразличимыми.

Гипотеза H_0' при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $f = 10$ отвергается, поскольку: $|t_b| = 3,02 > t_{кр}(\alpha; f) = 2,228$, и коэффициенты сдвига b_1, b_2 признаются различимыми.

Поскольку гипотеза H_0' отвергается, то гипотеза H_0 о статистической различимости линейных регрессий принимается.

1.3) Для проверки по ЦНА К 80-50-200 принимаются регрессии со следующими функциями:

- $y = 0,1x + 0,336$ (при $H_{д}^* = 1$);
- $y = 0,125x + 0,391$ (при $H_{д}^* = 1,14$).

По принятым функциям при задании параметра x в диапазоне исходных выборок: $[1,2; \dots 2,5]$ получены выборки различной размерности (таблицы Е.5, Е.6), по данным которых определяются параметры статистик для проверки гипотез.

Таблица Е.5 – Выборка по функции $y = 0,1x + 0,336$

Параметр выборки	Значения параметров					
$x, (A_{дМ_c})$	1,2	1,5	1,8	2	2,2	2,5
$y, (A'_{СОПР})$	0,456	0,486	0,516	0,536	0,556	0,586

Таблица Е.6 – Выборка по функции $y = 0,125x + 0,391$

Параметр выборки	Значения параметров							
$x, (A_{дМ_c})$	1,1	1,2	1,5	1,7	1,8	2	2,2	2,5
$y, (A'_{СОПР})$	0,5285	0,541	0,5785	0,6035	0,616	0,641	0,666	0,7035

Гипотеза H_0''' при уровне значимости $\alpha = 0,05$, $f_1 = f_2 = 4$ принимается, поскольку: $F_{набл} = 1,98 < F_{кр}(\alpha; f_1; f_2) = 6,39$, и дисперсии S_1^2, S_2^2 можно признать статистически неразличимыми.

Гипотеза H_0'' при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $f = 10$ принимается, поскольку: $|t_a| = 0,043 \leq t_{кр}(\alpha; f) = 2,228$, и угловые коэффициенты a_1, a_2 можно признать неразличимыми.

Гипотеза H_0' при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $f = 10$ отвергается, поскольку: $|t_b| = 2,82 > t_{кр}(\alpha; f) = 2,228$, и коэффициенты сдвига b_1, b_2 признаются различимыми.

Поскольку гипотеза H_0' отвергается, то гипотеза H_0 о статистической различимости линейных регрессий принимается.

1.4) Для проверки по ЦНА К 100-65-200 принимаются регрессии со следующими функциями:

- $y = 0,0793x + 0,319$ (при $H_{д}^* = 1$);
- $y = 0,0943x + 0,369$ (при $H_{д}^* = 1,14$).

По принятым функциям при задании параметра x в диапазоне исходных выборок: [1,2; ... 2,5] получены выборки различной размерности (таблицы Е.7, Е.8), по данным которых определяются параметры статистик для проверки гипотез.

Таблица Е.7 – Выборка по функции $y = 0,0793x + 0,319$

Параметр выборки	Значения параметров					
$x, (A_{дм_c})$	1,2	1,5	1,8	2	2,2	2,5
$y, (A'_{сопр})$	0,41376	0,43755	0,46134	0,4772	0,49306	0,51685

Таблица Е.8 – Выборка по функции $y = 0,0943x + 0,369$

Параметр выборки	Значения параметров							
$x, (A_{дм_c})$	1,1	1,2	1,5	1,7	1,8	2	2,2	2,5
$y, (A'_{сопр})$	0,4727	0,4822	0,5105	0,5293	0,5387	0,5576	0,5765	0,6048

Гипотеза H_0''' при уровне значимости $\alpha = 0,05$, $f_1 = f_2 = 4$ принимается, поскольку: $F_{\text{набл}} = 2,64 < F_{\text{кр}}(\alpha; f_1; f_2) = 6,39$, и дисперсии S_1^2, S_2^2 можно признать статистически неразличимыми.

Гипотеза H_0'' при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $f = 10$ принимается, поскольку: $|t_a| = 0,026 \leq t_{\text{кр}}(\alpha; f) = 2,228$, и угловые коэффициенты a_1, a_2 можно признать неразличимыми.

Гипотеза H_0' при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $f = 10$ отвергается, поскольку: $|t_b| = 2,68 > t_{\text{кр}}(\alpha; f) = 2,228$, и коэффициенты сдвига b_1, b_2 признаются различимыми.

Поскольку гипотеза H_0' отвергается, то гипотеза H_0 о статистической различимости линейных регрессий принимается.

2) Проверка для выборок $A'_{\text{ПОДШ}} = f(A_{\text{дм}_c})$ при изменении $H_{\text{д}}^*$.

2.1) Для проверки по ЦНА К 20/30 принимаются регрессии со следующими функциями:

- $y = 0,1138x + 0,3466$ (при $H_{\text{д}}^* = 1$);
- $y = 0,1427x + 0,4384$ (при $H_{\text{д}}^* = 1,14$).

По принятым функциям при задании параметра x в диапазоне исходных выборок: [1,1; ... 2,9] получены выборки различной размерности (таблицы Е.9, Е.10), по данным которых определяются параметры статистик для проверки гипотез.

Таблица Е.9 – Выборка по функции $y = 0,1138x + 0,3466$

$x, (A_{\text{дм}_c})$	1,1	1,5	1,8	2,3	2,6	2,9
$y, (A'_{\text{ПОДШ}})$	0,47178	0,5173	0,55144	0,60834	0,64248	0,67662

Таблица Е.10 – Выборка по функции $y = 0,1427x + 0,4384$

$x, (A_{\text{дм}_c})$	1	1,1	1,5	1,7	1,8	2,3	2,6	2,9
$y, (A'_{\text{ПОДШ}})$	0,5811	0,5954	0,6525	0,6810	0,6953	0,7666	0,8094	0,8522

Гипотеза H_0'' при уровне значимости $\alpha = 0,05$, $f_1 = f_2 = 4$ принимается, поскольку: $F_{\text{набл}} = 1,025 < F_{\text{кр}}(\alpha; f_1; f_2) = 6,39$, и дисперсии S_1^2, S_2^2 можно признать статистически неразличимыми.

Гипотеза H_0'' при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $f = 10$ принимается, поскольку: $|t_a| = 0,1 \leq t_{\text{кр}}(\alpha; f) = 2,228$, и угловые коэффициенты a_1, a_2 можно признать неразличимыми.

Гипотеза H_0' при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $f = 10$ отвергается, поскольку: $|t_b| = 2,88 > t_{\text{кр}}(\alpha; f) = 2,228$, и коэффициенты сдвига b_1, b_2 признаются различимыми.

Поскольку гипотеза H_0' отвергается, то гипотеза H_0 о статистической различимости линейных регрессий принимается.

2.2) Для проверки по ЦНА К 80-65-160 принимаются регрессии со следующими функциями:

- $y = 0,0921x + 0,29$ (при $H_{\text{д}}^* = 1$);
- $y = 0,119x + 0,345$ (при $H_{\text{д}}^* = 1,17$).

По принятым функциям при задании параметра x в диапазоне исходных выборок: $[1,2; \dots 2,5]$ получены выборки различной размерности (таблицы Е.11, Е.12), по данным которых определяются параметры статистик для проверки гипотез.

Таблица Е.11 – Выборка по функции $y = 0,0921x + 0,29$

Параметр выборки	Значения параметров					
	1,2	1,5	1,8	2	2,2	2,5
$x, (A_{\text{дм}_c})$	1,2	1,5	1,8	2	2,2	2,5
$y, (A'_{\text{гюдш}})$	0,50216	0,5173	0,55144	0,5742	0,59696	0,6311

Таблица Е.12 – Выборка по функции $y = 0,119x + 0,345$

Параметр выборки	Значения параметров							
	1,1	1,2	1,5	1,7	1,8	2	2,2	2,5
$x, (A_{дм_с})$	1,1	1,2	1,5	1,7	1,8	2	2,2	2,5
$y, (A'_{подш})$	0,6029	0,6138	0,6465	0,6683	0,6792	0,7010	0,7228	0,7555

Гипотеза H_0'' при уровне значимости $\alpha = 0,05$, $f_1 = f_2 = 4$ принимается, поскольку: $F_{набл} = 4,85 < F_{кр}(\alpha; f_1; f_2) = 6,39$, и дисперсии S_1^2, S_2^2 можно признать статистически неразличимыми.

Гипотеза H_0'' при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $f = 10$ принимается, поскольку: $|t_a| = 0,09 \leq t_{кр}(\alpha; f) = 2,228$, и угловые коэффициенты a_1, a_2 можно признать неразличимыми.

Гипотеза H_0' при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $f = 10$ отвергается, поскольку: $|t_b| = 2,64 > t_{кр}(\alpha; f) = 2,228$, и коэффициенты сдвига b_1, b_2 признаются различимыми.

Поскольку гипотеза H_0' отвергается, то гипотеза H_0 о статистической различимости линейных регрессий принимается.

2.3) Для проверки по ЦНА К 80-50-200 принимаются регрессии со следующими функциями:

- $y = 0,0797x + 0,275$ (при $H_{д}^* = 1$);
- $y = 0,096x + 0,324$ (при $H_{д}^* = 1,14$).

По принятым функциям при задании параметра x в диапазоне исходных выборок: $[1,2; \dots 2,5]$ получены выборки различной размерности (таблицы Е.13, Е.14), по данным которых определяются параметры статистик для проверки гипотез.

Таблица Е.13 – Выборка по функции $y = 0,0797x + 0,275$

Параметр выборки	Значения параметров					
	$x, (A_{дм_с})$	1,2	1,5	1,8	2	2,2
$y, (A'_{подш})$	0,37064	0,39455	0,41846	0,4344	0,45034	0,47425

Таблица Е.14 – Выборка по функции $y = 0,096x + 0,324$

Параметр выборки	Значения параметров							
	$x, (A_{дм_с})$	1,1	1,2	1,5	1,7	1,8	2	2,2
$y, (A'_{подш})$	0,4296	0,4392	0,468	0,4872	0,4968	0,516	0,5352	0,564

Гипотеза H_0''' при уровне значимости $\alpha = 0,05$, $f_1 = f_2 = 4$ принимается, поскольку: $F_{набл} = 1,97 < F_{кр}(\alpha; f_1; f_2) = 6,39$, и дисперсии S_1^2, S_2^2 можно признать статистически неразличимыми.

Гипотеза H_0'' при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $f = 10$ принимается, поскольку: $|t_a| = 0,03 \leq t_{кр}(\alpha; f) = 2,228$, и угловые коэффициенты a_1, a_2 можно признать неразличимыми.

Гипотеза H_0' при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $f = 10$ отвергается, поскольку: $|t_b| = 2,45 > t_{кр}(\alpha; f) = 2,228$, и коэффициенты сдвига b_1, b_2 признаются различимыми.

Поскольку гипотеза H_0' отвергается, то гипотеза H_0 о статистической различимости линейных регрессий принимается.

2.4) Для проверки по ЦНА К 100-65-200 принимаются регрессии со следующими функциями:

- $y = 0,076x + 0,244$ (при $H_{д}^* = 1$);
- $y = 0,082x + 0,298$ (при $H_{д}^* = 1,14$).

По принятым функциям при задании параметра x в диапазоне исходных выборок: $[1,2; \dots 2,5]$ получены выборки различной размерности

(таблицы Е.15, Е.16), по данным которых определяются параметры статистик для проверки гипотез.

Таблица Е.15 – Выборка по функции $y = 0,076x + 0,244$

Параметр выборки	Значения параметров					
$x, (A_{дм_c})$	1,2	1,5	1,8	2	2,2	2,5
$y, (A'_{подш})$	0,41376	0,43755	0,46134	0,4772	0,49306	0,51685

Таблица Е.16 – Выборка по функции $y = 0,082x + 0,298$

Параметр выборки	Значения параметров							
$x, (A_{дм_c})$	1,1	1,2	1,5	1,7	1,8	2	2,2	2,5
$y, (A'_{подш})$	0,4727	0,4822	0,5105	0,5293	0,5387	0,5576	0,5765	0,6048

Гипотеза H_0^m при уровне значимости $\alpha = 0,05$, $f_1 = f_2 = 4$ принимается, поскольку: $F_{набл} = 3,16 < F_{кр}(\alpha; f_1; f_2) = 6,39$, и дисперсии S_1^2, S_2^2 можно признать статистически неразличимыми.

Гипотеза H_0^n при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $f = 10$ принимается, поскольку: $|t_a| = 0,01 \leq t_{кр}(\alpha; f) = 2,228$, и угловые коэффициенты a_1, a_2 можно признать неразличимыми.

Гипотеза H_0' при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $f = 10$ отвергается, поскольку: $|t_b| = 2,37 > t_{кр}(\alpha; f) = 2,228$, и коэффициенты сдвига b_1, b_2 признаются различимыми.

Поскольку гипотеза H_0' отвергается, то гипотеза H_0 о статистической различимости линейных регрессий принимается.

3) Проверка для выборок $A'_{сопр} = f(A_{дм_c})$ при $H_d^* = 1$ для ряда ЦНА.

Для проверки принимаются регрессии со следующими функциями:

- $y = 0,103x + 0,4961$ (для К 20/30);
- $y = 0,0943x + 0,389$ (для К 80-65-160).

По принятым функциям при задании параметра x в диапазоне исходных выборок: [1,2; ... 2,5] получены выборки различной размерности (таблицы Е.17, Е.18), по данным которых определяются параметры статистик для проверки гипотез.

Таблица Е.17 – Выборка по функции $y = 0,103x + 0,4961$

$x, (A_{дм_c})$	1,2	1,5	1,8	2	2,2	2,5
$y, (A'_{сопр})$	0,6197	0,6506	0,6815	0,7021	0,7227	0,7536

Таблица Е.18 – Выборка по функции $y = 0,0943x + 0,389$

$x, (A_{дм_c})$	1,2	1,4	1,5	1,7	1,8	2	2,2	2,5
$y, (A'_{сопр})$	0,4927	0,5022	0,5305	0,5493	0,5587	0,5776	0,5965	0,6248

Гипотеза H_0'' при уровне значимости $\alpha = 0,05$, $f_1 = f_2 = 4$ принимается, поскольку: $F_{набл} = 1,357 < F_{кр}(\alpha; f_1; f_2) = 6,39$, и дисперсии S_1^2, S_2^2 можно признать статистически неразличимыми.

Гипотеза H_0' при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $f = 10$ принимается, поскольку: $|t_a| = 0,02 \leq t_{кр}(\alpha; f) = 2,228$, и угловые коэффициенты a_1, a_2 можно признать неразличимыми.

Гипотеза H_0' при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $f = 10$ отвергается, поскольку: $|t_b| = 2,53 > t_{кр}(\alpha; f) = 2,228$, и коэффициенты сдвига b_1, b_2 признаются различимыми.

Поскольку гипотеза H_0' отвергается, то гипотеза H_0 о статистической различимости линейных регрессий принимается.

4) Проверка для выборок $A'_{подш} = f(A_{дм_c})$ при $H_d^* = 1$ для ряда ЦНА.

Для проверки принимаются регрессии со следующими функциями:

- $y = 0,1138x + 0,3466$ (для К 20/30);
- $y = 0,0921x + 0,29$ (для К 80-65-160).

По принятым функциям при задании параметра x в диапазоне исходных выборок: [1,1; ... 2,9] получены выборки различной размерности (таблицы Е.19, Е.20), по данным которых определяются параметры статистик для проверки гипотез.

Таблица Е.19 – Выборка по функции $y = 0,1138x + 0,3466$

$x, (A_{дм_c})$	1,1	1,5	1,8	2,3	2,6	2,9
$y, (A'_{подш})$	0,6197	0,6506	0,6815	0,7021	0,7227	0,7536

Таблица Е.20 – Выборка по функции $y = 0,0921x + 0,29$

$x, (A_{дм_c})$	1,1	1,2	1,5	1,7	1,8	2,3	2,6	2,9
$y, (A'_{подш})$	0,5954	0,6096	0,6525	0,6810	0,6953	0,7666	0,8094	0,8522

Гипотеза H_0''' при уровне значимости $\alpha = 0,05$, $f_1 = f_2 = 4$ принимается, поскольку: $F_{набл} = 3,17 < F_{кр}(\alpha; f_1; f_2) = 6,39$, и дисперсии S_1^2, S_2^2 можно признать статистически неразличимыми.

Гипотеза H_0'' при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $f = 10$ принимается, поскольку: $|t_a| = 0,04 \leq t_{кр}(\alpha; f) = 2,228$, и угловые коэффициенты a_1, a_2 можно признать неразличимыми.

Гипотеза H_0' при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $f = 10$ отвергается, поскольку: $|t_b| = 2,285 > t_{кр}(\alpha; f) = 2,228$, и коэффициенты сдвига b_1, b_2 признаются различимыми.

Поскольку гипотеза H_0' отвергается, то гипотеза H_0 о статистической различимости линейных регрессий принимается.

По результатам выполненных проверок можно сделать вывод о статистической различимости линейных регрессий по зависимостям $A'_{сопр} = f(A_{дм_c})$ и $A'_{подш} = f(A_{дм_c})$ для различных $H_{д}^*$ и типов агрегатов, и необходимости выполнения корректировки зависимостей при изменении развиваемого агрегатом напора в процессе контролей и выполнении диагностики ЦНА различной мощности.

Приложение Ж

**Утвержденная методика определения предельных состояний
ресурсопределяющих узлов промышленных консольных центробежных
насосных агрегатов анализом амплитудных спектров тока электродвигателя**

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Ухтинский государственный технический университет»
(УГТУ)

УТВЕРЖДАЮ

ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный
технический университет»
Проректор по науке


И. В. Курта
_____ 2020 г.
*Решение научно-технического совета,
протокол от 08 июня 2020 г., №2*

УТВЕРЖДАЮ

ООО «Малое инновационное предприятие
Инжиниринговый центр УГТУ»
Генеральный директор


С. Г. Автамонов
_____ 2020 г.

**Методика определения предельных состояний
ресурсопределяющих узлов промышленных консольных
центробежных насосных агрегатов анализом амплитудных
спектров тока электродвигателя**

СОГЛАСОВАНО

ООО СРТЦ «ДИТЭКС»
Генеральный директор


В. Л. Мещанкин
_____ 2020 г.

ООО «ЭкспертСтрой»
Директор


А. Л. Смирнов
_____ 2020 г.

РАЗРАБОТЧИКИ

Руководитель
д-р техн. наук, профессор,
профессор кафедры МОН и ГП УГТУ


И. Ю. Быков
_____ 2020 г.

Исполнитель
старший преподаватель кафедры ЭАТП
УГТУ


П. С. Шичёв
_____ 2020 г.

Ухта, УГТУ, 2020