

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)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ухта – 2020

Диссертация выполнена в ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет» на кафедре «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
заслуженный работник Республики Коми
Быков Игорь Юрьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, ведущий
научный сотрудник, профессор кафедры
«Нефтегазовое дело и землеустройство» филиала
ФГБОУ ВО «Майкопский государственный
технологический университет» в пгт. Яблоновском
Кунина Полина Семёновна

кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электротехника и электротехнологические
системы» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный
университет имени первого Президента России
Б. Н. Ельцина»
Прахт Владимир Алексеевич

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический университет»,
г. Пермь.

Защита состоится 04 сентября 2020 г. в 12⁰⁰ на заседании диссертационного
совета Д 212.291.02 в Ухтинском государственном техническом университете по
адресу: 169300, г. Ухта, Республика Коми, ул. Первомайская, 13.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», а также на
сайте вуза по адресу www.ugtu.net в разделе «Наука→Диссертации».

Автореферат разослан 30 июля 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Д. А. Борейко

Общая характеристика работы

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 воздействие 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.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимости,

изложены методология и методы исследования, определены положения, выносимые на защиту, обозначены объем и структура работы.

В первой главе проведен обзор причин отказов и повреждений ресурсопределяющих узлов промышленных консольных ЦНА, дана краткая характеристика методов мониторинга состояния узлов и агрегатов в целом, выполнен анализ уровня разработки метода мониторинга, основанного на контроле параметров амплитудных спектров тока электродвигателей агрегатов.

Установлено, что наиболее опасными факторами, определяющими выработку консольными ЦНА своего ресурса и их отказ, являются повреждения подшипников качения и сопряжения валов, приводящие к достижению ими предельных состояний. Повреждения подшипников в формах абразивного износа и усталостного выкрашивания дорожек внутреннего и наружного колец, тел качения, внутренней поверхности гнезд сепаратора, трещин и разрывов перемычек сепаратора, приводят к чрезмерному увеличению зазоров в звеньях подшипников и являются причинами отказов ЦНА в 26 % случаев. Изменение состояния сопряжения валов, характеризующееся ростом нарушения центровки валов радиального, торцевого и смешанного типов определяет отказы ЦНА в 19 % случаев. Распределение причин отказов ЦНА показано на рисунке 1.

Отмеченные повреждения при работе ЦНА способствуют росту механических колебательных сил в звеньях машины: центробежной силы, кинематической силы, параметрической силы, ударной силы и силы сухого трения, действующих в трех направлениях: радиальном, осевом и тангенциальном. Указанные силы обеспечивают вибрацию агрегата и пульсации крутящего момента на валу за счет возбуждения переменных напряжений от кручения вала.

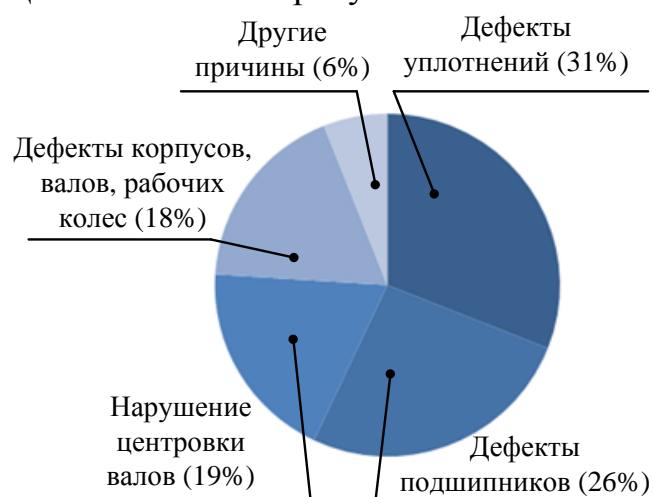


Рисунок 1 – Причины отказов промышленных ЦНА

Мониторинг технического состояния ЦНА без вывода машины из работы выполняется с целью оперативного обнаружения и оценки деградации состояния узлов агрегата, что позволяет эффективно организовывать систему планово-предупредительных ремонтов (ППР) на основе сочетания регламентированного ремонта и ремонта по техническому состоянию. Диагностика консольных ЦНА с целью определения состояний подшипников и сопряжения валов проводится методами контроля различных параметров: шумов, смазки, рабочих характеристик, температуры, вибрации, электрических параметров цепи питания электродвигателя.

В работе рассмотрен эффективный метод контроля электрических параметров, основанный на анализе амплитудных спектров сигналов тока фаз статора электродвигателя в составе ЦНА. Вопросу оценки технического

состояния 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, A. Hernandez-Solis, S. R. Shaw, Parasuram P. Harihara, Christopher Laughman и других. В работах рассмотрены алгоритмы выполнения мониторинга, рекомендации и указания по измерениям, анализу данных, компоновке измерительных систем.

Перспективность дальнейшего развития метода для определения состояний подшипников и сопряжений валов консольных ЦНА определяется необходимостью разработки подходов к предварительному определению пороговых значений диагностических параметров при подготовке к мониторингу, в том числе, с учетом возможных отклонений рабочих и конструктивных параметров ЦНА.

По результатам анализа работ выделены и охарактеризованы основные этапы диагностики ЦНА анализом токов электродвигателя и сформирована последовательность операций контроля, представленная на рисунке 1.

На основе последовательности определена обобщенная структура аппаратной части систем электропараметрического контроля технического состояния ЦНА, представленная на рисунке 2.

Существующие решения по аппаратному обеспечению мониторинга технического состояния узлов консольных ЦНА анализом спектров тока электродвигателей представляют собой измерительные системы мобильного и полустационарного типов.

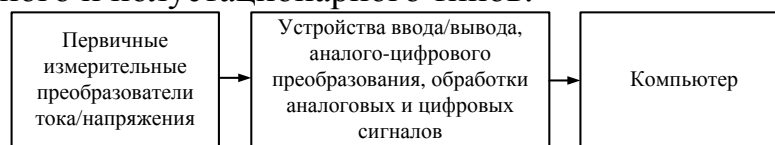


Рисунок 2 – Обобщенная структура аппаратной части систем контроля ЦНА

Во второй главе обозначены для исследования диагностические параметры мониторинга в спектре тока и вибрационный критерий для определения состояний узлов ЦНА, а также сформированы методики экспериментального исследования и компьютерного моделирования.



Рисунок 1 – Последовательность операций электропараметрического контроля

Ввиду, установленных в первой главе, единых факторов возбуждения вибрации и колебаний крутящего момента на валу ЦНА, определяющих отклонение параметров спектра тока двигателя, рассматривается возможная взаимосвязь диагностических параметров в спектре тока с параметрами общего уровня вибрации агрегата, которая позволит разработать подход к первоначальному определению пороговых значений диагностических параметров с использованием нормативов на вибрацию предварительно при подготовке к мониторингу. Предполагаемая связь параметров спектра с вибрацией показана на рисунке 3.

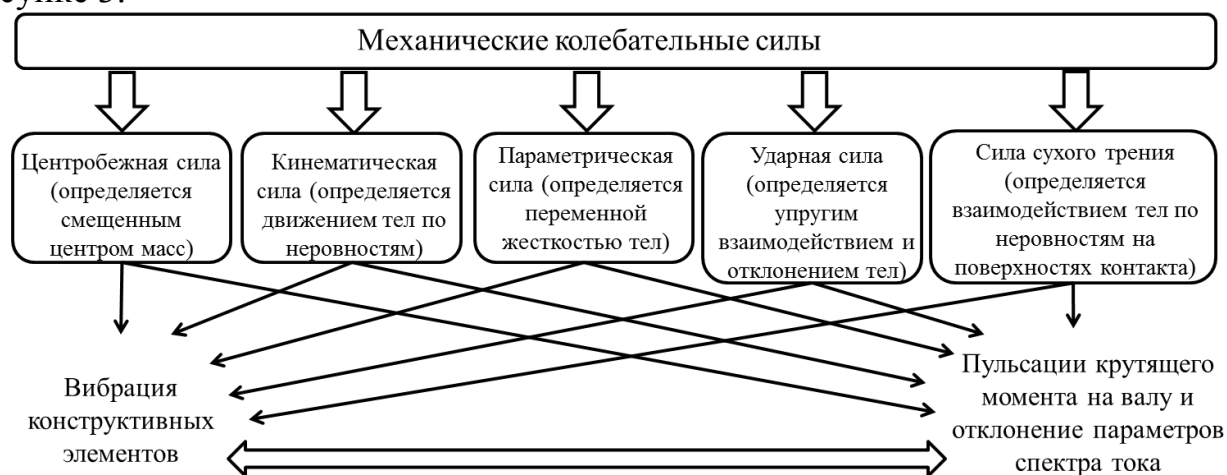
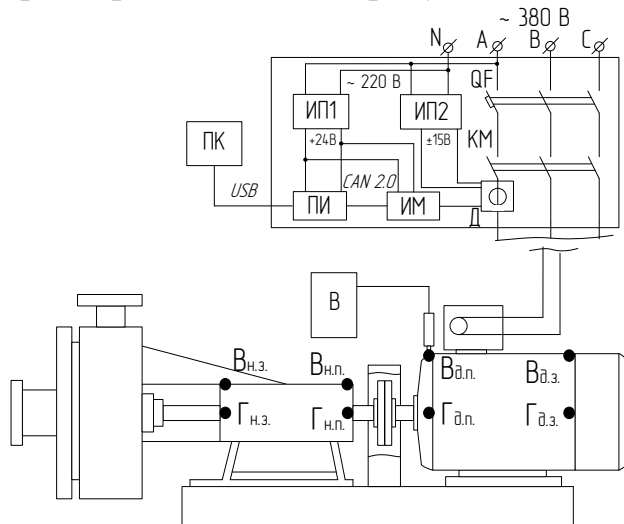


Рисунок 3 – Связь параметров вибрации и модуляции тока статора

Для экспериментального исследования подготовлена установка, состоящая из ЦНА консольного типа К 20/30 и комплекта измерительной аппаратуры, внешний вид и структура подключения которых представлены на рисунках 4 а, б.



а.



б.

а – внешний вид комплекса; б – структура соединений аппаратуры

Рисунок 4 – Экспериментальный измерительный комплекс

На рисунке 4 б 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; KM – силовые контакты контактора; В – портативный виброметр; В_{н.п.}, В_{н.з.}, Г_{н.п.}, Г_{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. В качестве диагностического параметра состояния насосного агрегата принимается относительное значение амплитуды частотных составляющих амплитудного спектра статорного тока электродвигателя, а в качестве вибрационного критерия принимается среднее квадратическое значение (СКЗ) виброскорости агрегата.

Порядок эксперимента показан на рисунке 5.



Рисунок 5 – Порядок выполнения эксперимента

Принудительное изменение состояния сопряжения валов ЦНА обеспечено путем нарушения показателя центровки валов l в радиальном и осевом направлениях в диапазоне: $l = 0,12 \div 2,2$ мм (допустимое по руководству 0,12 мм).

Состояние подшипников качения определено показателем поврежденности q , являющимся максимальным смещением наружного кольца относительно внутреннего (зазором) в радиальном и осевом направлениях в подшипнике, в пределах $0,08 \div 0,55$ мм.

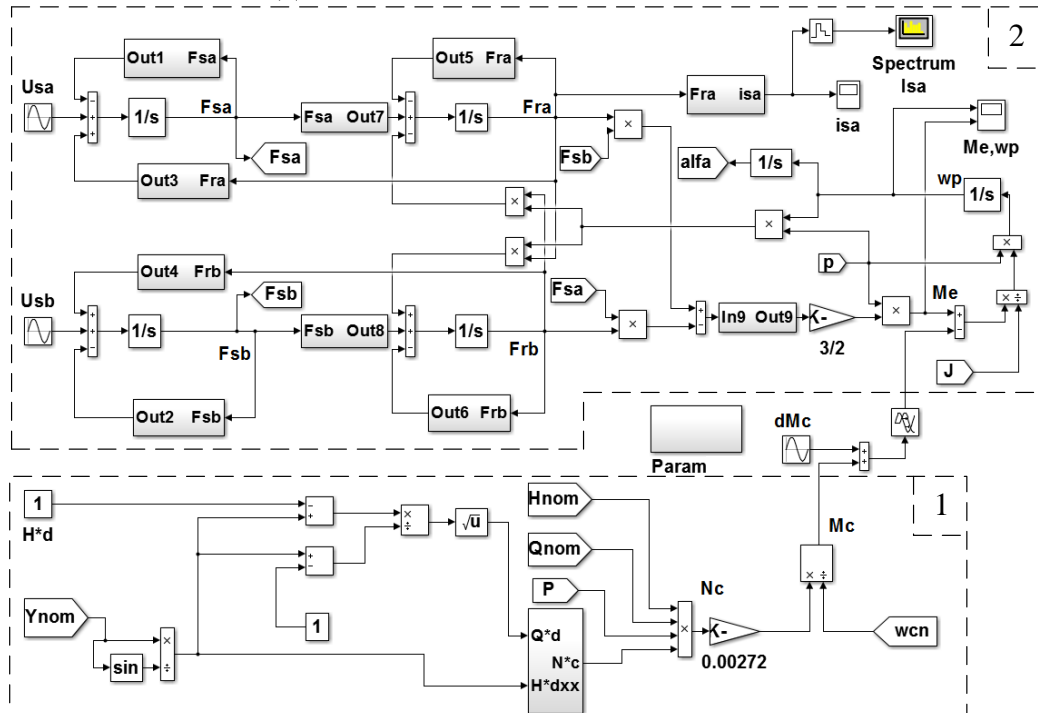
В качестве токового диагностического параметра принято относительное значение амплитуды информативных частотных составляющих спектров тока:

$A_i' = \frac{A_i}{A_{50}}$, 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.

Исследование возможных отклонений диагностических параметров в процессе контролей по причинам регулирования рабочих характеристик насоса и изменений пороговых значений при подготовке к мониторингам на консольных ЦНА других мощностей выполняется методом имитационного моделирования. Модель консольного ЦНА в программном комплексе Matlab R2015a (8.5.0.197613) с пакетом Simulink представлена на рисунке 6. Центробежный насос описывается уравнениями по методу электрогидравлических аналогий, связывающими производительность, напор и мощность в абсолютных и относительных единицах, и расчетный угол нагрузки. Асинхронный электродвигатель описывается системой уравнений в координатах α, β для потокосцеплений статора.

В качестве рабочих характеристик рассматриваются параметры напорной характеристики насосного агрегата в относительных единицах: относительные

развиваемый напор и производительность. Для описания моделей ЦНА разных мощностей использованы паспортные и расчетные параметры ряда однотипных агрегатов консольного исполнения, являющихся подобными, используемому в экспериментальном исследовании.



1,2 – блоки для описания центробежного насоса и электродвигателя соответственно
Рисунок 6 – Имитационная модель ЦНА

Связь между моделями насоса и двигателя обеспечивается путем соединения блоков определяющих электромагнитный момент двигателя « M_e » и момент сопротивления насоса « M_c ». 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 величина с различной амплитудой и частотами, на которых проявляются изменения состояний подшипников качения и сопряжения валов ЦНА.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования диагностических параметров определения состояний узлов ЦНА.

Примеры спектров тока приводного двигателя, зафиксированных при разных состояниях сопряжения валов и подшипников качения насоса и электродвигателя ЦНА представлены на рисунках 7 а,б,в,г.

С увеличением величины расцентровки (рисунок 7 б) отмечен существенный рост амплитуды гармоники 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.

Рост амплитуд частотных составляющих спектра на частотах $f_{\text{подш}} = f_0 \pm f_{\text{вр}} / 3$, наблюдается при каждом увеличении значения показателя поврежденности подшипников насоса (рисунок 7 в).

При изменении состояния подшипников электродвигателя (рисунок 7 г), аналогично подшипникам насоса, спектр тока содержит возрастающие составляющие на частотах $f_{\text{подш}} = f_0 \pm f_{\text{вр}} / 3$, а также

$f_{\text{подш.дв}} = f_0 \pm 2f_c$, и $f_{\text{эксц.дв}} = kf_{\text{вр}} \pm 12f_{\text{ск}}$, где $f_c \approx 0,4f_{\text{вр}}$ – 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.

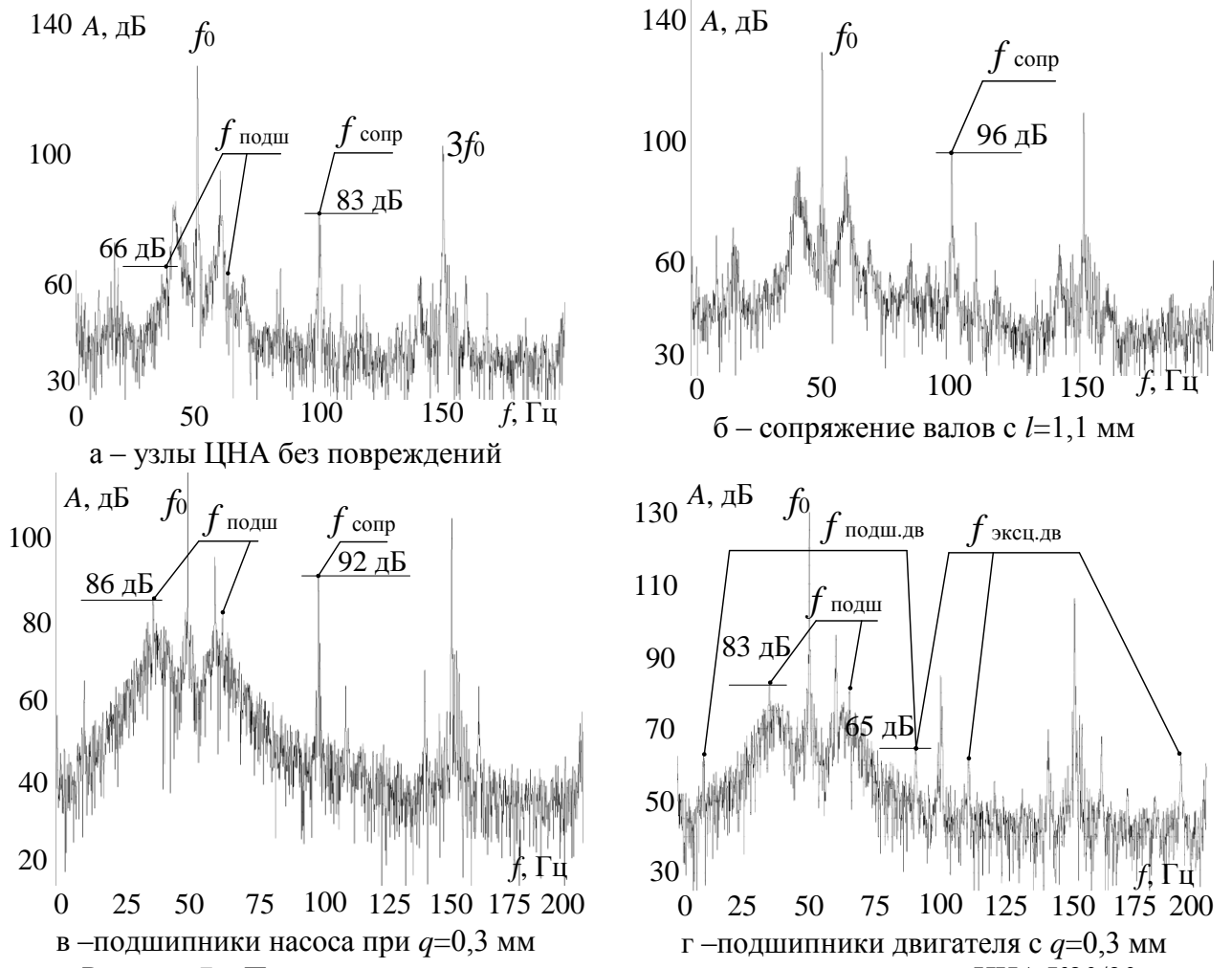


Рисунок 7 – Примеры спектров тока электродвигателя консольного ЦНА К20/30

Установленные информативные частотные составляющие спектра, по которым оцениваются диагностические параметры, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Информативные составляющие спектров

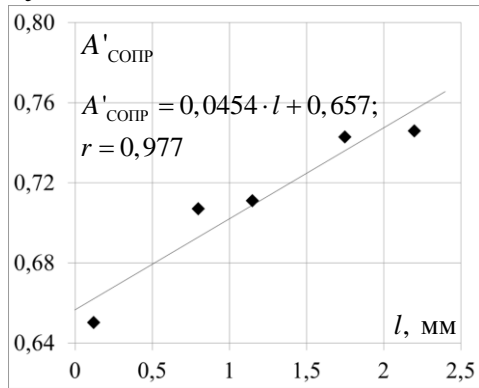
Рассматриваемый узел	Частоты информативных составляющих
1. Сопряжение валов агрегата	$f_{\text{сопр}} = f_0 + f_{\text{вр}}$
2. Подшипники насоса	$f_{\text{подш}} = f_0 \pm f_{\text{вр}} / 3$ к анализу принимается составляющая с наибольшей амплитудой в момент измерения
3. Подшипники электродвигателя	$f_{\text{подш}} = f_0 \pm f_{\text{вр}} / 3$ 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: $A'_{\text{сопр}}$.

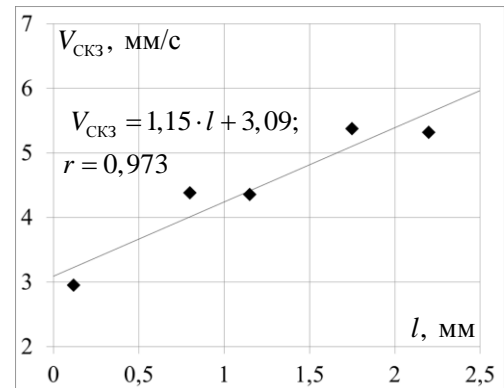
Диагностический параметр состояния подшипников агрегата определен на соответствующей информативной частоте $f_{\text{подш}}$ и обозначается: $A'_{\text{подш}}$.

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 $f_{\text{подш,дв}}$, $f_{\text{эксц,дв}}$.

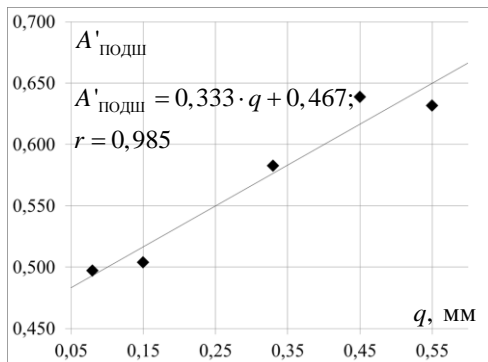
По результатам измерений $A'_{\text{сопр}}$, $A'_{\text{подш}}$ и $V_{\text{СКЗ}}$ по опытам с разными показателями расцентровки и поврежденности подшипников установлены зависимости: $A'_{\text{сопр}} = f(l)$, $V_{\text{СКЗ}} = f(l)$, $A'_{\text{подш}} = f(q)$, $V_{\text{СКЗ}} = f(q)$ представленные на рисунках 8 а,б,в,г.



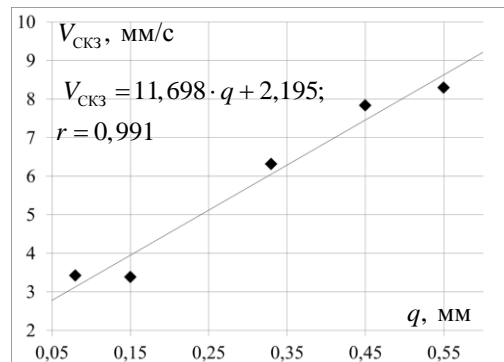
а – зависимость $A'_{\text{сопр}} = f(l)$



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



в – зависимость $A'_{\text{подш}} = f(q)$



г – зависимость $V_{\text{СКЗ}} = f(q)$

Рисунок 8 – Значения $A'_{\text{сопр}}$, $A'_{\text{подш}}$, $V_{\text{СКЗ}}$ при разных показателях расцентровки и поврежденности подшипников

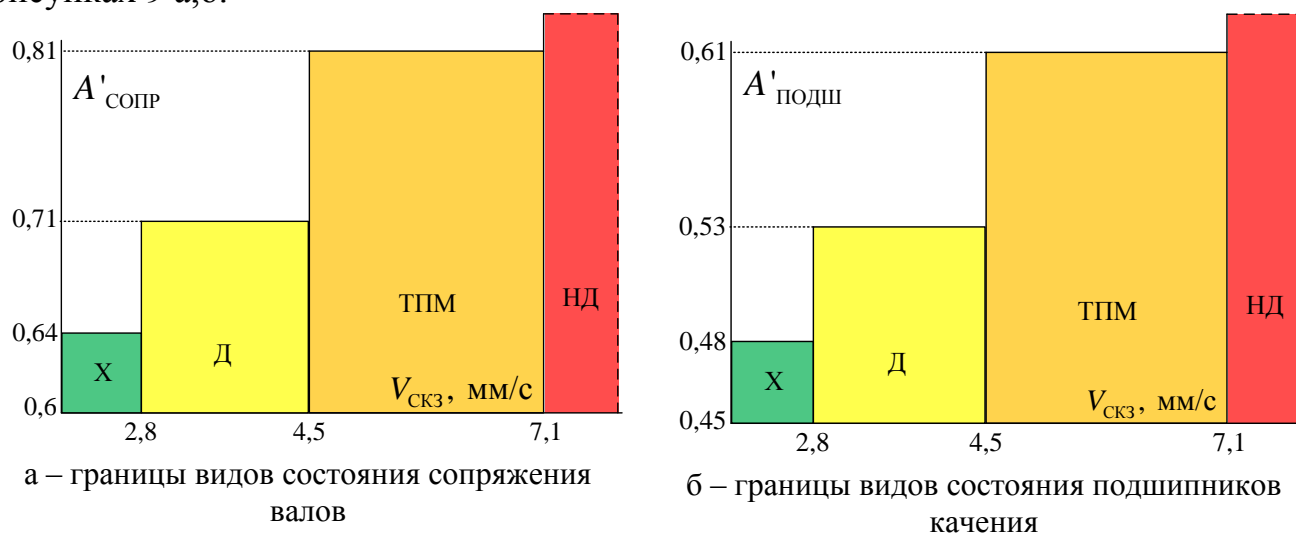
Соотнесением полученных уравнений зависимостей определены выражения $A'_{\text{сопр}} = f(V_{\text{СКЗ}})$, $A'_{\text{подш}} = f(V_{\text{СКЗ}})$:

$$A'_{\text{сопр}} = 0,038V_{\text{СКЗ}} + 0,54, \quad (1)$$

$$A'_{\text{подш}} = 0,029V_{\text{СКЗ}} + 0,403, \quad (2)$$

которые позволяют установить пороговые значения $A'_{\text{СОПР}}$, $A'_{\text{ПОДШ}}$, соответствующие известным нормам на СКЗ виброскорости ($V_{\text{СКЗ}}$), и определяющие границы видов состояний сопряжения валов и подшипников ЦНА.

Графические представления границ видов состояний узлов ЦНА, определенных согласно нормам на вибрацию по СА 03-001-05 отражены на рисунках 9 а,б.



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

Рисунок 9 – Границы видов состояний узлов ЦНА К 20/30

Кроме того, установленные пороговые значения параметров для границ видов состояний узлов и, соответствующие им, нормы на СКЗ виброскорости, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Пороговые значения диагностического и вибрационного параметров для границ классов технического состояния ЦНА К 20/30

Класс технического состояния	Пороговые значения вибрационного параметра, $V_{\text{СКЗ}}$, мм/с	Пороговые значения диагностического параметра, A'_i	
		$A'_{\text{СОПР}}$	$A'_{\text{ПОДШ}}$
в соответствии с 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
Требуется принятия мер (ТПМ)	<7,1	<0,81	<0,61
Недопустимо (НД)	>7,1	>0,81	>0,61

Установить наличие, либо отсутствие изменения состояния подшипников электродвигателя можно 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.

В четвертой главе изложены результаты исследования отклонений диагностических параметров определения состояний узлов ЦНА при изменении

рабочих параметров насоса и рассмотрении модели консольного ЦНА другой мощности.

С использованием имитационной модели ЦНА, представленной в главе 2, в результате ввода dM_c различной амплитуды A_{dM_c} и частоты ω_{dM_c} , ввода различных значений относительного напора H_d^* и параметров насоса и двигателя моделей: К20/30 (используемый в эксперименте), К80-65-160, К80-50-200, К100-65-200, получены группы зависимостей значений диагностических параметров от значений параметра имитации неисправности.

По результатам моделирования с вводом параметров ряда ЦНА при неизменном значении относительного напора $H_d^* = 1$ получены зависимости $A'_{\text{СОПР}} = f(A_{dM_c})$ и $A'_{\text{ПОДШ}} = f(A_{dM_c})$, представленные на рисунках 10 а,б.

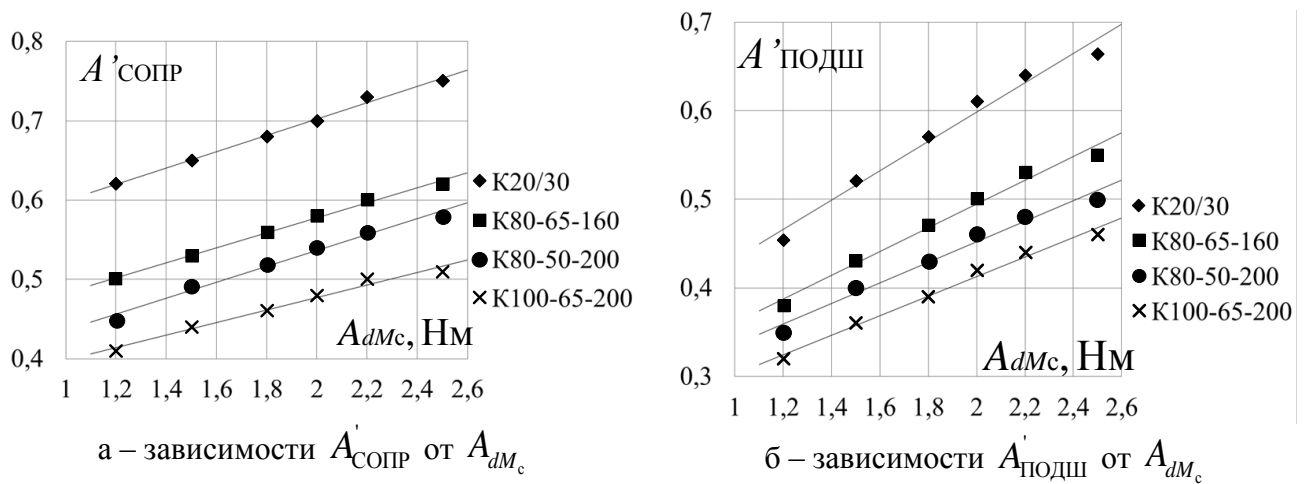
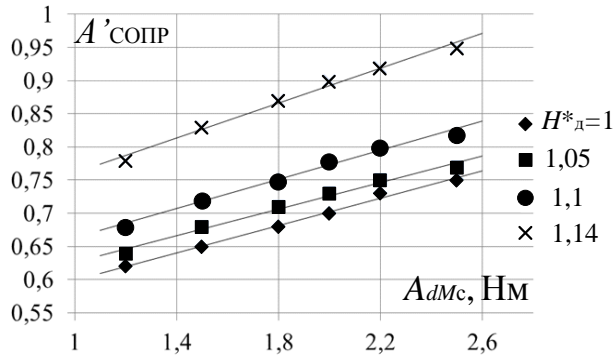


Рисунок 10 – Зависимости A'_i от A_{dM_c} для различных ω_{dM_c} , неизменном H_d^* при моделировании с параметрами ряда ЦНА

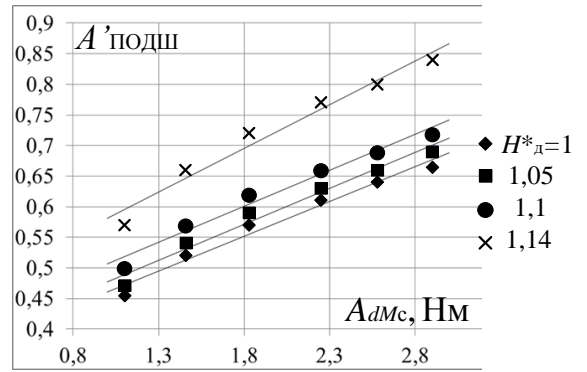
Затем, получены зависимости $A'_{\text{СОПР}} = f(A_{dM_c})$ и $A'_{\text{ПОДШ}} = f(A_{dM_c})$ для каждого ЦНА в отдельности при изменении относительного напора H_d^* в диапазонах от номинального ($H_d^* = 1$) до напора холостого хода. Зависимости представлены на рисунках 11 а-з.

Для зависимостей определены уравнения регрессии, вычислены коэффициенты корреляции, относительные угловые коэффициенты и коэффициенты сдвига регрессии a' , b' . Методами математической статистики обосновано, что линии регрессии являются статистически различимыми, что определяет необходимость уточнения пороговых значений диагностических параметров в процессе мониторинга состояний узлов ЦНА при изменении рабочих характеристик агрегата вследствие регулирования, и подготовке к контролям на агрегатах разных мощностей.

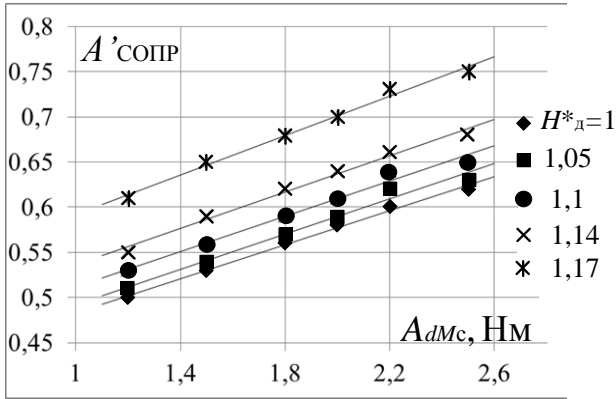
Уточнение пороговых значений предложено выполнять путем пересчета коэффициентов выражений (1) и (2), полученных при эксперименте на ЦНА К 20/30, умножением на установленные относительные коэффициенты регрессии a' , b' , соответствующие уравнениям, определенным при разных напорах и для моделей агрегатов разной мощности.



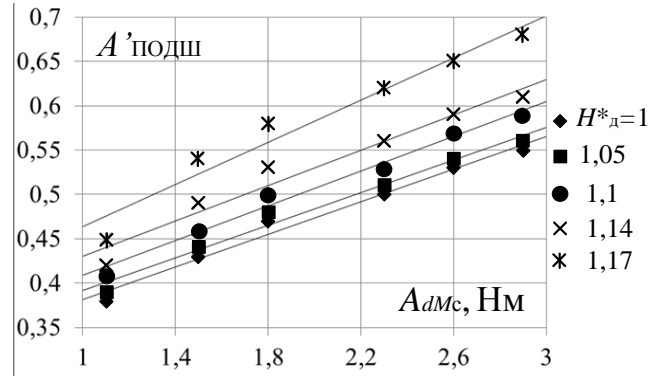
а – $A'_{СОПР} = f(A_{дмc})$ для К 20/30



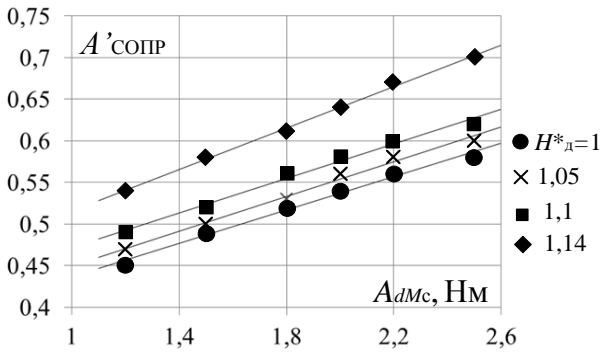
б – $A'_{ПОДШ} = f(A_{дмc})$ для К 20/30



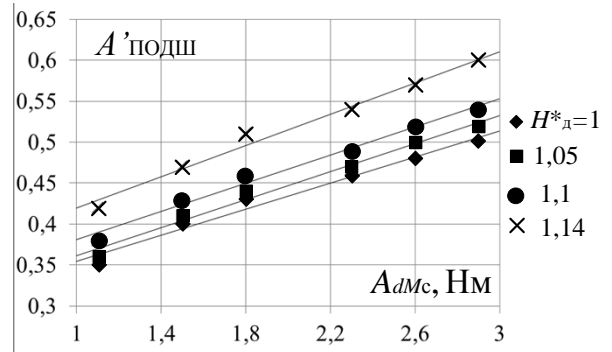
в – $A'_{СОПР} = f(A_{дмc})$ для К80-65-160



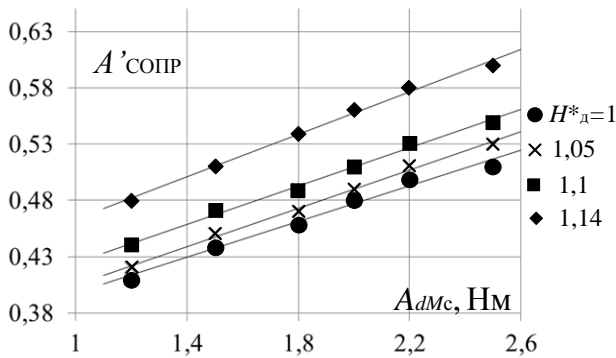
г – $A'_{ПОДШ} = f(A_{дмc})$ для К80-65-160



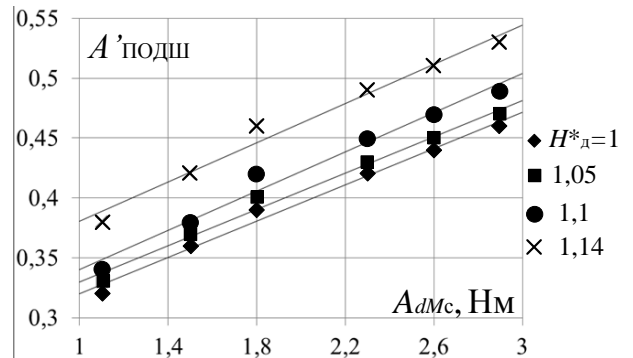
д – $A'_{СОПР} = f(A_{дмc})$ для К80-50-200



е – $A'_{ПОДШ} = f(A_{дмc})$ для К80-50-200



ж – зависимости $A'_{СОПР}$ от $A_{дмc}$



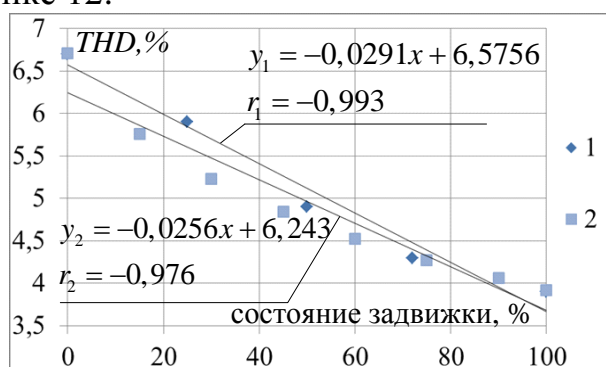
з – зависимости $A'_{ПОДШ}$ от $A_{дмc}$

Рисунок 11 – Зависимости $A'_{СОПР}$ и $A'_{ПОДШ}$ от $A_{дмc}$ для различных $H^*_{д}$ при моделировании с параметрами ряда консольных ЦНА

Для оценки адекватности имитационной модели в части оценки отклонений диагностического параметра при изменении рабочих характеристик ЦНА

выполнено моделирование с параметрами и условиями, соответствующими экспериментальному исследованию, представленному в диссертационной работе Шикунова В. Н. на тему: «Разработка методов повышения безопасности эксплуатации машинных агрегатов нефтегазовых производств с электрическим приводом» в 2008 г. Зависимость, представленная в указанной работе характеризует взаимосвязь коэффициента гармонических искажений амплитудно-частотного спектра сигнала тока фазы статора электродвигателя (*THD*) с показателем степени открытия задвижки на напорном трубопроводе насоса (0 – закрыта, 25, 50, 75, 100 % - открыта). Для получения теоретической зависимости в модели задавались рабочие и конструктивные параметры экспериментальной насосной установки.

Экспериментальная зависимость и зависимость, полученная по модели, представлены на рисунке 12.



1 – экспериментальная зависимость;

2 – зависимость по результатам моделирования

Рисунок 12 – Экспериментальная и теоретическая зависимости диагностического параметра от состояния задвижки

Линии регрессии зависимостей признаются статистически неразличимыми при проверке соответствующей гипотезы, что определяет адекватное описание теоретической зависимостью экспериментальных данных.

В пятой главе представлено описание методики определения предельных состояний ресурсопределяющих узлов промышленных консольных ЦНА анализом амплитудных спектров тока их электродвигателей.

Определен порядок реализации Методики и представлены общие требования и рекомендации по компоновке аппаратурной части измерительных систем, определению условий проведения мониторинга, установке пороговых значений диагностических параметров, измерениям и обработке данных, в том числе по определению фактического и прогнозируемого состояний узлов, формированию отчета и последующему анализу диагностической информации. Предложен алгоритм корректировки пороговых значений диагностических параметров в процессе реализации Методики. Сформулированы общие требования к аппаратурному обеспечению систем контроля, в том числе требования к первичным измерительным преобразователям, устройствам аналого-цифрового преобразования, компьютеру, источнику питания измерительной аппаратуры.

Для обеспечения Методики предлагаются варианты компоновок измерительных систем по мобильному и полустационарному типам.

Мобильная система оснащается первичным измерительным преобразователем (ПИП) типа разъемных токоизмерительных клещей с аналоговым выходным сигналом по току. ПИП подключается к измерительному модулю, который подключен к преобразователю интерфейса марки Zet производства ЗАО «Электронные технологии и метрологические системы» (компания ZETLAB). Аналогичные устройства использованы при проведении экспериментальных исследований в настоящей работе. Для реализации автономного питания устройств в составе мобильных систем контроля предлагается использовать портативные источники питания (ИП) с соответствующим выходным напряжением и возможностью перезарядки от сети. Структурная схема соединений измерительной аппаратуры мобильной системы представлена на рисунке 13.

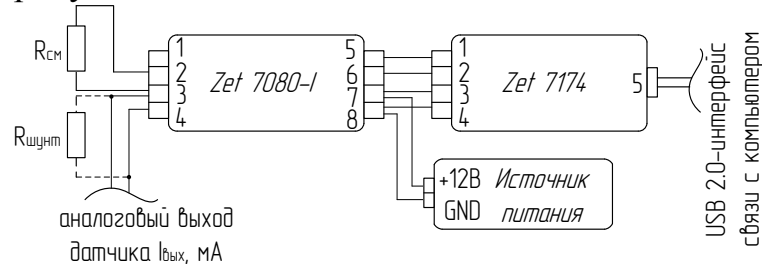


Рисунок 13 – Структурная схема соединений мобильной измерительной системы

Полустационарные измерительные системы контроля предусматривают частичный монтаж измерительной аппаратуры стационарно в зоне присоединения ПИП к отдельному фазному проводу кабеля питания электродвигателя ЦНА с обеспечением возможности подключения портативного измерительного оборудования через организованные каналы связи.

Структурная схема соединений измерительной аппаратуры полустационарной системы представлена на рисунке 14.

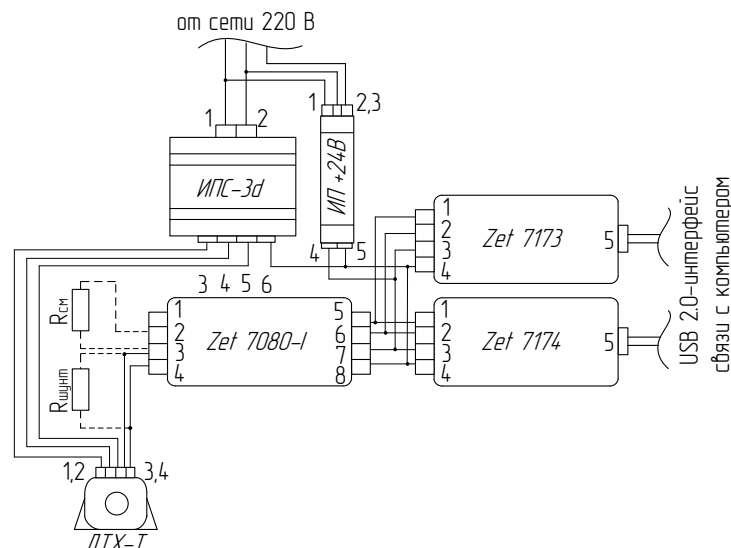


Рисунок 14– Структурная схема соединений полустационарной измерительной системы

В качестве первичного измерительного преобразователя полустационарных систем предлагается использовать неразъемные токовые датчики на эффекте Холла типа ДТХ-Т. 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-3D.

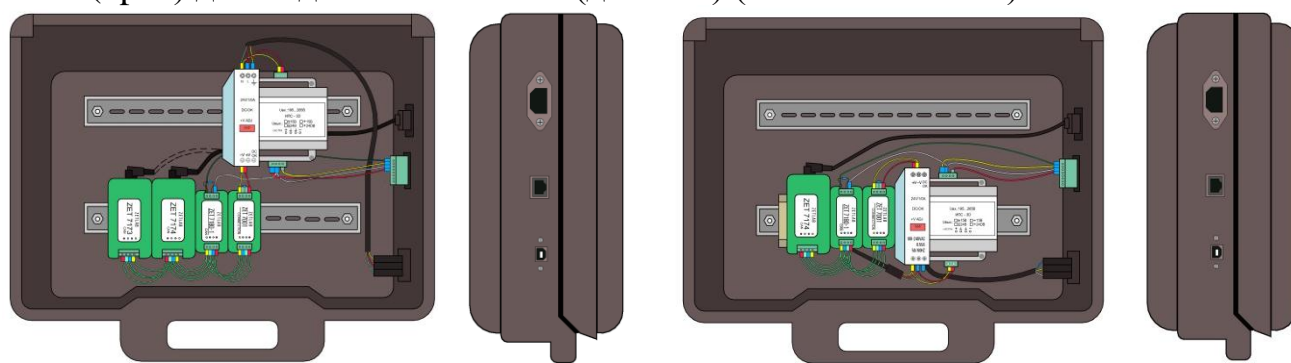
Часть измерительной системы для преобразования и накопления информации о сигнале предлагается реализовать устройствами производства ZETLAB: измерительный модуль Zet 7080-I, преобразователь интерфейса Zet 7174 и автономный регистратор Zet 7173. Питание устройств обеспечивается ИП с выходным напряжением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

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 15 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 15 – Внешний вид кейса с измерительной аппаратурой

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

Основные выводы:

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 предварительному определению 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 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.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. Ягубов З. Х., Тетеревлева Е. В., Дементьев И. А., Шичёв П. С. Об исследовании процесса обнаружения дефектов насосно-компрессорного оборудования по гармоническому составу тока статора электродвигателя // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2015. № 4. С. 473-496.

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

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

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

Авторские свидетельства и патенты:

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

Статьи в научно-технических сборниках и других изданиях:

1. Ягубов З. Х., Ягубов Э. З., Шичёв П. С. Имитационное моделирование влияния дефекта в насосно-компрессорных установках на ток статора приводного электродвигателя // «Ресурсы Европейского Севера. Технологии и экономика освоения». 2015. № 2. С. 31-38.

2. Шичёв П. С. Оценка технического состояния нефтеперекачивающих центробежных насосных агрегатов по гармоническому составу тока статора электродвигателя // XVII Международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2016» : материалы конференции (23-25 марта 2016 г.). В 6 ч. Ч. 2. Ухта. 2016. С. 221-224.

3. Шичёв, П. С. Исследование диагностических признаков неисправного состояния центробежных насосных агрегатов // XVIII Международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2017» : материалы конференции (12-14 апреля 2017 г.). В 5 ч. Ч. 4. Ухта. 2018. С. 21-24.

4. Шичёв П. С. Результаты исследования диагностических признаков механических неисправностей в электроприводных центробежных насосных агрегатах // Рассохинские чтения : материалы международной конференции (1-2 февраля 2018 года). В 2 ч. Ч. 2 / под ред. Н. Д. Цхадая. Ухта. 2018. С. 271-274.

5. Шичёв П. С. Оценка неисправностей механического характера в центробежном насосном агрегате электропараметрическим методом диагностики // XIX Международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2018»: материалы конференции (21-23 марта 2018 г.). В 5 ч. Ч. 3. – Ухта : УГТУ, 2019. – С. 103-106.

Учебно-методические пособия:

1. Быков И. Ю., Шичёв П. С. Оценка технического состояния ресурсопределяющих узлов промысловых консольных центробежных насосных агрегатов методом анализа спектров тока электродвигателя. Ухта : УГТУ. 2019. 77 с.