

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Ухтинский государственный технический университет»
(УГТУ)

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ
НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ ЭЛЕКТРОПАРАМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ
ДИАГНОСТИКИ**

Специальность – 05.11.16 «Информационно-измерительные и управляющие системы
(нефтяной и газовой промышленности)

Научно-квалификационная работа

Автор:

аспирант кафедры Электрификации
и автоматизации технологических процессов



П. С. Шичёв

Научный руководитель:

заведующий кафедрой Электрификации
и автоматизации технологических процессов
доктор технических наук, профессор



З. Х. Ягубов

Содержание

Введение	4
1. Анализ методов и систем контроля технического состояния центробежных насосных агрегатов	8
1.1 Неисправности, вызывающие отказы и методы контроля технического состояния центробежных насосных агрегатов	8
1.2 Контроль технического состояния динамического оборудования электропараметрическим методом диагностики	23
1.3 Методы моделирования объектов контроля для решения задач электропараметрической диагностики	28
1.4 Решения по аппаратурному обеспечению информационно-измерительных систем электропараметрического контроля технического состояния динамического оборудования.....	32
1.5 Выводы по главе	34
2. Экспериментальная оценка технического состояния центробежного насосного агрегата электропараметрическим методом диагностики	35
2.1 Взаимосвязь диагностического и вибрационного параметров.....	35
2.2 Экспериментальный комплекс и мероприятия по реализации исследования	36
2.3 Оценка влияния сторонних помех и анализ результатов эксперимента	45
2.4 Выводы по главе	60
3. Имитационное моделирование центробежного насосного агрегата с учетом наличия механических неисправностей и изменения рабочих и конструктивных параметров	62
3.1 Обоснование реализации имитационного моделирования.....	62
3.2 Описание модели и параметров моделирования	63
3.3 Обработка результатов моделирования	69
3.4 Проверка адекватности модели	79
3.5 Выводы по главе	82
4. Разработка предложений по аппаратурному обеспечению информационно-измерительных систем контроля технического состояния центробежных насосных агрегатов	83
4.1 Общие требования к аппаратурному обеспечению систем контроля	83
4.2 Аппаратурное обеспечение мобильных систем контроля	85
4.3 Аппаратурное обеспечение полустационарных систем контроля	88
4.4 Определение необходимого количества измерений.....	92

4.5 Выводы по главе	93
Заключение	94
Список использованной литературы.....	96
Приложение А	106
Приложение Б.....	108

Введение

Актуальность работы. Ввиду существенной значимости мероприятий по обеспечению надежной и безаварийной работы центробежных насосных агрегатов, составляющих многочисленную группу машин динамического типа и занимающих около 35% всего оборудования предприятий, на производственных объектах различных отраслей промышленности, разработка методической и аппаратурной составляющих методов функциональной диагностики оборудования является важной технологической задачей.

Задача предупреждения внезапных отказов оборудования эффективно решается применением информационно-измерительных систем контроля технического состояния, включающих в себя аппаратуру и программы для осуществления контролей, и, реализующих методы функциональной диагностики, позволяющие выполнять мониторинг технического состояния и определять остаточный ресурс оборудования без вывода из эксплуатации.

Функциональная диагностика, закрепленная в требованиях по контролю технического состояния большей части насосного оборудования производственных объектов, реализуется различными методиками, в том числе контролем шумов, смазки, параметрическим контролем, температурным и вибрационным мониторингом, обеспечиваемых значительным объемом теоретических и прикладных разработок, методического, нормативного и аппаратурного обеспечения. При этом реализация диагностики обозначенными методами характеризуется существенными трудозатратами связанными со сложностью обработки диагностической информации для определения технического состояния как машины в целом, так и ее конструктивных элементов, а также с проблематичностью организации информационно-измерительных компонентов систем контроля технического состояния, обуславливаемой необходимостью контакта первичных измерителей с объектом, особенно в процессе диагностики труднодоступных машин, например погружных насосных установок и машин, работающих в условиях воздействий значительных климатических факторов, агрессивных сред и загрязнений.

В современных реалиях производства при стремлении обеспечить достаточные точность и информативность диагностических признаков наряду с сокращением затрат трудовых и финансовых ресурсов при проведении контролей технического состояния динамического оборудования, в том числе центробежных насосных агрегатов, вне зависимости от их труднодоступности, все активнее разрабатывается электропараметрический метод функциональной диагностики основанный на регистрации сигналов токов электродвигателя агрегата и спектральном анализе сигналов с целью оценки диагностических признаков. Преимуществом метода является возможность организации

информационно-измерительных систем, позволяющих осуществлять удаленный сбор диагностической информации без непосредственного доступа к объекту контроля. При этом задачи классификации технического состояния и оценки влияния режимов работы оборудования на диагностические параметры при электропараметрическом контроле требуют разработки новых методических решений и предложений по обеспечению этих решений компонентами информационно-измерительных систем контроля технического состояния. Результаты, полученные в рамках разработки темы исследования, направлены на решение вышеуказанных задач, что определяет актуальность работы.

Цель работы. Повышение эффективности информационно-измерительных систем контроля технического состояния центробежных насосных агрегатов электропараметрическим методом диагностики

Задачи исследования.

1. Анализ уровня разработки алгоритмов и средств электропараметрического метода контроля технического состояния центробежных насосных агрегатов.
2. Экспериментальное определение электропараметрических диагностических признаков и пороговых значений диагностических параметров при наличии механических неисправностей в центробежном насосном агрегате.
3. Оценка влияния рабочих и конструктивных параметров насосного агрегата на диагностический признак с помощью методов имитационного моделирования.
4. Разработка предложений по аппаратурному обеспечению измерительных систем электропараметрического контроля технического состояния насосных агрегатов.

Научная новизна.

1. Экспериментально определены зависимости электропараметрического диагностического параметра от параметра вибрации центробежного насосного агрегата при наличии механических неисправностей и определены пороговые значения диагностического параметра для классификации технического состояния насосного агрегата.
2. Инструментами имитационного моделирования получены зависимости электропараметрического диагностического параметра от параметра механической неисправности центробежного насосного агрегата при изменении рабочих и конструктивных параметров агрегата.

Основные защищаемые положения.

1. Установленные диагностические признаки механических неисправностей центробежного насосного агрегата и выявленные пороговые значения диагностического параметра, позволяющие классифицировать техническое состояние насосного агрегата в процессе эксплуатации.

2. Определенные по имитационной модели центробежного насосного агрегата зависимости диагностического параметра от параметра имитации механической неисправности, позволяющие учесть влияние рабочих и конструктивных параметров агрегата на значение диагностического параметра при реализации контроля технического состояния.

3. Разработанные предложения по аппаратурному обеспечению информационно-измерительных систем контроля, обеспечивающие возможность оценки технического состояния насосных агрегатов.

Практическая значимость.

1. Создана экспериментальная диагностическая система для исследования электропараметрического метода оценки технического состояния центробежного насосного агрегата консольного типа.

2. Разработаны решения по совершенствованию алгоритмов и аппаратурному обеспечению информационно-измерительных систем оценки механических неисправностей центробежных насосных агрегатов электропараметрическим методом контроля.

Методы исследования и достоверность результатов. Поставленные в работе задачи решены с применением инструментов электропараметрического и вибрационного методов диагностики, методов теории математической статистики, методов теории электромеханики и электро-гидравлических аналогий, методов имитационного моделирования и численных методов. Достоверность результатов исследования обеспечивается использованием современного сертифицированного аппаратурного и программного обеспечения и использованием методов теории математической статистики при подготовке к эксперименту, при обработке экспериментальных данных, а также при оценке адекватности результатов моделирования.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на:

1. XVII, XVIII, XIX Международных молодежных научных конференциях «Севергеозкотех-2016, 2017, 2018» (УГТУ, г. Ухта);

2. Международных семинарах «Рассохинские чтения» (УГТУ, г. Ухта, 2016 г., 2018 г.);

3. II Международной Научно-технической конференции молодежи АО «Транснефть-Север» (АО «Транснефть-Север», г. Ухта, 2017 г.);

4. VII Республиканском молодежном инновационном конвенте «Молодежь-Будущему Республики Коми» (УГТУ, г. Ухта, 2017 г.).

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 8 работах, в том числе: 3 – в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов ВАК Минобрнауки России; 1 – в научно-техническом журнале, входящем в базу РИНЦ; 3 – в материалах научно-технических конференций; 1 – в форме описания к патенту на полезную модель.

Объем и структура работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и двух приложений. Текст работы изложен на 110 страницах, содержит 36 рисунков, 25 таблиц, список использованной литературы включает 109 наименований.

1. Анализ методов и систем контроля технического состояния центробежных насосных агрегатов

1.1 Неисправности, вызывающие отказы и методы контроля технического состояния центробежных насосных агрегатов

Центробежные насосные агрегаты, эксплуатируемые в различных системах объектов нефтегазовой промышленности являются ответственными и сложными энерго-механическими установками, нормальное функционирование которых обеспечивается надежностью их основных конструктивных элементов. Надежность, являющаяся важнейшим технико-экономическим показателем качества любого технического устройства или системы, определяется, как свойство способности изделия выполнить требуемую функцию при данных условиях, и влияющие на эту способность свойства безотказности, ремонтпригодности и долговечности [102]. Важным параметром, характеризующим данное свойство на различных этапах жизненного цикла устройства является интенсивность отказов. Под отказом, согласно теории надежности, понимается событие, после возникновения которого устройство теряет свою способность выполнять заданную функцию [102].

1.1.1 Отказы и неисправности центробежных насосных агрегатов

Согласно статистическим данным [44,77], доля отказов насосных агрегатов среди всего оборудования нефтегазовой отрасли составляет 11%. При этом отказы насоса в составе агрегата составляют 49%, а отказы энергетического оборудования порядка 30%, среди которых отказы непосредственно приводного электродвигателя составляют 15%.

В соответствии с данными [44,77] основными причинами выхода из строя насосного агрегата являются повышенная вибрация – 37%, дефекты уплотнений насоса – 31%, неисправности подшипников – 26%. Доля отказов и распределение причин отказов центробежных насосных агрегатов отражены на круговых диаграммах на рисунке 1.1.

Дефекты щелевых уплотнений, использующихся для разделения области всасывания от области нагнетания и торцевых уплотнений, необходимых для исключения утечек в месте выхода вала из корпуса 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% [44].

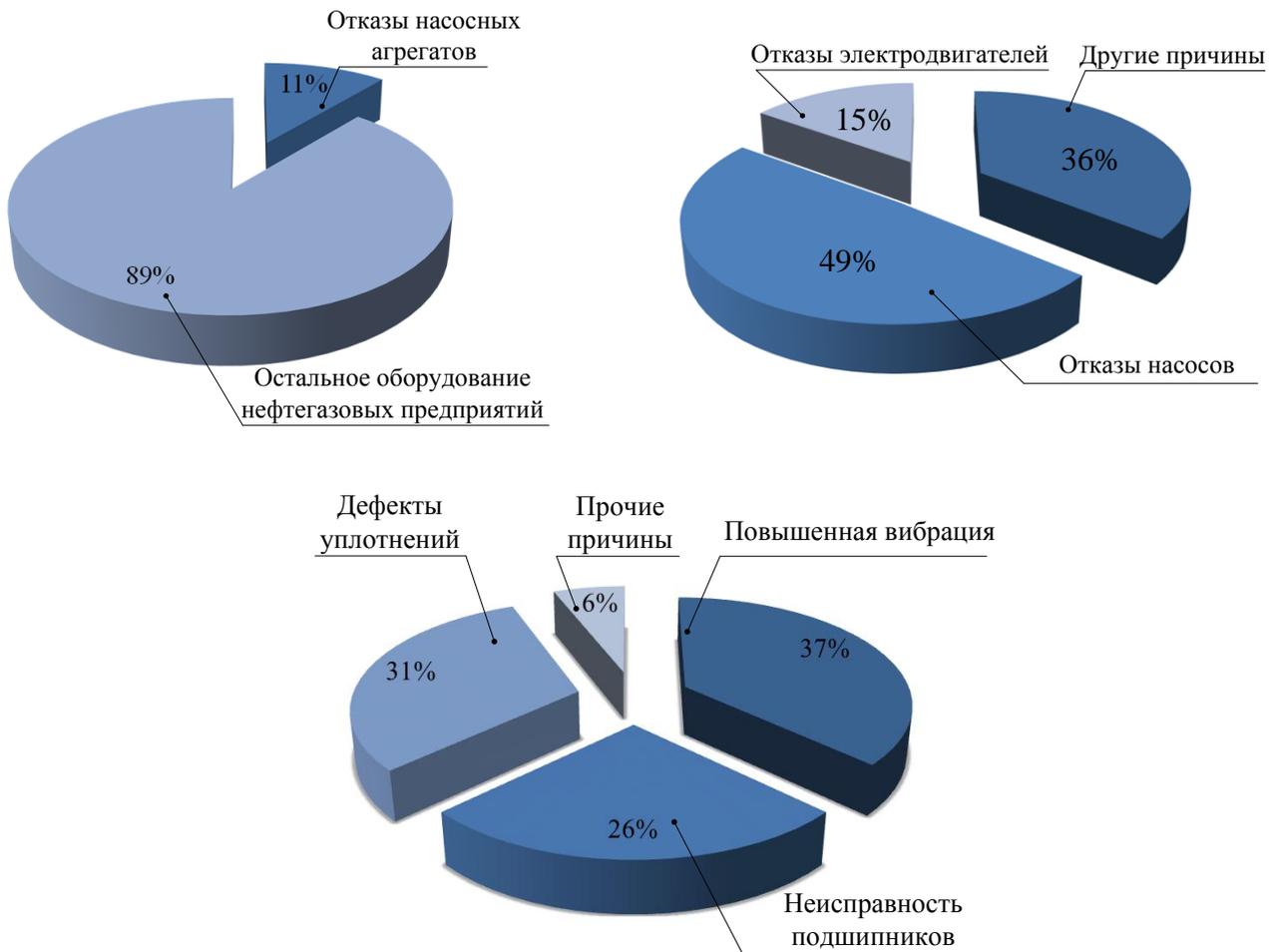


Рисунок 1.1. Доля отказов и распределение причин отказов центробежных насосных агрегатов

При этом дефекты уплотнений нельзя отнести ни к критическим, при наличии которых эксплуатация агрегата невозможна, или недопустима по условиям безопасности и надежности [10,51], 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 [44,55,103].

Повышенная вибрация является наиболее вероятной причиной отказа насосов – 37 %. По некоторым данным [43] повышенная вибрация вызывает отказы насосного оборудования в 45% случаев.

Важно отметить, что вибрация агрегата, сама по себе, не является дефектом. Повышенную вибрацию правильно считать, как следствием, так и причиной возникновения

и развития различного рода производственных и эксплуатационных неисправностей, некачественной сборки, монтажа, наладки, а также работы агрегата в режимах отличных от номинальных. При этом вибрационное состояние (уровень вибрации) является важнейшим показателем работоспособности центробежных насосных агрегатов и определяет эффективность и надежность их функционирования в процессе эксплуатации.

Причиной возмущения вибрационных колебаний в динамических машинах является действие колебательных сил различного характера происхождения: механических, гидродинамических и электромагнитных. Параметры колебательных сил в насосном агрегате определенного конструктивного исполнения и с характерными рабочими параметрами, определяются режимом работы данной машины, и, в большей степени, техническим состоянием конструктивных элементов, взаимосвязанным с присутствием и степенью развития неисправностей этих элементов. В результате анализа ряда источников [1,3,5,6,10,19,44,98,99] выделены разновидности колебательных сил и связанные с ними неисправности элементов узлов насосных агрегатов, представленные в таблице 1.

Таблица 1.1 – Колебательные силы и, связанные с ними неисправности

Природа силы	Вид силы	Основные характерные неисправности конструктивных элементов
Механическая	Центробежная сила (определяется смещенным центром масс)	Ротор: – статическая, моментная, динамическая неуравновешенности (механический дисбаланс и дисбаланс от прогиба, в том числе, неуравновешенности конструктивных частей ротора: полумуфты, рабочие колеса); – нарушение целостности валов (трещины, усталостное выкрашивание, абразивный износ); – контакт вращающихся частей с неподвижными (трение ротора о статор в двигателе, торцевание в подшипнике, задевание рабочего колеса о стенки камеры); – нарушение соосности валов; Соединительная муфта: – коленчатость и излом осей
	Кинематическая сила (определяется движением тел по неровностям)	
	Параметрическая сила (определяется переменной жесткостью тел)	
	Ударная сила (определяется упругим взаимодействием и отклонением тел)	
	Сила сухого трения (определяется взаимодействием тел по неровностям на поверхностях контакта)	

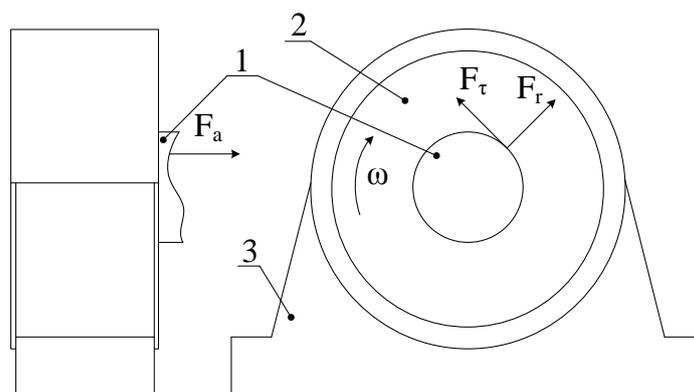
Природа силы	Вид силы	Основные характерные неисправности конструктивных элементов
		валов; – дефекты полумуфт; Подшипниковые узлы: – дефекты изготовления и сборки; – дефекты эксплуатации (абразивный, усталостный износ дорожек, тел качения, сепараторов, вкладышей); – ослабление крепления опор; Элементы опоры агрегата: – ослабление жесткости рамы; – просадка фундамента; – ослабление крепления агрегата к раме.
Электромагнитная	Магнитная сила (определяется переменными параметрами магнитного поля в воздушном зазоре и геометрией зазора) Электродинамическая сила (определяется взаимодействием магнитного поля с линейной токовой нагрузкой в обмотках) Магнитострикционная сила (определяется деформацией сердечника под действием магнитного поля)	Обмотка и сердечник статора электродвигателя: – межвитковые замыкания в обмотке; – деформация сердечника; Обмотка и сердечник ротора: – межвитковое замыкание в обмотке; – обрыв стержней короткозамкнутой обмотки; – деформация сердечника; Воздушный зазор: – нарушение геометрии воздушного зазора вследствие статического и динамического эксцентриситетов ротора.
Гидродинамическая	Упругая сила (определяется неравномерностью давлений в проточной части, пульсацией давлений вследствие турбулентности потока, вихреобразования, кавитации) Подъемная сила (определяется обтеканием жидкостью поверхности лопаток колеса) Сила трения (определяется взаимодействием жидкости с поверхностью корпуса проточной части)	Рабочее колесо: – неуравновешенность колеса (несоосность центрального отверстия и наружного диаметра, обрыв лопатки); – перекося посадки колеса на вал; – нарушение формы зазора между колесом и корпусом проточной части; – деформация лопаток; – поверхностные дефекты колеса (заусеницы, выступы, шероховатость).

Стоит отметить, что одни и те же неисправности могут непосредственно, либо косвенно являться причинами модуляции колебательных сил разной природы. Например, из-за прогиба ротора в электродвигателе по причине двойкой жесткости и тепловой нестабильности возникает эксцентриситет различного характера, что сопровождается нарушением геометрии воздушного зазора между ротором и статором, и появлением в зоне минимального зазора сил одностороннего магнитного тяжения, приводящим в дальнейшем к задеванию ротора о статор. При нарушении соосности валов двигателя и насоса агрегата вследствие некачественной центровки, просадки фундамента и вибрации наблюдается повышенный износ подшипников, что может приводить к биениям ротора в опорах, эксцентриситету ротора в двигателе, смещениям рабочего колеса в корпусе проточной части насоса и нарушениям гидродинамики потока. В свою очередь неуравновешенность рабочего колеса насоса, вызываемое различными производственными и эксплуатационными причинами, влияет на общее значение величины дисбаланса ротора агрегата [3,5,6,19,99].

Основной вклад в формирование вибрационных колебаний вносят именно механические колебательные силы, величина и глубина модуляции которых определяется режимом работы оборудования, механикой вращающихся элементов и, в существенной степени, техническим состоянием узлов машины [3,60].

В общем случае, любая из представленных механических сил, действующих в звеньях машины, в части направления действия может включать следующие составляющие: радиальную (F_r), осевую (F_a) и тангенциальную (F_t) (см. рисунок 1.2) [48]. По характеру изменения направления и величины силы разделяют на статические, которые постоянны по модулю и направлению во времени, и динамические, изменяющиеся как по значению, так и по направлению действия [66].

При воздействии механических сил в элементах машины имеют место деформации узлов различного характера, изгибные и крутильные колебания валов. При достижении механическими силами определенных значений наблюдается повышенный износ и преждевременный выход из строя конструктивных элементов машины. Так, при действии радиальной центробежной силы инерции динамического характера (в отношении системы координат неподвижной к ротору), обуславливаемой неуравновешенным состоянием вала вследствие технологических отклонений от осевой симметрии, неоднородности материала, 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 1.2 – 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 [50]:

$$F_{ц.и} = m \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t).$$

С увеличением значения центробежных сил интенсивно возрастает степень износа подшипников, наблюдается рост вибрации агрегата с периодом колебаний, соответствующем частоте вращения ротора [19,48,99].

При вращении ротора в подшипниках имеют место силы трения, кинематические и ударные силы в месте сопряжения деталей, проявляющиеся вследствие наличия неровностей, дефектов в местах трения и особенностей работы механизма подшипника. Векторы действия этих сил могут иметь радиальную, осевую и тангенциальную составляющие (см. рисунок 1.2). 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 [49]:

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

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 [3,19,49].

Наиболее восприимчивым к воздействию механических колебательных сил элементом, осуществляющим передачу динамических усилий между неисправной деталью и корпусом агрегата, является подшипниковый узел. Техническое состояние подшипника, как элемента, определяющего эксплуатационные показатели и ресурс основной части энергомеханического оборудования малой и средней мощностей, и, в 26% случаев являющегося причиной отказов насосных агрегатов, представляет наибольший интерес при проведении процедуры диагностики [14,44,60,77,99].

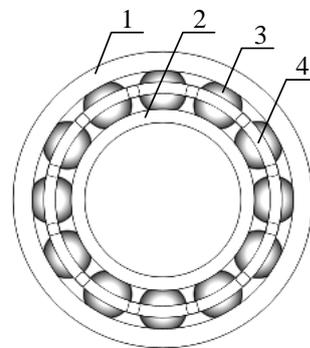
На сегодняшний день, конструкция насосного оборудования предусматривает использование подшипников двух типов трения в области контакта неподвижной и вращающейся деталей: подшипников скольжения и подшипников качения. Выбор типа используемого подшипника определяется следующими факторами [47,48]:

- частотой вращения вала;
- особенностями эксплуатации агрегата, подразумевающими работу в различных средах, в том числе агрессивных средах, наличие вибрационных и ударных нагрузок;
- необходимостью в особо точной центровке валов агрегата и поддержании заданной оси вращения;
- требованиями к конструкции подшипника, включающие ограничения радиальных и осевых габаритов, необходимость наличия разъемного корпуса, возможность регулировки зазоров;
- технико-экономической целесообразностью использования подшипника, определяемой надежностью работы агрегата, трудоемкостью ремонтных работ, взаимозаменяемостью подшипников.

Подшипники качения, в основу работы которых положен принцип трения качения между сопрягаемыми деталями подшипника, являются основным элементом при создании опор вращения роторного оборудования [48]. Конструктивно подшипники качения, в общем случае, состоят из внешнего и внутреннего колец (обойм) и, располагаемыми между кольцами, тел качения, разделяемых сепаратором (см. рисунок 1.3). Подшипники качения имеют ряд достоинств, определяющих их преимущественное использование, в том числе и

при конструировании насосных агрегатов: 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 [47,48].

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



1, 2 – наружное и внутреннее кольца; 3 – тела качения; 4 – сепаратор

Рисунок 1.3 – Подшипник качения

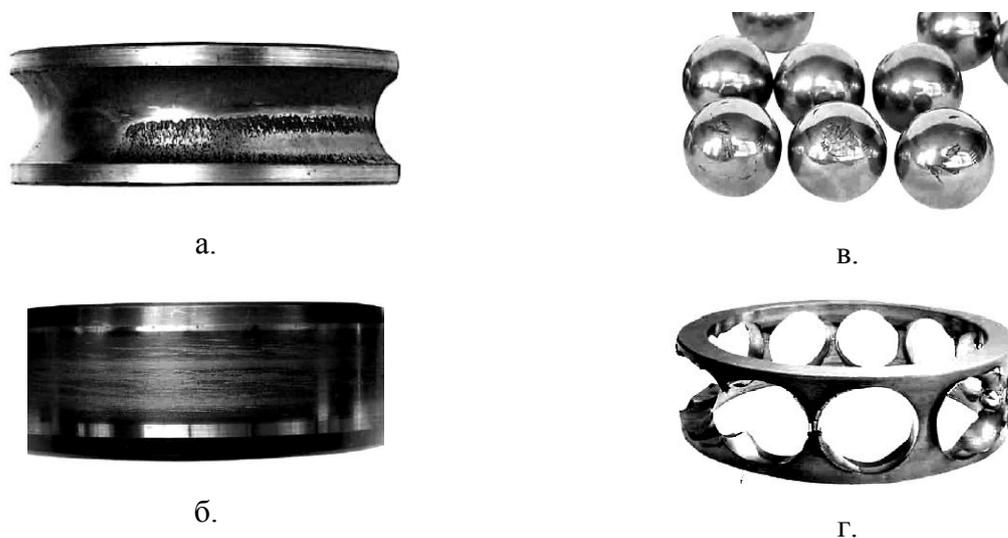
трения скольжения с телами качения и кольцами, производят из антифрикционных материалов, например штамповкой из мягкой углеродистой стали, обладающей хорошими антифрикционными свойствами, либо, при высокой скорости вращения, из текстолита, фторопласта, дуралюмина, латуни и бронзы [47,48].

Согласно данным [53], не более 10 % подшипников качения полностью отрабатывают проектный срок службы. При этом, по данным статистики [99], 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%.

Неисправности подшипников качения довольно разнообразны, и их можно, условно, 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 [99].

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 [15,85]. В работе [19] основным последствием износа подшипников отмечается контактная эрозия поверхностей качения. На рисунке 1.4 представлены иллюстрации элементов подшипников качения при различных дефектах [81].



а – усталостное выкрашивание внутреннего кольца,

б – абразивный износ дорожки качения,

в – выкрашивание материала тела качения, г – разрушение сепаратора

Рисунок 1.4 – Элементы подшипника скольжения при различных видах изнашивания

В работе [94] 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 колец, коррозионно-механическим 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 [85].

При износе подшипника качения, сопровождающегося, как уже было отмечено выше, усталостным выкрашиванием и абразивным износом поверхностей дорожек качения, тел качения, разрушением сепаратора, наблюдается модуляция колебательных сил различной природы: кинематических сил, параметрических сил, ударных сил и сил трения (см. рисунок 1.2) [3].

Таким образом, в конечном счете, износ элементов подшипников качения приводит к увеличению радиальных и осевых зазоров в опоре и модуляции механических колебательных сил [3,99], что сопровождается увеличением динамических нагрузок на опору, ростом уровня вибрации и колебаний крутящего момента на валу агрегата.

Чрезмерный износ подшипников, способствующий периодическому смещению вала с оси вращения, наряду с другими факторами механического характера: погрешности при посадке полумуфт на валы, некачественная центровка перед вводом агрегата в эксплуатацию, нарушение центровки в процессе работы из-за прогибов вала и просадки фундамента, приводит к росту величины несоосности валов агрегата, являющейся одной из основных причин модуляции механических колебательных сил в машине [99].

Помимо нарушения центровки, механические колебательные силы могут модулироваться вследствие дефектов самих полумуфт, проявляющихся в форме коленчатого нарушения соосности линий валов, излома осей, и совместного наличия данных явлений в зоне сопряжения [19]. Встречаются следующие дефекты полумуфт: трещины в теле полумуфты, износ отверстия под вал, нарушение геометрии полумуфты, увеличенное отверстие под упругий элемент (в случае упругой втулочно-пальцевой муфты) [60].

Относительное смещение линий валов и дефекты полумуфт в зоне сопряжения валов приводят к модуляции механических колебательных сил в агрегате и вибрационным колебаниям, преимущественно на оборотных частотах вращения вала, а также пульсациям крутящего момента на валу. Кроме этого несоосность, вызывая изгибные деформации вала, связанные с ней колебания, и модуляцию динамических сил в подшипнике, в том числе, сил трения с тангенциальной составляющей, определяет существенный износ подшипников агрегата [3,19,48,60].

По характеру относительного смещения осей валов агрегата, встречаются следующие виды несоосности (см. рисунок 1.5):

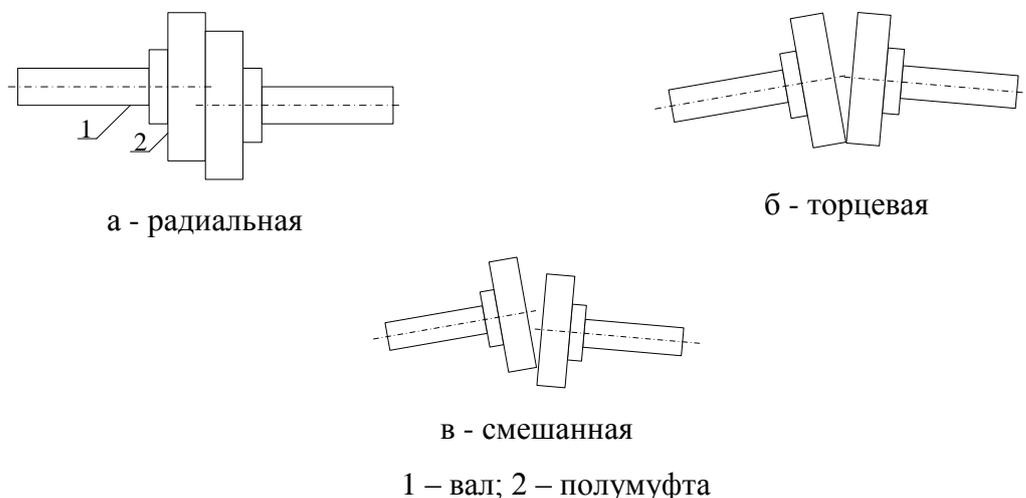


Рисунок 1.5 – Виды несоосности валов

1.1.2 Методы оценки технического состояния центробежных насосных агрегатов

Оперативное и достоверное обнаружение и отслеживание неисправностей, возникающих при эксплуатации насосных агрегатов, обеспечивается в рамках мероприятий по оценке фактического технического состояния работающих машин. Преимущественное использование методов контроля технического состояния, позволяющих по факту в режиме реального времени и без вывода из эксплуатации определить степень пригодности агрегата к работе и выявить параметры дефекта, является очевидным. Такие методы диагностики 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 принять стратегию ремонта оборудования по фактическому состоянию, что предусматривает снижение объемов ремонта, оптимизацию его сроков, дифференцированный подход к обслуживанию оборудования, имеющего различную степень износа. По некоторым данным переход к техническому обслуживанию по фактическому состоянию может принести выгоду предприятию эквивалентную 30% от общей стоимости эксплуатируемого оборудования [10,60].

Процедуры оценки фактического технического состояния машин без вывода из эксплуатации определяются общим понятием функциональной диагностики, заключающейся 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 [51]. Функциональная диагностика, в общем случае, регламентируется государственными стандартами, руководящими документами и технологическими регламентами предприятий [26,35,41,42], и реализуется различными методами, предусматривающими обработку характерных косвенных диагностических параметров.

В соответствии с [42] основными контролируруемыми параметрами при выполнении процедуры диагностики 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 функциональной диагностики, используемые при оценке технического состояния электроприводных центробежных насосных агрегатов.

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 [60,87].

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 [21,24,28].

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 [60]. 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 [27,36].

При плановом и оперативном контролях технического состояния центробежных насосных агрегатов анализом частиц в смазке информативно определяется степень износа подшипниковых узлов [42].

Параметрический контроль

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 [44,58,103].

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 [77].

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 [60,103].

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 [28,29,67,70].

Вибрационный контроль

Мониторинг и анализ вибрационных параметров являются основными и обязательными мероприятиями в рамках оперативных и плановых диагностических контролей технического состояния насосного оборудования [99]. 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. [10].

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 [32,38,39,40,78,84].

Электропараметрический контроль

В настоящее время достаточно активно изучается и представляет практическую значимость сравнительно новый метод оценки технического состояния электроприводных динамических машин, в том числе насосных агрегатов, являющийся одним из видов электропараметрического контроля, входящего в состав группы методов электрического неразрушающего контроля и базирующегося на регистрации и анализе электрических характеристик объекта диагностики [25]. Метод предусматривает использование в качестве диагностических данных параметров сигналов фазных (линейных) токов и напряжений цепи питания электродвигателя, получаемых путем представления данных сигналов в различных формах.

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, А. Hernandez-Solis, S. R. Shaw, Parasuram P. Harihara, Christopher Laughman и других.

В работе [61] 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 [88,89], определяются диагностические признаки межвитковых замыканий в обмотках статора в спектре огибающих осциллограмм токов статора и механических дефектов подшипников электродвигателя в амплитудно-частотных спектрах обобщенного вектора тока. Неисправность типа эксцентриситета ротора электродвигателя исследована по анализу частотных составляющих спектров тока фазы обмотки статора [83] и по временным характеристикам фазных токов электродвигателя в режиме пуска [97]. 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 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 [72,73], а также в описаниях к изобретениям [75,76] 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 амплитудно-частотных спектрах сигналов фазного тока, и в спектрах модуля обобщенного вектора фазных токов. В описании к способу [65] отмечается возможность эффективного использования инструментов анализа амплитудно-частотного спектра сигналов фазных токов при диагностике погружных электроцентробежных насосов. В работе [98] 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 [4,86], 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. Шведские

исследователи в своей работе [106] определили диагностические признаки возникновения кавитации при работе ЦНА. Нужно отметить, что кавитация, будучи явлением присущим к ненормальному режиму работы насоса, по сути, не является дефектом и устраняется, либо минимизируется путем корректной регулировки и соблюдения требований к эксплуатации агрегата. Процедуры определения механических дефектов в работе не описаны. 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.

С точки зрения аппаратурного и программного инструментария для реализации процедур диагностики насосных агрегатов рассматриваемым методом существует достаточный объем разработок и предложений. В работах [2,4,65,74,75,76,86,91,92,98] 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 программного обеспечения.

Тем не менее, наряду со значительным объемом разработок, направленных на решение полного спектра задач контроля технического состояния и диагностики динамического оборудования по параметрам частотных составляющих сигнала тока статора электродвигателя существуют следующие предпосылки, определяющие необходимость его дальнейшего развития:

- 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 [31] 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 [26,42]. Под структурными параметрами понимаются особенности конструкции агрегата и его узлов, рабочие характеристики, режимные параметры и т.д.

Таким образом, можно сказать, что метод оценки технического состояния динамического оборудования, в том числе насосных агрегатов, анализом амплитудно-частотных спектров сигналов фазных токов статора электродвигателя является перспективным техническим решением. Однако по рассматриваемому методу целесообразны дополнительные исследования в части определения пороговых значений диагностических параметров и классификации технического состояния оборудования, а также адекватности и полноты учета влияния на диагностические признаки изменения структурных и рабочих параметров оборудования.

1.2 Контроль технического состояния динамического оборудования электропараметрическим методом диагностики

По результатам изучения уровня разработки электропараметрического контроля технического состояния электроприводного динамического оборудования определено, что одним из наиболее перспективных подходов к диагностической оценке является построение методов на основе анализа амплитудно-частотного спектра сигнала тока фаз статора электродвигателя в составе агрегата.

Проанализировав ряд работ [2,4,65,74,75,76,86,91,92,98] и требования ГОСТ Р ИСО 17359-2015 [42] можно представить алгоритм реализации рассматриваемых методов в обобщенном виде в форме структуры последовательности необходимых операций, представленной на рисунке 1.6.

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 информационно-измерительных системах контроля технического состояния рассмотренных типов представлено в подразделе 1.4.



Рисунок 1.6 – Структура алгоритма электропараметрического контроля

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) [2,31].

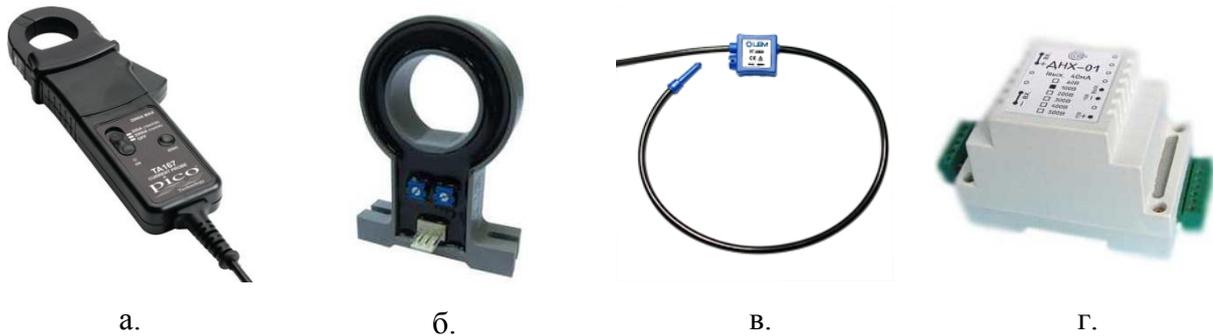


Рисунок 1.7 – Средства измерения сигналов тока и напряжения

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 [2,86]. Выбор того, или иного типа первичного измерительного преобразователя обуславливается типом измерительной системы (стационарная/мобильная), необходимостью согласования параметров датчиков с параметрами вторичных измерительных устройств, эргономикой использования.

Точки размещения измерительных преобразователей определяются на линии питания электродвигателя в наиболее удобных местах: в коробке выводов электродвигателя, на участке кабеля от двигателя до распределительного узла (щита), в распределительном узле. При этом преобразователи могут подключаться как напрямую к жилам кабеля, так и во вторичные цепи штатных измерительных трансформаторов при условии согласования параметров сигналов [2,31].

Предельные значения измеряемых тока и напряжения для первичных измерительных преобразователей 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 [2,68].

В качестве диагностических параметров при анализе амплитудно-частотного спектра тока рекомендуется принимать значения амплитуд информативных частотных составляющих, отнесенные к значению амплитуды основной гармоники тока (коэффициенты частотных составляющих) [2,4,75,76,86,98]. Пороговые значения диагностических параметров, исходя из существующего уровня разработки метода, на начальном этапе диагностики можно определить согласно рекомендациям [2,31], 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 [26,42].

Согласно требованиям ГОСТ 27518-87 и ГОСТ Р ИСО 17359-2015 [26,42] 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 [39]. При использовании полустационарной и мобильной систем выполняется периодический сбор и анализ данных [25], который является вполне достаточным для машин небольших габаритов и мощности при оценке неисправностей подшипников и нарушения соосности валов [34]. 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.

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 [2,31], а также для компенсации влияния основной составляющей напряжения промышленной частоты вследствие ее взаимной компенсации по трем фазам [65].

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 [2,76,91].

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 информационно-измерительных систем контроля. Фильтрация сигналов выполняется с целью ограничения прохождения сигналов с частотами ниже частоты Найквиста, равной половине частоты дискретизации сигнала устройствами аналого-цифрового преобразования [75,76].

Формирование спектров выполняется специализированным программным обеспечением в составе информационно-измерительной системы контроля с использованием алгоритмов дискретного, а также быстрого преобразований Фурье (ДПФ, БПФ) [8]:

$$X_k = X(k\Delta f) = \Delta t \sum_{n=1}^N x_n e^{(-j2\pi \frac{kn}{N})}, \quad k = 1, 2, \dots, N,$$

где X_k – спектр временного ряда $x_n = x(n\Delta t)$, заменяющего непрерывную реализацию сигнала $x(t)$ при $n = 1, 2, \dots, N$;

N – объем выборки;

$\Delta t = T / N$ – интервал дискретности;

T – длина реализации сигнала.

По полученным данным о значениях параметров амплитудно-частотных спектров сигналов тока и напряжения инструментарием программного обеспечения 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 [2,4,75,76,86,91,99].

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.

1.3 Методы моделирования объектов контроля для решения задач электропараметрической диагностики

Разработка и анализ моделей объектов контроля, в том числе центробежных насосных агрегатов, 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 Существующие методы моделирования объектов контроля

На рисунке 1.8 представлены методы моделирования, используемые для анализа поведения динамического оборудования в рамках исследований методов контроля технического состояния [64,90].

Методы статистического моделирования предполагают построение моделей, основанных на выявляемых статистических закономерностях поведения объекта. Методы предполагают использование значительных объемов статистических данных и применение специализированного программного обеспечения для упрощения вычислительных операций [90]. Применительно к исследованиям электропараметрического метода контроля

технического состояния динамических машин 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 [63,65,86,98].

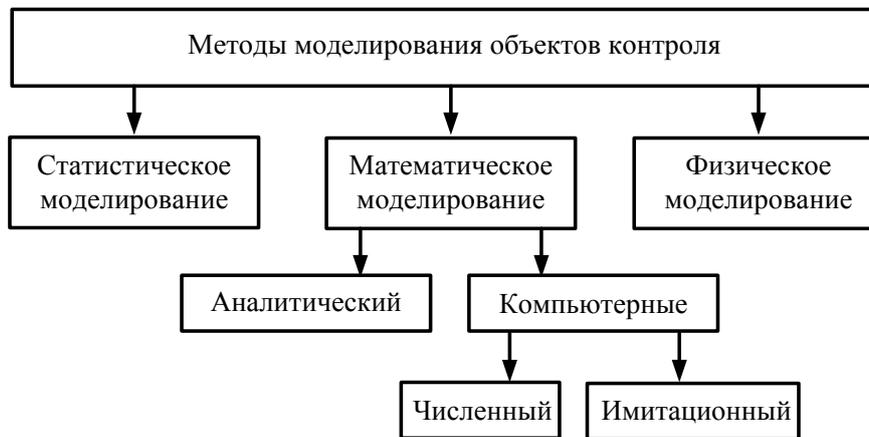


Рисунок 1.8 – Методы моделирования объектов контроля

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 [90]. В рамках разработок электропараметрического метода контроля физическое моделирование выполняется на специализированных лабораторных стендах [4,17,80,89].

На этапах теоретических исследований при разработке электропараметрических методов диагностики 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 [90].

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 [64].

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 [108], неисправности при работе двигателя в составе центробежных насосных агрегатов [107].

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 [90], 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 электропараметрической диагностики исследуются электродвигатели и насосные агрегаты с учетом различных неисправностей составлением моделей методом конечных элементов [61,62], а также с использованием визуальных блок-диаграмм в виде направленных графов в графических средах имитационного моделирования, например, Matlab Simulink [17,83,86].

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.

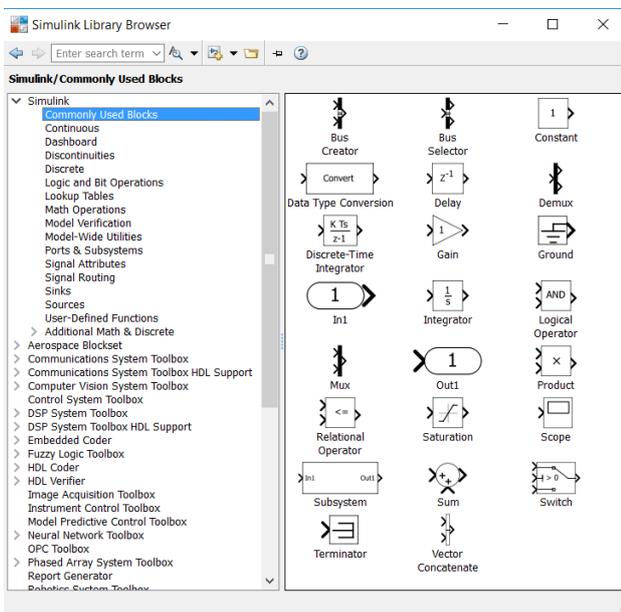
Программа Jigrein имеет функциональный интерфейс и позволяет строить визуальные схемы объектов моделирования, однако не предоставляет возможности работы с выходными данными модели [52].

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 [52].

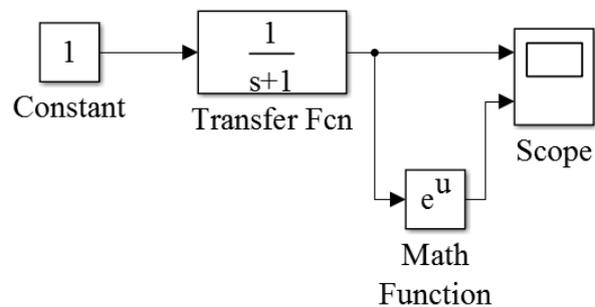
Наиболее распространенным программным продуктом, обеспечивающим возможность создания визуальных блок-диаграмм сложных моделей объектов является Matlab с пакетом визуального программирования Simulink. Преимуществом данного

продукта является наиболее обширный набор инструментов для создания блок-диаграмм сложных динамических моделей, разнопланового анализа данных модели и оформления результатов анализа [52].

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 а, б представлены вид окна библиотеки Simulink на примере Matlab R2015a (8.5.0.197613) и пример направленного объединения блоков в блок-диаграмму.



а.



б.

а – библиотека блоков Simulink; б – блок-диаграмма Simulink

Рисунок 1.9 – Библиотека и блок-диаграмма Simulink

Библиотека 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.

Возможности программной среды Matlab Simulink в решении задач анализа моделей сложных динамических объектов определяют ее использование в настоящей работе при исследовании электропараметрического метода контроля технического состояния центробежных насосных агрегатов.

1.4 Решения по аппаратурному обеспечению информационно-измерительных систем электропараметрического контроля технического состояния динамического оборудования

В соответствии с алгоритмом, представленным в подразделе 1.2, аппаратурная часть информационно-измерительных систем электропараметрического контроля технического состояния динамического оборудования, 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, komponуемые на единой плате в общем корпусе [83]. 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 [2,4,65,74,75,76,86,91,92,98], можно представить обобщенной структурой, изображенной на рисунке 1.10. Представленная структура нашла отражение в описании полезной модели, разработанной автором в составе авторского коллектива [105].

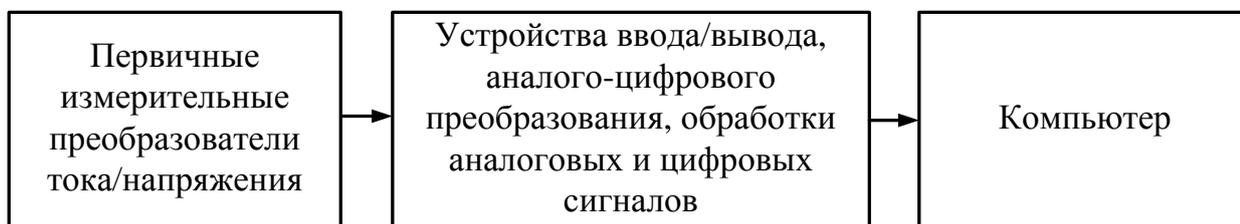


Рисунок 1.10 – Структура систем контроля технического состояния

В работе [74] 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 [4,98]. Измерительной аппаратурой являются: измерители и анализаторы показателей количества и качества электрической энергии AR5 [91,98], Ресурс-UF2М [4,91] и энерготестер ПКЭ [4], комплектуемые первичными измерительными преобразователями видов токовых клещей классами точности 0,5 и 1, и проводами с зажимами типа «крокодил». В описании к изобретению [91] отмечается возможность использования аналого-цифрового преобразователя разрядностью не ниже 16 разрядов.

Диагностическая система, предложенная в работе [86], 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. подраздел 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 электропараметрическим методом представляют собой информационно-измерительные системы мобильного и полустационарного типов (см. подраздел 1.2). При этом возможность создания стационарных систем с подключением в общую сеть предприятия обозначается [86], но детально не рассматривается.

1.5 Выводы по главе

1.5.1 Наиболее вероятными неисправностями, определяющими повышение вибрации и возникновение отказов центробежных насосных агрегатов, являются дефекты элементов подшипников и нарушение соосности валов электродвигателя и насоса, обуславливаемые действием колебательных сил механического происхождения;

1.5.2 Функциональная диагностика центробежных насосных агрегатов эффективно реализуется методом электропараметрического контроля технического состояния анализом амплитудно-частотных спектров сигналов фазных токов и напряжений электродвигателя с использованием в качестве диагностических параметров относительных амплитуд частотных составляющих спектров. Метод имеет характерный алгоритм реализации, предусматривающий использование аппаратного обеспечения, серийно выпускаемого промышленностью, и достаточное методическое обеспечение. При этом по рассматриваемому методу целесообразны дополнительные исследования в части определения пороговых значений диагностических параметров и классификации технического состояния оборудования, а также адекватности и полноты учета влияния на диагностические признаки изменения структурных и рабочих параметров оборудования;

1.5.3 Разработка и анализ моделей объектов контроля является неотъемлемым этапом при исследовании методов технической диагностики динамического оборудования, в том числе центробежных насосных агрегатов. Среди существующих методов математического моделирования объектов контроля при исследовании электропараметрического метода диагностики наибольшим потенциалом обладает метод имитационного моделирования с применением аппарата визуальных блок-диаграмм;

1.5.4 Имеющиеся технические решения по аппаратному обеспечению информационно-измерительных систем электропараметрического контроля технического состояния динамического оборудования по анализу параметров амплитудно-частотных спектров сигналов фазных токов и напряжений электродвигателей агрегатов, в большинстве своем, предусматривают использование типовых элементов и модулей, выпускаемых серийно, компонуемых в составе мобильных и полустационарных систем по общим принципам и частным требованиям к техническим характеристикам.

2. Экспериментальная оценка технического состояния центробежного насосного агрегата электропараметрическим методом диагностики

2.1 Взаимосвязь диагностического и вибрационного параметров

В пункте 1.1.1 первого раздела отмечено, что вибрация и колебания крутящего момента на валу динамических машин 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 [57,104] и являются причиной модуляции гармоник и частотных составляющих статорного тока [2,3], содержащих диагностическую информацию по электропараметрическим методам диагностики.

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

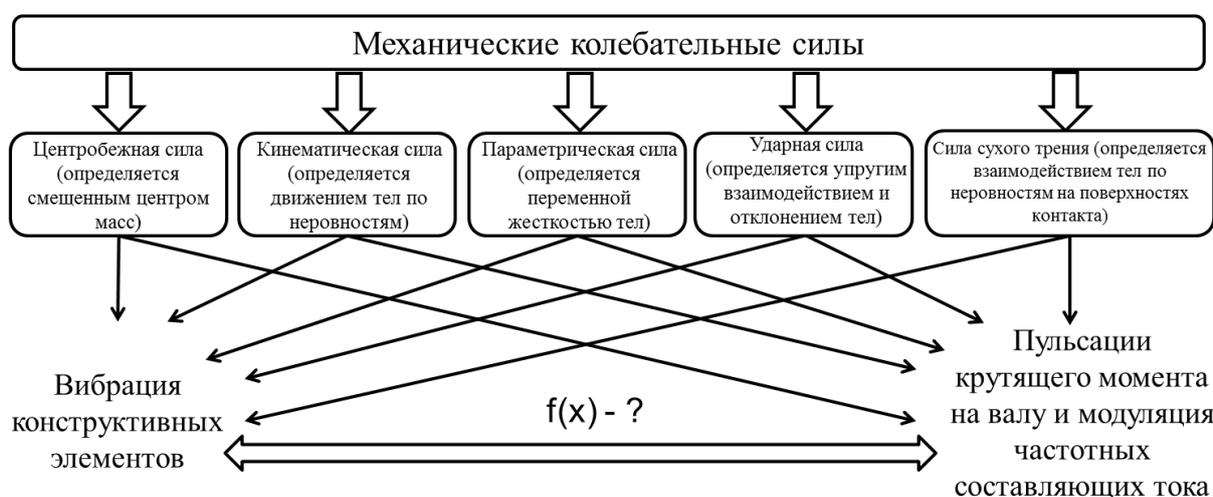


Рисунок 2.1 – Связь параметров вибрации и модуляции тока статора

Наличие единых факторов возникновения вибрации и модуляции статорного тока двигателя позволяет предполагать о существовании функциональной взаимосвязи между диагностическими параметрами электропараметрического метода контроля и вибрационными критериями технического состояния машины.

В качестве диагностического параметра принимается относительное значение амплитуды частотных составляющих амплитудно-частотного спектра статорного тока

электродвигателя, а в качестве вибрационного критерия принимается СКЗ виброскорости агрегата. Выбор обусловлен достаточно высокой диагностической ценностью, изученностью и удобством использования данных параметров, описанных подробнее в подразделе 1.1.2 настоящей работы.

Исследование совместного проявления электропараметрического диагностического признака и вибрационного критерия с определением функциональной взаимосвязи между ними позволит повысить эффективность диагностических мероприятий по оценке технического состояния центробежных насосных агрегатов за счет того, что модуляции параметров статорного тока, являющиеся диагностическими признаками по определению состояния, фиксируются измерительной аппаратурой с относительно низкой погрешностью и возможностью удаленных измерений от объекта контроля, а, соответствие этих признаков изменению вибрационных параметров, позволит адекватно оценить и классифицировать техническое состояние оборудования.

2.2 Экспериментальный комплекс и мероприятия по реализации исследования

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

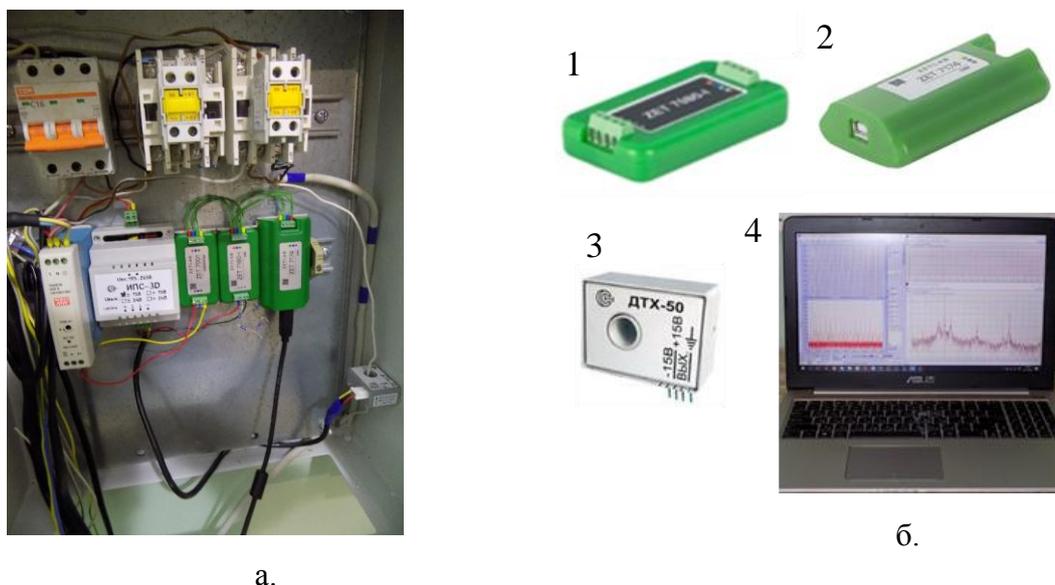
Экспериментальный комплекс разработан на базе консольного насосного агрегата К 20/30 с асинхронным электродвигателем АИР 100 S2 номинальной мощностью 4 кВт. Насосный агрегат смонтирован на бетонном фундаменте. Обвязка насосного агрегата обеспечивается запорными вентилями, соединенными с буферной емкостью посредством ПВХ спирально-витых шлангов серии 1610 L BC-63.



Рисунок 2.2 – Общий вид экспериментальной установки

Сборка, разборка, монтаж и подключение установки в процессе эксперимента выполнены с учетом требований нормативно-технической документации: ГОСТ 22247-96, СТО 70238424.29.160.30.004-2009, ГОСТ Р 53672-2009, ГОСТ ИЕС 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 [9,22,30,37,79,93].

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 программным обеспечением ZETLab (см. рисунок 2.3), позволяющим выполнять анализ амплитудно-частотного спектра сигнала с записью результатов в файл программы, контроль действующих значений токов, вывод осциллограммы и множество других функций [109]. 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.



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 (см. рисунок 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 ГОСТов [20,23,30], а также указаний руководств и инструкций по эксплуатации соответствующих средств измерений.

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

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 [31] 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 [38,39,84].

Структура экспериментального измерительного комплекса представлена схемой на рисунке 2.5.

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; 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; В_{д.п.}, В_{д.з.}, Г_{д.п.}, Г_{д.з.} – точки контроля соответственно вертикальной и горизонтальной составляющих вибрации переднего и заднего подшипников электродвигателя.

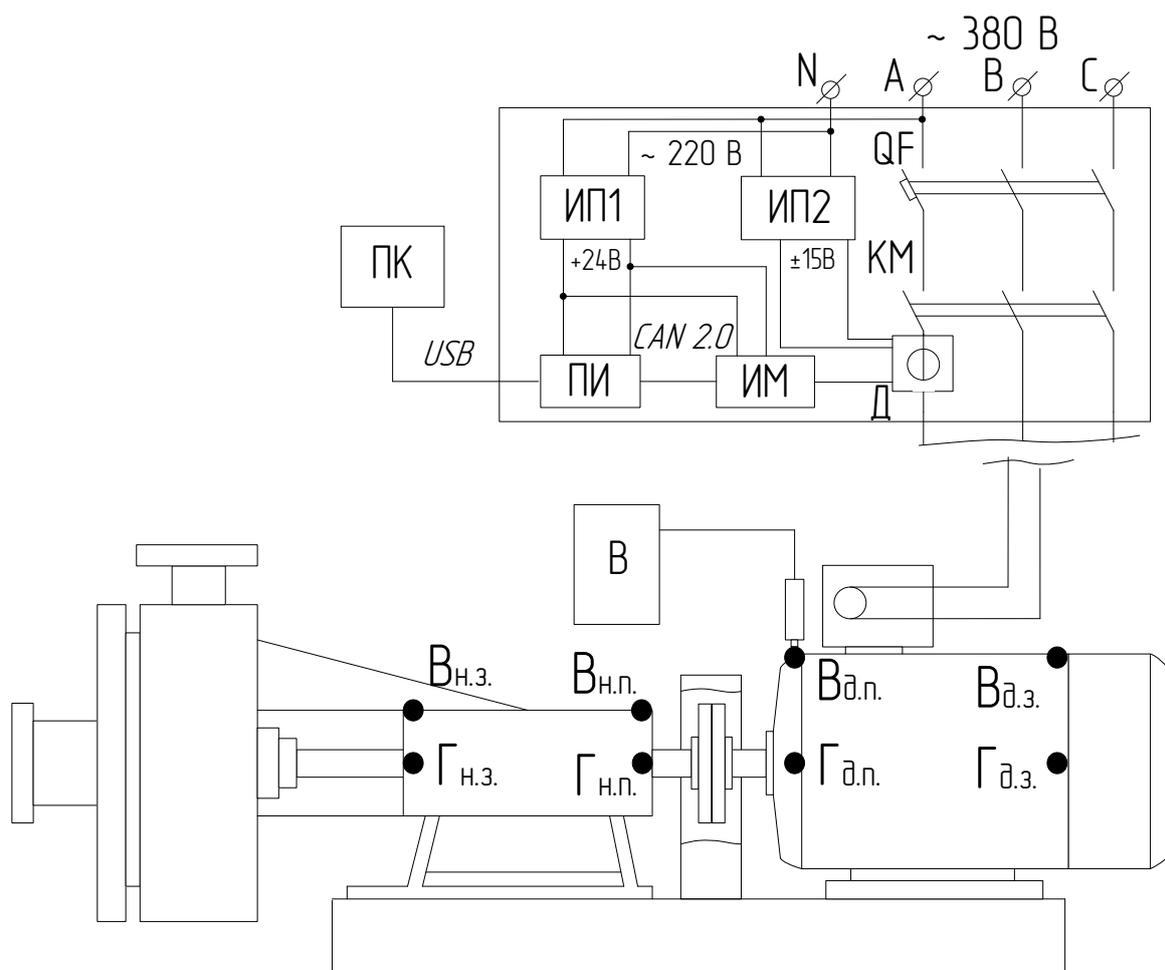


Рисунок 2.5 – Экспериментальный комплекс

Согласно указаниям руководств по эксплуатации насоса и электродвигателя агрегата, а также ГОСТ 10816-1 [33] 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 [33].

Центровка валов при сборках и монтаже агрегата в процессе эксперимента выполнена центровочным устройством с индикаторами часового типа (см. рисунок 2.6). В соответствии с указаниями руководств по эксплуатации уровень расцентровки не превышает 0,15 мм, за исключением эксперимента по расцентровке валов.

С целью определения диагностических признаков механических неисправностей в экспериментальной насосной установке реализовано искусственное создание дефектов различного уровня следующих, часто встречающихся, разновидностей: нарушение центровки валов насоса и электродвигателя, избыточный абразивный износ дорожек качения и поломка сепаратора подшипников насоса и двигателя.

Нарушение центровки валов

Для оценки уровня расцентровки использовано центровочное устройство с индикаторами часового типа (см. рисунок 2.6). Количественно, значение показателя расцентровки в радиальном и осевом направлениях при эксперименте варьируется в диапазоне: $0,12 \div 2,2$ мм (допустимое по руководству $0,15$ мм). Показатель принимается

по максимальному значению отклонения a , либо b (см. рисунок 2.7).

По результатам эксперимента получены амплитудно-частотные спектры сигнала фазного тока двигателя и СКЗ виброскорости насосного агрегата.

Примеры спектров тока, зафиксированных при минимальной и максимальной расцентровках представлены на рисунках 2.8 а, б.

С увеличением величины расцентровки отмечен существенный рост амплитуды гармоники спектра на частоте 100 Гц. Данное наблюдение соответствует исследованиям, проведенным ранее коллективом НОУ «Севзапучцентр» и ООО «Вибротехника» [2], по результатам которых определен диагностический признак расцентровки валов электродвигателя и механизма на частоте: $f_{оэф} = f_0 \pm f_{ep} \cdot k$, где f_0 – частота главной гармоники, f_{ep} – частота вращения вала; k – целое число. Поскольку экспериментальная установка предполагает параметры: $f_0 = 50$ Гц, $f_{ep} = 49,2$ Гц, то при $k=1$ частота диагностического признака расцентровки соответствует значению, при котором экспериментально наблюдается рост гармонической составляющей.



Рисунок 2.6 – Центровочное устройство

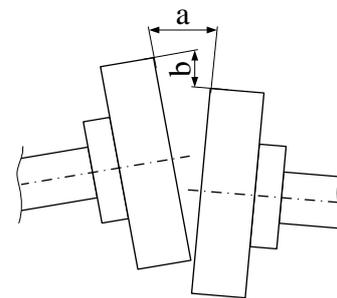
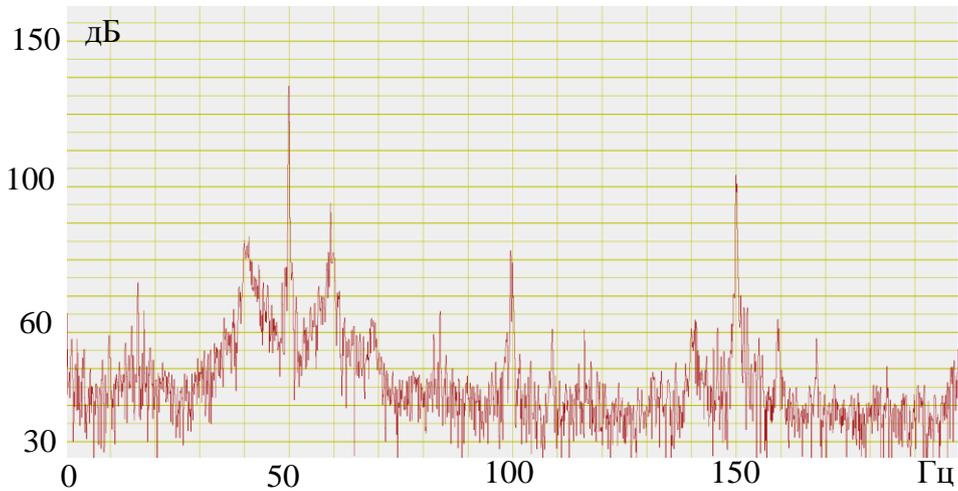


Рисунок 2.7 – К определению показателя расцентровки

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



а – спектр тока при минимальном значении несоосности валов



б – спектр тока при наибольшем значении несоосности валов

Рисунок 2.8 – Спектры тока при нарушении соосности валов агрегата

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 износ определен по максимальному значению смещения наружного кольца (1) относительно внутреннего (2) (люфт) при воздействии внешних сил в радиальном F_r и осевом F_a направлениях (см. рисунок 2.9).

В процессе эксперимента значение отклонения изменяется в пределах $0,08 \div 0,3$ мм и контролируется закрепленным индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм.

Примеры спектров тока, зафиксированных при минимальном и максимальном показателях износа дорожек качения подшипников насоса представлены на рисунках 2.10 а,б.

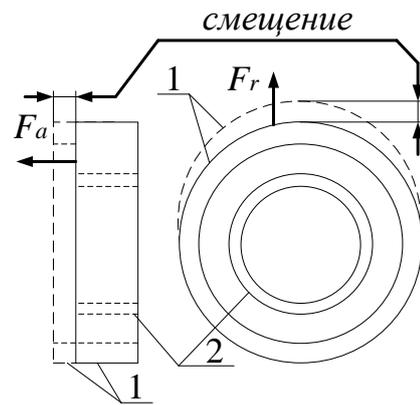
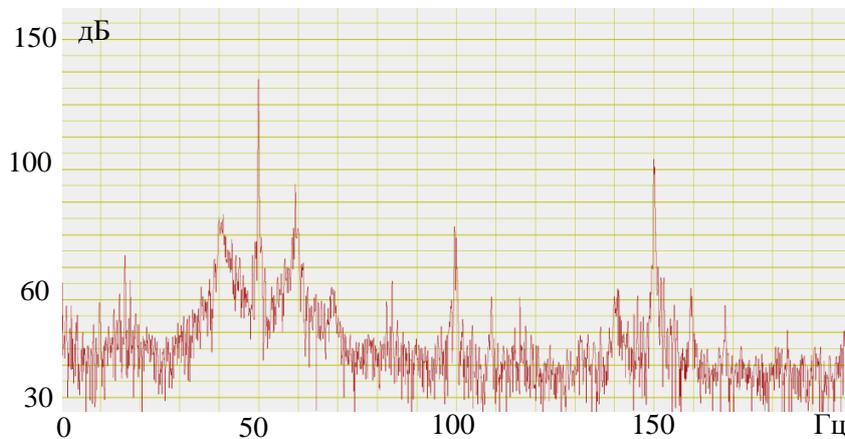
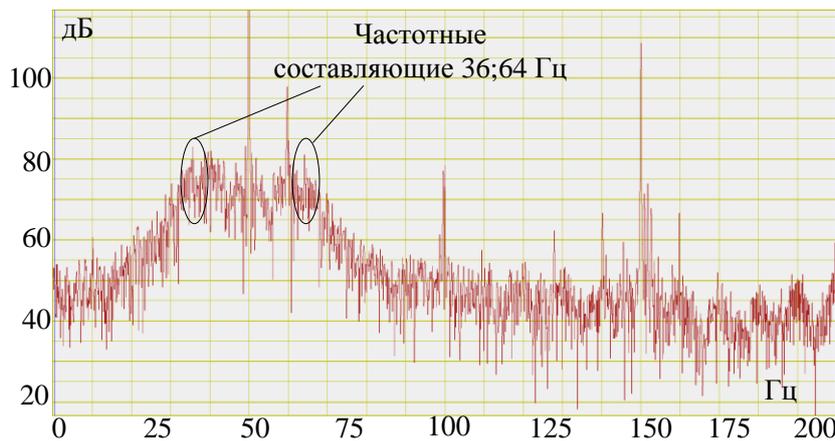


Рисунок 2.9 – К определению износа дорожек подшипника



а – спектр тока при минимальном износе дорожек подшипника



б – спектр тока при максимальном износе дорожек подшипника

Рисунок 2.10–Спектры тока при износе дорожек качения подшипников насоса

По результатам эксперимента отмечен значительный рост амплитуд частотных составляющих спектра на частотах 36 и 64 Гц, наблюдаемый при каждом увеличении значения показателя износа дорожек качения подшипников насоса. Данное наблюдение

согласуется с ранними исследованиями [2], в которых дефект типа «Автоколебания ротора механизма» определен на частотах $f_{\text{деф}} = f_0 \pm f_{\text{вр}} / k$, что в соответствии с параметрами экспериментальной установки соответствует 36; 64 Гц при $k=3$. При этом отмечается увеличение общего уровня СКЗ виброскорости агрегата. Количественные значения диагностических параметров представлены в следующем подразделе ниже.

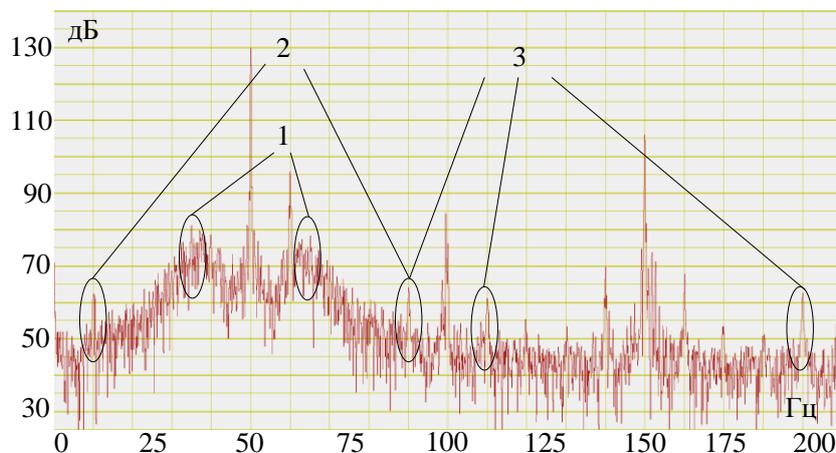
Пример спектра тока, зафиксированного при максимальном показателе износа дорожек качения подшипников электродвигателя представлен на рисунке 2.11.

Также как и при эксперименте с подшипниками насоса отмечается увеличение амплитуд частотных составляющих 36 и 64 Гц. При этом отмечается существенный одновременный рост амплитуд частотных составляющих 10;90;110;190 Гц, которые можно разбить на две группы (см. рисунок 2.11).

Частотные составляющие второй группы (10;90 Гц) согласно [2] являются информативными при оценке дефекта типа «Автоколебания ротора в подшипниках двигателя» с составляющей на частоте вращения сепаратора подшипника: $f_{\text{деф}} = f_0 \pm 2f_c$, где $f_c \approx 0,4f_{\text{вр}}$ – частота вращения сепаратора подшипника двигателя. Частотные составляющие третьей группы (90;110;190 Гц) согласно [2] являются информативными при оценке дефекта типа «Динамический эксцентриситет ротора двигателя с насыщением сердечника», который развивается одновременно с износом подшипников двигателя:

$f_{\text{деф}} = kf_{\text{вр}} \pm 2nf_{\text{ск}}$, где $f_{\text{ск}} = sf_0 = \left(\frac{1 - pf_{\text{вр}}}{f_0}\right) \cdot f_0 = 0,85$ Гц – частота скольжения ротора

двигателя экспериментальной установки в номинальном режиме работы; $k = 2, 3$; $n = 12$.



1 – частотные составляющие 36;64 Гц; 2 – частотные составляющие 10;90 Гц;

3 – частотные составляющие 90;110;190 Гц;

Рисунок 2.11 – Спектр тока при износе дорожек качения подшипников электродвигателя

Таким образом, идентичным дефектам в насосе и электродвигателе соответствуют амплитудно-частотные спектры тока с различными параметрами частотных составляющих, что позволяет локализовать повышенный абразивный износ дорожек качения подшипников до уровня устройства в составе насосного агрегата.

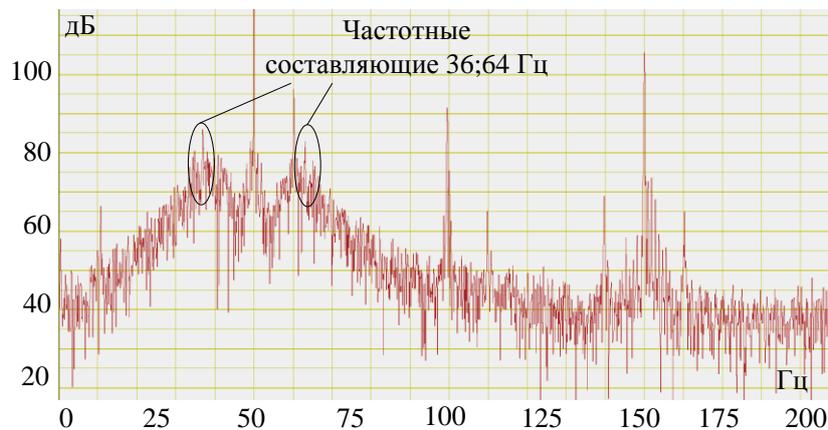
Дефект сепаратора подшипников качения насоса

Неисправность сепаратора подшипников создается путем расклепывания и излома частей сепаратора с разными уровнями дефектовки (см. рисунок 2.12). За максимальный уровень дефекта принято состояние сепаратора при расклепывании двух секций.

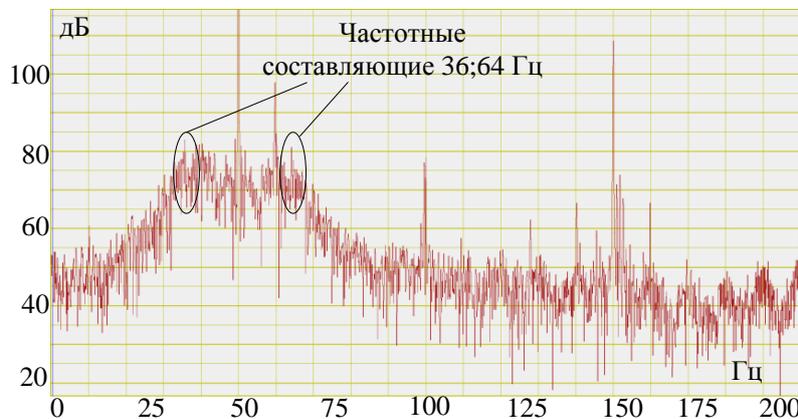
Примеры амплитудно-частотных спектров тока фазы статора электродвигателя при наличии дефекта сепаратора максимального уровня и при наличии повышенного абразивного износа дорожек качения представлены на рисунках 2.13 а, б.



Рисунок 2.12 – Дефект сепаратора



а – спектр тока при максимальном уровне дефекта сепаратора подшипника



б – спектр тока при повышенном абразивном износе дорожек качения

Рисунок 2.13 – Спектры тока при отсутствии и наличии дефектов подшипника насоса

При наличии дефекта сепаратора любого уровня наблюдается рост амплитуды частотных составляющих спектра тока на частотах 36 и 64 Гц, т.е. на частотах аналогичных информативным составляющим повышенного износа дорожек качения подшипников.

При этом дальнейшие исследования показали, что износ дорожек сопровождается более существенным значением СКЗ виброскорости агрегата. Поэтому результирующий класс технического состояния принято определять по уровню износа дорожек качения подшипников.

Таким образом, по результатам реализованного эксперимента, для последующего анализа можно обозначить следующие частотные составляющие спектра как информативные при диагностике рассмотренных механических дефектов:

Таблица 2.1 – Отмеченные информативные составляющие спектров

Тип дефекта	Частоты информативных составляющих
1. Нарушение соосности валов электродвигателя и насоса	$f_{\text{деф}} = f_0 \pm f_{\text{вр}} \cdot k$, где k – целое число; к анализу принимается гармоника на частоте 100 Гц как имеющая наибольшую амплитуду $- f_{\text{деф}} = 2f_0$
2. Повышенный абразивный износ дорожек качения подшипников насоса	$f_{\text{деф}} = f_0 \pm f_{\text{вр}} / 3$; к анализу принимается составляющая с наибольшей амплитудой в момент измерения на частотах 36;64 Гц
3. Повышенный абразивный износ дорожек качения подшипников электродвигателя	$f_{\text{деф}} = f_0 \pm f_{\text{вр}} / 3$; к анализу принимается составляющая с наибольшей амплитудой в момент измерения на частотах 36;64 Гц; дополнительно для локализации дефекта в двигателе: $f_{\text{деф}} = f_0 \pm 2f_c$ (10; 90 Гц); $f_{\text{деф}} = 2f_{\text{вр}} \pm 24f_{\text{ск}}$ (90; 110 Гц); $f_{\text{деф}} = 3f_{\text{вр}} - 24f_{\text{ск}}$ (190 Гц)

2.3 Оценка влияния сторонних помех и анализ результатов эксперимента

2.3.1 Оценка влияния сторонних помех на амплитудно-частотный 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 [68,73,86,98]. 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 амплитудно-частотный 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 подразделе 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.

Амплитудно-частотный спектр тока фазы «А» линии питания неработающего электродвигателя агрегата представлен на рисунке 2.14.

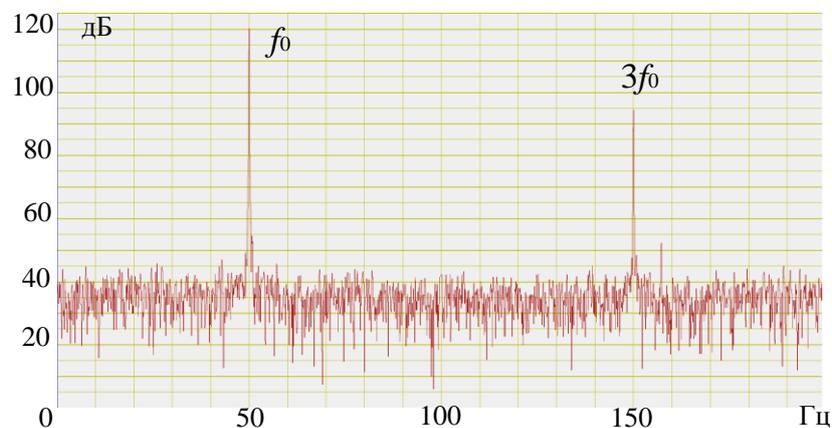


Рисунок 2.14 – Спектр фазного тока линии питания двигателя

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 (см. таблицу 2.1) выявлено не было.

2.3.2 Анализ результатов эксперимента

В качестве электропараметрического 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.

Для оценки достаточного объема измерений необходимого для получения надежных статистических параметров предварительно выполнены измерения объемом $n = 20$, представленные в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – 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

№ измерения	A'_{100}	$V_{СКЗ}$, мм/с
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 [45], или предельным значением основной приведенной погрешности.

Предельные значения основных приведенных погрешностей компонентов измерительного канала по току: датчик тока, измерительный модуль, а также виброметра приняты согласно паспортным данным (см. таблицу А1 Приложения А). Общее значение для преобразователя интерфейса и программного обеспечения 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 [46,82]:

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

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

$$\sigma_i = \frac{\gamma_i}{\sqrt{3}} \text{ – оценка границы } i\text{-ой составляющей относительной погрешности (СКО для}$$

одного средства измерения) [46,69];

γ_i – предельное значение основной приведенной погрешности прибора.

По предварительно полученной выборке (см. таблицу 2.7) вычисляются:

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

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

В практике измерений считается достаточным выполнение требования [45]:

$$d \leq \frac{\delta}{2} = \frac{\sigma_{\Sigma}}{2},$$

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

[45] 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 дефектов должны содержать минимум 46 значений параметров.

Ниже представлены общие выборки значений диагностических параметров, соответствующие различным, искусственно создаваемым дефектам, включающие в себя частные выборки по уровням дефектов (по опытам), полученные 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]. Также представлены результаты анализа полученных выборок.

По значениям из общих выборок средствами программного комплекса Matlab R2015a (8.5.0.197613) Simulink построены графики зависимости диагностического параметра от параметра вибрации при создании различных дефектов и определены аппроксимирующие функции. Также в соответствии с нормативным документом [84] выполнена классификация технического состояния агрегата по значениям вибрационного параметра, представленная шкалой, соотнесенной с измеренными СКЗ виброскорости, определяющая следующие классы состояний: Хорошо – соответствует исправному состоянию агрегата), Допустимо – характеризует полностью работоспособное состояние агрегата при малой вероятности отказа), Требуется принятия мер (ТПМ) – допустимо при непродолжительной эксплуатации), Недопустимо (НДП) – недопустимо при эксплуатации, требуется остановка. Классификация произведена 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 [84] устанавливаются различные пределы вибрационных параметров, для классификации приняты наименьшие предельные значения.

Одним из признаков корректности полученных в процессе исследований данных является соответствие распределения измеряемой величины нормальному закону распределения [71,96]. В этой связи по всем частным выборкам выполнены проверки гипотез о соответствии величин параметров A_i' и $V_{\text{СКЗ}}$ нормальному закону распределения по критерию Шапиро-Уилка [54]:

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

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

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i;$$

$W(\alpha)$ – критическое значение статистики;

α – уровень значимости

Для подтверждения равнозначности измерений по опытам с различными уровнями неисправностей в рамках каждого исследования по конкретным дефектам выполнены

проверки гипотез о равенстве дисперсий в частных выборках по критерию Фишера (F-критерию) [13]:

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

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;

α – уровень значимости (0,05);

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

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

Для проверки значимости коэффициента корреляции между значениями параметров по общим выборкам использованы следующие зависимости [45,96]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} > r_0[n],$$

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

$$r_0[n] = \frac{\sqrt{n + 12(\sqrt{n} \cdot r_{\text{min}} + 3)} - \sqrt{n}}{6} \text{ – критическое значение параметра;}$$

$$r_{\text{min}} = \frac{\sqrt{n + 36} - \sqrt{n}}{6};$$

n – объем выборки;

Нарушение центровки валов

Общая выборка значений диагностических параметров, полученных при экспериментальном исследовании несоосности валов двигателя и насоса, представлена в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Общая выборка значений диагностических параметров при несоосности валов

№ частной выборки	№ измерения	A'_{100}	$V_{СКЗ}$, мм/с	№ частной выборки	№ измерения	A'_{100}	$V_{СКЗ}$, мм/с
1	1	0,625	3	2	70	0,702	3,8
	2	0,646	3,2		71	0,725	4,0
	3	0,636	3,2		72	0,721	4,2
	4	0,645	3,5		73	0,702	4,6
	5	0,648	3,3		74	0,696	4,6
	6	0,654	2,5		75	0,705	4,6
	7	0,660	3		76	0,714	3,8
	8	0,673	2,6		77	0,708	4,9
	9	0,661	2,8		78	0,697	4,8
	10	0,652	2,6		79	0,722	4,8
	11	0,669	2,9		80	0,718	4,1
	12	0,632	2,9		81	0,713	4,2
	13	0,660	2,9		82	0,711	4,1
	14	0,664	2,9		83	0,726	3,8
	15	0,668	3,1		84	0,688	4,4
	16	0,638	3,2		85	0,71	4,5
	17	0,675	2,9		86	0,718	3,8
	18	0,661	3,0		87	0,72	4,8
	19	0,657	3,0		88	0,709	4,5
	20	0,670	2,8		89	0,713	4,4
	21	0,631	3,3		90	0,704	4,3
	22	0,657	3,0		91	0,696	4,4
	23	0,674	3,3		92	0,696	4,1
	24	0,639	2,7		3	93	0,726
	25	0,635	3,3	94		0,728	5,4
	26	0,659	3,3	95		0,729	5,1
	27	0,626	2,6	96		0,730	5,1
	28	0,664	2,8	97		0,731	5,3
	29	0,663	2,6	98		0,732	5,5
	30	0,647	2,7	99	0,734	5,6	

№ частной выборки	№ измерения	A'_{100}	$V_{СКЗ}$, мм/с	№ частной выборки	№ измерения	A'_{100}	$V_{СКЗ}$, мм/с
	31	0,652	2,6		100	0,735	4,9
	32	0,646	2,5		101	0,735	5,3
	33	0,665	3,4		102	0,736	5,8
	34	0,627	2,7		103	0,737	5,2
	35	0,638	2,8		104	0,738	5,3
	36	0,651	3,2		105	0,738	5,1
	37	0,664	3,0		106	0,739	5,8
	38	0,631	3,2		107	0,740	5,8
	39	0,619	2,7		108	0,740	5,2
	40	0,668	3,0		109	0,741	4,9
	41	0,641	2,8		110	0,742	4,9
	42	0,664	3,1		111	0,743	5,7
	43	0,633	2,6		112	0,733	5,2
	44	0,636	2,8		113	0,745	5,7
	45	0,646	2,8		114	0,746	5,5
	46	0,639	3,4		115	0,746	5,7
2	47	0,701	4,6	116	0,762	5,7	
	48	0,695	4,5	117	0,746	5,7	
	49	0,721	4,9	118	0,747	5,8	
	50	0,691	4,6	119	0,747	4,9	
	51	0,726	4,2	120	0,747	5,1	
	52	0,696	4,2	121	0,758	5,5	
	53	0,708	3,9	122	0,748	5,3	
	54	0,724	3,8	123	0,748	5,3	
	55	0,717	4,4	124	0,749	5,8	
	56	0,725	4,1	125	0,750	4,9	
	57	0,726	4,8	126	0,751	5,0	
	58	0,722	4,4	127	0,752	5,4	
	59	0,72	4,6	128	0,753	5,2	
	60	0,719	3,9	129	0,753	5,5	
	61	0,715	4,3	130	0,755	5,0	

№ частной выборки	№ измерения	A'_{100}	$V_{СКЗ}$, мм/с	№ частной выборки	№ измерения	A'_{100}	$V_{СКЗ}$, мм/с
	62	0,715	4,6		131	0,756	5,1
	63	0,709	4,8		132	0,757	5,3
	64	0,722	4,5		133	0,761	4,9
	65	0,699	4,6		134	0,762	5,2
	66	0,699	4,3		135	0,763	5,2
	67	0,724	4,3		136	0,764	5,1
	68	0,72	4,8		137	0,765	5,3
	69	0,698	4,2		138	0,768	5,0

Пояснение: частная выборка 1 – по опыту с максимальным значением расцентровки агрегата 0,12 мм; частная выборка 2 – 1,15 мм; частная выборка 3 – 2,2 мм (см. рисунок 2.7).

Проверка гипотез о нормальности распределения величин:

1) Опыт 1:

– гипотеза о нормальности распределения A'_{100} :

$W = 0,937 > W(\alpha) = 0,924$ (при $\alpha = 0,05$), следовательно, нет оснований отвергнуть гипотезу о нормальности распределения A'_{100} ;

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

$W = 0,966 > W(\alpha) = 0,924$ (при $\alpha = 0,05$), следовательно, нет оснований отвергнуть гипотезу о нормальности распределения $V_{СКЗ}$;

2) Опыт 2:

– для A'_{100} : $W = 0,929 > W(\alpha) = 0,924$ (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'_{100} : $W = 0,941 > W(\alpha) = 0,924$ (при $\alpha = 0,05$);

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

следовательно, нет оснований отвергать гипотезы;

Проверка гипотез о равенствах дисперсий:

– гипотеза о равенстве дисперсий трех выборок S_1^2, S_2^2, S_3^2 по параметру A'_{100} : $F_{\text{набл}} = 1,858 < F_{\text{крит}}(\alpha; k_1; k_2) = 1,88$ (при $\alpha = 0,05$), следовательно, нет оснований отвергать гипотезу и различие между выборочными дисперсиями незначимо;

– гипотеза о равенстве дисперсий трех выборок S_1^2, S_2^2, S_3^2 по параметру $V_{\text{СКЗ}}$: $F_{\text{набл}} = 1,398 < F_{\text{крит}}(\alpha; k_1; k_2) = 1,88$ (при $\alpha = 0,05$), следовательно, нет оснований отвергать гипотезу и различие между выборочными дисперсиями незначимо;

Проверка значимости коэффициента корреляции между параметрами A'_{100} и $V_{\text{СКЗ}}$ по общей выборке: $r = 0,907 > r_{\theta}[n] = 0,445$, следовательно, линейную связь можно считать надежно установленной [96].

По полученным значениям параметров в общей выборке построен график зависимости диагностического параметра от параметра вибрации. Определена аппроксимирующая функция вида: $A'_{100} = 0,037 \cdot V_{\text{СКЗ}} + 0,547$, где A'_{100} – относительная амплитуда информативной гармоники на частоте 100 Гц. Также выполнена классификация технического состояния агрегата по значениям вибрационного параметра, представленная шкалой, соотнесенной с измеренными СКЗ виброскорости (см. рисунок 2.15) в соответствии с [84].

Средняя квадратическая ошибка отклонения составляет: $\sigma = 0,018$.

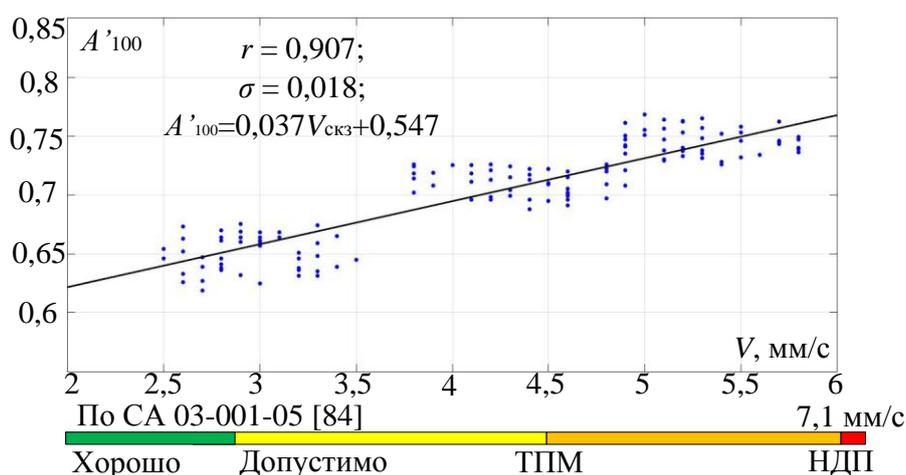


Рисунок 2.15 – График функциональной зависимости диагностического параметра от параметра вибрации

Абразивный износ дорожек качения подшипников

Общая выборка значений диагностических параметров, полученных при экспериментальном исследовании повышенного абразивного износа дорожек качения

подшипников, представлена в таблице 2.4. Как указано в таблице 2.1 в предыдущем подразделе 2.2 к анализу принимается наибольшее значение относительной амплитуды по двум частотным составляющим спектра (36; 64 Гц) в момент измерения – $A'_{36;64}$.

Таблица 2.4 – Общая выборка значений диагностических параметров при повышенном износе дорожек качения подшипников

№ частной выборки	№ измерения	$A'_{36;64}$	$V_{СКЗ}$, мм/с	№ частной выборки	№ измерения	$A'_{36;64}$	$V_{СКЗ}$, мм/с
1	1	0,487	3,2	2	70	0,608	6,1
	2	0,482	3		71	0,569	6,5
	3	0,493	3,5		72	0,59	6,6
	4	0,491	2,9		73	0,586	6,3
	5	0,492	3,3		74	0,592	5,9
	6	0,490	3,4		75	0,57	6,4
	7	0,490	3,7		76	0,563	5,9
	8	0,506	3,4		77	0,552	6,2
	9	0,489	3,5		78	0,591	6,4
	10	0,498	2,9		79	0,556	6,7
	11	0,498	3,2		80	0,571	6,2
	12	0,488	2,8		81	0,554	6,1
	13	0,498	3,3		82	0,579	6,9
	14	0,471	3,6		83	0,607	6,8
	15	0,489	3,8		84	0,606	6,1
	16	0,519	3,7		85	0,573	6,4
	17	0,509	3,6		86	0,574	6,5
	18	0,483	3,7		87	0,602	6,4
	19	0,509	3,3		88	0,603	6,2
	20	0,484	3,7		89	0,606	6,4
	21	0,490	3,5		90	0,586	6,4
	22	0,537	3,8		91	0,557	6,7
	23	0,502	3,7		92	0,605	6,3
	24	0,502	3,5	3	93	0,651	8,7
	25	0,521	3,0		94	0,656	8,7

№ частной выборки	№ измерения	$A'_{36;64}$	$V_{СКЗ}$, мм/с	№ частной выборки	№ измерения	$A'_{36;64}$	$V_{СКЗ}$, мм/с
	26	0,497	3,7		95	0,637	8,8
	27	0,499	3,1		96	0,627	8,3
	28	0,496	3,7		97	0,651	8,6
	29	0,481	3,5		98	0,640	8,3
	30	0,509	3,7		99	0,623	8,3
	31	0,480	3,5		100	0,622	8,2
	32	0,514	3,6		101	0,621	8,1
	33	0,508	3,4		102	0,643	8
	34	0,470	3,0		103	0,618	8,3
	35	0,520	3,5		104	0,612	8,1
	36	0,484	3,5		105	0,621	7,9
	37	0,517	3,6		106	0,657	8,8
	38	0,512	3,2		107	0,619	8,9
	39	0,474	3,4		108	0,637	8,0
	40	0,497	3,6		109	0,623	8,9
	41	0,473	3,2		110	0,653	8,4
	42	0,519	3,9		111	0,614	8,2
	43	0,493	3,0		112	0,619	7,8
	44	0,488	3,4		113	0,628	8,1
	45	0,52	3,1		114	0,632	8,2
46	0,495	3,7	115	0,65	8,2		
2	47	0,586	5,7	116	0,624	8,6	
	48	0,586	6,7	117	0,614	7,9	
	49	0,608	6,5	118	0,623	8,0	
	50	0,576	6,3	119	0,637	8,9	
	51	0,561	6,3	120	0,648	8,4	
	52	0,604	6,1	121	0,634	8,1	
	53	0,592	6,8	122	0,613	7,9	
	54	0,569	6	123	0,625	8,3	
	55	0,578	5,9	124	0,615	8,6	
	56	0,581	6,1	125	0,657	8,4	

№ частной выборки	№ измерения	$A'_{36;64}$	$V_{СКЗ}$, мм/с	№ частной выборки	№ измерения	$A'_{36;64}$	$V_{СКЗ}$, мм/с
	57	0,589	6,3		126	0,626	8,0
	58	0,567	6,2		127	0,635	8,4
	59	0,573	6,7		128	0,622	7,8
	60	0,588	5,9		129	0,636	8,1
	61	0,607	5,9		130	0,614	8,2
	62	0,562	6,3		131	0,634	8,4
	63	0,6	5,9		132	0,637	8,3
	64	0,577	6,7		133	0,634	8,0
	65	0,575	6,1		134	0,64	7,8
	66	0,565	6,5		135	0,644	8,5
	67	0,585	5,9		136	0,625	8,7
	68	0,585	6,2		137	0,617	8,2
	69	0,578	6,6		138	0,639	8,6

Пояснение: частная выборка 1 – по опыту с максимальным значением смещения в подшипнике (см. рисунок 2.9) 0,15 мм; частная выборка 2 – 0,3 мм; частная выборка 3 – 0,45 мм.

Проверка гипотез о нормальности распределения величин:

1) Опыт 1:

– гипотеза о нормальности распределения $A'_{36;64}$:

$W = 0,938 > W(\alpha) = 0,924$ (при $\alpha = 0,05$), следовательно, нет оснований отвергать гипотезу о нормальности распределения $A'_{36;64}$;

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

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

2) Опыт 2:

– для $A'_{36;64}$: $W = 0,954 > W(\alpha) = 0,924$ (при $\alpha = 0,05$);

– для $V_{СКЗ}$: $W = 0,928 > W(\alpha) = 0,924$ (при $\alpha = 0,05$),

следовательно, нет оснований отвергать гипотезы;

3) Опыт 3:

- для $A'_{36;64}$: $W = 0,957 > W(\alpha) = 0,924$ (при $\alpha = 0,05$);
- для $V_{СКЗ}$: $W = 0,929 > W(\alpha) = 0,924$ (при $\alpha = 0,05$),

следовательно, нет оснований отвергать гипотезы;

Проверка гипотез о равенствах дисперсий:

– гипотеза о равенстве дисперсий трех выборок S_1^2, S_2^2, S_3^2 по параметру $A'_{36;64}$:
 $F_{\text{набл}} = 1,55 < F_{\text{крит}}(\alpha; k_1; k_2) = 1,88$ (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 по параметру $V_{СКЗ}$:
 $F_{\text{набл}} = 1,304 < F_{\text{крит}}(\alpha; k_1; k_2) = 1,88$ (при $\alpha = 0,05$), следовательно, нет оснований отвергать гипотезу и различие между выборочными дисперсиями незначимо;

Проверка значимости коэффициента корреляции между параметрами $A'_{36;64}$ и $V_{СКЗ}$ по общей выборке: $r = 0,961 > r_0[n] = 0,533$, следовательно, линейную связь можно считать надежно установленной.

По полученным значениям параметров в общей выборке построен график зависимости диагностического параметра от параметра вибрации (см. рисунок 2.16) и определена аппроксимирующая функция вида: $A'_{36;64} = 0,027 \cdot V_{СКЗ} + 0,406$.

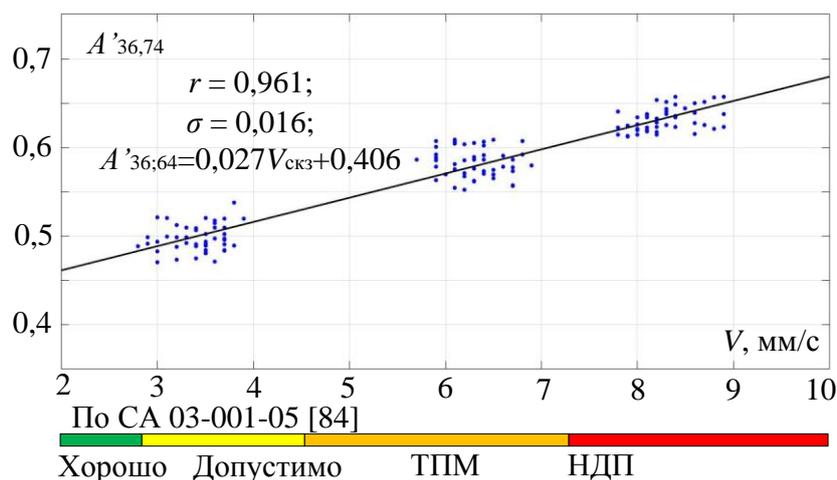


Рисунок 2.16 – График функциональной зависимости диагностического параметра от параметра вибрации

Также выполнена классификация технического состояния агрегата по значениям вибрационного параметра, представленная шкалой, соотнесенной с измеренными СКЗ виброскорости (см. рисунок 2.16) в соответствии с [84].

Средняя квадратическая ошибка отклонения составляет: $\sigma = 0,016$.

По полученным функциональным зависимостям диагностического параметра от параметра вибрации определены пороговые значения относительных амплитуд информативных гармоник спектра тока, используемых для оценки нарушения соосности валов насосного агрегата и дефектов подшипников качения. Пороговые значения представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Пороговые значения вибрационного и диагностического параметров для различных типов технического состояния агрегата

Вид технического состояния агрегата	Пороговые значения вибрационного параметра, $V_{СКЗ}$, мм/с	Пороговые значения диагностического параметра, A_i'	
в соответствии с СА 03-001-05 [84] для ЭД с $h < 132$ мм		$f_{деф} = 2f_0$	$f_{деф} = f_{ер} \pm \frac{f_0}{3}$
Хорошо	<2,8	<0,65	<0,48
Допустимо	<4,5	<0,71	<0,53
Требуется принятия мер	<7,1	<0,81	<0,6
Недопустимо	>7,1	>0,81	>0,6

2.4 Выводы по главе

2.4.1 Разработан экспериментальный аппаратный комплекс для оценки механических неисправностей центробежного насосного агрегата электропараметрическим методом диагностики, позволяющий выполнять задачи измерения и преобразования сигнала тока фазы статора электродвигателя с последующим анализом амплитудно-частотного спектра сигнала и классификацией технического состояния агрегата по диагностическим признакам нарушения соосности валов и повышенного износа опорных подшипников качения насоса и электродвигателя.

2.4.2 Определены информативные частотные составляющие амплитудно-частотного спектра сигнала фазного тока статора электродвигателя, изменяющие амплитуду при развитии механических неисправностей. Нарушению соосности валов насоса и электродвигателя соответствует частота $f_{деф} = f_0 \pm f_{ер} - 100$ Гц. Повышенному абразивному износу дорожек качения и излому сепаратора подшипников насоса соответствуют составляющие $f_{деф} = f_0 \pm f_{ер} / 3 - 36; 64$ Гц. Повышенному абразивному

износу дорожек качения электродвигателя: $f_{def} = f_0 \pm f_{ep} / 3 - 36; 64$ Гц; $f_{def} = f_0 \pm 2f_c - 10; 90$ Гц; $f_{def} = 2f_{ep} \pm 24f_{ck} - 90; 110$ Гц; $f_{def} = 3f_{ep} - 24f_{ck} - 190$ Гц.

2.4.3 Получены линейные функции зависимости значений диагностического параметра – относительной амплитуды частотных составляющих спектров токов двигателя от значений вибрационного критерия – СКЗ виброскорости агрегата при нарушении соосности валов насоса и электродвигателя: $A'_{100} = 0,037 \cdot V_{СКЗ} + 0,084, r = 0,907$; и повышенном износе опорных подшипников качения: $A'_{36;64} = 0,027 \cdot V_{СКЗ} + 0,406, r = 0,961$. По функциональным зависимостям и в соответствии с нормируемыми значениями вибрационного параметра определены пороговые значения диагностического параметра для разных видов технического состояния насосного агрегата.

3. Имитационное моделирование центробежного насосного агрегата с учетом наличия механических неисправностей и изменения рабочих и конструктивных параметров

3.1 Обоснование реализации имитационного моделирования

В соответствии с требованиями нормативно-технической документации в области контроля технического состояния оборудования, в том числе центробежных насосных агрегатов [26,42], 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 [100,101].

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 [18,59,100,101].

В этой связи можно считать целесообразным постановку математического эксперимента с целью изучения характера диагностического признака при возможных изменениях некоторых рабочих и конструктивных параметров центробежных насосных агрегатов с использованием инструментов имитационного моделирования.

3.2 Описание модели и параметров моделирования

Для исследования реакции диагностических признаков 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 для определения диагностических признаков механических неисправностей (см. главу 2): 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: относительные 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 (подробнее в подразделе 1.1).

Перечень задаваемых параметров модели представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – 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 электродвигателя	момент инерции ротора, кг·м ²	J
	число пар полюсов	p
	активные сопротивления обмоток статора и ротора, Ом	R_s, R_r
	собственные индуктивности обмоток статора и ротора, Гн	$L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$

Тип параметров	Наименование параметра, единица измерения	Обозначение
	взаимная индуктивность между обмотками, Гн	L_m
Рабочие насоса	относительный действительный напор	H_D^*
	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 [59] и параметров модели электродвигателя: $R_s, R_r, L_{si}, L_{ri}, L_m$ по [95] представлены в Приложении Б.

Модель центробежного насосного агрегата представляет собой математические описания центробежного насоса и асинхронной машины [100,101].

Центробежный насос описывается уравнениями по методу электрогидравлических аналогий, связывающими производительность, напор и мощность в абсолютных и относительных единицах, и расчетный угол нагрузки [59]:

$$Q_D^* = \sqrt{\left[\frac{\gamma_p^{ном}}{\sin \gamma_p^{ном}} - H_{Dxx}^* \right] / \left(\frac{\gamma_p^{ном}}{\sin \gamma_p^{ном}} - 1 \right)};$$

$$N_C^* = \frac{1}{\eta_{ном}} \cdot [1 + (3 - 2 \cdot H_{Dxx}^*) \cdot (Q_D^* - 1)];$$

$$Q_D = Q_D^* \cdot Q_{ном}; H_D = H_D^* \cdot H_{ном}; N_C = N_C^* \cdot N_{гид};$$

$$N_{гид} = \frac{Q_{ном} \cdot H_{ном} \cdot \rho}{102};$$

$$M_c = \frac{N_C}{\omega_p},$$

где Q_D^* – относительная действительная производительность насоса;

H_{Dxx}^* – относительный напор насоса в режиме холостого хода;

N_C^* – относительная потребляемая мощность насоса;

Q_D, H_D – действительные производительность и напор насоса;

$N_{гид}$ – гидравлическая мощность насоса;

M_c – момент сопротивления на валу насоса.

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 [56,57]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_{s\alpha} = [u_{s\alpha} - \Psi_{s\alpha} \cdot (\frac{R_s \cdot L_r}{L_s \cdot L_r - L_m^2}) + \Psi_{r\alpha} \cdot (\frac{R_s \cdot L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2})] \cdot \frac{1}{s}; \\ \Psi_{s\beta} = [u_{s\beta} - \Psi_{s\beta} \cdot (\frac{R_s \cdot L_r}{L_s \cdot L_r - L_m^2}) + \Psi_{r\beta} \cdot (\frac{R_s \cdot L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2})] \cdot \frac{1}{s}; \\ \Psi_{r\alpha} = [-\Psi_{r\alpha} \cdot (\frac{R_r \cdot L_s}{L_s \cdot L_r - L_m^2}) + \Psi_{r\alpha} \cdot (\frac{R_r \cdot L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2}) - p \cdot \omega_p \cdot \Psi_{r\beta}] \cdot \frac{1}{s}; \\ \Psi_{r\beta} = [-\Psi_{r\beta} \cdot (\frac{R_r \cdot L_s}{L_s \cdot L_r - L_m^2}) + \Psi_{r\beta} \cdot (\frac{R_r \cdot L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2}) + p \cdot \omega_p \cdot \Psi_{r\alpha}] \cdot \frac{1}{s}; \\ M_{\text{э}} = 1,5 \cdot p \cdot (\frac{L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2}) \cdot (\Psi_{s\beta} \cdot \Psi_{r\alpha} - \Psi_{s\alpha} \cdot \Psi_{r\beta}); \\ \omega_p = p \cdot \frac{M_{\text{э}} - M_c}{J} \cdot \frac{1}{s}, \end{array} \right.$$

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:

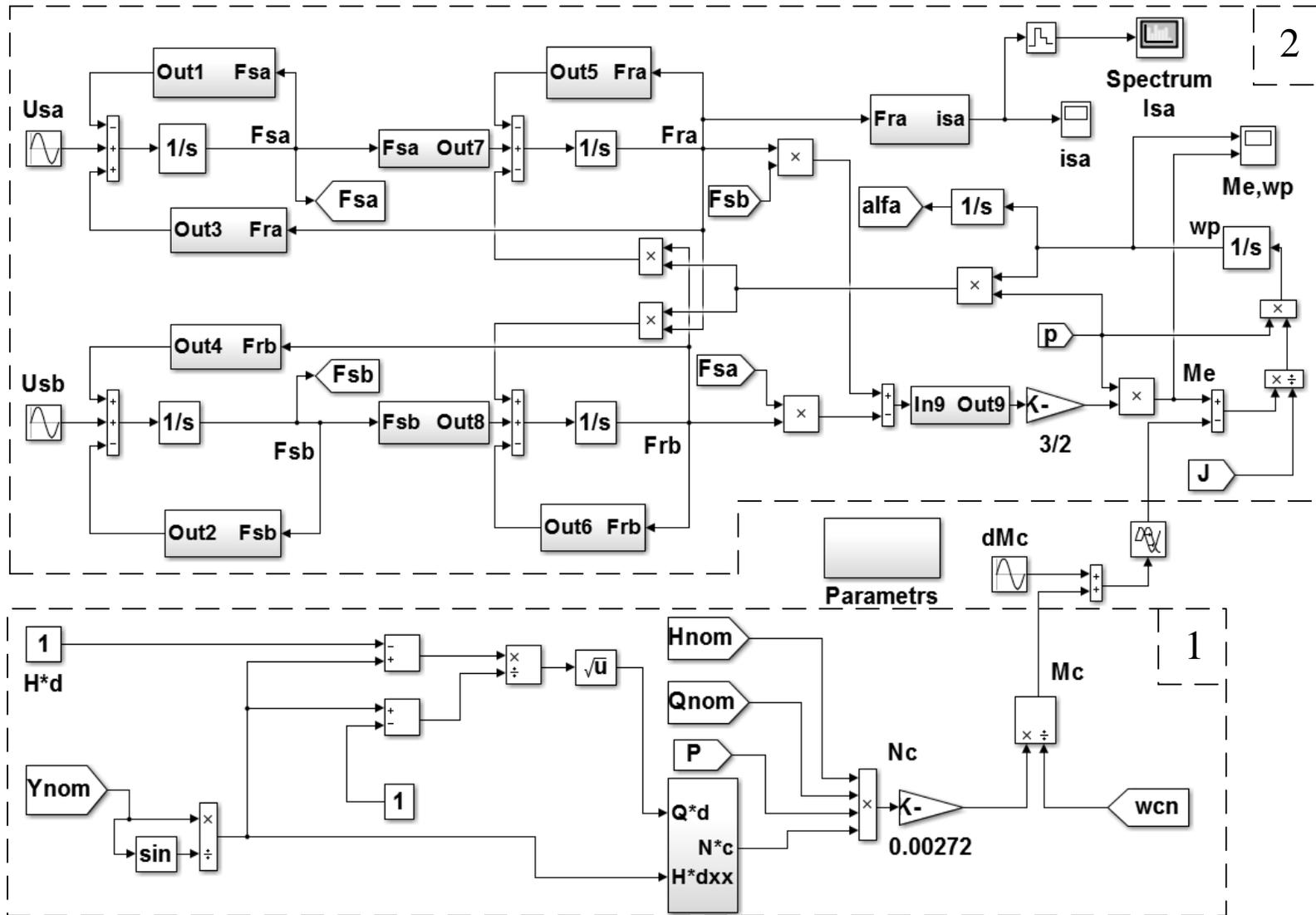
$$i_{s\alpha} = \Psi_{s\alpha} \cdot \frac{L_r}{L_s \cdot L_r - L_m^2} - \Psi_{r\alpha} \cdot \frac{L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2}.$$

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 3.1 изображена полная имитационная модель центробежного насоса. Модель включает в себя совокупности блоков описывающих центробежный насос по ранее

рассмотренным аналитическим зависимостям (1) и асинхронный электродвигатель (2). Связь между моделями насоса и двигателя обеспечивается путем соединения блоков определяющих электромагнитный момент двигателя « M_e » 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.



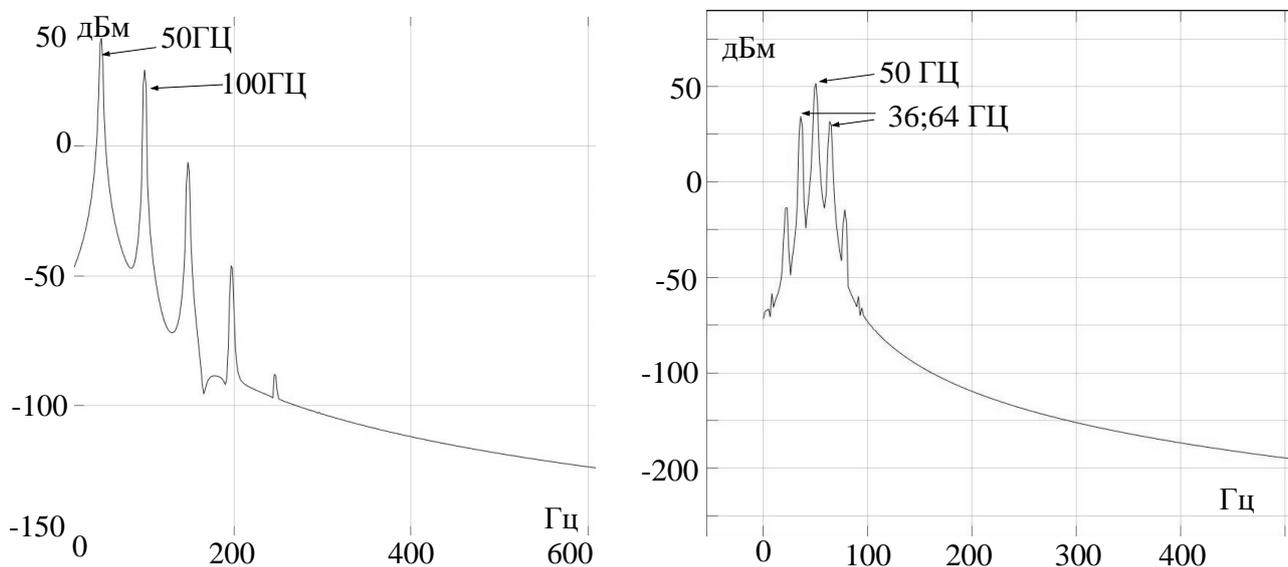
1 – блоки для описания центробежного насоса; 2 – блоки для описания электродвигателя

Рисунок 3.1 - Полная имитационная модель центробежного насосного агрегата

3.3 Обработка результатов моделирования

При экспериментальном исследовании (см. главу 2) 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 гармоник неисправностей экспериментальной установки.

На рисунках 3.2 а, б изображены амплитудно-частотные спектры величины тока i_{sa} , полученные с использованием блока Spectrum Analyzer при задании dM_c с различными частотами ω_{dM_c} информативных составляющих.



а – спектр тока при $\omega_{dM_c} = \omega_{p.ном}$

б – спектр тока при $\omega_{dM_c} = \omega_{p.ном} / 3$

Рисунок 3.2 – Спектры тока при различных ω_{dM_c}

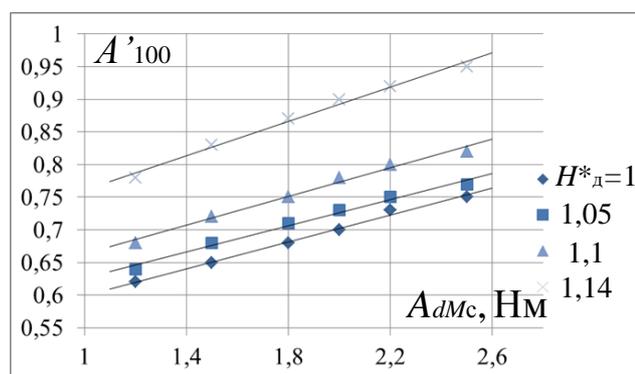
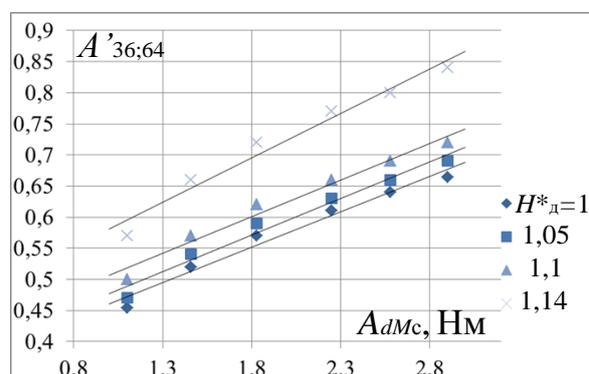
В результате задания dM_c различной амплитуды A_{dM_c} и частоты ω_{dM_c} в модели с конструктивными параметрами насосного агрегата К 20/30 при изменении рабочего параметра H_d^* со значениями: 1; 1,05; 1,1; 1,14 получены зависимости значений диагностических параметров от значений параметра неисправности (см. таблицы 3.2, 3.3, рисунки 3.3 а, б).

Таблица 3.2 – Выборки значений зависимости $A'_{100} = f(A_{dM_c})$ для разных H_D^*

H_D^*	$A_{dM_c}, \text{Нм}$					
	1,2	1,5	1,8	2	2,2	2,5
A'_{100}						
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

Таблица 3.3 – Выборки значений зависимости $A'_{36;64} = f(A_{dM_c})$ для разных H_D^*

H_D^*	$A_{dM_c}, \text{Нм}$					
	1,1	1,5	1,8	2,3	2,6	2,9
$A'_{36;64}$						
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

а – зависимости A'_{100} от A_{dM_c} б – зависимости $A'_{36;64}$ от A_{dM_c} Рисунок 3.3 – Зависимости A'_i от A_{dM_c} для различных ω_{dM_c} и H_D^*

Нижний порог 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. 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 $H_{\text{д}}^*$, что обозначает модуляцию диагностического признака неисправности при изменении рабочего параметра.

Инструментами Microsoft Excel для зависимостей определены уравнения регрессии, вычислены коэффициенты корреляции, относительные угловые коэффициенты и коэффициенты сдвига (см. таблицу 3.4).

Таблица 3.4 – Уравнения регрессии и относительные коэффициенты по диагностическим признакам при изменении $H_{\text{д}}^*$

Значение $H_{\text{д}}^*$	Уравнение регрессии (коэффициент корреляции)	Относительные коэффициенты	
		Угловой, a'	Сдвига, b'
зависимости для A'_{100} 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 $A'_{36;64}$ 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

Полученные коэффициенты позволяют выполнить корректировку уравнений регрессии зависимостей $A'_{100} = f(A_{\text{дм}_c})$ и $A'_{36;64} = f(A_{\text{дм}_c})$ при изменении рабочего параметра $H_{\text{д}}^*$.

Далее определены зависимости $A'_{100} = f(A_{\text{дм}_c})$ и $A'_{36;64} = f(A_{\text{дм}_c})$ при задании конструктивных параметров ряда насосных агрегатов (см. подраздел 3.2) с постоянным значением относительного напора $H_{\text{д}}^* = 1$ (см. таблицы 3.5, 3.6 и рисунки 3.4 а, б).

Таблица 3.5 – Выборки значений зависимости $A'_{100} = f(A_{\text{дм}_c})$ при $H_{\text{д}}^* = 1$

Агрегат	$A_{\text{дм}_c}, \text{Нм}$					
	1,2	1,5	1,8	2	2,2	2,5
	A'_{100}					
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

Таблица 3.6 – Выборки значений зависимости $A'_{36;64} = f(A_{dM_c})$ при $H_d^* = 1$

Агрегат	$A_{dM_c}, \text{НМ}$					
	1,1	1,5	1,8	2,3	2,6	2,9
A'_{100}						
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

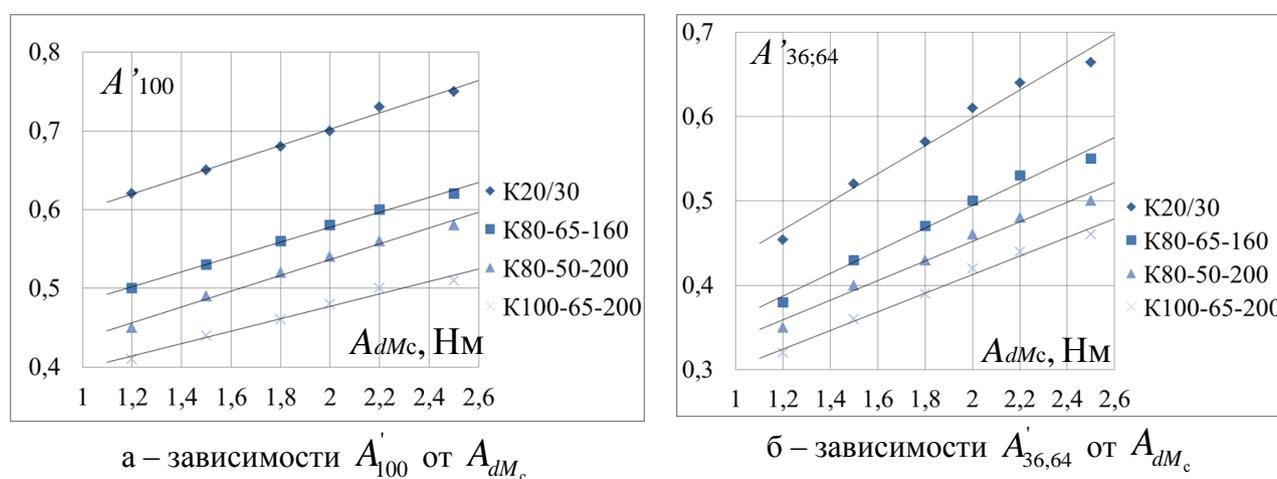


Рисунок 3.4 – Зависимости A'_i от A_{dM_c} для ряда насосных агрегатов

По полученным зависимостям также отмечается линейный характер и смещение в координатной плоскости для агрегатов с разными конструктивными параметрами. В таблице 3.7 представлены уравнения регрессии и относительные угловые коэффициенты и коэффициенты сдвига:

Таблица 3.7 – Уравнения регрессии и относительные коэффициенты по диагностическим признакам для ряда насосных агрегатов

Агрегат	Уравнение регрессии	Относительные коэффициенты	
		Угловой, a'	Сдвига, b'
зависимости для A'_{100} 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
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 $A'_{36;64}$ при $\omega_{dM_c} = \omega_{p,ном} / 3$			

Агрегат	Уравнение регрессии	Относительные коэффициенты	
		Угловой, a'	Сдвига, b'
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

Полученные коэффициенты позволяют выполнить перерасчет коэффициентов уравнений регрессии зависимостей A_i' от A_{dM_c} , соответствующих определенным информативным частотным составляющим, для 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 [54].

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

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

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:

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

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:

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

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

$$\tilde{S} = S^* \left\{ \frac{1}{(n_1 - 1)S_{x1}^2 + (n_2 - 1)S_{x2}^2} + \frac{1}{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)} \cdot \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right\};$$

$$\bar{b} = \frac{(n_1 - 1)S_{x1}^2 b_1 + (n_2 - 1)S_{x2}^2 b_2}{(n_1 - 1)S_{x1}^2 + (n_2 - 1)S_{x2}^2};$$

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

В том случае если $|t_a| \leq t_{кр}(\alpha; f)$, 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, очевидно, наиболее различные регрессии из общих ансамблей линий, рассматриваемых отдельно для $A'_{100} = f(A_{dM_c})$ и $A'_{36;64} = f(A_{dM_c})$ при изменении $H_{д}^*$ и изменении типа агрегата.

1) Проверка для выборок $A'_{100} = f(A_{dM_c})$ при изменении $H_{д}^*$.

Для проверки принимаются регрессии со следующими функциями:

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

По принятым функциям при задании параметра x в диапазоне исходных выборок: [1,2; ... 2,5] получены выборки различной размерности (см. таблицы 3.8, 3.9), по данным которых определяются параметры статистик для проверки гипотез.

Таблица 3.8 – Выборка по функции $y = 0,103x + 0,4961$

$x, (A_{dM_c})$	1,2	1,5	1,8	2	2,2	2,5
$y, (A'_{100})$	0,6197	0,6506	0,6815	0,7021	0,7227	0,7536

Таблица 3.9 – Выборка по функции $y = 0,1311x + 0,6302$

$x, (A_{dM_c})$	1,2	1,4	1,5	1,8	2	2,1	2,2	2,5
$y, (A'_{100})$	0,7875	0,8137	0,8269	0,8662	0,8924	0,9055	0,9186	0,9580

Гипотеза H_0'' при уровне значимости $\alpha = 0,05$, $f_1 = f_2 = 4$ принимается, поскольку: $F_{набл} = 2,78 < F_{кр}(\alpha; f_1; f_2) = 6,39$, 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: $|t_a| = 0,32 \leq t_{кр}(\alpha; f) = 2,228$, 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.

2) Проверка для выборок $A_{36;64}' = f(A_{dM_c})$ при изменении $H_{д}^*$.

Для проверки принимаются регрессии со следующими функциями:

- $y = 0,1138x + 0,3466$ (при $H_{д}^* = 1$);
- $y = 0,1427x + 0,4384$ (при $H_{д}^* = 1,14$).

По принятым функциям при задании параметра x в диапазоне исходных выборок: [1,1; ... 2,9] получены выборки различной размерности (см. таблицы 3.10, 3.11), по данным которых определяются параметры статистик для проверки гипотез.

Таблица 3.10 – Выборка по функции $y = 0,1138x + 0,3466$

$x, (A_{dM_c})$	1,1	1,5	1,8	2,3	2,6	2,9
$y, (A_{36;64}')$	0,6197	0,6506	0,6815	0,7021	0,7227	0,7536

Таблица 3.11 – Выборка по функции $y = 0,1427x + 0,4384$

$x, (A_{dM_c})$	1,1	1,2	1,5	1,7	1,8	2,3	2,6	2,9
$y, (A_{36;64}')$	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: $F_{набл} = 1,899 < F_{кр}(\alpha; f_1; f_2) = 6,39$, 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: $|t_a| = 0,225 \leq t_{кр}(\alpha; f) = 2,228$, и угловые коэффициенты a_1, a_2 можно признать неразличимыми.

Гипотеза H_0' при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $f = 10$ отвергается, поскольку: $|t_b| = 2,565 > t_{кр}(\alpha; f) = 2,228$, 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 $A'_{100} = f(A_{dM_c})$ при $H_{д}^* = 1$ и изменении типа агрегата.

Для проверки принимаются регрессии со следующими функциями:

- $y = 0,103x + 0,4961$ (для К 20/30);
- $y = 0,0793x + 0,3186$ (для К 100-65-200).

По принятым функциям при задании параметра x в диапазоне исходных выборок: [1,2; ... 2,5] получены выборки различной размерности (см. таблицы 3.12, 3.13), по данным которых определяются параметры статистик для проверки гипотез.

Таблица 3.12 – Выборка по функции $y = 0,1138x + 0,3466$

$x, (A_{dM_c})$	1,2	1,5	1,8	2	2,2	2,5
$y, (A'_{100})$	0,6197	0,6506	0,6815	0,7021	0,7227	0,7536

Таблица 3.13 – Выборка по функции $y = 0,1427x + 0,4384$

$x, (A_{dM_c})$	1,2	1,4	1,5	1,7	1,8	2	2,2	2,5
$y, (A'_{100})$	0,4138	0,4296	0,4376	0,4534	0,4613	0,4772	0,4931	0,5169

Гипотеза H_0'' при уровне значимости $\alpha = 0,05$, $f_1 = f_2 = 4$ принимается, поскольку: $F_{\text{набл}} = 1,702 < F_{\text{кр}}(\alpha; f_1; f_2) = 6,39$, 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: $|t_a| = 0,155 \leq t_{\text{кр}}(\alpha; f) = 2,228$, и угловые коэффициенты a_1, a_2 можно признать неразличимыми.

Гипотеза H_0' при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $f = 10$ отвергается, поскольку: $|t_b| = 2,349 > t_{\text{кр}}(\alpha; f) = 2,228$, и коэффициенты сдвига b_1, b_2 признаются различимыми.

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

4) Проверка для выборок $A'_{36;64} = f(A_{dM_c})$ при $H_{д}^* = 1$ и изменении типа агрегата.

Для проверки принимаются регрессии со следующими функциями:

- $y = 0,1138x + 0,3466$ (для К 20/30);
- $y = 0,0774x + 0,2425$ (для К 100-65-200).

По принятым функциям при задании параметра x в диапазоне исходных выборок: [1,1; ... 2,9] получены выборки различной размерности (см. таблицы 3.10, 3.11), по данным которых определяются параметры статистик для проверки гипотез.

Таблица 3.14 – Выборка по функции $y = 0,1138x + 0,3466$

$x, (A_{dM_c})$	1,1	1,5	1,8	2,3	2,6	2,9
$y, (A'_{36;64})$	0,6197	0,6506	0,6815	0,7021	0,7227	0,7536

Таблица 3.15 – Выборка по функции $y = 0,0774x + 0,2425$

$x, (A_{dM_c})$	1,1	1,2	1,5	1,7	1,8	2,3	2,6	2,9
$y, (A'_{36;64})$	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: $F_{\text{набл}} = 4,402 < F_{\text{кр}}(\alpha; f_1; f_2) = 6,39$, 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: $|t_a| = 0,662 \leq t_{\text{кр}}(\alpha; f) = 2,228$, и угловые коэффициенты a_1, a_2 можно признать неразличимыми.

Гипотеза H_0' при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $f = 10$ отвергается, поскольку: $|t_b| = 2,597 > t_{\text{кр}}(\alpha; f) = 2,228$, и коэффициенты сдвига b_1, b_2 признаются различимыми.

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

По результатам выполненных проверок можно сделать вывод о статистической различимости линейных регрессий по зависимостям $A'_{100} = f(A_{dM_c})$ и $A'_{36;64} = f(A_{dM_c})$ для различных $H_{\text{д}}^*$ и типов агрегатов, и необходимости выполнения корректировки зависимостей при изменении рабочих и конструктивных параметров агрегатов.

3.4 Проверка адекватности модели

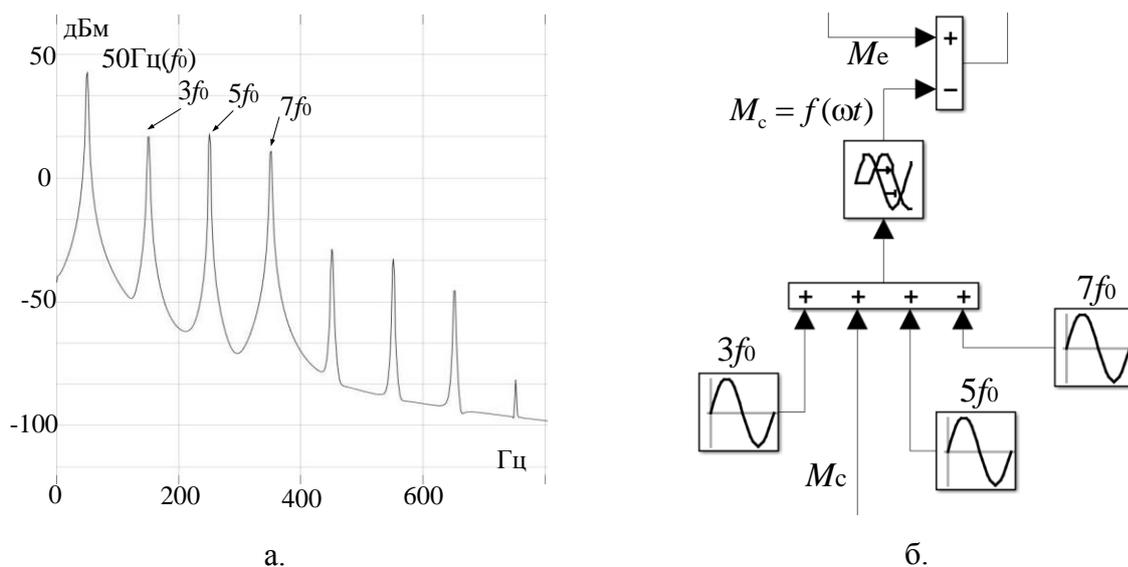
Известно, что математические модели должны в определенной степени соответствовать экспериментальным данным, что подтверждает их адекватность.

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 [98], отражающая 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). Экспериментальная установка по работе [98] представлена центробежным насосом марки ЗГр8 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 [98] в эксперименте с насосом ЗГр8 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 (см. рисунок 3.5 а), соответствующего экспериментальному, в структуру модели введены дополнительные блоки (см. рисунок 3.5 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 3.5 – Амплитудно-частотный спектр и блоки модели

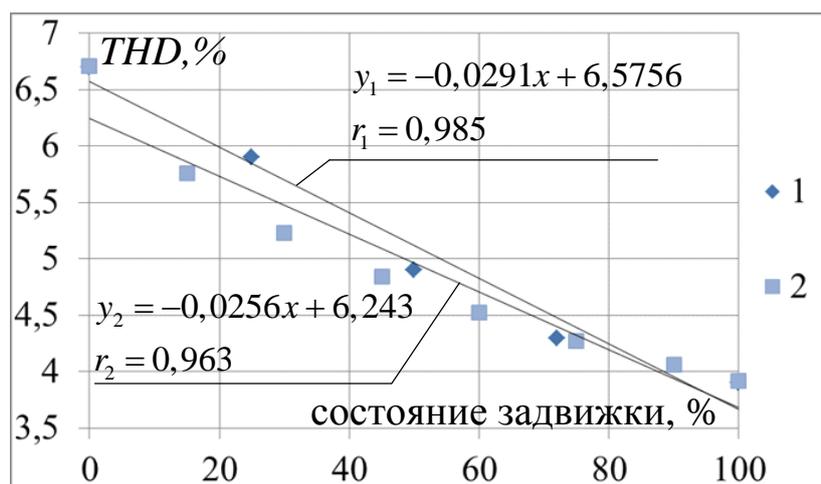
По результатам моделирования получена выборка значений зависимости THD от состояния задвижки на напорном трубопроводе насоса (см. таблицу 3.17) и определены линии регрессии и коэффициенты корреляции для экспериментальной и теоретической зависимости THD спектра тока от состояния задвижки (см. рисунок 3.6).

Таблица 3.16 – Экспериментальная выборка по [98]

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

Таблица 3.17 – 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



1 – экспериментальная зависимость по [98];

2 – теоретическая зависимость по модели

Рисунок 3.6 – 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. Сравнение выполняется по алгоритму, изложенному ранее в подразделе 3.3.

Выдвигается 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 [54].

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.

3.5 Выводы по главе

3.5.1 Разработана имитационная модель центробежного насосного агрегата, включающая в себя модели центробежного насоса и асинхронного электродвигателя, позволяющая имитировать модуляцию частотных составляющих амплитудно-частотного спектра тока статора двигателя от влияния колебаний крутящего момента сопротивления и при изменении рабочих и конструктивных параметров моделируемого агрегата;

3.5.2 Получены линейные зависимости диагностического параметра – относительной амплитуды частотных составляющих амплитудно-частотного спектра тока от параметра неисправности – амплитуды колебаний крутящего момента сопротивления: $A_{100}' = f(A_{дм_c})$ и $A_{36;64}' = f(A_{дм_c})$ при изменении значения рабочего параметра агрегата – относительной величины напора насоса, и при разных конструктивных параметрах, соответствующих агрегатам K20/30, K80-65-160, K80-50-200, K100-65-200;

3.5.3 Определены относительные угловые коэффициенты и коэффициенты сдвига полученных линий регрессий, позволяющие корректировать зависимость диагностического параметра от параметра неисправности при изменении рабочих и конструктивных параметров насосного агрегата. Обоснована необходимость корректировки зависимости в связи со статистической различимостью регрессий и невозможностью описания единой функцией выборок по разным рабочим и конструктивным параметрам;

3.5.4 Обоснована адекватность разработанной модели в части оценки модуляции параметра амплитудно-частотного спектра тока статора двигателя при изменении рабочих параметров насоса путем подтверждения статистической неразличимости линейных регрессий, полученных по экспериментальным данным работы [99] и данным имитационного моделирования.

4. Разработка предложений по аппаратурному обеспечению информационно-измерительных систем контроля технического состояния центробежных насосных агрегатов

В соответствии с обобщенными алгоритмом электропараметрического метода, изложенным в подразделе 1.2 настоящей работы, и структурой систем контроля технического состояния по рассматриваемому методу, представленной в подразделе 1.4, для реализации оценки технического состояния центробежных насосных агрегатов с использованием диагностических признаков механических неисправностей, исследованных в рамках настоящей работы, необходимо определить перечень измерительного оборудования и требования к техническим характеристикам измерительного оборудования, представить компоновку измерительной системы, установить точки контроля и режимы измерения.

В рамках настоящей работы рассматриваются варианты исполнения информационно-измерительных систем контроля по мобильному и полустационарному типам (см. подразделы 1.2, 1.4).

4.1 Общие требования к аппаратурному обеспечению систем контроля

4.1.1 Первичный измерительный преобразователь

При выборе преобразователей необходимо учитывать следующие общие условия:

- 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 уровней дефектов по зависимостям, рассмотренным в подразделе 2.3);
- 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 подразделе 2.2);

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

Полный перечень технических характеристик измерительного преобразователя определяется конкретными условиями применения.

4.1.2 Устройство аналого-цифрового преобразования

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

При выборе устройств необходимо учитывать следующие общие условия:

– частота дискретизации должна быть не ниже 400 Гц (условие определяется необходимым частотным диапазоном спектра, содержащим информативные частотные компоненты, определенные в подразделе 2.2);

– 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 подразделе 2.2);

– диапазон входного сигнала (по току, либо падению напряжения на входном сопротивлении) должен соответствовать предельным значениям выходного сигнала первичного измерительного преобразователя. При превышении верхнего порога 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 измерительного преобразователя определяется конкретными условиями применения.

4.1.3 Компьютер

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

При выборе компьютера (Netbook) необходимо учитывать следующие общие условия:

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

– конфигурация компьютера должна соответствовать требованиям программного обеспечения в частности к типу операционной системы, разрядности процессора и количеству ядер, объему оперативной памяти и памяти накопителей данных, параметрам графического ускорителя и параметрам экрана, наличию периферийных устройств.

4.1.4 Источник питания (ИП)

При выборе ИП необходимо учитывать следующие общие условия:

– 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 и ГОСТ ИЕС 61010-1-2014 [23,30]. Требования к параметрам измерительных приборов при измерениях электрических величин на электродвигателях устанавливаются по ГОСТ 11828-86 [20].

4.2 Аппаратурное обеспечение мобильных систем контроля

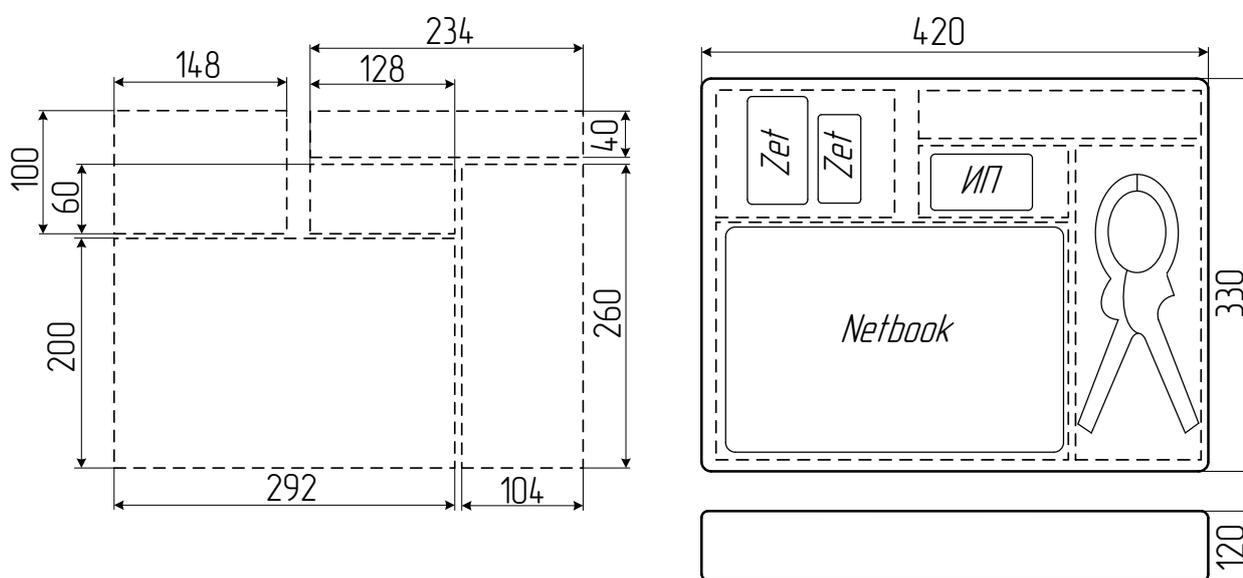
В качестве первичного измерительного преобразователя сигнала тока для мобильной системы предлагается использовать разъемные токоизмерительные клещи с аналоговым выходным сигналом по току. Клещи должны иметь возможность получения значения выходного сигнала, пропорционального мгновенному значению входного 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 соответствующих 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 производства ZETlab. Данные устройства использованы при проведении экспериментальных исследований в настоящей работе (см. подраздел 2.2). На рисунках 4.1 а,б представлены эскизы кейса с размещенным в нем оборудованием.



а – размеры внутренних секторов кейса

б – внешние размеры кейса и размещение оборудования

Рисунок 4.1 - 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 4.2.

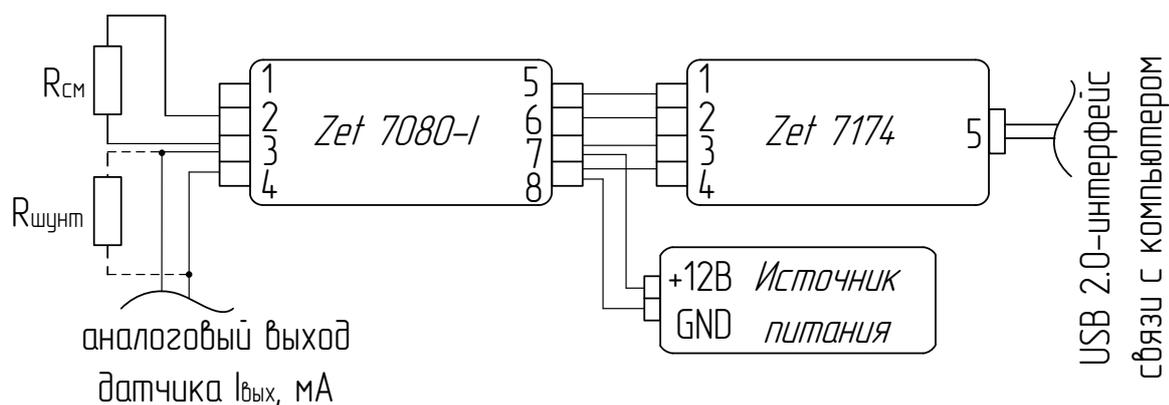


Рисунок 4.2 – Структурная схема соединений измерительной аппаратуры

В таблице 4.1 представлены описания контактов, обозначенных цифрами на схеме.

Таблица 4.1 – 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 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

Обозначенное на схеме сопротивление $R_{\text{шунт}}$ является шунтирующим сопротивлением и включается в цепь в случае превышения значением входного аналогового сигнала установленных пределов для измерительного модуля. Рассчитывается $R_{\text{шунт}}$ следующим образом [109]:

$$R_{\text{шунт}} = \frac{120}{N - 1},$$

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

N – коэффициент, пропорциональный увеличению пределов для измерительного модуля.

Обозначенное на схеме сопротивление $R_{\text{см}}$ является сопротивлением, задающим смещение, и включается в случае подключения датчика с двухполярным выходным сигналом. Рассчитывается $R_{\text{см}}$ следующим образом [109]:

$$R_{\text{см}} = \frac{3,8}{I_{\text{р-р}} / 2},$$

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

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

4.3 Аппаратурное обеспечение полустационарных систем контроля

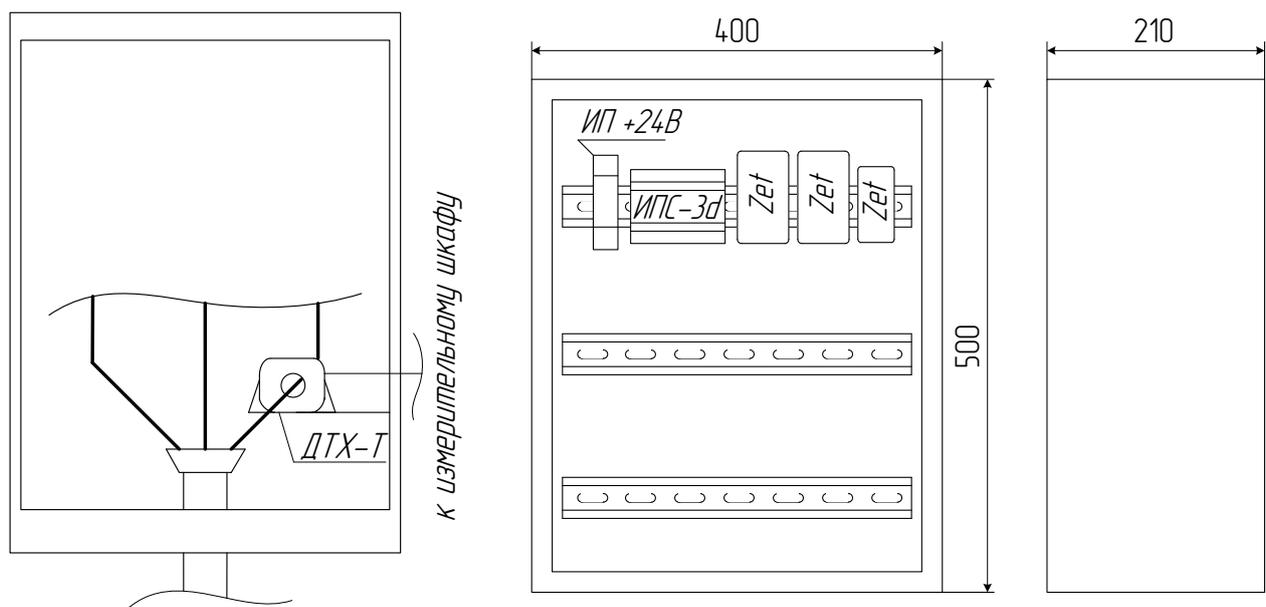
Полустационарные информационно-измерительные системы контроля предусматривают частичный монтаж измерительной аппаратуры стационарно в зоне присоединения первичных измерительных преобразователей к объекту контроля с обеспечением возможности подключения портативного измерительного оборудования через организованные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

При реализации электропараметрического контроля технического состояния оборудования 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 $\pm 15В$ обеспечивается источником питания датчиков ИПС-3D.

Эскизы компоновки одного канала полустационарной системы контроля представлены на рисунках 4.3 а,б.



а – установка датчика тока в

силовом щите

к электродвигателю

б – установка измерительного оборудования в шкафу

Рисунок 4.3 – Эскизы установки датчика тока в силовом щите и измерительного оборудования в шкафу

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.

Установка устройств выполняется в специализированном шкафу для измерительной аппаратуры со смотровой дверцей. Шкаф монтируется на стенке, либо отдельной стойке, имеет монтажную панель для установки DIN-реек, на которые оборудуется измерительная аппаратура.

Структурная схема соединений измерительной аппаратуры представлена на рисунке 4.4.

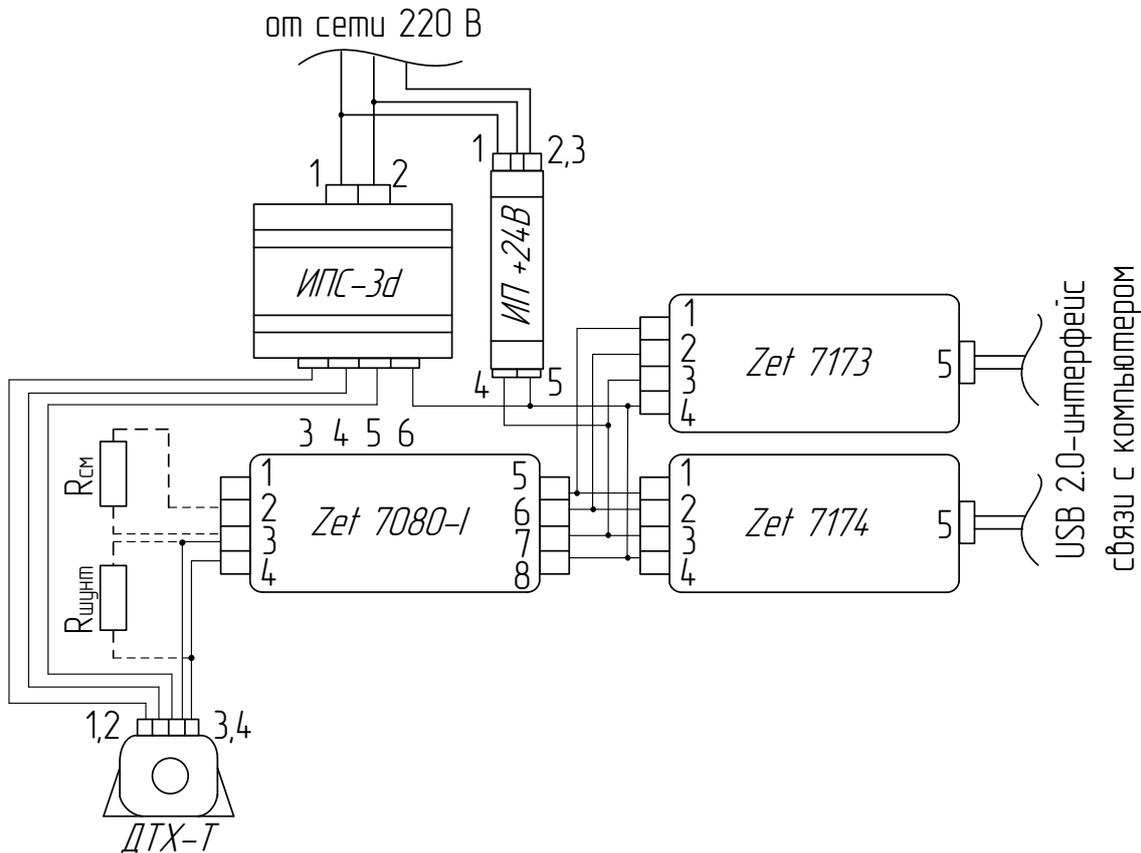


Рисунок 4.4 – Структурная схема соединений измерительной аппаратуры

В таблице 4.2 представлены описания контактов, обозначенных цифрами на схеме.

Таблица 4.2 – 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		

Обозначение контакта на схеме	Тип контакта	Назначение контакта
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»)

Определение обозначенных на схеме на рисунке 4.4 сопротивлений $R_{\text{шунт}}$ и $R_{\text{см}}$ аналогично рассмотренному для мобильной системы в подразделе 4.2.

4.4 Определение необходимого количества измерений

С целью обеспечения достаточной точности оценки значения диагностического параметра при реализации контроля технического состояния оборудования требуется получить определенное количество зафиксированных значений параметра во время проведения измерений, что вызвано влиянием на ошибку измерения систематической и случайных составляющих погрешности, обуславливаемых различными факторами.

Минимально необходимое количество измерений n_{min} для достоверной оценки значения диагностического параметра, определяемого по экспериментальным выборкам, представленным в п. р. 2.3.2 главы 2, вычисляется с учетом имеющихся выборочных оценок среднего, среднего квадратического отклонения по каждой экспериментальной выборке и с учетом предельного значения погрешности измерения по измерительному каналу [45].

$$n_{\text{min}} = \frac{g_{\alpha}^2 V^2}{\delta^2};$$

$$V = \frac{S}{\bar{x}},$$

где \bar{x}, S, V – выборочные оценки среднего, среднего квадратического отклонения и коэффициент вариации соответственно;

$g_\alpha = 1,96$ – коэффициент для нормального распределения при заданной надежности $\gamma = 0,95$;

δ – значение приведенной погрешности по измерительному каналу.

При расчете по каждой частной выборке в рамках экспериментальных исследований, при значении $\delta = 1,67\%$ определено наибольшее n_{\min} для выборки при оценке износа подшипников насосного агрегата: $n_{\min} = 10$.

Таким образом, при измерениях значений электропараметрического диагностического параметра в процессе оценки дефектов насосного агрегата по экспериментальным зависимостям, полученным в настоящей работе (см. п. р. 2.3.2 главы 2) с использованием экспериментального канала с $\delta = 1,67\%$ следует выполнять фиксацию не менее чем десяти значений параметра во время измерений.

4.5 Выводы по главе

4.5.1 Сформулированы общие требования к аппаратному обеспечению информационно-измерительных систем электропараметрического контроля технического состояния насосного оборудования, включая требования к первичным измерительным преобразователям, устройствам аналого-цифрового преобразования и обработки сигнала, источникам питания и компьютеру.

4.5.2 Предложены варианты компоновки измерительных систем контроля по мобильному и полустационарному типам с обозначением размещения и соединения измерительной аппаратуры.

4.5.3 Определено необходимое количество измерений для обеспечения достаточной точности оценки значения диагностического параметра при реализации контроля технического состояния оборудования.

Заключение

1. По результатам анализа уровня разработки электропараметрического метода контроля технического состояния центробежных насосных агрегатов выявлено, что метод, основанный на анализе амплитудно-частотных спектров токов статора электродвигателя позволяет эффективно решать задачи оценки технического состояния оборудования при наличии неисправностей различного характера. Установлено, что по рассматриваемому методу имеется достаточный объем разработок и методического обеспечения. Метод полностью может быть реализован с использованием известного сертифицированного серийно выпускаемого измерительного оборудования и программного обеспечения. При этом по методу требуется проведение дополнительных исследований в связи с недостаточной проработкой аппарата классификации технического состояния оборудования по пороговым значениям диагностических параметров и необходимостью определения диагностических признаков неисправностей в агрегатах с учетом возможных изменений структурных параметров и режимов работы машины.

2. Экспериментально определены значения частот информативных частотных составляющих амплитудно-частотного спектра тока фазы линии питания электродвигателя, которые соответствуют диагностическим признакам нарушения соосности валов и повышенного износа подшипников качения электродвигателя и насоса. По результатам измерений получены функциональные зависимости электропараметрического диагностического параметра от параметра вибрации агрегата и определены пороговые значения диагностического параметра, соответствующие различным видам технического состояния машины.

3. С применением инструментов метода имитационного моделирования, эффективность использования которого при исследовании методов технической диагностики динамического оборудования достаточно обоснована, определены характерные модуляции значений электропараметрического диагностического параметра при возможных изменениях рабочих и конструктивных параметров центробежных насосных агрегатов. По полученным зависимостям диагностического параметра от параметра, имитирующего неисправность, определены относительные угловые коэффициенты и коэффициенты сдвига линий регрессий, что определяет возможность корректировки зависимости при изменении рабочих и конструктивных параметров машины. Проверка адекватности имитационной модели позволила установить соответствие результатов, полученных при моделировании, результатам существующих экспериментальных исследований.

4. С учетом имеющегося уровня разработки электропараметрического метода контроля технического состояния динамического оборудования разработаны предложения по аппаратному обеспечению мобильных и полустационарных информационно-измерительных систем контроля с общими рекомендациями по выбору измерительного оборудования и компоновке систем.

Список использованной 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 27518-87. Диагностирование изделий. Общие требования [Текст]. – Введ. 1989–01–01. – Москва: Стандартиформ, 2009. – 8 с.
27. ГОСТ 30858-2003. Триботехнические требования и показатели. Принципы обеспечения. Общие положения [Текст]. – Введ. 2006–01–01. – Москва: Стандартиформ, 2005. – 13 с.
28. ГОСТ 6134-2007 (ИСО 9906:1999) Насосы динамические. Методы испытаний [Текст]. – Введ. 2008–06–01. – Москва: Стандартиформ, 2008. – 109 с.
29. 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.
30. ГОСТ ИЕС 61010-1-2014. Безопасность электрических контрольно-измерительных приборов и лабораторного оборудования. Часть 1. Общие требования [Текст]. – Введ. 2015–09–01. – Москва: Стандартиформ, 2015. – 136 с.
31. ГОСТ ISO 20958-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя [Текст]. – Введ. 2016–10–01. – Москва: Стандартиформ, 2016. – 27 с.
32. 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: Стандартиформ, 2015. – 23 с.
33. 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.
34. 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: Стандартиформ, 2005. – 22 с.
35. ГОСТ Р 27.605-2013. Надежность в технике. Ремонтпригодность оборудования. Диагностическая проверка [Текст]. – Введ. 2014–06–01. – Москва: Стандартиформ, 2014. – 43 с.

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

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

38. 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.

39. 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.

40. 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.

41. 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.

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

43. 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.

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

45. 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.

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

47. 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.

48. Иосилевич, Г. Б. Детали машин [Текст]: учебник для студентов машиностроит. спец. вузов / Г. Б. Иосилевич. – Москва: Машиностроение, 1988. – 366 с.
49. Иосилевич, Г. Б. Прикладная механика [Текст]: для студентов вузов / Г. Б. Иосилевич, П. А. Лебедев, В. С. Стреляев. – Москва: Машиностроение, 1985. – 576 с.
50. Исакович, М. М. Устранение вибраций электрических машин [Текст] / М. М. Исакович [и др.]. – Ленинград: Энергия, 1969. – 216 с.
51. Калекин, В. С. Основы технической диагностики нефтегазового оборудования [Текст]: учеб. пособие / В. С. Калекин, В. В. Токарев. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – 152 с.
52. 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>.
53. Клюев, В. В. Неразрушающий контроль [Текст]. В 7 т. Т. 7. Вибродиагностика / В. В. Клюев и [др.]. – Москва: Машиностроение, 2007. – 732 с.
54. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников [Текст] / А. И. Кобзарь. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
55. Колпаков, Л. Г. Центробежные насосы магистральных нефтепроводов [Текст] / Л. Г. Колпаков. – Москва: Недра, 1985. – 184 с..
56. 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.
57. Копылов, И. П. Электрические машины [Текст]: Учеб. для вузов / И. П. Копылов. – 2-е изд., перераб. – Москва: Высш. шк.;Логос, 2000. – 607 с.
58. Коршак, А. А. Диагностика объектов нефтеперекачивающих станций [Текст]: Учебное пособие / А. А. Коршак, Л. Р. Байкова. – Уфа: ДизайнПолиграф-Сервис, 2008. – 176 с.
59. Костышин, В. С. Моделирование режимов работы центробежных насосов на основе электрогидравлической аналогии [Текст]: монография / В. С. Костышин. – Иваново-Франковск, 2000. – 163 с.
60. 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.
61. 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.

62. 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.

63. 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.

64. 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.

65. 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.

66. 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.

67. 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.

68. 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.

69. 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.

70. 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.

71. Пантелеев, В. А. Статистические основы моделирования [Текст]: монография / В. А. Пантелеев. – Ухта: УГТУ, 2008. – 116 с.
72. 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.
73. Петухов, В. С. Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов парка тока и напряжения [Текст] / В. С. Петухов // Новости электротехники. – 2008. – № 1(49).
74. Петухов, В. С. Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов парка тока и напряжения. Измерительный комплекс [Текст] / В. С. Петухов // Новости электротехники. – 2008. – № 2(50).
75. 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.
76. 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.
77. Писаревский, В. М. Эксплуатация и диагностика насосных агрегатов магистральных нефтепроводов [Текст]: учеб. пособие / В. М. Писаревский. – Москва: Нефть и газ, 2004. – 126 с.
78. 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: Стандартинформ, 2017. – 28 с.
79. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок. Серия 17. Выпуск 53 [Текст]. – Москва: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2013. – 192 с.
80. 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.

81. 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/>.

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

83. 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.

84. 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.

85. 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.

86. 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.

87. 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.

88. 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.

89. 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.

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

91. 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.

92. 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.

93. 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.

94. 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.

95. 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.

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

97. 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.

98. 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.

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

100. 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.

101. 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.

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

103. 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.

104. 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/>.

105. 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.

106. 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.

107. Parasuram P. Harihara, Alexander G. Parlos. Fault Diagnosis of Centrifugal Pumps Using Motor Electrical Signals // IntechOpen. – 2012. – DOI: 10.5772/26439.

108. 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.

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

Приложение А

Основные технические характеристики средств измерений экспериментального комплекса

Таблица А.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	$\pm 15 (\pm 5\%)$
Диапазон температур, °С	$-20 \div 70$
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	$+9 \div +24$ В
Диапазон температур, °С	$-40 \div 100$
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	$+9 \div +24$ В
Диапазон температур, °С	$-40 \div 60$
Потребляемая мощность, Вт	1,5
Виброметр AR63B	
Диапазоны измеряемых значений вибрации	Виброскорость: $-0,1 \div 199$ мм/с
	Виброускорение: $-0,1 \div 199$ м/с ²
	Виброперемещение: $0,001 \div 1,99$ мм

Параметр, единица измерения	Значение
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 Б

Порядок расчета параметров моделей насоса и электродвигателя

А.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;

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

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;

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

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

$$\eta_0^{\text{НОМ}} = \frac{1}{1 + 0,68 n_s^{-0,66}} \text{ – объемный КПД насоса;}$$

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

M – количество рабочих потоков насоса.

А.2 Расчет параметров модели электродвигателя

Активные сопротивления цепей статора $R_{\text{С}}$ и ротора R_{r} рассчитываются по формулам:

$$R_{\text{С}} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2 (1 - s_{\text{НОМ}})}{2c_1 (1 + c_1 / s_{\text{к}}) m_{\text{к}} (P_{\text{НОМ}} + \Delta P_{\text{мех}})}; R_{\text{r}} = \frac{(P_{\text{НОМ}} + \Delta P_{\text{мех}}) m_{\text{к}}}{3(1 - s_{\text{НОМ}}) i_{\text{к}}^2 I_{\text{НОМ}}^2},$$

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

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

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

$$c_1 = 1 + \frac{L_{1\text{с}}}{L_{\text{m}}} - \text{конструктивный коэффициент (предварительно задается в диапазоне [1,02$$

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

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

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

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

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

$$m_{\text{к}} = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{НОМ}}} - \text{отношение пускового и номинального моментов};$$

$$i_{\text{к}} = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{НОМ}}} - \text{отношение тока короткого замыкания (пускового) к номинальному току};$$

Собственные индуктивности $L_{\text{с}}, L_{\text{r}}$, индуктивности рассеяния $L_{1\text{с}}, L_{1\text{r}}$ 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.