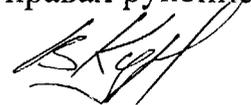


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
ФИЛИАЛ НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
«МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ» В Г. ВОЛЖСКОМ

На правах рукописи



04201352783

КУРЬЯНОВ ВАСИЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ

ДИАГНОСТИКА И ПРОГНОЗ ВРЕМЕНИ
ЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ РОТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(промышленность)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Шевчук В. П.

Волгоград – 2012

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Анализ систем контроля и диагностики роторного оборудования.....	12
1.1 Анализ методов диагностики и мониторинга роторного оборудования...	29
1.2 Анализ систем диагностирования промышленных энергоустановок.....	31
1.2.1 Анализ технических средств диагностики.....	41
1.3 Анализ методов определения эффективности работы оборудования.....	43
1.4 Выводы и постановка задач исследования.....	55
2 Исследование моделей развития дефектов.....	58
2.1 Экспериментальные исследования моделей развития дефектов.....	59
2.2 Модели измерительной информации.....	78
2.3 Проверка адекватности моделей измерительной информации.....	85
2.4 Выводы и обсуждение результатов	96
3 Разработка и исследование алгоритмов диагностики.....	100
3.1 Выбор моделей метрологических характеристик автоматизированного рабочего места	102
3.2 Математическая модель ошибок прогноза энергоэффективности	108
3.3 Оптимизация параметров настройки автоматизированного рабочего места	114
3.4 Алгоритм диагностики высокочастотного канала обработки информации.....	117
3.5 Алгоритм диагностики среднечастотного канала обработки информации.....	126
3.6 Алгоритм диагностики низкочастотного канала обработки информации.....	128
3.7 Выводы и обсуждение результатов.....	130
4 Исследование алгоритмов диагностики и прогноза эффективности.....	132
4.1 Алгоритм прогноза времени вывода оборудования на ремонт.....	133

4.2 Исследование алгоритма прогноза времени вывода оборудования на ремонт.....	135
4.3 Программный модуль имитации диагностических сигналов	145
4.4 Программный модуль для количественной оценки потерь	149
4.5 Выводы и обсуждение результатов.....	153
Заключение.....	155
Список литературы.....	157
Приложение А. Испытательная машина ЦКБ-50.....	169
Приложение Б. Сводные результаты стендовых испытаний.....	171
Приложение В. Программы имитации измерительной информации...	177
Приложение Г. Программы имитации сигналов и проверки адекватности моделей сигналов.....	183
Приложение Д. Оптимизация затрат на эксплуатацию роторного оборудования	202

Введение

Актуальность работы. К роторному оборудованию относятся множество видов и типов электрических машин, имеющих вал (ротор), который вращается с заданной скоростью. Такие машины нашли широкое применение практически в каждой отрасли промышленности. Без роторного оборудования немислима выработка электроэнергии традиционными способами на таких станциях, как АЭС, ГЭС, ТЭЦ, основным оборудованием которых являются мощные турбинные агрегаты и генераторы. Современное производство предъявляет чрезвычайно высокие требования к качеству и работоспособности роторных машин. Возрастающая стоимость энергоносителей диктует создание современного оборудования. Один из главных путей повышения энергоэффективности эксплуатации роторного оборудования – это внедрение эффективных способов контроля и управления энергопотреблением, в основу которого закладываются современные информационно-измерительные системы.

В роторном оборудовании основным приводным элементом является электродвигатель. Следует отметить, что изменение мощности электродвигателя зависит от технического состояния приводимого оборудования и самого электродвигателя, то есть энергопотребление функционально зависит от степени изношенности и дефектов приводимого оборудования (редукторов, насосов, вентиляторов и др.), а также от степени дефектов в узлах самого электродвигателя (подшипниках, электромеханической и электромагнитной системе). Существует оборудование с прецизионной обработкой материалов, где выдерживается высокая точность работы механизмов, и появление даже маленьких дефектов, и, как следствие, вибраций, может привести к браку продукции. На таких производствах дефектные узлы немедленно ремонтируют или заменяют на новые. Основная масса оборудования на производствах работает с достаточно большими дефектами, вибрациями и часто не ремонтируется до

поломки. Например, насосные агрегаты или оборудование, установленное в труднодоступных местах, – вентиляционные установки. Существующие экспертные системы диагностики позволяют решать лишь часть задач эксплуатирующего персонала. Как правило, решаются задачи определения вида неисправности и рекомендуются временные отрезки по дальнейшей работе. При этом вопрос об изменении структуры потребления электроэнергии и энергоэффективности оборудования в целом остается открытым или даже не задаваемым, но очень актуальным в настоящее время.

Проблемами диагностики и анализа энергоэффективности роторного оборудования занимались и продолжают заниматься. Однако сферы исследований разделены либо вопросами поиска дефектов: Ключев В.В., Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю., Бойченко С.Н., Дурсов В.М., Коренькин В.Н., Костюков В.Н., либо исследованиями в области оценки и расчета потерь в оборудовании: Вагин Г.Я., Воротницкий В.Э., Жежеленко И.В., Железко Ю.С., Иванов В.С., Казанцев В.Н., Кордюков Е.И., Кузнецов В.Г., Курбатский В.Г., Кучумов Л.А., Пекелис В.Г.

Все это указывает на важность исследования и необходимость совершенствования методов диагностики и прогнозирования состояния оборудования по вибрационным параметрам для своевременного устранения неисправностей и получения экономического эффекта за счет снижения потребления электроэнергии оборудованием. А также позволяет персоналу, эксплуатирующему оборудование, не только своевременно принимать необходимые решения по выводу оборудования в ремонт, но и владеть оперативной информацией о наиболее экономичных режимах работы оборудования, обеспечивающих рациональное использование электроэнергии.

Целью работы является повышение эффективности управления роторным оборудованием.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ существующих методов диагностики дефектов и их влияния на эффективность функционирования роторного оборудования;
2. Выбрать и исследовать критерий оценки оптимального времени вывода роторного оборудования на ремонт;
3. Разработать алгоритмы диагностики по основным параметрам, определяющим эффективность работы роторного оборудования;
4. Разработать алгоритм прогноза времени вывода оборудования на ремонт.

Методы исследования. При выполнении работы использовались методы теории случайных функций, математического и имитационного моделирования, теория автоматического управления, теории планирования эксперимента и теории принятия решений.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Предложен критерий энергоэффективности функционирования роторного оборудования, отличающийся от известных учетом потерь электрической энергии, зависящих от дефектов [75, 81];
2. Получены модели измерительной информации, по которым целесообразно проводить диагностику, отличающиеся от известных учетом развивающихся дефектов [76, 79, 80];
3. Предложены алгоритмы диагностики эффективности функционирования роторного оборудования, отличающиеся от известных определением в реальном масштабе времени дефектов и расчетом потерь электрической энергии, зависящих от дефектов [76, 77];
4. Предложен алгоритм прогноза времени вывода роторного оборудования на ремонт, отличающийся от известных наличием контроля за изменением потерь электрической энергии, зависящих от дефектов [77].

Практическая значимость работы.

Основные результаты диссертационного исследования, имеющие практическую значимость, заключаются в следующем:

1. Разработан пакет прикладных программ для оптимизации затрат на эксплуатацию при обнаружении дефектов и оценки их влияния на потери электрической энергии (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012617022 от 6 августа 2012 г.) [78, 81, 82];

2. Разработан пакет прикладных программ для визуализации измеряемых трендов автоматизированного рабочего места энергетика для диагностики роторного оборудования [79, 84];

3. Предложена классификация дефектов по воздействию на энергоэффективность роторного электрооборудования [75];

4. Разработана экспериментальная установка в составе информационно-измерительной системы для диагностики роторного оборудования, оптимизации затрат на эксплуатацию при обнаружении дефектов и оценки их влияния на потери электрической энергии, которая используется на кафедре «Автоматизация технологических процессов и производств» филиала МЭИ в г. Волжский [79, 84, 85]. Получен эффект от внедрения в виде снижения потерь электроэнергии на 20 %.

Положения, выносимые на защиту.

1. Критерий энергоэффективности функционирования роторного оборудования;

2. Модели измерительной информации, по которым целесообразно проводить диагностику;

3. Алгоритмы диагностики эффективности функционирования роторного оборудования при помощи высокочастотных, среднечастотных и низкочастотных сигналов;

4. Алгоритм прогноза времени вывода роторного оборудования на ремонт.

Соответствие паспорту научной специальности. Указанная область исследований соответствует специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации в энергетике, а именно: пункту 3 – «Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», пункту 4 – «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», пункту 6 – «Методы идентификации систем управления на основе ретроспективной, текущей и экспертной информации», пункту 7 – «Методы и алгоритмы структурно-параметрического синтеза и идентификации сложных систем».

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: XV Межвузовской научно-практической конференции молодых ученых и студентов (г. Волжский, 2009); Межрегиональной конференции «Моделирование и создание объектов энергосберегающих технологий» (г. Волжский, 2009); XVI Межвузовской научно-практической конференции молодых ученых и студентов (г. Волжский, 2010); Третьей Всероссийской научно-практической конференции «Ресурсо-энергосбережение и эколого-энергетическая безопасность промышленных городов» (г. Волжский, 2010); Семнадцатой ежегодной международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиотехника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2011); Восемнадцатой ежегодной международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиотехника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2012).

Внедрение результатов работы. Все разработанные алгоритмы, методики диагностики и экспериментальная установка используются филиалом МЭИ в г. Волжском для проведения лабораторных занятий по дисциплинам «Технические средства автоматизации», «Проектирование

автоматизированных систем», «Диагностика и надёжность автоматизированных систем». Автоматизированное рабочее место энергетика используется на полигоне возобновляемых источников энергии филиала МЭИ в г. Волжском.

Достоверность результатов исследований подтверждена методом имитационного моделирования и результатами экспериментов. Эксперименты по исследованию влияния дефектов подшипников на изменение расхода электрической энергии, потребляемого роторным оборудованием, проводились на ОАО «Волжский подшипниковый завод». Эксперименты по проверке работоспособности алгоритмов диагностики проводились на экспериментальной установке, созданной специально для этих целей.

Публикации. Всего по теме диссертационной работы опубликовано 15 работ в научных журналах и сборниках трудов международных, межрегиональных и межвузовских конференций, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений, общим объемом 168 страниц, 99 рисунков, 6 таблиц, 102 наименования источника литературы, 5 приложений.

В первой главе диссертации проведен анализ существующих методов диагностики и мониторинга эффективности энергетического оборудования. Проведен анализ существующих информационно - измерительных систем по диагностике и неразрушающему контролю роторного оборудования, а так же систем рассчитывающих количественно потери электрической энергии. Обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена выбору критерия эффективности работы роторного оборудования. Планированию и проведению эксперимента.

Определению влияния дефектов подшипников на расход электрической энергии. Получению моделей измерительной информации. Проверке адекватности полученных моделей.

Третья глава посвящена синтезу алгоритмов диагностики. Разрабатываются алгоритмы диагностики, ориентированные на обработку высокочастотных сигналов (>100 герц), сигналов средней частоты (от 1 до 100 герц) и обработку низкочастотных сигналов с частотой меньше 1 герца. Разработана структурная модель автоматизированного рабочего места по диагностике роторного оборудования, отличающаяся от известных наличием текущего контроля за изменением потерь электрической энергии зависящих от наличия и развития дефектов.

Четвертая глава посвящена разработке и исследованию алгоритма прогноза времени вывода роторного оборудования на ремонт. Исследованию алгоритмов диагностики и прогноза эффективности работы автоматизированного рабочего места. Так же разработке программного обеспечения и визуализации протекающих процессов. Появляющиеся дефекты и неисправности, а так же износ и старение оборудования, вызывающие появление дополнительных потерь энергии, выявляются системой при сравнении с данными, полученными математическим моделированием, и делается вывод о необходимости принятия мер по их устранению. Например, путем вывода оборудования в ремонт, переключения на резервный источник питания либо резервное оборудование.

Разработанное программное обеспечение состоит из: пакета прикладных программ настройки модулей стенда, пакета прикладных программ оптимизации каналов диагностики и пакета прикладных программ по контролю и снижению расхода и потерь электрической энергии. Данные программные модули установлены на ЭВМ, предназначенном для визуализации процессов изменения измерительной информации, поступающей с первичных преобразователей к цифровому интерфейсу. Для

отображения данных в реальном времени на ЭВМ в интегрированной среде разработки автоматизированных систем управления технологическими процессами отечественного производства Trace Mode создано автоматизированное рабочее место и пакет прикладных программ для обеспечения его работы. В рамках проводимых исследований получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Диссертационная работа завершается обсуждением основных выводов и результатов, которые позволяют классифицировать работу как решение важной научной проблемы диагностики и прогноза времени эффективной работы роторного оборудования промышленного предприятия.

В приложении сведены таблицы с экспериментальными данными, результаты имитационного моделирования и акты внедрения результатов работы.

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю, д.т.н., профессору В.П. Шевчуку за помощь в организации научной работой, благодарность всему коллективу кафедры ИИТ «НИУ «МЭИ» (ТУ) за ценные замечания и помощь, оказанную при написании кандидатской диссертации.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ РОТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

К роторному оборудованию относятся множество видов и типов электрических машин, имеющих вал (ротор) который вращается с заданной скоростью. Такие машины нашли широкое применение практически в каждой отрасли промышленности (см. рисунок 1.1). Без роторного оборудования немислима выработка электроэнергии традиционными способами на таких станциях как АЭС, ГЭС, ТЭЦ, основным оборудованием которых являются мощные турбинные агрегаты и генераторы. Современное производство предъявляет чрезвычайно высокие требования к качеству и работоспособности роторных машин. Чтобы оборудование могло считаться вполне пригодным к эксплуатации оно должно удовлетворять ряду требований, предъявляемых действующими стандартами. Кроме того, в ряде случаев к электрическим машинам предъявляются дополнительные требования, оговариваемые техническими условиями. К отдельным видам машин могут предъявляться требования специфические для этих видов или требования более жесткие. Такие требования указываются в специализированных стандартах на эти виды машин [29].

Одной из главных задач в настоящее время для развития российской экономики является повышение энергоэффективности. Международным энергетическим агентством (МЭА) сбережение энергии и повышение эффективности её использования считаются важными аспектами укрепления мировой энергетической безопасности. Более 40 научно – исследовательских программ МЭА охватывают несколько направлений. Из 42 действующих научно – исследовательских программ 13 направлены на разработку энергоэффективных технологий в секторе конечного потребления электроэнергии [7]. В секторе конечного потребления электроэнергии значительная часть оборудования является роторным. Для роторного оборудования наибольший интерес представляет программа

«Энергоэффективность электрооборудования для потребительского сектора (Efficient Electrical End Use Equipment IA). Эта программа нацелена на разработку и внедрение энергоэффективного электрооборудования для потребительского сектора. В рамках действующих проектов исследуется поведение оборудования от самого энергоэффективного до оборудования со средними показателями и другие аспекты, в том числе снижение потребления энергии оборудованием в режиме ожидания. В потребительском секторе электрооборудования значительная доля принадлежит электродвигателям различной мощности и типов.

В роторном оборудовании основным приводным элементом является электродвигатель. Следует отметить, что изменение мощности электродвигателя зависит от технического состояния приводимого оборудования и самого электродвигателя, т.е. энергопотребление функционально зависит от степени изношенности и дефектов приводимого оборудования (редукторов, насосов, вентиляторов и др.), а также от степени дефектов в узлах самого электродвигателя (подшипниках, электромеханической и электромагнитной системе).

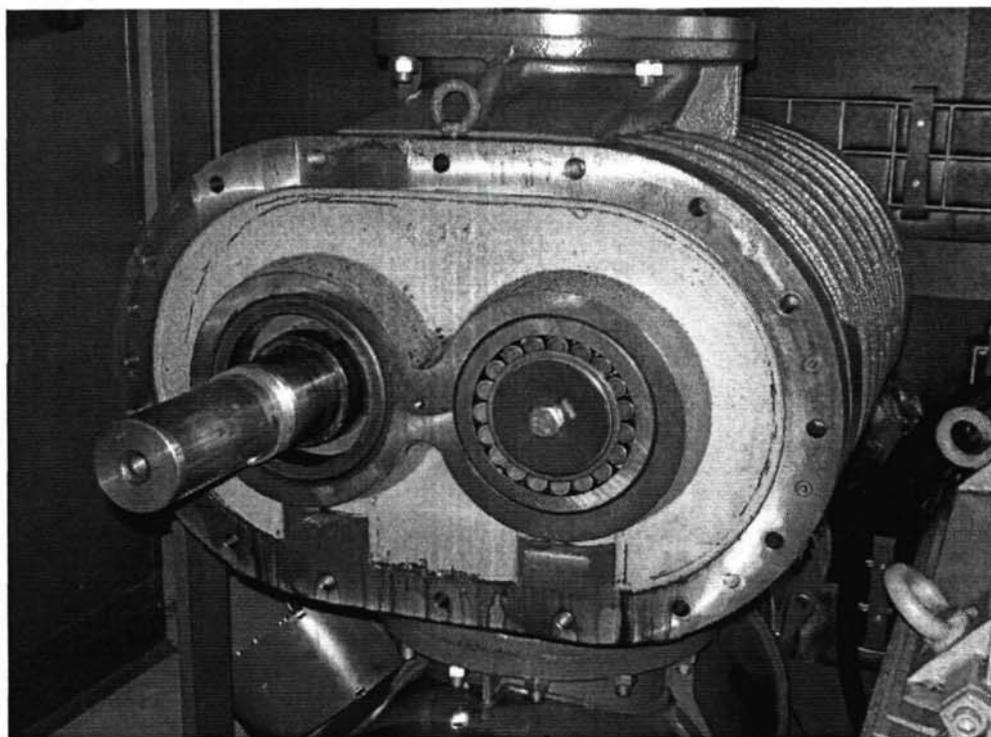


Рисунок 1.1 – Промышленная воздуходувка роторного типа

Изготовление электрических машин неизбежно сопровождается технологическими неточностями и отступлениями, а зачастую и браком продукции, в результате чего, отдельные экземпляры машин одного и того же типа по своим характеристикам отличаются. Техническое состояние электродвигателей характеризуется их виброакустическими характеристиками. Наличие вибраций не только снижает ресурс работы двигателя, но и оказывает непосредственное влияние на качество функционирования систем, в которых он используется. Техническое состояние электрооборудования роторного типа и изменение его во времени в наибольшей степени зависит от контактирующих и трущихся элементов и действующих в них вибрационных нагрузок.

Силы трения, и соответственно, возбуждаемая ими высокочастотная вибрация, в исправных подшипниках представляют собой случайные процессы с постоянной за время измерения мощностью [3]. При возникновении дефектов поверхностей качения появляется периодическое изменение мощности этих процессов, т.е. появляется амплитудная модуляция сил трения и высокочастотной вибрации. Неуравновешенность элементов вызывает колебания с частотами, кратными частоте вращения или стационарного движения. Амплитуда вынужденных сил пропорциональна квадрату частоты и дисбалансу. Колебания являются следствием вышеперечисленных факторов взаимодействия между собой, в результате возникает вибрация в широком спектре частот (до десятков килогерц) с различными амплитудами. Взаимодействия элементов, их относительные перемещения порождают вибрации, которые существенно усиливаются при наличии дефектов.

Диагностика - это, в основном, поиск слабых компонент сигнала на фоне сильных. Различаются слабые и сильные компоненты обычно и по частоте. По мощности эти компоненты могут различаться в 10^6 раз, поэтому измеряют не их мощность, а амплитуду, и различие между слабыми и сильными компонентами снижается до величин, порядка 10^3 раз. В каждом

объекте действуют динамические силы. Эти силы - источник не только шума и вибрации, но и дефектов, которые изменяют свойства сил и, соответственно, характеристики вибрации. Можно сказать, что функциональная диагностика машин без смены режима их работы - это изучение динамических сил, а не собственно вибрации или шума. Последние просто содержат в себе информацию о динамических силах, но в процессе преобразования сил в вибрацию или шум часть информации теряется. Еще больше информации теряется при преобразовании сил и совершаемой ими работы в тепловую энергию. Именно поэтому из двух видов сигналов (температура и вибрация) в диагностике предпочтение следует отдать вибрации [9]. Динамические силы в машинах возбуждают вибрацию либо непосредственно, либо силы возбуждают шум, а шум - вибрацию корпуса.

Вибрация, в зависимости от природы возбуждающих ее сил, может быть либо детерминированной (чаще периодической), либо случайной. Детерминированный сигнал вибрации (см. рисунок 1.2) – это гармоническое колебание, которое характеризуется амплитудой (пиковое значение $X_{\text{пик}}$, среднеквадратичное значение $X_{\text{скз}}$ или среднее значение $X_{\text{ср}}$ протестированного сигнала), частотой $f=1/T$ и начальной фазой [3].

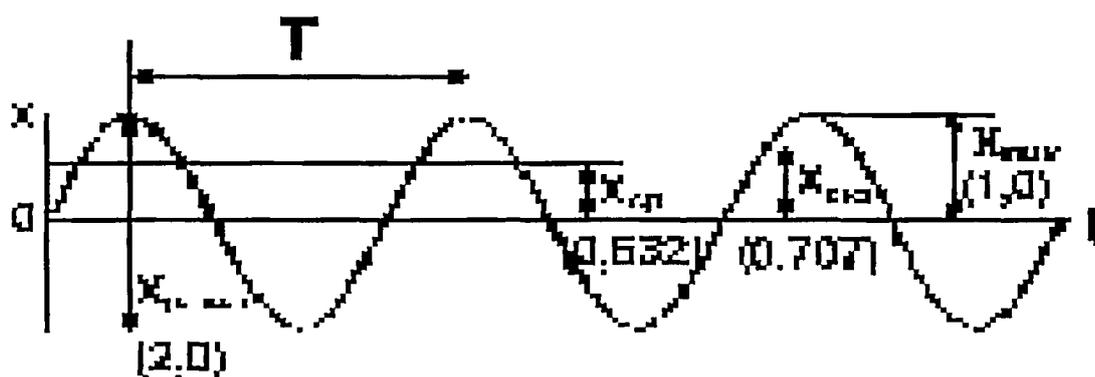


Рисунок 1.2- Характеристики гармонического сигнала

Случайный сигнал (см. рисунок 1.3) может принимать любое значение в определенном диапазоне, поэтому его характеризуют не амплитудой, частотой и фазой, а пиковыми значениями и их статистическими характеристиками.

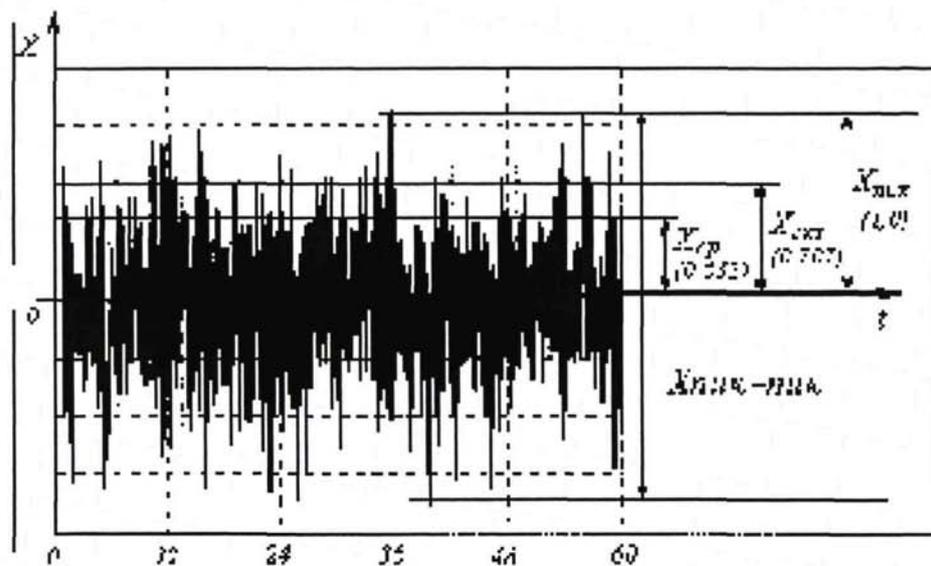


Рисунок 1.3 – Сигнал на вторичном приборе

Периодическая вибрация может быть представлена в виде спектра. В нем может быть одна составляющая - гармонический сигнал (рисунок 1.4а или рисунок 1.4б).

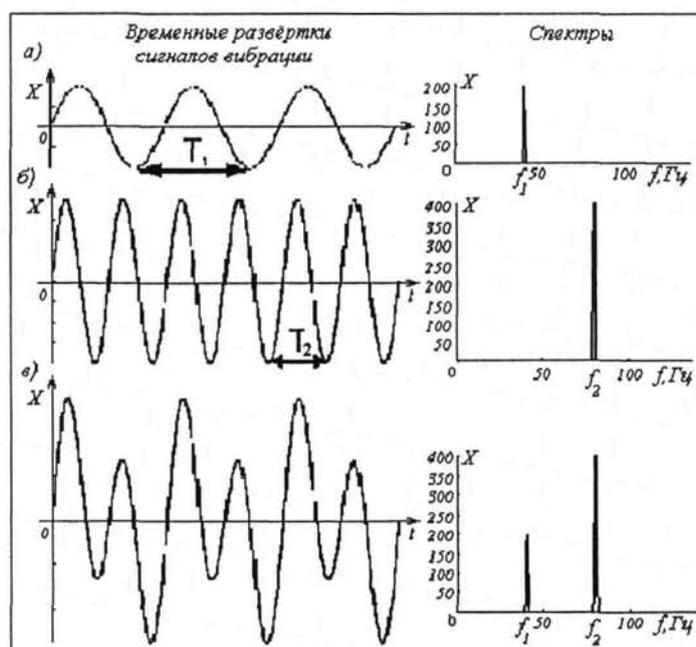


Рисунок 1.4 - Временные сигналы вибрации и их спектры

Если сигнал представляет собой комбинацию (рисунок 1.4в) двух простейших гармонических составляющих с разными частотами и амплитудами, то его спектр имеет вид (рисунок 1.4в, справа), где явно видно наличие именно этих двух гармонических составляющих с разными частотами и амплитудами.

Поскольку периодические составляющие отображают спектром, случайные тоже следует так же отображать, но спектр - сплошной [3]. Спектр удобен тем, что он делит вибрацию на компоненты с разными свойствами, а достаточно часто и разной природы [6]. Типовой спектр (рисунок 1.5) характеризуется, как правило, большим количеством гармонических составляющих в области низких частот. Для диагностики машин и оборудования при выборе частотной области вибрации следует учитывать свойства вибрации разной частоты. Так, в области инфранизких частот вибрация может возбуждаться даже не самой контролируемой машиной, а, например, работающими рядом другими машинами и, в том числе, проходящим на сравнительно большом расстоянии транспортом [7].

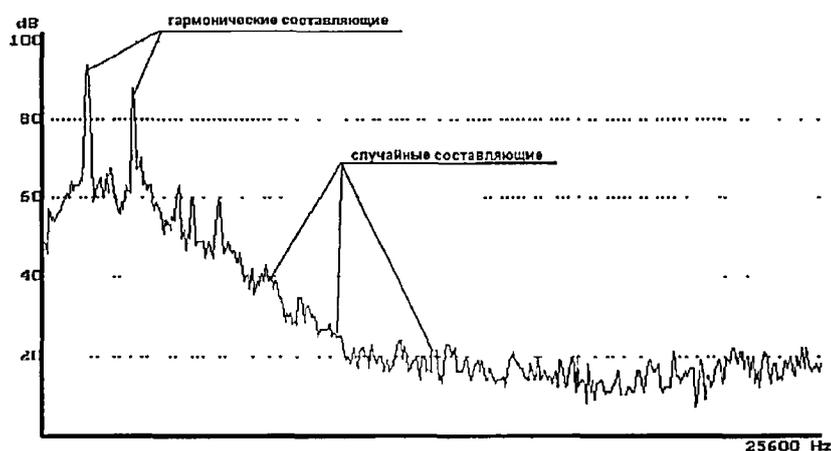


Рисунок 1.5 - Спектр сигнала вибрации

Особенность вибрации на низких частотах состоит в том, что она слабо затухает в пространстве, а следовательно, в точку установки датчика доходит вибрация от всех узлов контролируемой машины, от сопряженных с ней других машин и от соседнего оборудования. Поэтому при анализе вибрации на низких частотах возникает проблема локализации дефектного узла и проблема помехоустойчивости. На этих частотах (в диапазоне частот до 3-5 гармоники частоты вращения) машина колеблется как единое целое, поэтому нужны большие силы и большие дефекты, чтобы раскачать всю машину[24]. На средних частотах в любой точке контроля вибрация возбуждается, в основном, колебательными силами, действующими в

ближайших к ней узлах машины. В спектре вибрации наблюдается большое количество гармонических составляющих разной частоты, но из-за многочисленных резонансов соотношения амплитуд этих составляющих сильно отличаются от соотношений величин возбуждающих их колебательных сил. Как следствие - искажения информации о дефектах - источниках этих колебательных сил и отсутствие повторяемости результатов при малейшем изменении частоты вращения машины. На высоких частотах вибрация приобретает волновой характер, в спектре мало линий, мало (на первый взгляд) информации, но для возбуждения вибрации достаточно даже малых сил [25]. По вибрации обнаруживаются практически все дефекты электрических машин, кроме дефектов электрической изоляции. Последние могут быть обнаружены лишь после того момента, когда через поврежденное место потечет ток. Жизненный цикл роторного оборудования можно представить в виде рисунка 1.6

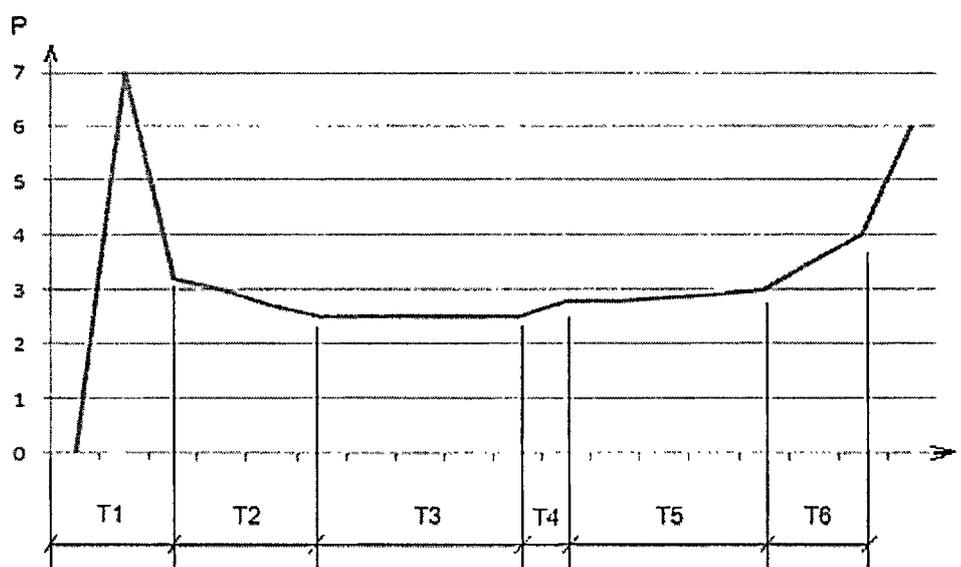


Рисунок 1.6 Жизненный цикл роторного оборудования

где, T_1 – Пуск оборудования; T_2 – Приработка; T_3 – Бездефектная работа; T_4 – Зарождение дефекта; T_5 – Развитие дефекта; T_6 – Зарождение второго дефекта и так далее до поломки или останова на ремонт.

Исследуя виды дефектов роторного оборудования, получена классификация, представленная в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Классификация дефектов роторного оборудования

Дефекты подшипников качения:	Дефекты подшипников скольжения:	Дефекты вала ротора:	Дефекты рабочих колес насосов, турбин, вентиляторов и компрессоров:	Дефекты электромагнитной системы асинхронного двигателя:
Дефект смазки	Дефект смазки	-	-	-
Раковины, сколы на телех качения	Удары в подшипнике	-	-	-
Дефекты тел качения и сепаратора	-	-	-	-
Обкатывание наружного кольца	Перекас подшипника	Неуравновешенность ротора	Неуравновешенность в рабочем колеса	Дефекты обмоток (большой клетки) ротора
Неравномерный радиальный нагиб	Износ подшипника	Бой вала (муфты)	Бой рабочего колеса	Дефекты обмоток статора
Перекас наружного кольца		Автоколебания вала (ротора)	Дефекты узлов крепления	Статический эксцентриситет воздушного зазора между ротором и статором.
Износ наружного кольца		Дефекты узлов крепления	Дефекты лопастей	Несимметрия напряжения питания
Раковины на наружном кольце		Дефекты соединительных муфт	Автоколебания рабочего колеса	Нелинейные искажения напряжения питания
Износ внутреннего кольца			Неоднородность потока	
Раковины на внутреннем кольце			Кавитация	
Износ тел качения и сепаратора				
Сложный дефект				
Прекращение работы кольца				

Вибрация является источником помех в системах автоматического регулирования, вызывает появление уводящих моментов, но так, же большое влияние на работоспособность электрического роторного оборудования оказывает и качество электрической энергии.

[35] устанавливает показатели и нормы качества электрической энергии (КЭ) в электрических сетях систем электроснабжения общего назначения переменного трехфазного и однофазного тока частотой 50 Гц в точках, к которым присоединяются электрические сети, находящиеся в собственности различных потребителей электрической энергии, или приемники электрической энергии (точки общего присоединения). Ухудшение КЭ, или, другими словами, повышение уровня электромагнитных помех в системе электроснабжения, обусловлено технологическим процессом производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии, т.е. процессом ее функционирования. Показателями КЭ являются [35]: установившееся отклонение напряжения δU_y ; размах изменения напряжения δU_i ; доза фликера P_i ; коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_U ; коэффициент n -ой гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$; коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} ; коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} ; отклонение частоты Δf ; длительность провала напряжения $\Delta t_{п}$; импульсное напряжение $U_{имп}$; коэффициент временного перенапряжения $K_{пер U}$. Ухудшение качества электроэнергии может привести к нарушению электромагнитной совместимости и, следовательно, к ряду отрицательных последствий или ущербу для отдельных видов электроприемников. Известно, что на работе двигателей отрицательно сказывается несимметрия напряжений. Можно выделить случай нанесения прямого ущерба вследствие порчи технологического оборудования и получения при этом бракованной продукции из-за электроэнергии плохого качества. Электромагнитная

обстановка, создаваемая некоторыми наиболее интенсивными источниками помех, приведена на рисунке. 1.7.

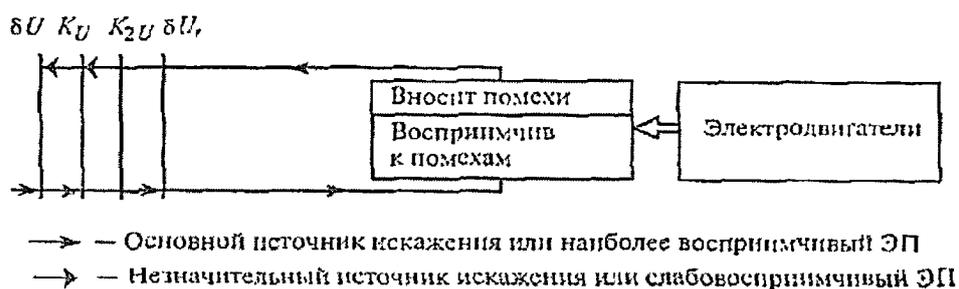


Рисунок 1.7 – Электромагнитная обстановка, создаваемая некоторыми источниками помех

Четыре вертикальные линии – источники помех, каждая из которых может рассматриваться как канал, по которому кондуктивные помехи, проникают в сеть и распространяются по ней.

Отклонение частоты [35] нормально допустимое и предельно допустимое составляет $\pm 0,2$ и $\pm 0,4$ Гц соответственно. Причиной отклонения частоты является изменение баланса активной мощности. Наиболее чувствительны к отклонениям частоты вращающиеся машины. Доля асинхронных двигателей (АД) от всей нагрузки энергосистемы составляет примерно 60 %. Снижение частоты приводит к снижению скорости вращения АД, являющегося приводом производственных механизмов, что способствует технологическому ущербу.

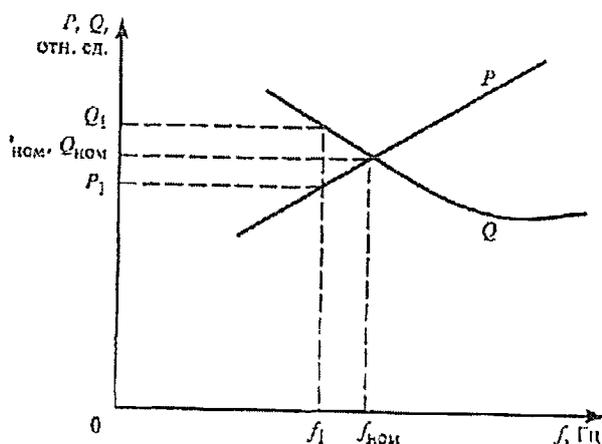


Рисунок 1.8 – Статические характеристики асинхронного двигателя по частоте

где P , Q – активная и реактивная мощности кВт, кВар, f – частота, Гц. При снижении частоты снижается сопротивление АД и возрастает потребляемый им ток, что приводит к дополнительному нагреву статора и ротора и, как следствие, к электротехническому ущербу, обусловленному сокращением срока службы АД за счет ускоренного износа его изоляции при повышенной температуре. При снижении частоты возрастает и потребляемая реактивная мощность. На рисунке 1.8 приведены обобщенные статические характеристики асинхронной нагрузки. Увеличение потребляемой реактивной мощности способствует увеличению потерь электроэнергии в линиях электропередачи и трансформаторах, что также приводит к электротехническому ущербу.

Отклонение напряжения согласно [35] на зажимах ЭП устанавливает нормально и предельно допустимое установившееся отклонение напряжения $\delta U_y = \pm 5\%$ и предельное $\pm 10\%$ номинального напряжения сети. В точках общего присоединения к сетям напряжением 380 В и выше отклонение напряжения рассчитывается с учетом потерь напряжения в сети и необходимости обеспечить допустимые отклонения напряжения на зажимах электроприемников в режимах наибольшей и наименьшей суточной нагрузки потребителя. Положительные отклонения напряжения приводят к снижению потерь напряжения и увеличению потерь мощности в сетях, увеличению производительности механизмов с асинхронным приводом. Однако срок службы оборудования сокращается. Отрицательные отклонения напряжения, главным образом, сказываются на снижении производительности, увеличении потерь напряжения и снижении потерь мощности. Для оценки ущерба от отклонений напряжения используют экономические характеристики, отражающие зависимость этого ущерба от значения напряжения на выводах электроприемника.

Влияние отклонений напряжения на потребляемую электроприемниками мощность характеризуют статическими характеристиками по

напряжению. На рисунке 1.9 представлены обобщенные статические характеристики комплексной нагрузки по напряжению. Эти зависимости в общем случае нелинейные. При малых отклонениях напряжения их можно представлять в виде линейных зависимостей. Вид статической характеристики по напряжению характеризует регулирующий эффект нагрузки. Регулирующим эффектом нагрузки называют изменение потребляемой активной и реактивной мощности нагрузки в процентах при изменении напряжения на 1 %.

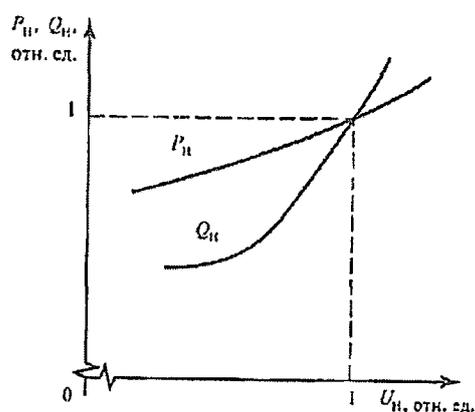


Рисунок 1.9 – Обобщенные статические характеристики комплексной нагрузки по напряжению

где P , Q – активная и реактивная мощности, U – напряжение.

При снижении напряжения на нагрузке, как следует из статических характеристик, регулирующий эффект нагрузки способствует поддержанию напряжения на приемном конце линии, т.е. на нагрузке, из-за снижения потребляемой мощности и, следовательно, потерь напряжения в линии. В этом заключается положительный регулирующий эффект нагрузки. В отличие от этого конденсаторная батарея, особенно нерегулируемая, обладает отрицательным регулирующим эффектом. При снижении напряжения на ее вводе снижается и генерируемая реактивная мощность. Это способствует увеличению реактивной мощности передаваемой по линии, и, следовательно, увеличению потерь напряжения в линии и снижению их на нагрузке.

Известно, что при снижении напряжения на зажимах двигателя на 15% номинального его электромагнитный момент снижается до 72 % номинального, При уменьшении напряжения увеличивается его скольжение и снижается скорость вращения. При увеличении скольжения возрастает ток, что приводит к дополнительному нагреву АД. При длительном режиме работы при $U = 0,9 U_{\text{ном}}$ срок службы АД сокращается вдвое (электротехнический ущерб). Повышение напряжения приводит к увеличению потребляемой реактивной мощности и соответствующим потерям в распределительной сети. В среднем при повышении напряжения на 1 % потребляемая реактивная мощность (регулирующий эффект) возрастает на 3 % для АД мощностью 20—100 кВт и на 5—7 % для АД меньшей мощности.

Колебания напряжения в сетях возникают, главным образом, при работе резкопеременных нагрузок: управляемых тиристорных преобразователей с широким диапазоном и большой скоростью регулирования напряжения, ДСП, мощных сварочных агрегатов и т.п.

Колебания амплитуды и фазы напряжения, возникающие при работе прокатных станов, вызывают колебания электромагнитного момента, активной и реактивной мощностей синхронных генераторов блок-станций предприятий, что отрицательно сказывается на экономичности работы ТЭС в целом. Известны случаи неустойчивой работы системы автоматического регулирования возбуждения и реактивной мощности синхронных генераторов и двигателей и даже ложной работы форсировки возбуждения. Колебания амплитуды и в большей мере фазы напряжения вызывают вибрации электродвигателей, механических конструкций, трубопроводной арматуры. В последнем случае снижается усталостная прочность металла, сокращается срок его службы. Так, при размахах изменения напряжения с частотой примерно 1 Гц, в 2 раза превышающих допустимые согласно [35], срок службы трубопроводов вследствие пульсаций напора насоса сокращается на 5—7 %.

Несинусоидальность напряжения влияет на все виды электроприемников. Вызвано это не только тепловым дополнительным нагревом электроприемников от высших гармоник тока, но и тем, что высшие гармоники образуют составляющие прямой последовательности (1, 4, 7-я и т.д.), обратной последовательности (2, 5, 8-я и т.д.) и нулевой последовательности (гармоники кратные трем). Эти последовательности различаются порядком чередования фаз напряжения (тока), чем и вызвано различие в их влиянии на работу электроприемников.

До 10% всех аварий АД имеют механическое происхождение. При этом 8% приходится на долю аварий, связанных с асимметрией фаз и только 2% на аварии, связанные с механическим перегрузом. Доля аварий, связанных с браком мала и, поэтому, ее можно не принимать во внимание в настоящем рассмотрении. Оценка вероятностей возникновения механических аварий отсутствует, большая их часть, носит скрытый характер и выявляется только после соответствующих испытаний или разборки двигателя, однако, постоянный контроль сетевого напряжения и нагрузки на валу АД позволяет, в большинстве случаев, свести эту вероятность к минимуму.

Работа АД всегда сопровождается его нагревом, что обусловлено происходящими в нем процессами и потерями энергии. Нормативный срок службы электродвигателя определяется, в конечном счете, допустимой температурой нагрева его изоляции. В современных двигателях применяется несколько классов изоляции, допустимая температура нагрева которых составляет для класса А – 105°C, Е – 120°C, В – 130°C, F – 155°C, Н – 180°C, С выше 180°C. Превышение допустимой температуры ведет к преждевременному разрушению изоляции и существенному сокращению срока его службы. Если машина работает в продолжительном режиме, но с переменной нагрузкой (P1, P2, P3...), имеет место неустановившийся тепловой процесс (см. рисунок 1.10), т. к. в разные промежутки времени: t_1 ,

t_2 , t_3 , t_4 и т. д. в ней возникают различные потери мощности, а следовательно, различные тепловые потери. В эксплуатации, в основном, приходится сталкиваться с режимами, ненормированными гостами. Наиболее характерным является режим с быстроизменяющейся нагрузкой, когда двигатель периодически входит в режим перегрузки, возвращаясь затем на номинальный режим или опускаясь в режим работы с нагрузкой меньше номинальной.

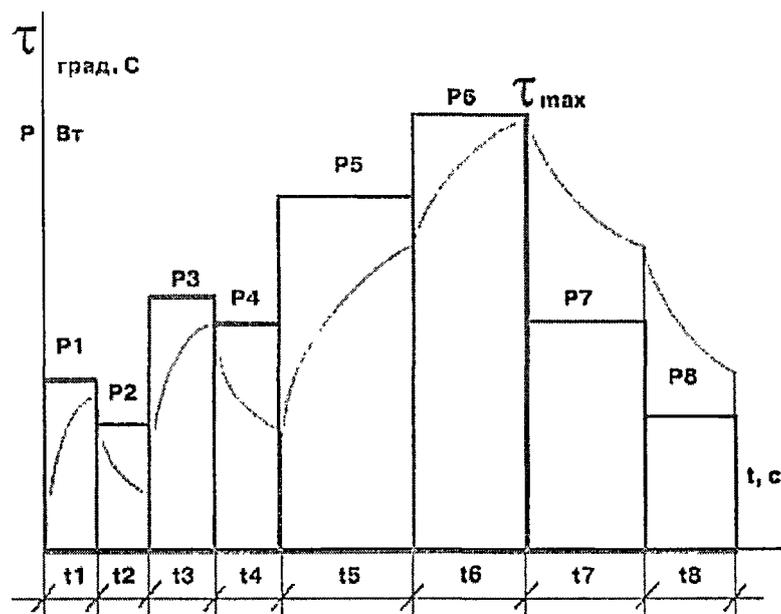


Рисунок 1.10 – Кривая изменения температуры двигателя при изменяющейся нагрузке

Составляющие потерь [21, 49-50] электроэнергии классифицируются следующим образом: **номинальные потери**, зависящие только от паспортных данных и параметров самих элементов; **эксплуатационные потери**, обусловленные режимами работы источника питания и электроприемников, качеством электроэнергии, схемой электроснабжения, а также отклонениями технологического процесса от оптимального режима. В процессе эксплуатации АД его изоляция неизбежно «старееет». Основными причинами, вызывающими эти процессы являются: нагревание обмоток рабочими и пусковыми токами, токами короткого замыкания и перегруза, теплотой от посторонних источников; динамическими усилиями, возникающими при взаимодействии проводников с током,

коммутационными перенапряжениями. На состояние изоляции большое влияние оказывают также условия окружающей среды – температура и влажность воздуха, загрязненность и запыленность. Состояние изоляции определяет степень безопасной эксплуатации электроустановок. При снижении сопротивления изоляции высока вероятность появления такой тяжелой аварии АД, как пробой обмотки статора на корпус (короткое замыкание на корпус), опасной не только для самого электродвигателя, но и для обслуживающего персонала. По сети начинают протекать токи короткого замыкания в 10-100 раз превышающие номинальные, а на корпус электроустановки может быть вынесено высокое напряжение, опасное для жизни человека. Не менее важным является непрерывный контроль сопротивления изоляции обмоток статора во время работы электродвигателя, т. к. диэлектрические свойства изоляции, измеренные до включения АД, могут внезапно измениться под воздействием электрического напряжения и температуры. Переход системы технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) от планово-предупредительных ремонтов (ППР) к ТО и Р по текущему (фактическому) техническому состоянию оборудования базируется на методах и средствах вибрационного мониторинга и диагностики [2-9]. Возрастающая стоимость энергоносителей диктует создание нового высокоэффективного оборудования. Одним из способов снижения эксплуатационных затрат работающего роторного оборудования является внедрение эффективных способов контроля и управления энергопотреблением, в основу которого закладываются современные информационно-измерительные системы. Энергосберегающие мероприятия выражаются поддержанием оптимального уровня расхода электрической энергии, а так же снижении количества потерь электрической энергии в реальном масштабе времени, при возникновении неисправных режимов работы роторного оборудования.

1.1 Анализ методов диагностики и мониторинга роторного оборудования

Неразрушающий контроль (диагностика) [1, 4] – это регулярная проверка прочности деталей и оборудования, которые требуют особой надежности. Он используется при строительстве крупных объектов, при эксплуатации важных производственных объектов в таких сферах, как машиностроение, энергетика, металлургия и других. В процедуру неразрушающего контроля входит описание всех основных параметров и мероприятий, которые следует соблюдать при использовании техники неразрушающего контроля для решения конкретной задачи в соответствии с установленными стандартом, нормами или техническими условиями. Процедура неразрушающего контроля может влечь применение более чем одного метода неразрушающего контроля или техники. К средствам неразрушающего контроля относят контрольно-измерительную аппаратуру, в которой используют проникающие поля, излучения и вещества для получения информации о качестве исследуемых материалов и объектов.

Наиболее распространенными в настоящее время являются следующие методы неразрушающего контроля.

Виброакустический неразрушающий контроль (диагностика) [2,18] – основан на взаимодействии силы трения, возбуждаемая ими высокочастотная вибрация, в исправных механизмах представляет собой случайные процессы с постоянной за время измерения мощностью. При возникновении дефектов появляется периодическое изменение мощности этих процессов, т.е. появляется амплитудная модуляция сил трения и высокочастотной вибрации. Виброакустический неразрушающий контроль рассчитан на обнаружение зарождающихся дефектов в элементах и узлах машин и оборудования. Обнаруживаемые дефекты по характеру влияния на вибрацию и шум объекта диагностирования могут быть разделены на три

основные группы. К первой относятся дефекты, появление которых изменяет характеристики колебательных сил, являющихся причиной возникновения вибрации и шума. Во вторую группу объединяются дефекты, которые не меняют характеристики колебательных сил, а изменяют механические свойства узлов, в которых они действуют. К третьей группе относятся дефекты, приводящие к изменению механических свойств узлов и конструкции, по которым распространяется вибрация.

Методы функциональной диагностики позволяют эффективно обнаруживать дефекты первой группы. Методы тестовой диагностики эффективнее всего работают при поиске дефектов третьей группы. Дефекты второй группы могут обнаруживаться методами как функциональной, так и тестовой диагностики. Если же дефекты имеют свойства первой и второй групп, то для их обнаружения, как правило, следует использовать методы функциональной диагностики. И, наконец, дефекты всех трех групп на последних этапах своего развития оказывают существенное влияние на сигналы вибрации и (или) шума и поэтому могут быть обнаружены до момента возникновения аварийной ситуации системами мониторинга виброакустического состояния машин и оборудования.

Радиоволновый метод неразрушающего контроля [4] – основан на регистрации изменений параметров электромагнитных волн радиодиапазона, взаимодействующих с объектом контроля. Обычно используются волны сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона с длиной от 1мм до 100 мм.

Тепловой метод неразрушающего контроля [4] – основан на регистрации изменений тепловых или температурных полей контролируемых объектов. Он применим к объектам из любых материалов.

Оптический метод неразрушающего контроля [4] – основан на наблюдении или регистрации параметров оптического излучения, взаимодействующего с контролируемым объектом.

Радиационный метод неразрушающего контроля [4] – основан на регистрации и анализе проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия его с объектом контроля. В зависимости от природы ионизирующего излучения вид контроля подразделяют на подвиды: рентгеновский, гамма-, бета- (поток электронов), нейтронный.

Акустический метод неразрушающего контроля [3, 4] – основан на регистрации параметров упругих волн, возникающих или возбуждаемых в объекте. Чаще всего используют упругие волны ультразвукового диапазона (с частотой колебаний выше 20 кГц). Этот метод также называют ультразвуковым. Акустические свойства твердых материалов и воздуха настолько сильно отличаются, что акустические волны отражаются от тончайших зазоров (трещин, непроваров) шириной 10^{-6} ... 10^{-4} мм. Этот вид контроля применим ко всем материалам, достаточно хорошо проводящим акустические волны: металлам, пластмассам, керамике, бетону и т.д. Колебания в исследуемый объект вводятся в импульсном или непрерывном режимах с помощью пьезоэлектрического преобразователя сухим контактным, контактным через жидкую среду или бесконтактным способом через воздушный зазор с помощью электромагнитно-акустического преобразователя [4]. С помощью акустических методов измеряют толщины стенок изделий, выявляют разнообразные дефекты и неоднородности структуры, определяют геометрические характеристики изделий. Эти методы имеют следующие недостатки: необходимость акустического контакта преобразователя с объектом контроля, повышенные требования к чистоте поверхности изделия, влияние сторонних шумов на результаты измерений, воздействие температуры изделия и другие.

Неразрушающий контроль методом проникающих веществ – основан на явлении капиллярного проникновения хорошо смачивающих пробных веществ (жидкости) в полость дефектов объема контроля. Его делят на методы капиллярные и течеискания [4].

Электрический, магнитный и вихретоковый неразрушающий контроль – объединены в электромагнитный неразрушающий контроль. Эти методы основаны на регистрации взаимодействия электрических, магнитных и электромагнитных полей с объектами контроля либо на измерении электрических и магнитных характеристик объектов контроля [4].

Магнитный неразрушающий контроль – основан на анализе взаимодействия магнитного поля с контролируемым объектом. Как правило, его применяют для контроля объектов из ферромагнитных материалов [4].

Электрический неразрушающий контроль – основан на регистрации параметров электрического поля, взаимодействующего с контролируемым объектом (собственно электрический метод), или поля, возникающего в контролируемом объекте в результате внешнего воздействия (термоэлектрический метод). Его применяется для контроля диэлектрических и проводящих материалов [4].

Вихретоковый неразрушающий контроль – основан на анализе взаимодействия электромагнитного поля вихретокового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте. В этом методе используется эффект воздействия вихревых токов, возбуждаемых в проводящем образце, на электрические параметры преобразователя. Его применяют только для контроля изделий из электропроводящих материалов [4].

1.2. Анализ систем диагностирования промышленных энергоустановок

Структура измерительных каналов автоматизированных рабочих мест исследователя ведущего диагностику выглядели, так, как показано на рисунке 1.11

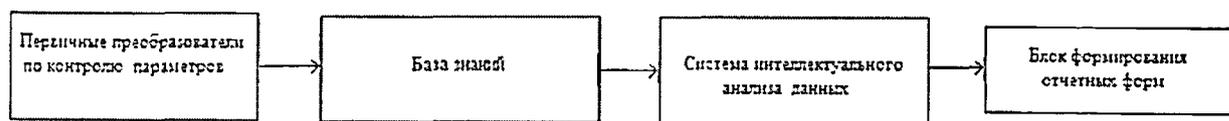


Рисунок 1.11 – Структура канала диагностики и контроля [19]

В настоящее время существует множество производителей систем диагностирования промышленных энергоустановок. Рассмотрим основные из них.

Аппаратура «Вибробит 300» предназначена для непрерывного стационарного измерения, контроля, мониторинга, параметров механического состояния паровых и газовых турбин, турбокомпрессоров, центробежных насосов и других машин, смонтированных на подшипниках, во время их эксплуатации.

Аппаратура выполняет измерение следующих параметров: среднее квадратическое значение (СКЗ) виброскорости опор подшипников, относительное виброперемещение вращающихся валов и других узлов; относительное смещение вращающихся валов; относительное смещение корпусов подшипников; положение запорных и регулирующих органов; число оборотов ротора; наклон опор цилиндров, деталей и узлов; другие технологические параметры, представленные унифицированными сигналами постоянного тока; преобразование измеренных значений параметров в унифицированные сигналы постоянного тока. Расчет дополнительных параметров в реальном масштабе времени: гармонических составляющих вибрации, оборотной составляющей вибрации и ее фазы, двойной оборотной составляющей вибрации и ее фазы, низкочастотной вибрации, высокочастотной вибрации, скачков значений параметров, коэффициента амплитуды вибрации. Сравнение параметров с уставками и сигнализация их превышения. Формирование для штатной системы сигнализации и защиты релейных сигналов; передача по запросу, по цифровому интерфейсу, измеренных и рассчитанных параметров на персональный компьютер.

Производственно - внедренческая фирма "Вибро-Центр", научно - производственное предприятие "РОС" производит экспертную систему оперативной диагностики состояния и планирования ремонтов вращающегося оборудования по текущему техническому состоянию "Аврора 2000". Система предназначена для использования эксплуатационным и ремонтным персоналом в следующих целях: контроль текущего технического состояния роторного (вращающегося) оборудования с отслеживанием динамики развития неисправностей; определение возможности дальнейшей эксплуатации оборудования без ремонта; подготовка информации о необходимых регламентных и ремонтных работах, их объеме и сроках проведения. Основой для определения текущего состояния оборудования являются измерения СКЗ (среднеквадратичного значения) виброскорости (мм/сек) в диапазоне от 10 до 1000 Гц в трех направлениях - "Вертикальном", "Поперечном" ("Горизонтальном") и "Осевом". Для нормального функционирования системы необходимо наличие виброметров с автономным питанием для измерения СКЗ виброскорости в (мм/сек) – например, виброметр с памятью типа «Корсар»; персонального компьютера стандартной конфигурации. Позволяет контролировать состояние любого вращающегося оборудования за исключением низкооборотного оборудования с частотой вращения менее 600 об/мин, что обусловлено не недостатками программы, а техническими возможностями широко применяемых датчиков вибрации и нормированным диапазоном для СКЗ виброскорости, с 10 до 1000 Герц.

ООО «Диамех» производит прибор - «АГАТ-М», который представляет собой двухканальный портативный автономный виброизмерительный прибор. Он позволяет проводить измерения следующих вибрационных характеристик: общего уровня вибрации, амплитуды/фазы первой гармонической составляющей оборотной частоты; выполнять спектральный анализ вибросигналов и их форм; проводить 1/3

октавный анализ с расчетом мощностей вибрации в 33 стандартных частотных полосах. Имеется возможность диагностики подшипников качения с использованием измерений пик-фактора и анализа спектра и формы огибающей вибросигнала, а также возможность проведения экспресс-диагностики состояния подшипников качения (определение наличия дефектов элементов подшипника, износа и монтажа подшипника). Прибор позволяет получить одно и двухканальные характеристики (разгон/выбег) по первой гармонической составляющей оборотной частоты, а также временные характеристики общего уровня, амплитуды/фазы и пик-фактора. Прибор позволяет выполнять балансировку роторов с использованием до 2-х плоскостей коррекции и до 4-х измерительных точек.

Исследования [11] показали, что экспертная система диагностики СИ должна представлять собой, комплексную систему текущего мониторинга технического состояния приборного парка предприятия. Структура системы представлена на рисунке 1.12 (здесь, информационно-измерительная система – это система приборного оформления каждого производственного участка). Система состоит из трех следующих видов обеспечений: информационное, программное и техническое обеспечение. Информационное обеспечение представляет собой базу экспериментальных данных и базу технических характеристик. База экспериментальных данных содержит информацию об основных показателях приборов. Эта информация может вводиться в базу экспериментальных данных как в ручном режиме посредством системы управления базой данных (СУБД), так и в автоматизированном посредством средств измерений (СИ). База экспериментальных данных представляет большую ценность, так как на основе ее информации могут быть получены эмпирические модели, связывающие показатели условий эксплуатации приборного парка и его технические характеристики. Совокупность этих двух баз данных образуют базу знаний системы. Программное обеспечение включает в себя следующие функционально законченные элементы

экспертной системы: систему управления базой экспериментальных данных: обеспечивает добавление, редактирование, удаление и поиск информации в базе экспериментальных данных; систему интеллектуального анализа данных.

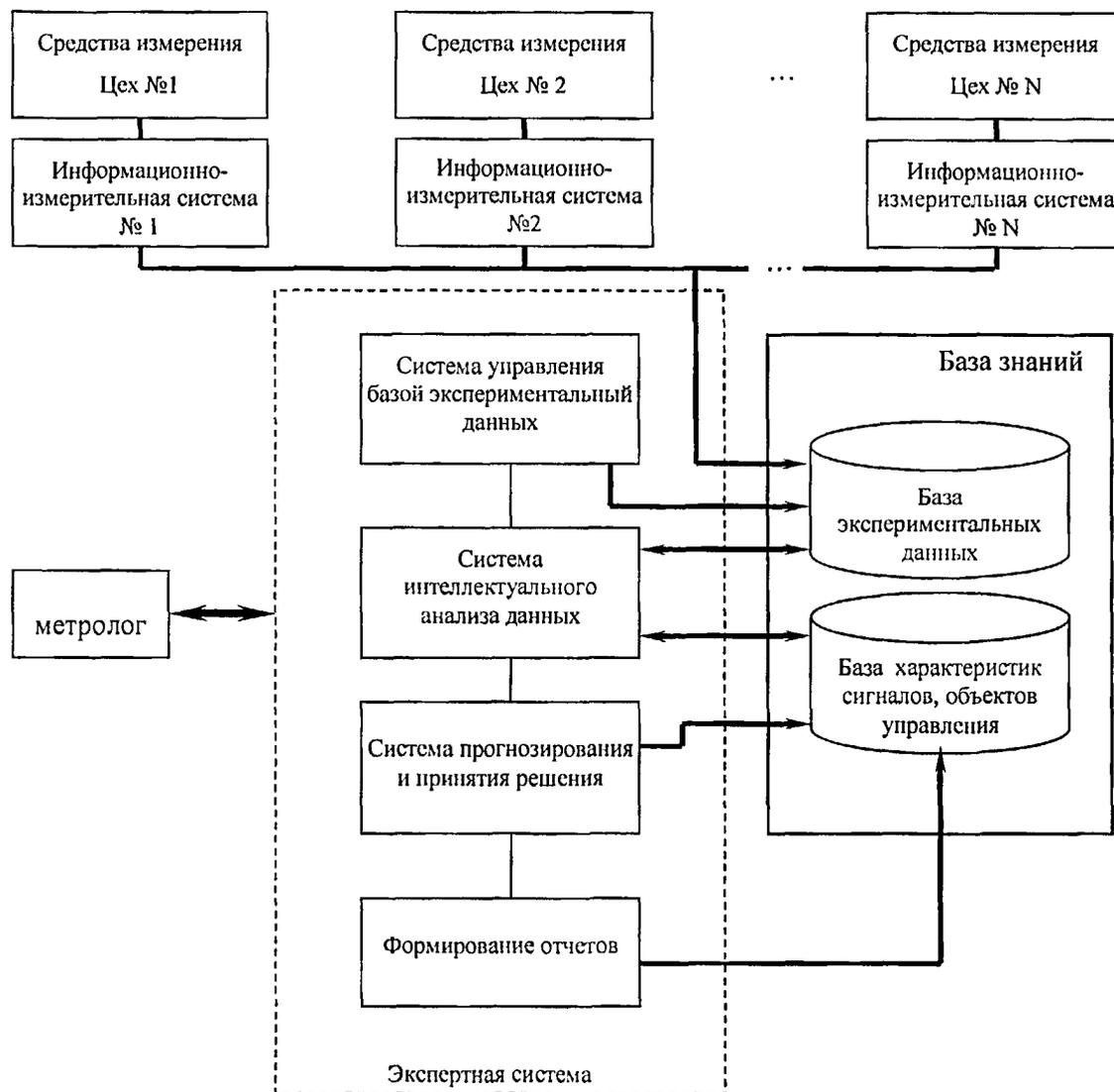


Рисунок 1.12 – Структурная схема автоматизированного рабочего места метролога [11].

Система интеллектуального анализа данных: обеспечивает построение эмпирических моделей на основе базы экспериментальных данных и ведение базы технических характеристик; систему прогнозирования и принятия решений: обеспечивает решение на основе базы технических характеристик различных задач диагностики; систему формирования выходных

документов: обеспечивает формирование на основе базы знаний отчетной документации. Управление комплексной системой осуществляется при помощи автоматизированного рабочего места метролога (АРМ).

Система визуализации базы технических характеристик приборного парка представляет собой отображение текущего состояния приборов закрепленных на оборудовании и предоставляет для работы оператора механизмы взаимодействия с СУБД базы технических характеристик. Оператор начинает работу с главного меню. Главное меню позволяет оперативно выбрать задачу, а именно: учет средств измерений, просмотр позиций, проведение диагностики через мнемосхемы производства, формирование и управление графиками поверки, работа с кодификаторами, справочниками или нормативными документами.

Рассмотрим ряд систем, решающие задачи автоматического контроля состояния оборудования.

Система автоматизированного проектирования управляющих систем (Light SCADA). Система разработана предприятием ООО "Метрология и автоматизация" и имеет следующие возможности: сбор данных с разнообразных измерительных устройств (датчики давления, температуры, уровня жидкости и пр.); приборы технологического и коммерческого учёта газа, жидкостей, электроэнергии; поддержка протоколов обмена OPC и DD; ведение базы данных измерений; обеспечение доступа пользователей к текущей и архивной информации; отображение текущих параметров на технологической схеме; построение графиков; создание отчётов; использование Интернет для доступа к информации, а также для передачи управляющих команд (при наличии прав пользователя); использование беспроводной связи (WAP и GPRS) для связи с удалёнными измерительными приборами; удобный редактор для описания технологического процесса. Структурная схема применения системы LSCADA представлена на рисунке 1.13. В настоящий момент система Light

SCADA успешно внедрена на ряде промышленных предприятий Самарской области и в жилищно-коммунальном хозяйстве [11].

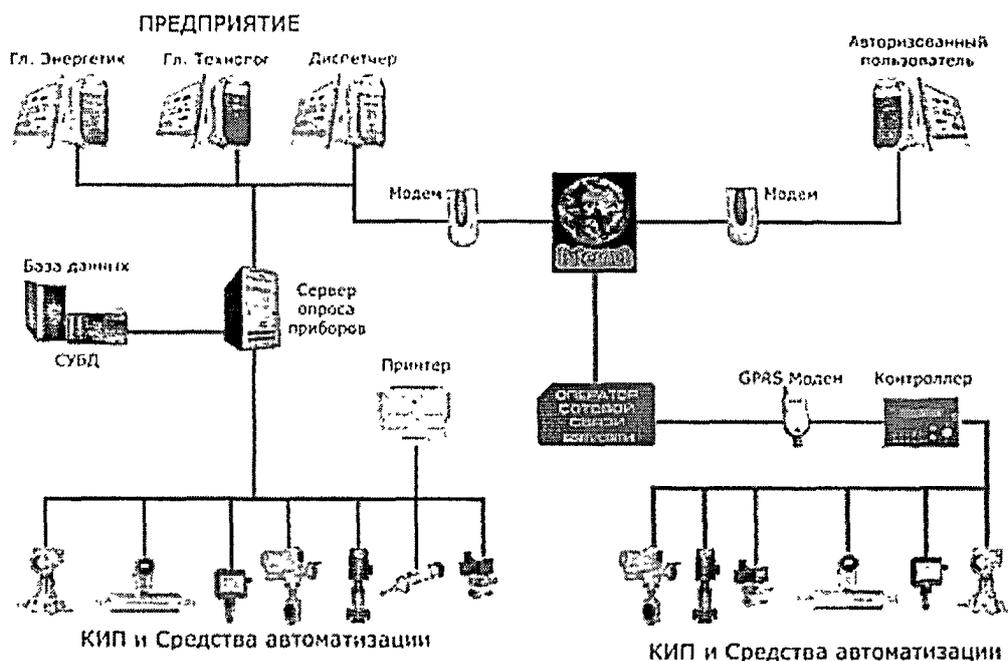


Рисунок 1.13 - Структурная схема системы LSCADA

Основным недостатком системы является отсутствие подсистемы диагностики измерительных каналов.

Украинская SCADA система «КОНТУР» - это набор инструментальных средств и исполнительных модулей, предназначенных для создания автоматизированных рабочих мест операторов по наблюдению за состоянием технологического процесса и управлению им.

SCADA система КОНТУР разрабатывается уже около 9 лет и позиционирует себя как полнофункциональная SCADA система, ориентированная на современные технологии и стандарты, с открытой архитектурой. «Контур» обеспечивает: обмен данными с устройствами уровня технологического процесса (измерители и исполнительные механизмы), генерирование событий и сообщений о критических и аварийных состояниях технологических параметров, архивирование истории изменения параметров технологического процесса, создание графических мнемосхем для отображения текущих параметров технологического процесса, обработки аварийных событий, для отображения истории

изменения технологических параметров, динамическое отображение графических мнемосхем в рабочем режиме. «Контур» является универсальной SCADA системой и применима для любого производственного процесса и предприятия в целом, а также является отечественной разработкой, отличающейся от других подобных систем простотой, открытостью и надёжностью. Стоимость системы «Контур» ощутимо отличается от подобных продуктов (на 15-20% ниже). Система «Контур» внедрена и успешно работает на предприятиях химической, пищевой и энергетической отраслей. Система «Контур» может без труда обмениваться данными с любыми системами управления предприятием, что позволяет комплексно решать проблемы автоматизации и управления производством. Однако в ней нет подсистемы диагностики.

Автоматизированная система диспетчерского управления (АСДУ).

Оперативно-информационный комплекс и Автоматизированная система диспетчерского управления решает проблемы в области контроля и управления объектами. Мы предлагаем простой, надёжный и удобный инструмент контроля технологических параметров и оперативного интерактивного управления каждым исполнительным механизмом. Особенности системы это открытая архитектура системы обеспечивает практически неограниченные возможности по расширению и изменению системы. Автоматизация новых объектов контроля или оборудование дополнительных рабочих мест, изменение схемы связи или электрической схемы подстанции – все это не вызовет никаких затруднений.

К подсистемам верхнего уровня относятся программно-аппаратные комплексы диспетчерских пунктов промышленных предприятий, РЭС, ПЭС или областных электросетей. Подсистема верхнего уровня обеспечивает накопление, обработку и представление информации, получаемой с объектов контроля, а также обеспечивает пользовательский интерфейс для выдачи управляющих воздействий на объекты управления.

Базовыми аппаратными средствами подсистемы верхнего уровня являются IBM PC – совместимые ПЭВМ, объединенные в локальную вычислительную сеть. Верхний уровень системы включает в себя несколько АРМ, сервер (серверы) коммуникаций и базы данных. Программное обеспечение АРМ и серверов АСДУ представляет собой комплекс задач, реализованных на SCADA-системе MicroSCADA и работающих под управлением операционной системы Windows NT 4.0.

К подсистеме нижнего уровня относятся системы телемеханики объектов контроля и управления. Аппаратура подсистемы нижнего уровня осуществляет сбор, первичную обработку и передачу на верхний уровень информации с объектов контроля и управления, аппаратура работает в автоматическом режиме и не требует вмешательства технического персонала. Базовой системой нижнего уровня является универсальный контроллер RTU -560. В качестве каналов связи между подсистемами используются уплотненные и выделенные телефонные линии, радиоканалы, GSM-каналы, каналы ВЧ и спутниковой связи. Между подсистемами АСДУ верхнего уровня или между АСДУ и смежными системами используются сетевые протоколы TCP/IP. Между подсистемами нижнего уровня и верхним уровнем используются стандартные протоколы систем телемеханики.

Система осуществляет непрерывный автоматический контроль и анализ технологических параметров и состояния оборудования объектов контроля. При обнаружении нештатного функционирования или изменения состояния оборудования выдается соответствующее сообщение с возможностью немедленного перехода на источник тревоги. Непрерывный контроль и анализ ситуации позволяют быстро и эффективно предупреждать, обнаруживать и устранять неисправности на ранних стадиях их развития, еще до того, как они привели к необратимым или трагическим последствиям. Система обеспечивает управление любым исполнительным органом простым нажатием клавиши с каждого рабочего места АСДУ.

Принятый механизм выдачи команды и подтверждение правильности команды практически исключают возможность выдачи случайной или ошибочной команды. Вся информация, получаемая с объектов контроля, по действиям оператора и о возникновении аварийных или внештатных ситуаций, архивируется и заносится в журналы событий и сообщений. Анализ архивов и журналов позволяет оценить работу оборудования и электрических сетей, спрогнозировать их состояние или разобраться в причинах происшествия, предпринять меры для предупреждения возникновения нежелательных событий в будущем, но решает вопросов текущей диагностики каналов измерения [11].

ООО "РеалТехноСервис" представляет систему промышленной автоматизации и диспетчеризации ИНТЕК. Система ИНТЕК - отечественная разработка. Она позволяет автоматизировать большинство современных технологических процессов и обеспечивать мониторинг событий, включая действия оператора и реакцию автоматики. Система ИНТЕК полностью сертифицирована и может быть развернута на любом объекте, требующем диспетчерский контроль и автоматизацию производства. Более того, система сертифицирована как Измерительная Система Коммерческого учета энергоресурсов. Это означает, что все данные, полученные системой, могут быть использованы как основание для проведения взаиморасчетов с энергоснабжающими организациями. Однако система не позволяет осуществлять диагностику измерительных каналов.

1.2.1 Анализ технических средств диагностики

Проведенный обзор литературы в части существующих информационно – измерительных систем и приборов по диагностике и неразрушающему контролю роторного оборудования показал, что существуют отечественные и зарубежные производители систем и приборов по диагностике узлов роторного оборудования и ряд систем по расчету потерь электрической энергии в оборудовании которые представлены в таблицах 1.2 и 1.3.

Таблица 1.2 – Системы и приборы по диагностике роторного оборудования.

Описание системы	Наименование производителя	Город
Российские		
Экспертная система оперативной диагностики состояния и планирования ремонтов вращающегося оборудования по текущему техническому состоянию	Производственно-внедренческая фирма «Вибро-Центр»	г. Пермь.
Виброизмерительный прибор «Агат-М».	ООО «Диамех»	г. Москва
Устройство виброизмерительное портативное АДП-3101	ООО «Инкотес»	г. Нижний Новгород
Виброанализатор СД-12М	ООО «ВАСТ»	г. Санкт-Петербург
Виброизмерительная аппаратура	ООО НПП «Вибробит».	г. Ростов на дону
Зарубежные		
Системы производимые Bruel&Kjar –“Compas”, Bently Nevada и др.		

Таблица 1.3 – Системы по расчету потерь в оборудовании

Описание системы	Наименование производителя	Город
Российские		
Программа расчета и анализа потерь электроэнергии РАП-10-ст	ООО НТЦ "Сележ-электро"	г. Москва
Комплекс программ РТП-3	ОАО «НТЦ Электроэнергетики»	г. Москва
Программный комплекс Прогресс	ООО «Софт-электро»	г. Дубна
Зарубежные		
Rastr 2.30.1.1. используется преимущественно в странах СНГ и др.		

Разработаны низкочастотный индукционный вибропреобразователь [13], позволяющий регистрировать низкочастотные ударного типа виброизмерения, и управляющая и регистрирующая электронная схема, позволяющая проводить первичную статистическую обработку виброизмерений и оценку состояния обмотки статора генератора [13].

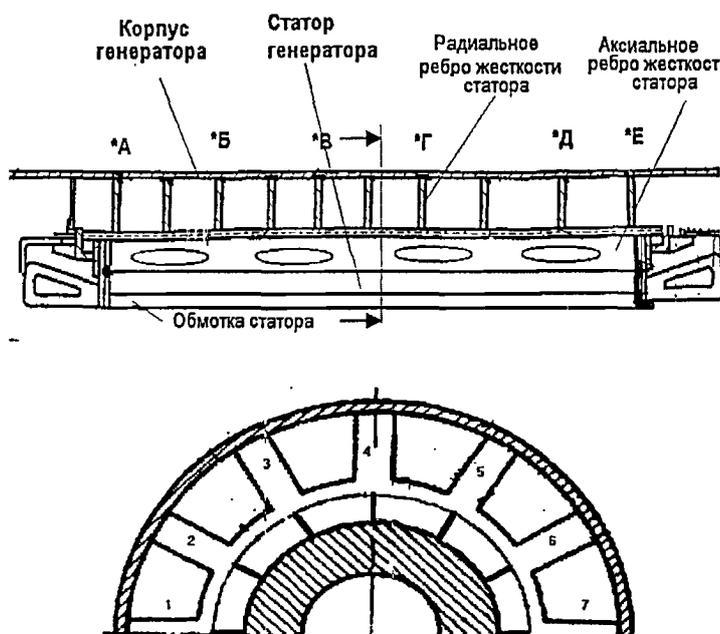


Рисунок 1.14 – Схема расчета и измерений вибрации корпуса турбогенераторов.

А – Е – обозначение точек расчета вибросмещения по образующей корпуса (аксиальные ребра жесткости корпуса генератора); 1 – 7 – номера образующих расчета (радиальные кольца жесткости) [13].

Патентов по автоматизированному рабочему месту, определяющему энергоэффективность роторного оборудования не обнаружено.

На основе проведенного обзора выявлено, что эффективность работы многих существующих систем зависит от точности измерений информативных параметров вибрации, параметров электрической сети и применяемого впоследствии алгоритма диагностирования. Но ни один из вышеназванных программных комплексов не учитывает в текущем времени последствия того или иного неисправного состояния роторного оборудования, приводящего к повышению расхода и потерь электрической энергии, тем самым теряется или расходуется нерационально до 30 % электрической энергии потребляемой роторным оборудованием.

1.3 Анализ методов определения эффективности работы оборудования

В технико-экономических показателях, характеризующих эффективность использования энергоресурсов, прежде всего, должна быть правильно отражена физическая суть процесса, которая так или иначе отражает фундаментальные законы природы: сохранения массы вещества и энергии. При исследовании любого процесса необходимо, чтобы полностью соблюдался баланс суммарной массы вещества и суммарной энергии системы [50]. Одним из методов определения эффективности работы оборудования или процесса является составление энергетического баланса, который отражает количественное соответствие между суммой подведенной и полезной энергией, необходимой для завершения технологической операции или процесса, а так же потерь, вызванных несовершенством

преобразования энергии и получения готовой продукции. В процессе поиска и оценки резервов энергосбережения балансовый метод анализа является ведущим. Сложность структуры и многообразие условий, которые следует учитывать, исключают жесткую регламентацию выбора способов и методов составления балансов. Общие требования к разработке и анализу энергобалансов промышленных предприятий, а так же организационные и методические основы составления и анализа энергетических балансов регламентируются [37]. Стандарт устанавливает основные понятия и общие положения, состав первичной информации, порядок организации разработки и анализа энергобалансов. Подчеркивается, что разработка и анализ энергетических балансов направлены на решение следующих задач управления: совершенствование системы учета и контроля энергоносителей; оценка фактической эффективности энергоиспользования на предприятии, выявление причин возникновения потерь топливно-энергетических ресурсов и определение их значений; выявление и оценка резервов экономии топлива и энергии; совершенствование нормирования и разработка научно обоснованных норм расхода топлива и энергии на производство продукции; определение рациональных размеров энергопотребления в производственных процессах (установках); разработка плана мероприятий, направленных на снижение потерь топливно-энергетических ресурсов за счет совершенствования организации, техники и технологии производства; стимулирование экономии топливно-энергетических ресурсов.

Энергетический баланс дает количественное выражение закона сохранения и превращения энергии для конкретного процесса (установки) или системы в конкретный период времени. Он является статической характеристикой, как правило, динамических процессов и объектов в тех или иных производственных системах. К динамическим относятся объекты способные реагировать на внешнее воздействие изменением своего внутреннего состояния и выходных величин, характеризующих его

состояние. И воздействие на объект и его реакция в общем случае изменяются с течением времени, они наблюдаемы, т. е. могут быть измерены соответствующими приборами. Объект имеет внутреннюю структуру, состоящую из взаимодействующих динамических элементов. Таким образом, применительно к роторному оборудованию появляющиеся дефекты это воздействие на объект. Реакцией оборудования, например, электрического двигателя будет изменение во времени параметров виброускорения, развитие дефектов приведет к возрастанию температуры и увеличенному потреблению электрической энергии. Основным свойством динамических объектов является их инерционность, т.е. объект не сразу, а постепенно реагирует на внешние воздействия, а при отсутствии внешнего воздействия стремится сохранить свое состояние и поведение. Кроме того, применительно к рабочим машинам перекачивающим жидкости и газы (насосам), динамические силы возникающие при вращении рабочего колеса в потоке, передаются на корпус машины, во первых через подшипники, а во вторых, через жидкость или газ, находящихся, прежде всего между торцевыми поверхностями лопастей и корпусом машины (направляющим аппаратом) [22].

Построение энергобалансов при разной производительности исследуемых процессов дает возможность построения их энергетической характеристики, отражающей зависимость потребления энергии от производительности системы. Следовательно, баланс может быть представлен энергетических характеристик, отражающих зависимость расхода (потребления) ресурсов от производительности агрегата. В зависимости от первичной информационной базы энергетические балансы получают расчетным, опытным или смешанным путем. При расчетном способе в основе составления баланса лежат соответствующие уравнения, выражающие функциональную зависимость между отдельными элементами расхода энергии и технологическими параметрами, производительностью

временем работы и другими аргументами процесса. Расчетный способ предполагает, что все расчеты выполняются на основе паспортных данных, нормализованных технологических условий и энергетических параметров, при соблюдении нормативов потерь энергии и норм времени. Опытный способ построения энергобаланса основан на данных, получаемых в процессе специально проводимых энерготехнологических балансовых испытаниях. При этом важно обеспечить такие условия испытаний, которые можно признать нормативными. При проведении испытаний измеряются параметры и расходы всех материально-энергетических потоков, как входящих, так и выходящих из установки. Точность конечных результатов испытаний зависит от класса точности измерительных приборов, правильности и частоты снятия показаний, поддержания установившегося режима, увеличением числа опытов. Смешанный способ предполагает сочетание расчетных и опытных способов получения энергобаланса. Достаточно часто постоянные потери холостого хода и пусковые расходы определяются опытным путем, а полезная энергия и переменные потери определяются расчетным путем. Второй приём можно назвать способом взаимной коррекции, который предполагает что отдельные статьи расчетного энергобаланса корректируются по данным испытаний. Возможен и другой путь, когда баланс полученный в результате экспресс испытаний корректируется путем расчета полезной составляющей и переменных потерь энергии. В отличие от расчетного и опытного способа смешанный способ составления энергобалансов универсален, обеспечивает достаточную точность результатов, поэтому широко применяется [48-50].

Каждый крупномасштабный аппарат должен работать в максимуме эффективности, если его работа не зависит от соседних аппаратов и узлов технологического процесса. На рисунке 1.16 представлено поле экспериментальных данных эффективности работы тепловой электростанции. Из рисунка видно, что максимальная эффективность

тепловой электростанции как суммы эффективностей работы котлоагрегата и турбогенератора совпадает с минимальной себестоимостью выработанной электроэнергии. Все кривые на рисунке 1.16. результат аппроксимации методом наименьших квадратов экспериментальных данных снятых на реальном технологическом процессе. При этом, критерий управления котлоагрегатом [19] – это уравнение измерения текущего значения эффективности работы котлоагрегата, которое имеет вид:

$$\mathcal{E}P_K(iT_S) = -0.025G_{Г}(iT_S)^2 + 2.961G_{Г}(iT_S) - 173.654 \quad (1.1)$$

за критерий управления турбоагрегатом принято уравнение измерения текущего значения эффективности работы турбогенератора, которое имеет вид:

$$\mathcal{E}P_T(iT_S) = 0.014G_{ПП}(iT_S)^2 + 3.385G_{ПП}(iT_S) - 201.975 \quad (1.2)$$

Критерий управления электростанцией - это уравнение измерения текущего значения технологической себестоимости электроэнергии энергоблока (см. рисунок 1.15) по топливу, X_C , которое имеет вид:

$$C_{ЭБ}(iT_S) = 0.0214G_{Г}(iT_S)^2 + 3.841G_{Г}(iT_S) - 190.021 \quad (1.3)$$

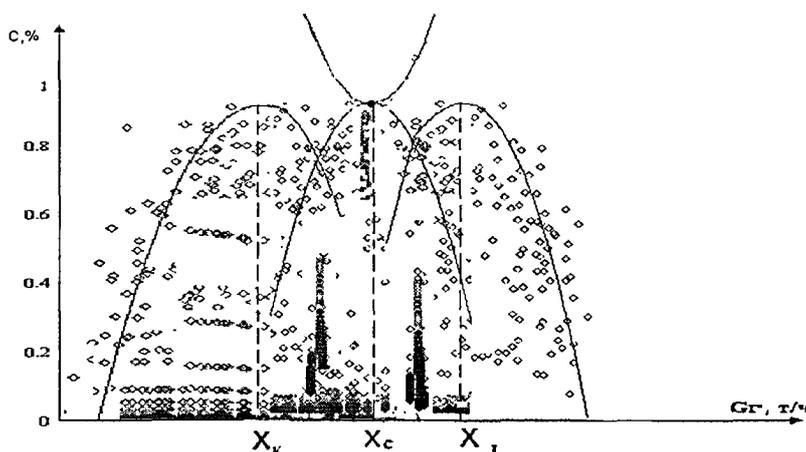


Рисунок 1.15 – Поле экспериментальных данных эффективности работы электростанции

Уравнения измерения эффективности работы отдельного оборудования электростанции [19], в виде экстремальных зависимостей,

позволяют перейти к оптимальному управлению тепловой электростанцией по критерию минимума себестоимости производимой электроэнергии. Аналогичные выводы можно сделать и по эффективности управления другим. При этом параметры математической модели легко идентифицируемы как по кривым разгона, так и по корреляционным функциям сигналов, поэтому автокорреляционную функцию, $Y(t)$, так же как и автокорреляционную функцию, $X(t)$ целесообразно выбирать то же экспонентами:

$$K_x(\tau) = \frac{\sigma_u^2 \cdot K_0^2}{2T_0} \cdot \exp(-\alpha\tau), \quad (1.4)$$

где α - постоянная корреляционной функции, равная обратной величине постоянной времени объекта T_0 ; K_0 - коэффициент передачи объекта, связывающий измеряемую величину с физико-химическими процессами, происходящими в ходе технологического процесса.

Таким образом, и математическая модель помехи может быть представлена случайным стационарным процессом с корреляционной функцией вида

$$K_n(\tau) = \sigma_n^2 \exp(-\alpha_1 \beta |\tau|), \quad (1.5)$$

где α_1 - величина, обратная постоянной времени корреляционной функции помехи, которая может быть интерпретирована как скорость изменения помехи, β - соотношение частотных свойств помехи и сигнала (быстродействие помехи), σ_n^2 - дисперсия помехи.

При этом дисперсия помехи связана с дисперсией измерительной информации соотношением $\sigma_n^2 = S \sigma_x^2$, где S - уровень помехи, а скорость изменения помехи связана со скоростью изменения измерительной информации соотношением $\alpha_1 = R \alpha$, где R - коэффициент пропорциональности, зависящий от физико-химических свойств веществ, участвующих в технологическом процессе, а также от конструктивных особенностей аппарата, в котором этот процесс протекает.

Проблемой является количественно обоснованный выбор критериев эффективности работы энергооборудования.

В виртуальных приборах за критерий управления целесообразно выбирать технологический коэффициент полезного действия, который измеряется и вычисляется виртуальным прибором как отношение обобщенного технологического параметра, характеризующего основные свойства объекта управления, к тому же параметру, вычисленному по математической модели объекта управления. Такие критерии представляют собой дробно-мультипликативные взаимодействия нескольких измеряемых сигналов [51] и поэтому могут быть применены для количественной оценки эффективности любой технической системы.

При этом за **критерий эффективности работы оборудования** может быть принято отношение текущего значения критерия управления измеренного на объекте $K_o(t)$ к текущему значению этого же критерия вычисленного по математической модели, $K_m(t)$:

$$\eta(t) = \frac{K_o(t)}{K_m(t)}, \quad (1.6)$$

Например [19], функциональная схема виртуального прибора для измерения текущих значений эффективности работы котлоагрегата представлена на рисунке 1.16.

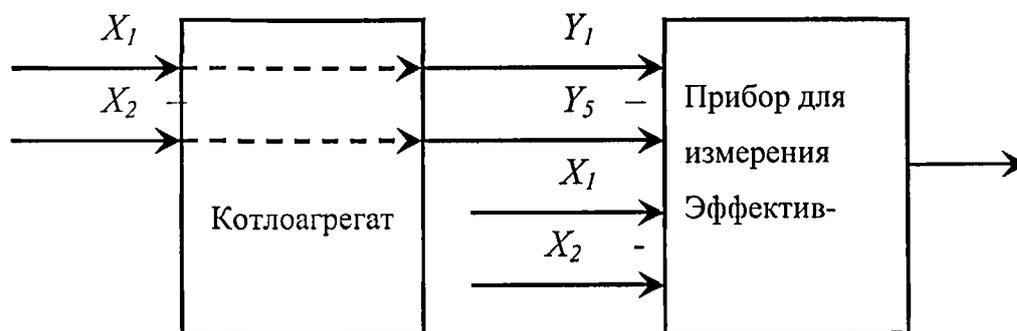


Рисунок 1.16 – Функциональная схема виртуального прибора

Эффективность работы котлоагрегата, при этом, рассчитывается виртуальным прибором, который представляет собой четырех канальную измерительную систему с уравнением измерения:

$$\Xi(t) = \frac{Y_1(t) \cdot Y_5(t) \cdot i(Y_6(t))}{\int_0^{T_y} X_1(t) \cdot h_{11}(t-\tau) \cdot d\tau \cdot \int_0^{T_y} X_2(t) \cdot h_{25}(t-\tau) \cdot d\tau \cdot i(Y_6(t))} \quad (1.7)$$

где: $X_1(t)$ – расход газовой смеси; $Y_1(t)$ – температура перегретого пара на выходе из котельного агрегата; $Y_5(t)$ – расход перегретого пара; $i(Y_6(t))$ – энтальпия (при текущем значении давления перегретого пара); $h_{11}(t)$ – импульсная переходная характеристика по каналу расход газа – температура перегретого пара; $h_{25}(t)$ – импульсная переходная характеристика по каналу расход воды – расход перегретого пара; $X_2(t)$ – расход питательной воды.

Таким образом, **виртуальный прибор** - это управляющая система выполняющая функции вторичного прибора. Наличие в измерительной системе вычислительной техники делает возможным не только хранение информации, но и применение алгоритмов идентификации, теории искусственного интеллекта, адаптации, а также алгоритмов обучения и организации структуры измерительной системы для обработки прямых измерений. Всё это придает процессу измерения признаки **интеллектуальной измерительной системы** [19]. Современные информационно-измерительные системы, наряду с классическими схемами обработки информации, такими, как аналоговая обработка информации, при которой весь процесс измерения производится с помощью аналоговых приборов, или цифровая обработка информации, которая имеет полностью цифровой тракт измерения, используют гибридные схемы обработки информации. Такие схемы обработки измерительной информации определяют класс интеллектуальных измерительных систем, метрология

которых представлена в монографии [68], а концепция автоматизированного проектирования рассматривается в настоящей работе. Основной особенностью проектирования таких систем [19] является представление управляющей системы как виртуального прибора представленной на рисунке 1.17, состоящего из контроллера, который снабжен программами первичной обработки измерительной информации и компьютера, который снабжен программами визуализации информации, считываемой из контроллера.

Таким образом, компьютер выполняет функции вторичного прибора в измерительной системе и не подлежит метрологической аттестации. Вся измерительная информация в контроллере обрабатывается стандартными вычислительными процедурами и по специальной консоли вся передается на вторичный прибор (компьютер), где обрабатывается специальными программными средствами визуализации.

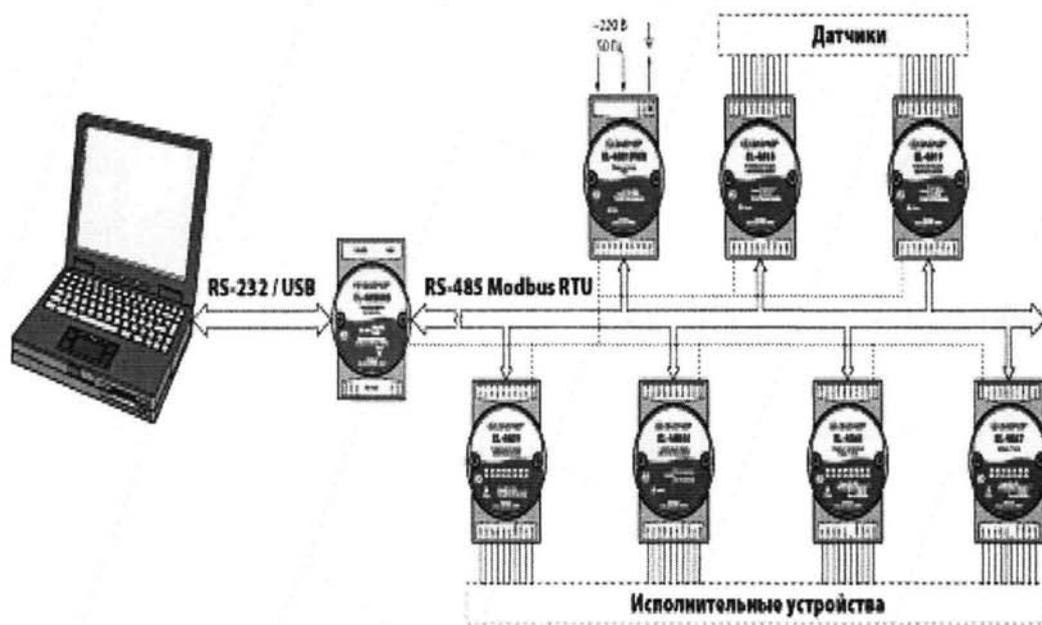


Рисунок 1.17 – Структурная схема виртуального прибора

Таким образом, виртуальный прибор - это управляющая система с высоко развитым программным обеспечением визуализации процессов измерения и управления. Традиционные вторичные приборы, такие как осциллографы, генераторы сигналов или цифровые приборы, как правило,

ориентированы на выполнение одной, в лучшем случае нескольких специфических задач, определяемых их разработчиком. Основой виртуального прибора является программное обеспечение, реализующее его функции. Наличие в измерительной системе вычислительной техники делает возможным не только хранение информации, но и применение алгоритмов идентификации, теории искусственного интеллекта, адаптации, а также алгоритмов обучения и организации структуры измерительной системы для обработки прямых измерений. Всё это придает процессу измерения признаки **интеллектуальной измерительной системы** [22]. Современные информационно-измерительные системы, наряду с классическими схемами обработки информации, такими, как аналоговая обработка информации, при которой весь процесс измерения производится с помощью аналоговых приборов, или цифровая обработка информации, которая имеет полностью цифровой тракт измерения, используют гибридные схемы обработки информации. **Основной особенностью** проектирования таких систем [22] является представление управляющей системы как виртуального прибора, измерительные каналы которого состоят из первичного преобразователя на основе микропроцессорного контроллера снабжённого программами первичной обработки измерительной информации и промышленной ЭВМ, которая снабжена программами визуализации процессов измерения и оптимального управления. При этом программное обеспечение промышленной ЭВМ является средой графического визуального программирования, позволяющей с легкостью создавать пользовательский интерфейс виртуального прибора, реализовывать управление прибором и вторичную обработку информации, использовать удобное для пользователя отображение измерительной информации. К программному обеспечению промышленной ЭВМ предъявляются жесткие требования, вытекающие из условий измерения, условий существования измеряемого объекта и технических характеристик элементной базы первичных преобразователей,

выполненных с применением микропроцессорных элементов. Таким образом, основным назначением виртуального прибора является визуализация текущего состояния технологического процесса и выработка рекомендаций по оптимальному управлению технологического процесса в целом.

Кроме того, виртуальный прибор – это робастная система управления, то есть самонастраивающаяся система адаптивного управления динамической системой с неточно известной (или вообще неизвестной) математической моделью объекта управления, работающая в условиях случайных нестационарных возмущений и случайных стационарных помех измерения.

Технические потери – нагрузочные, холостого хода, климатические, далее в работе рассмотрены случаи возникновения дополнительных потерь при старении изоляции проводников, потерь возникающих при увеличении нагрузки на валу возникающей вследствие неисправностей частей электродвигателя и как следствие повышенном вибрационном состоянии.

Технические потери электроэнергии, обусловленные физическими процессами, происходящими при передаче электроэнергии по электрическим сетям и выражающимися в преобразовании части электроэнергии в тепло в элементах сетей.

На самом деле, присутствуют обе составляющих в проблеме потерь электроэнергии в сетях:

1. Объективный расход энергии, связанный с передачей тока по электрическим сетям;
2. Действительно потери, т.е. необоснованный расход электроэнергии, связанный с износом электрооборудования, несовершенством технологических решений. Эти устройства не могут быть идеальными.

Нагрузочные потери активной мощности в элементе сети [20] с сопротивлением R при напряжении U определяются по формуле (1.8):

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R, \quad (1.8)$$

где ΔP – нагрузочные потери активной мощности;

P – активная мощность сети, кВтч;

Q – реактивная мощность сети, кВАр;

U – напряжение, кВ;

R – сопротивление, кОм.

Из формулы видно, что для снижения потерь мощности важно проводить мероприятия по уменьшению или ограничению потребления реактивной мощности потребителями.

В [21] предложена формула для определения потерь в синхронном компенсаторе (СК) или генераторах электростанций

$$\Delta W_{СК} = (0,4 + 0,1 \cdot K^2_{\max}) \cdot \Delta P_{\text{ном}} \cdot T_{СК} \quad (1.9)$$

Где K^2_{\max} коэффициент максимальной загрузки СК;

ΔP – потери в СК при номинальной загрузке;

$T_{СК}$ – время работы СК в расчетном периоде.

Преобразуя формулу 1.8 с учетом 1.9 получим формулу для определения потерь электроэнергии в роторном оборудовании:

$$\Delta W(t) = I^2(t) \cdot R \cdot t \quad (1.10)$$

Где I – электрический ток потребляемый оборудованием, А.

Отставание тока по фазе от напряжения в индуктивных элементах обуславливает интервалы времени, когда напряжение и ток имеют противоположные знаки: напряжение положительно, а ток отрицателен и наоборот. В эти моменты мощность не потребляется нагрузкой, а подается обратно по сети в сторону генератора. При этом электроэнергия, запасаемая в каждом индуктивном элементе, распространяется по сети, не рассеиваясь в активных элементах, а совершая колебательные движения (от нагрузки к генератору и обратно). Соответствующую мощность называют реактивной. Диаграмма активной и реактивной мощностей представлена на рисунке 1.18.

Активная энергия преобразуется в полезную - механическую, тепловую и др. энергии. Реактивная энергия не связана с выполнением полезной работы, однако она необходима для создания электромагнитного поля, наличие которого является необходимым условием для работы электродвигателей и трансформаторов.

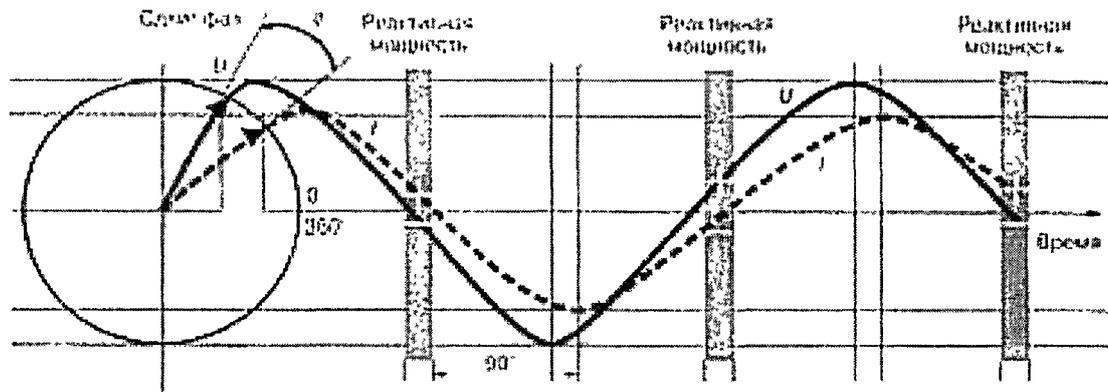


Рисунок 1.18 – Диаграмма активной и реактивной энергии

Потребление реактивной мощности от энергоснабжающей организации нецелесообразно, т.к. приводит к увеличению мощности генераторов, трансформаторов, сечения подводящих кабелей, а так же повышению активных потерь и падению напряжения.

1.4 Выводы и постановка задач исследования

Таким образом, энергоэффективность а следовательно и затраты на эксплуатацию роторного оборудования представлены на рисунке 1.19 и зависят от показателей вибрации (наличия дефектов оборудования), количества потребляемой электроэнергии и температуры нагрева изоляции двигателя.

Важность рассматриваемых методов неразрушающего контроля в системах диагностирования заключается в том, что они позволяют оценивать состояние электрооборудования роторного типа на различных стадиях его активного существования и как следствие влиять на качество производимого

им конечного продукта или совершаемой работы с максимально экономичными параметрами по расходу электроэнергии.

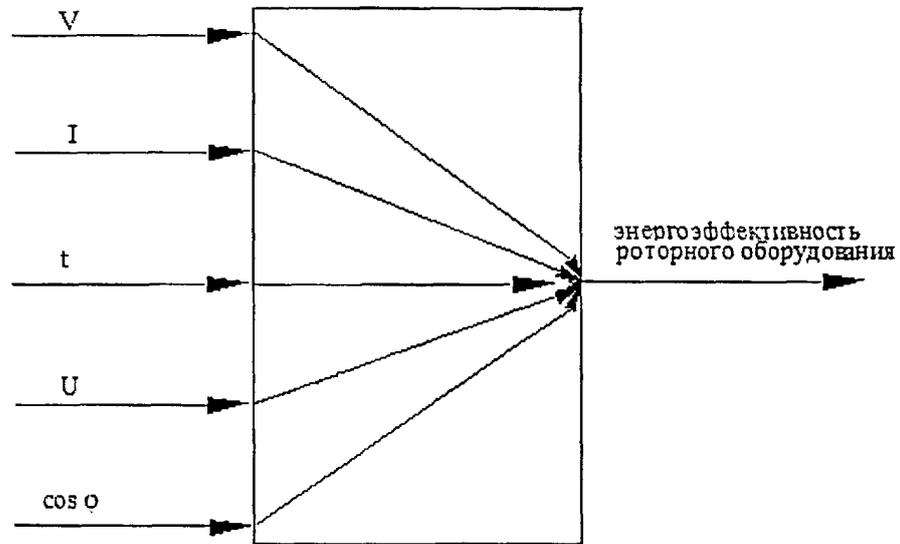


Рисунок 1.19 – Факторы влияющие на энергоэффективность роторного оборудования

где V – вибрация; U – напряжение; I – сила тока, t - температура; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности.

Исследования рассматриваемых вибрационных составляющих позволяют разрабатывать методики по диагностированию и прогнозированию фактического состояния оборудования, оценивать качество изделий и использовать получаемые диагностические модели на различных стадиях жизненного цикла роторного оборудования.

Электрические машины являются исполнительными механизмами, поэтому нарушение их нормального режима функционирования вызывает ухудшение качества электроэнергии и увеличение её потребления. Техническое состояние промышленных энергоустановок и изменение его во времени в наибольшей степени зависит от контактирующих и трущихся элементов и действующих в них вибрационных нагрузок. Следовательно, системы диагностирования, анализа и прогнозирования процессов, происходящих в трущихся элементах, таких как ротор машины – подшипник являются наиболее важными задачами.

Существующие экспертные системы диагностики позволяют решать лишь часть задач эксплуатирующего персонала. Как правило, решаются задачи определения вида неисправности и рекомендуются временные отрезки по дальнейшей работе, при этом вопрос об изменении структуры потребления электроэнергии и энергоэффективности оборудования в целом остается открытым или даже не задаваемым, но очень актуальным в настоящее время.

Все это указывает на важность исследования вибрации и необходимость совершенствования методов диагностики и прогнозирования состояния оборудования по вибрационным параметрам для своевременного устранения неисправностей и получения экономического эффекта за счет снижения потребления электроэнергии оборудованием. А также позволять персоналу эксплуатирующему оборудование не только своевременно принимать необходимые решения по выводу оборудования в ремонт, но и владеть оперативной информацией о наиболее экономичных режимах работы оборудования обеспечивающих рациональное использование электроэнергии.

Таким образом, целью работы является повышение эффективности управления роторным оборудованием.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

Провести анализ существующих методов диагностики дефектов и их влияния на эффективность функционирования роторного оборудования;

2. Выбрать и исследовать критерий оценки оптимального времени вывода роторного оборудования на ремонт;

3. Разработать алгоритмы диагностики по основным параметрам, определяющим эффективность работы роторного оборудования;

4. Разработать алгоритм прогноза времени вывода оборудования на ремонт.

ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ РАЗВИТИЯ ДЕФЕКТОВ

В условиях работы современных автоматизированных систем управления роторным оборудованием за критерий эффективности целесообразно принять количественные оценки потерь при работе роторного оборудования (см. главу 1). Из анализа затрат на эксплуатацию роторного оборудования [80] можно выделить дополнительные потери электрической энергии зависящие от дефектов роторного оборудования и представить их в виде графика на рисунке 2.1.

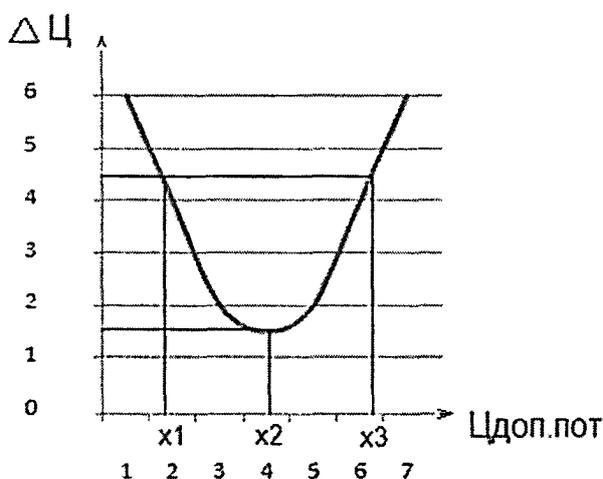


Рисунок 2.1 Анализ затрат на эксплуатацию роторного оборудования

$\Delta Ц$ – разница между стоимостью ремонтных работ и стоимостью оплаты повышенных потерь электрической энергии (зависящих от дефектов); $Ц_{доп.пот}$ – стоимость потерь электроэнергии зависящих от дефектов.

В начальный период времени эксплуатации оборудования дефектов либо нет, либо они настолько малы, что стоимость оплаты потерь электроэнергии незначительна и соответствует точке x_1 на рисунке 2. С развитием дефектов стоимость оплаты потерь возрастает, а разница между стоимостью ремонтных работ и оплатой потерь электроэнергии снижается и достигает минимального значения в точке x_2 . При дальнейшем развитии дефектов затраты на оплату потерь превышают стоимость проведения ремонтных работ.

Введя в формулу 1.10 уточняющие коэффициенты в виде модели развития i -го дефекта и настроечного коэффициента системы диагностики получим уравнение измерения критерия энергоэффективности:

$$\Delta W(t) = I^2(t) \cdot R \cdot t \cdot \sum_{i=1}^n d_{xi}(t) \cdot K_{н.с.}, \quad (2.1)$$

где $\Delta W(t)$ – потери электроэнергии при работе роторного оборудования, кВт·ч; I – электрический ток, потребляемый роторным оборудованием, А; R – сопротивление обмотки роторного оборудования, кОм; t – текущее время работы роторного оборудования, ч; $d_{xi}(t)$ – модель развития i -го дефекта; $K_{н.с.}$ – настроечный коэффициент системы диагностики

В свою очередь модель развития i -того дефекта вычисляется по формуле (2.2):

$$d_{Xi}(t) = \frac{\Delta I(t)}{K_i} \quad (2.2)$$

где K_i – коэффициент адаптации;

Показания измерительной системы – мощность определяется по уравнению измерения на основании прямых измерений напряжения, тока, \cos угла сдвига фаз.

2.1 Экспериментальные исследования моделей развития дефектов

В испытательном центре ОАО «Волжский Подшипниковый Завод» проведен ряд экспериментов, на испытательной установке ЦКБ-50 (Приложение А). Измерялась группа характеристик: виброускорение, температура, ток, напряжение, мощность (активная, реактивная, полная), коэффициент мощности на оборудовании с тестируемыми подшипниками, как бездефектными (новыми), так и с последующем нанесением дефектов, приближенным к реальным, возникающим при длительной эксплуатации оборудования [75].

Измерения проводились в несколько этапов: этап 1 – на установку монтировались совершенно новые (условно бездефектные подшипники) и снимались вышеуказанные характеристики до наступления момента прикатки подшипников и стабилизации измеряемых параметров; этап 2 – на ролик одного из подшипников наносился дефект и измерения повторялись; этап 3 – на несколько роликов наносились аналогичные дефекты и измерения повторялись.

Эксперимент проведен на двух типах подшипников: роликовые радиальные подшипники 12309KM - 2 шт. и роликовые радиально-упорные подшипники 6-7506A - 2 шт. Нагрузка распределялась следующим образом:

Для подшипников 12309KM.

Начальные условия эксперимента: радиальная нагрузка F_r равно нулю, атм. (Давление в системе радиального нагружения = 0). На подшипник действует постоянная радиальная нагрузка от веса оснастки. Значение нагрузки равно 5 кгс.; осевая нагрузка F_a равна нулю, атм.; давление в системе смазки постоянное - 3,2 атм.; n = об/мин., частота вращения вала n равно 3500, об/мин.

Испытания проводились при постоянной нагрузке. Период испытаний для каждой стадии определялся из условий стабилизации измеряемых параметров. В качестве смазки применялось масло индустриальное И-20А.

Фотоизображения подшипников серии 12309KM приведены на рисунках 2.2-2.4

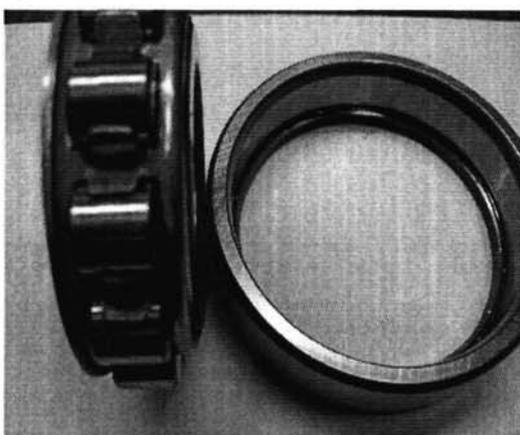


Рисунок 2.2 – Новый подшипник 12309KM (бездефектный)

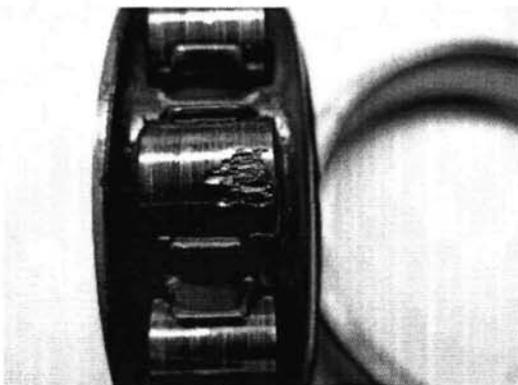


Рисунок 2.3 – Подшипник с дефектом (раковины, сколы на ролике)

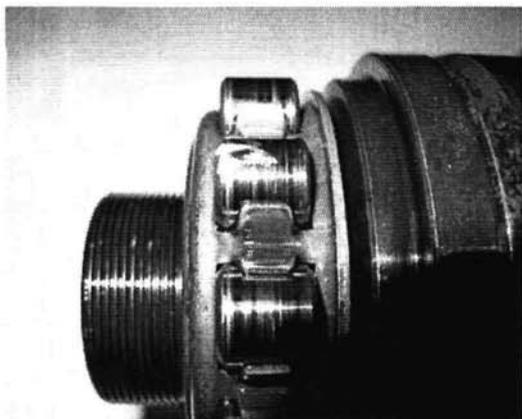


Рисунок 2.4 – Подшипник с эмитируемым дефектом (раковины, сколы на ролике)

Измерения проводились до наступления момента прикатки подшипников и стабилизации измеряемых параметров. В течение суток наблюдалось повышение температуры нагрева подшипников, снижение вибрации и снижение потребляемого тока электроприводом. Изменения температуры и вибрации подшипников в процессе приработки представлены на рисунке 2.5.

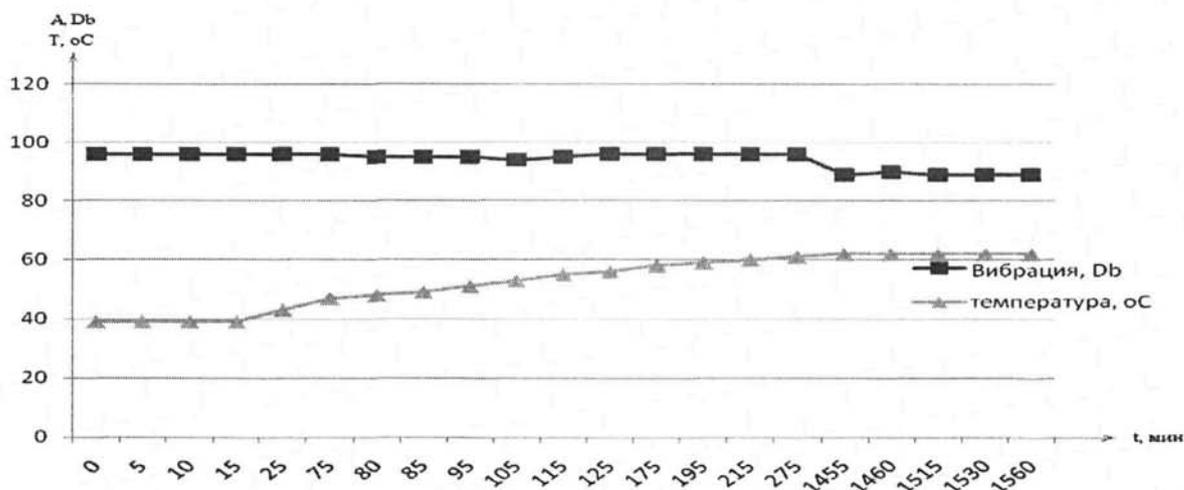


Рисунок 2.5 – Изменение температуры и вибрации подшипника в процессе приработки

где A – виброускорение, $\text{мм}/\text{с}^2$; T – температура, $^{\circ}\text{C}$; t – время измерения, мин. Верхняя кривая на графике отображает изменение общего уровня вибрации подшипника, Дб. Нижняя кривая на графике отображает изменение температуры подшипника, $^{\circ}\text{C}$.

На рисунке 2.5 четко прослеживается момент прикатки подшипника после 275 минуты с момента пуска, в результате чего происходит снижение уровня вибрации и стабилизация роста температуры.

Изменения токов и мощностей подшипника в процессе приработки представлены на рисунке 2.6

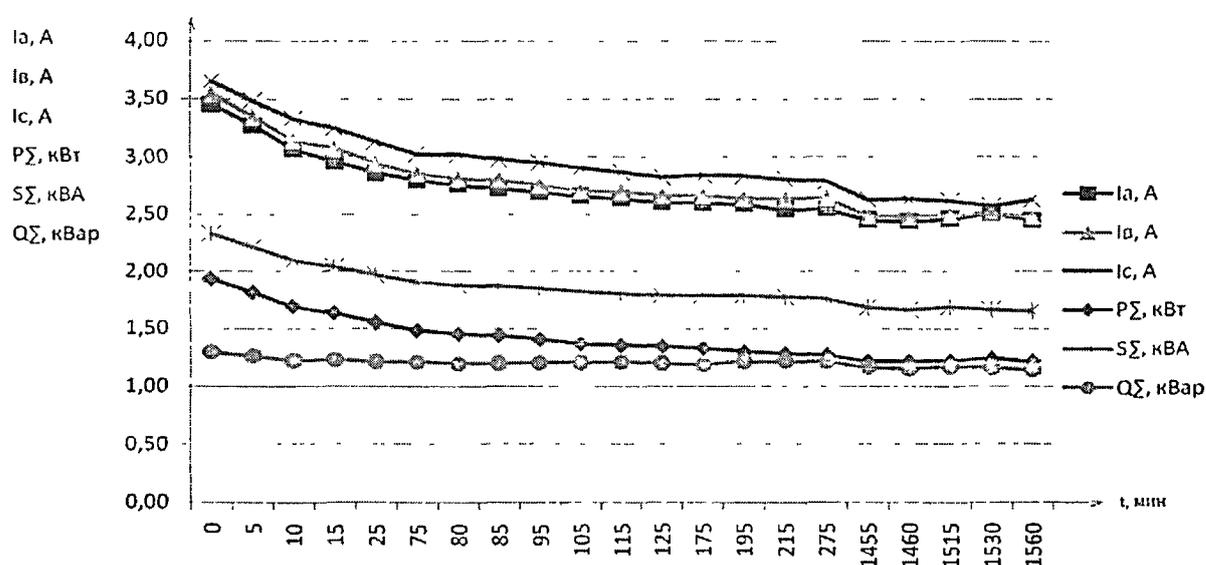


Рисунок 2.6 – Изменение токов и мощностей в процессе приработки подшипника

где I_a – ток протекающий в фазе «а» привода испытательной установки, А; I_b – ток протекающий в фазе «в» привода испытательной установки, А; I_c – ток протекающий в фазе «с» привода испытательной установки, А; P_{Σ} – активная мощность потребляемая испытательной установкой, кВт; S_{Σ} – полная мощность потребляемая испытательной установкой, кВА; Q_{Σ} – реактивная мощность потребляемая испытательной установкой, кВар.

На рисунке 2.6 четко прослеживается процесс прикатки нового подшипника, сопровождающееся плавным снижением измеряемых величин.

После 275 минуты и в течении суточного контроля измеряемых величин наблюдается стабилизация параметров и измерения на новом подшипнике завершились.

После нанесения на ролик подшипника дефекта в виде имитации выкрашивания площадью 12 мм², глубиной 2,5 мм. (см. рисунок ПАЗ Приложение А) измерения повторялись.

Изменения температуры и вибрации подшипников после нанесения дефекта № 1 представлены на рисунке 2.7.

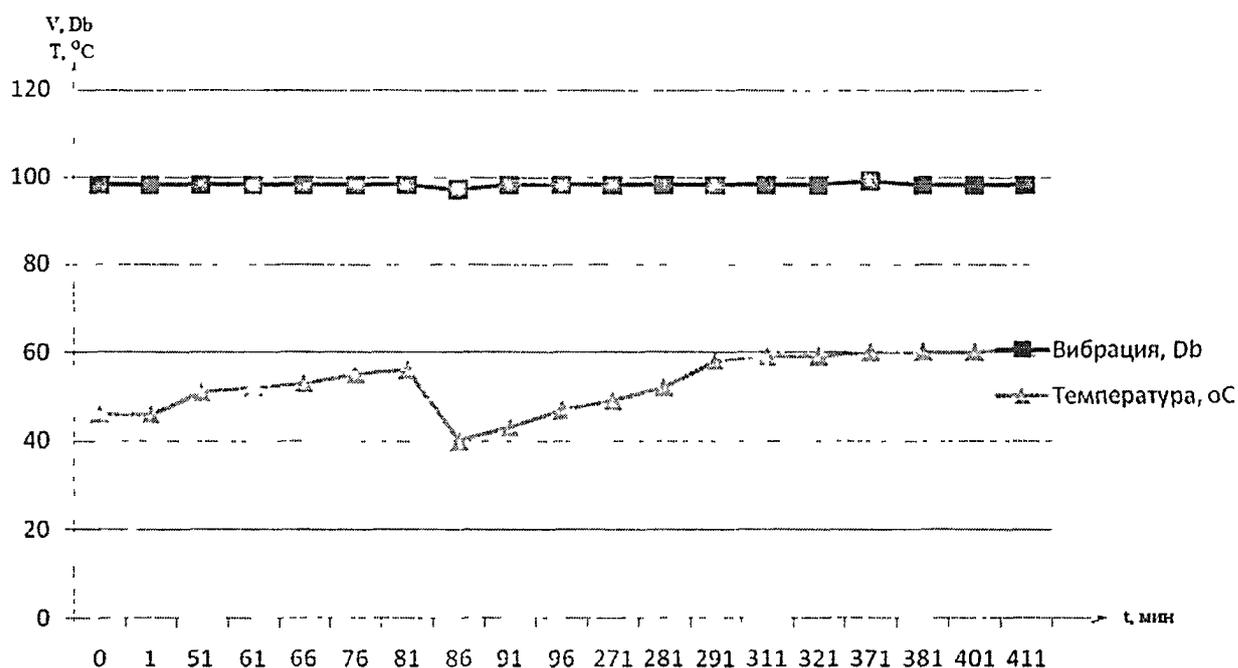


Рисунок 2.7 – Изменение температуры и вибрации подшипника при имитации выкрашивания площадью 12 мм², глубиной 2,5 мм

где А – виброускорение, мм/с²; Т – температура, °С; t – время измерения, мин. Верхняя кривая на графике отображает изменение общего уровня вибрации подшипника, Дб. Нижняя кривая на графике отображает изменение температуры подшипника, °С.

На рисунке 2.7 на протяжении всего времени измерений наблюдались незначительные изменения измеряемых величин.

Изменения токов и мощностей подшипника после нанесения дефекта в виде имитации выкрашивания площадью 12 мм², глубиной 2,5 мм. представлено на рисунке 2.8.

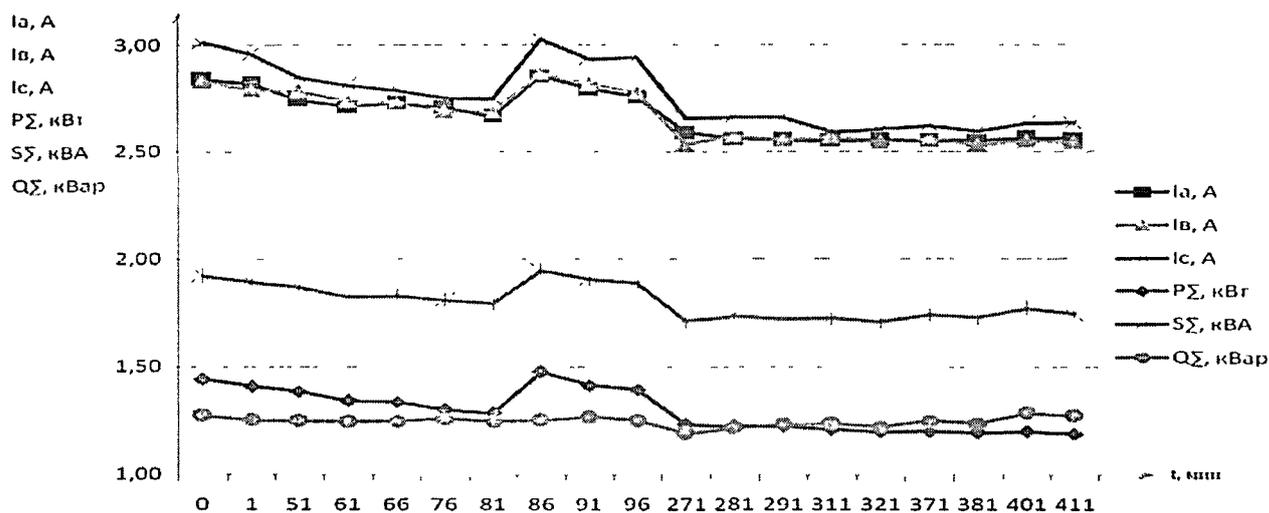


Рисунок 2.8 – Изменение токов и мощностей после нанесения дефекта в виде имитации выкрашивания площадью 12 мм^2 , глубиной $2,5 \text{ мм}$

где I_a – ток протекающий в фазе «а» привода испытательной установки, А; I_b – ток протекающий в фазе «в» привода испытательной установки, А; I_c – ток протекающий в фазе «с» привода испытательной установки, А; P_{Σ} – активная мощность потребляемая испытательной установкой, кВт; S_{Σ} – полная мощность потребляемая испытательной установкой, кВА; Q_{Σ} – реактивная мощность потребляемая испытательной установкой, кВар.

На рисунке 2.8 с 81 по 271 минуту измерений произошел скачкообразный рост измеряемых величин, что свидетельствует о дополнительно возникающих потерях электрической энергии от наличия дефекта.

При нанесении аналогичных дефектов на два ролика подшипника, картина существенно изменяется.

На поверхность второго ролик подшипника нанесен дефект раковина, имитация выкрашивания площадью 12 мм^2 , глубиной $2,5 \text{ мм}$. Проведены измерения.

Изменения температуры и вибрации подшипников после нанесения дефекта раковина, имитация выкрашивания площадью 12 мм^2 , глубиной $2,5 \text{ мм}$ представлены на рисунке 2.9.

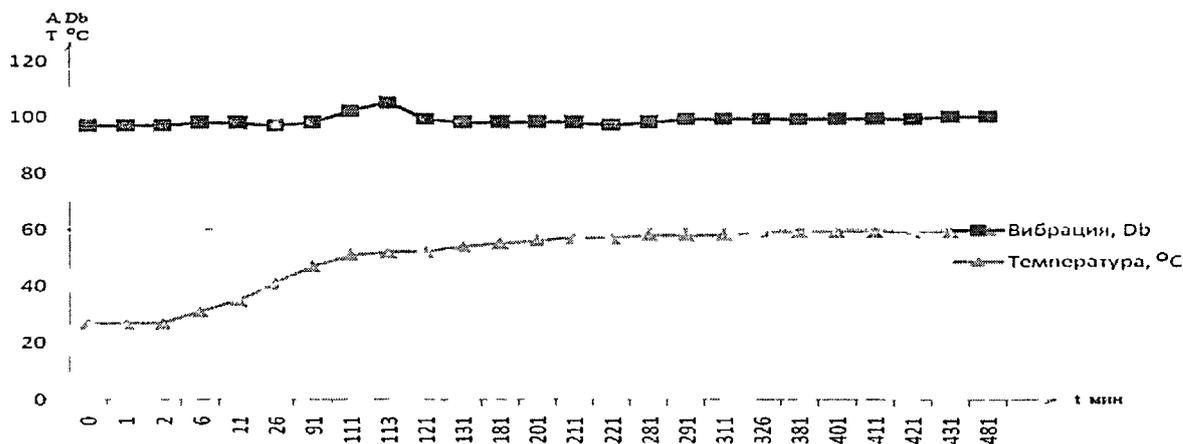


Рисунок 2.9 – Изменение температуры и вибрации подшипника после нанесения дефекта раковина, имитация выкрашивания площадью 12 мм^2 , глубиной 2,5 мм на второй подшипник

где A – виброускорение, мм/с^2 ; T – температура, $^{\circ}\text{C}$; t – время измерения, мин. Верхняя кривая на графике отображает изменение общего уровня вибрации подшипника, Дб. Нижняя кривая на графике отображает изменение температуры подшипника, $^{\circ}\text{C}$.

На рисунке 2.9 с течением времени наблюдался стабильный рост значений измеряемых параметров.

Изменения токов и мощностей после нанесения дефекта раковина, имитация выкрашивания площадью 12 мм^2 , глубиной 2,5 мм на второй подшипник представлено на рисунке 2.10.

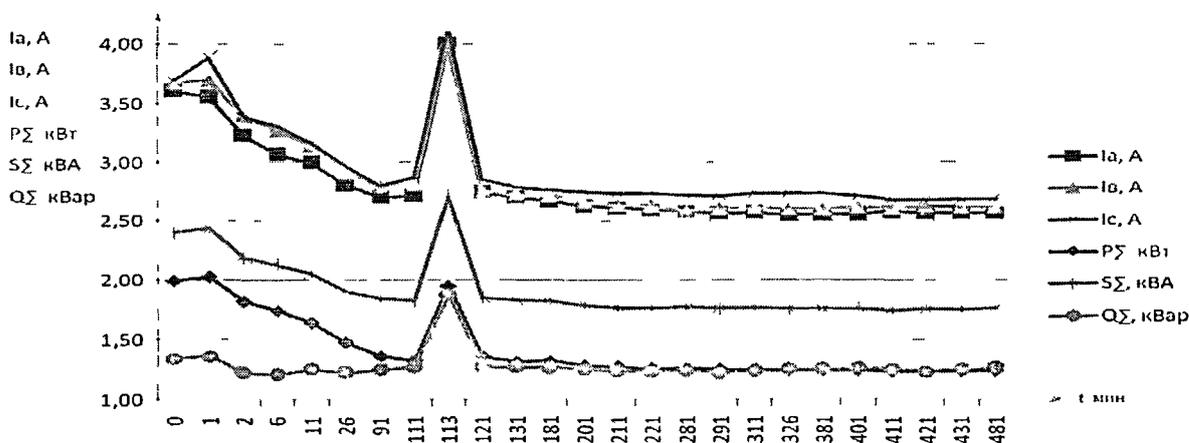


Рисунок 2.10 – Изменение токов и мощностей после нанесения дефекта раковина, имитация выкрашивания площадью 12 мм^2 , глубиной 2,5 мм на второй подшипник

где I_a – ток протекающий в фазе «а» привода испытательной установки, А; I_b – ток протекающий в фазе «в» привода испытательной установки, А; I_c – ток протекающий в фазе «с» привода испытательной установки, А; P_{Σ} – активная мощность потребляемая испытательной установкой, кВт; S_{Σ} – полная мощность потребляемая испытательной установкой, кВА; Q_{Σ} – реактивная мощность потребляемая испытательной установкой, кВар.

На рисунке 2.10 со 111 по 121 минуту измерений произошел резкий, скачкообразный рост измеряемых величин, что свидетельствует о дополнительно возникающих потерях электрической энергии из-за наличия дефекта.

Испытания тех же подшипников с дефектами в режиме понижения, а затем повышения давления масла в системе смазки (в полости оснастки), приводит к следующей информации. Давление масла плавно понижали от 4 кгс/см² до нуля, затем повышали до исходной величины.

Изменения температуры и вибрации подшипника представлены на рисунке 2.11.

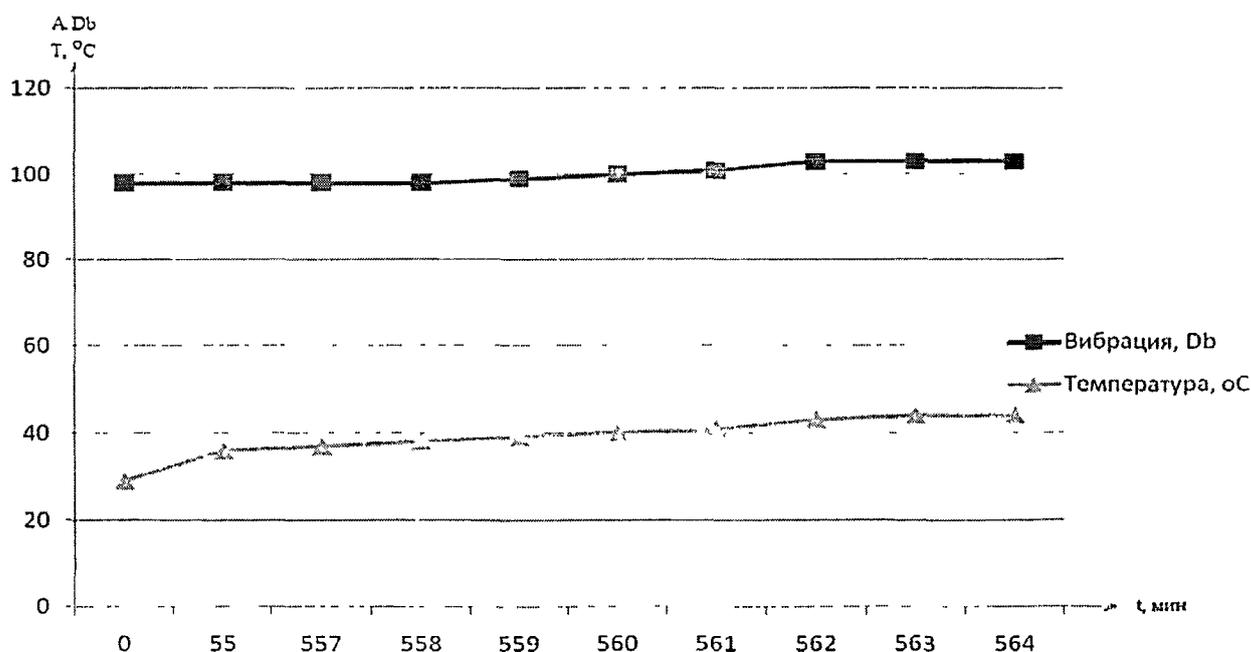


Рисунок 2.11 – Изменение температуры и вибрации подшипника при изменении давления масла

где A – виброускорение, мм/с^2 ; T – температура, $^{\circ}\text{C}$; t – время измерения, мин. Верхняя кривая на графике отображает изменение общего уровня вибрации подшипника, Дб. Нижняя кривая на графике отображает изменение температуры подшипника, $^{\circ}\text{C}$.

На рисунке 2.11 с течением времени наблюдался стабильный рост измеряемых величин вне зависимости от снижения или повышения давления масла, что свидетельствует о наличии достаточно сильных дефектов, приводящих к росту значений измеряемых параметров.

Изменения токов и мощностей при изменении давления представлены на рисунке 2.12.

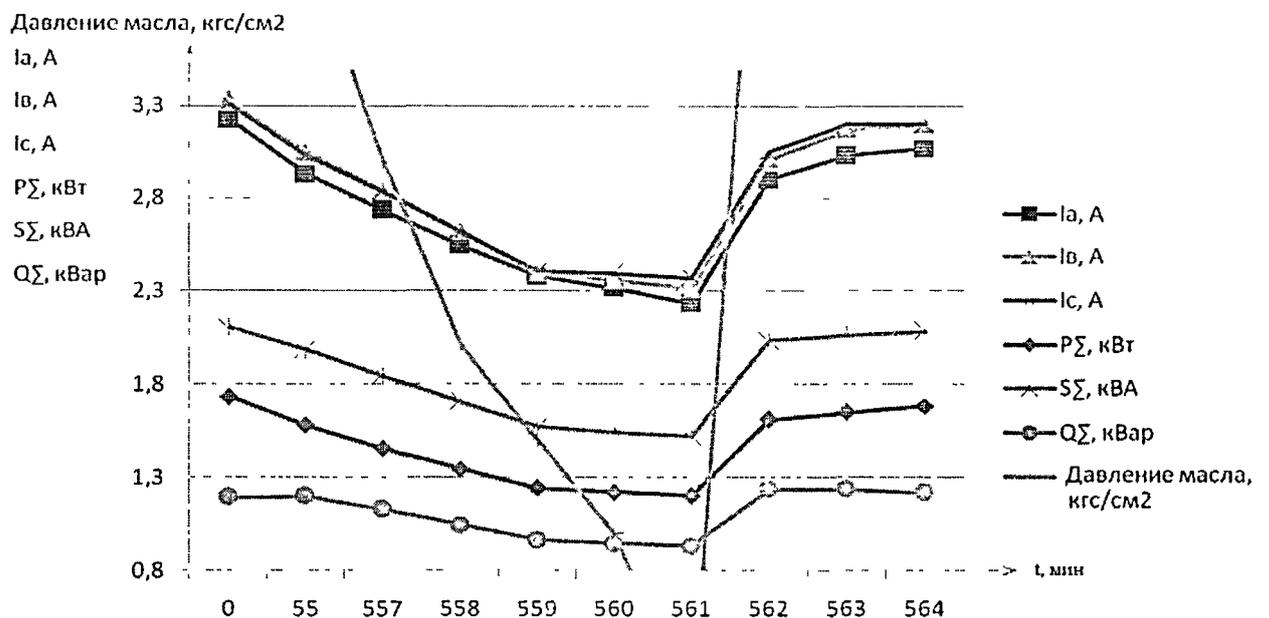


Рисунок 2.12 – Изменение токов и мощностей при изменении давления масла

где I_a – ток протекающий в фазе «а» привода испытательной установки, A ; I_b – ток протекающий в фазе «в» привода испытательной установки, A ; I_c – ток протекающий в фазе «с» привода испытательной установки, A ; P_{Σ} – активная мощность потребляемая испытательной установкой, кВт ; S_{Σ} – полная мощность потребляемая испытательной установкой, кВА ; Q_{Σ} – реактивная мощность потребляемая испытательной установкой, кВар .

На рисунке 2.12 со наблюдается снижение а затем рост значений измеряемых параметров, в соответствии с изменениями давления масла в системе.

Подшипники 12309КМ заменены на подшипники 6-7506А.

Начальные условия эксперимента для подшипников 6-7506А:

Нагрузка, F_r равна нулю, нагрузка F_a равна 23 атм.; давление в системе смазки постоянное и равно 3 атм, частота вращения вала равна 4250 об/мин.

При дальнейших испытаниях на стенд были установлены новые (условно бездефектные) четыре подшипника 6-7506А. Первичная обработка измерительной информации привела к следующим результатам.

Изменения температуры и вибрации подшипников в процессе их приработки представлены на рисунке 2.13.

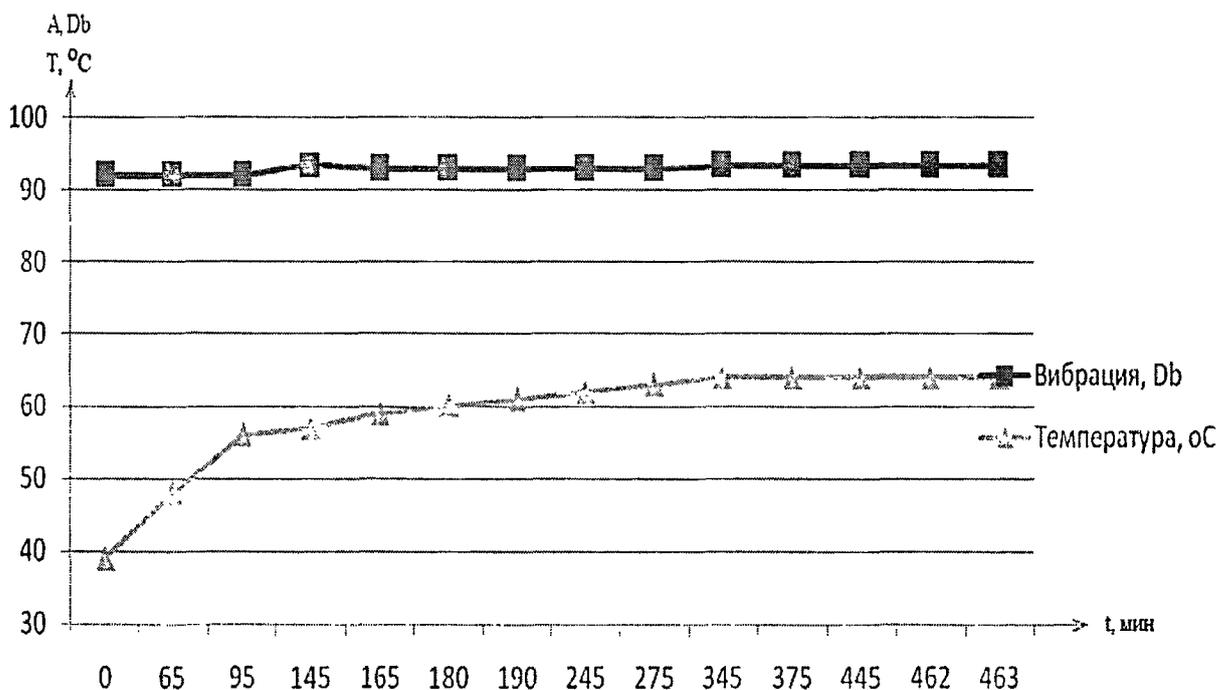


Рисунок 2.13 – Изменение температуры и вибрации подшипника в процессе приработки

где A – виброускорение, мм/с^2 ; T – температура, $^{\circ}\text{C}$; t – время измерения, мин. Верхняя кривая на графике отображает изменение общего уровня вибрации подшипника, Дб. Нижняя кривая на графике отображает изменение температуры подшипника, $^{\circ}\text{C}$.

На рисунке 2.13 с течением времени наблюдался рост измеряемых величин.

Изменения токов и мощностей подшипника в процессе приработки представлены на рисунке 2.14.

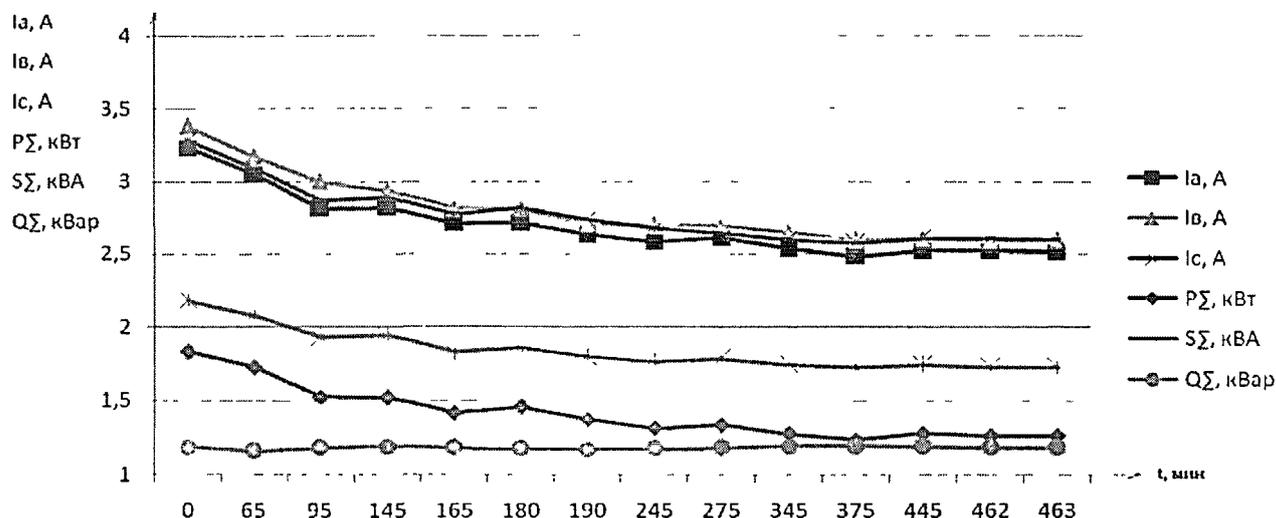


Рисунок 2.14 – Изменение токов и мощностей в процессе приработки подшипника

где I_a – ток протекающий в фазе «а» привода испытательной установки, А; I_b – ток протекающий в фазе «в» привода испытательной установки, А; I_c – ток протекающий в фазе «с» привода испытательной установки, А; P_{Σ} – активная мощность потребляемая испытательной установкой, кВт; S_{Σ} – полная мощность потребляемая испытательной установкой, кВА; Q_{Σ} – реактивная мощность потребляемая испытательной установкой, кВар.

Прослеживается процесс прикатки нового подшипника, сопровождающийся плавным снижением измеряемых величин. После 375 минуты наблюдается стабилизация параметров и измерения на новом подшипнике завершились.

Далее на ролик подшипника наносится дефект – раковины, сколы на ролике (фото № 3 Приложение А) и измерения повторялись. Изменения температуры и вибрации подшипников после нанесения дефекта представлены на рисунке 2.15.

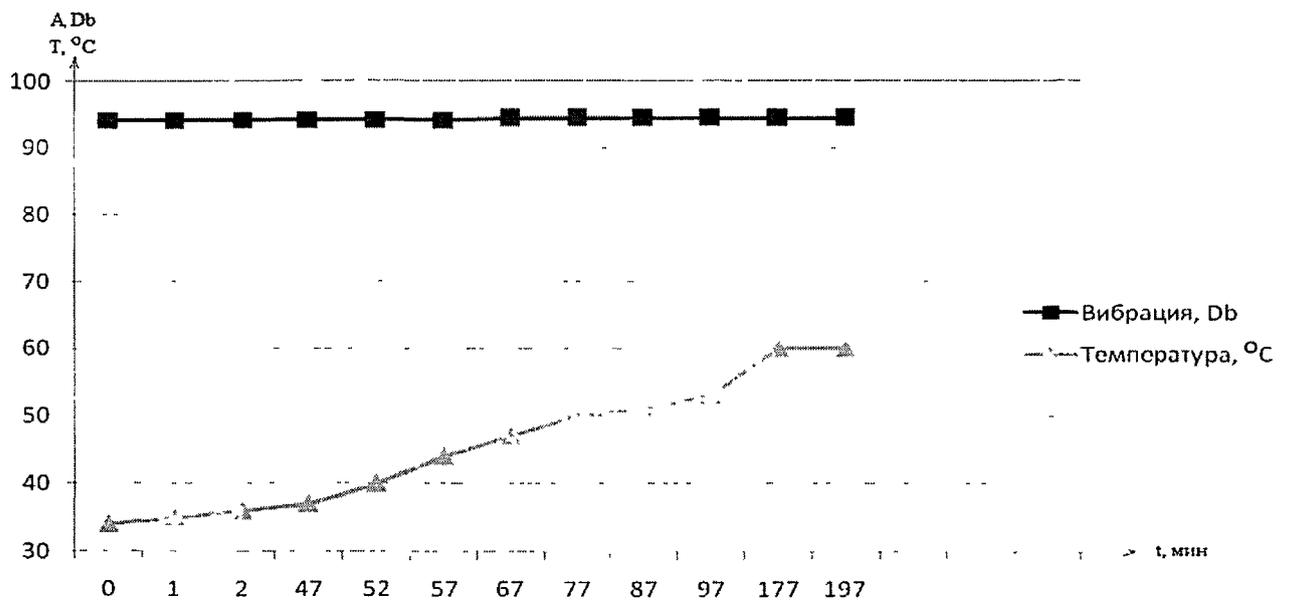


Рисунок 2.15 – Изменение температуры и вибрации подшипника после нанесения дефекта

где A – виброускорение, мм/с^2 ; T – температура, $^{\circ}\text{C}$; t – время измерения, мин. Верхняя кривая на графике отображает изменение общего уровня вибрации подшипника, Дб. Нижняя кривая на графике отображает изменение температуры подшипника, $^{\circ}\text{C}$.

Изменения токов и мощностей подшипника после нанесения дефекта представлено на рисунке 2.16.

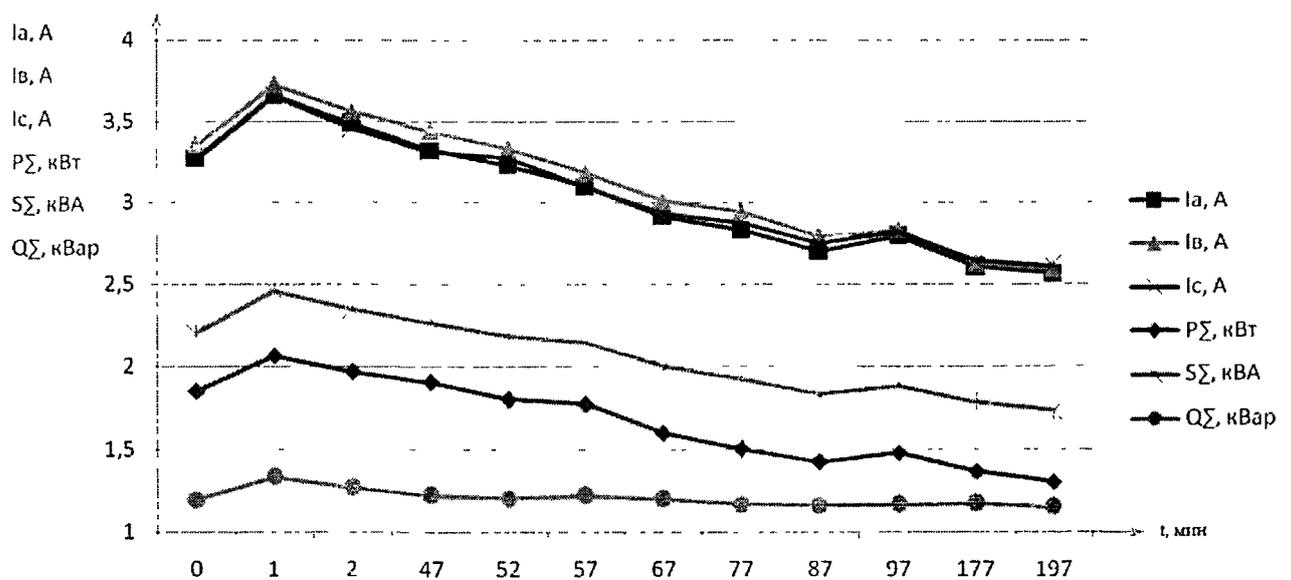


Рисунок 2.16 – Изменение токов и мощностей после нанесения дефекта на подшипник

где I_a – ток протекающий в фазе «а» привода испытательной установки, А; I_b – ток протекающий в фазе «в» привода испытательной установки, А; I_c – ток протекающий в фазе «с» привода испытательной установки, А; P_{Σ} – активная мощность потребляемая испытательной установкой, кВт; S_{Σ} – полная мощность потребляемая испытательной установкой, кВА; Q_{Σ} – реактивная мощность потребляемая испытательной установкой, кВар.

Аналогичные дефекты нанесены на два ролика подшипника.

Изменения температуры и вибрации подшипников после нанесения дефекта представлены на рисунке 2.17.

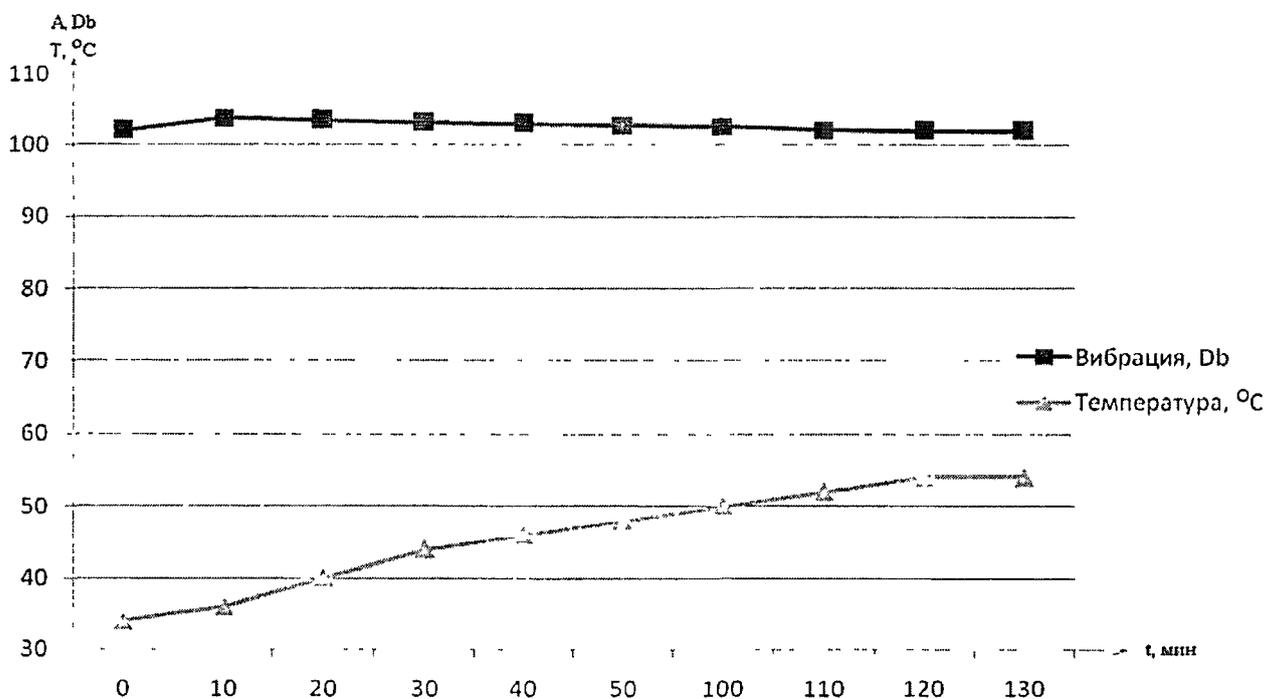


Рисунок 2.17 – Изменение температуры и вибрации подшипника после нанесения дефекта

где A – виброускорение, мм/с^2 ; T – температура, $^{\circ}\text{C}$; t – время измерения, мин. Верхняя кривая на графике отображает изменение общего уровня вибрации подшипника, Дб. Нижняя кривая на графике отображает изменение температуры подшипника, $^{\circ}\text{C}$.

Изменения токов и мощностей после нанесения дефекта представлено на рисунке 2.18

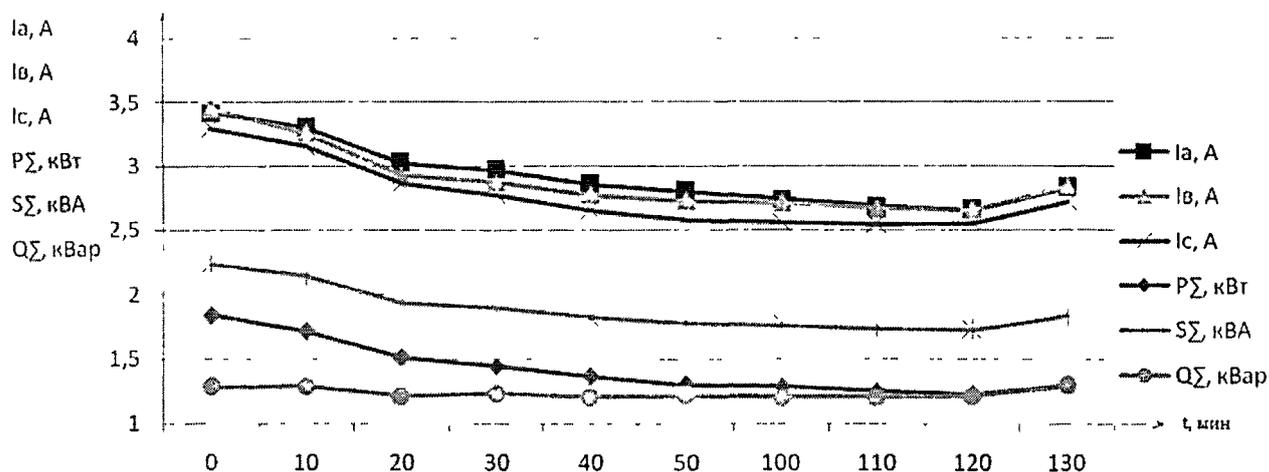


Рисунок 2.18 – Изменение токов и мощностей после нанесения дефекта на подшипник

где I_a – ток протекающий в фазе «а» привода испытательной установки, А; I_b – ток протекающий в фазе «в» привода испытательной установки, А; I_c – ток протекающий в фазе «с» привода испытательной установки, А; P_Σ – активная мощность потребляемая испытательной установкой, кВт; S_Σ – полная мощность потребляемая испытательной установкой, кВА; Q_Σ – реактивная мощность потребляемая испытательной установкой, кВар.

Испытания проводились на этом же подшипнике с дефектами в режиме понижения, а затем повышения давления масла в подшипниковой камере.

Изменения температуры и вибрации подшипника представлены на рисунке 2.19.

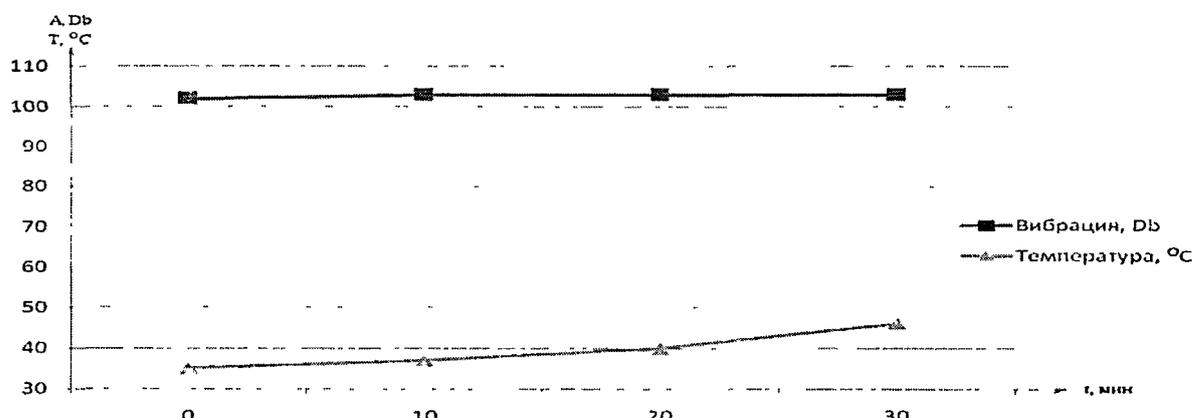


Рисунок 2.19 – Изменение температуры и вибрации подшипника при изменении давления масла

где A – виброускорение, мм/с^2 ; T – температура, $^{\circ}\text{C}$; t – время измерения, мин. Верхняя кривая на графике отображает изменение общего уровня вибрации подшипника, Дб. Нижняя кривая на графике отображает изменение температуры подшипника, $^{\circ}\text{C}$.

Изменения токов и мощностей при изменении давления представлены на рисунке 2.20.

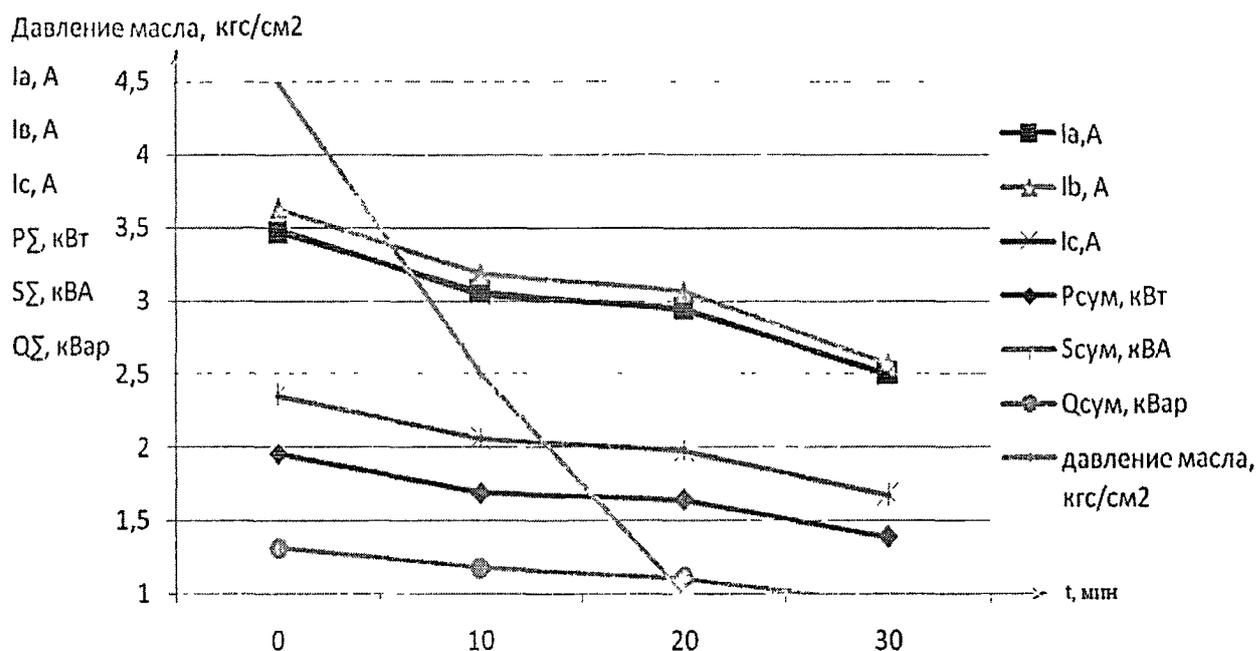


Рисунок 2.20. Изменение токов и мощностей при изменении давления масла

где I_a – ток протекающий в фазе «а» привода испытательной установки, А; I_b – ток протекающий в фазе «в» привода испытательной установки, А; I_c – ток протекающий в фазе «с» привода испытательной установки, А; P_{Σ} – активная мощность потребляемая испытательной установкой, кВт; S_{Σ} – полная мощность потребляемая испытательной установкой, кВА; Q_{Σ} – реактивная мощность потребляемая испытательной установкой, кВар.

Параллельно с измерениями проводилась и вибрационная диагностика с помощью программного комплекса DREAM, измерительным прибором – виброанализатором СД-12М разработанным ОАО «ВАСТ» г. Санкт-Петербург.

Результат вибродиагностики для бездефектного подшипника представлен на рисунке 2.21.

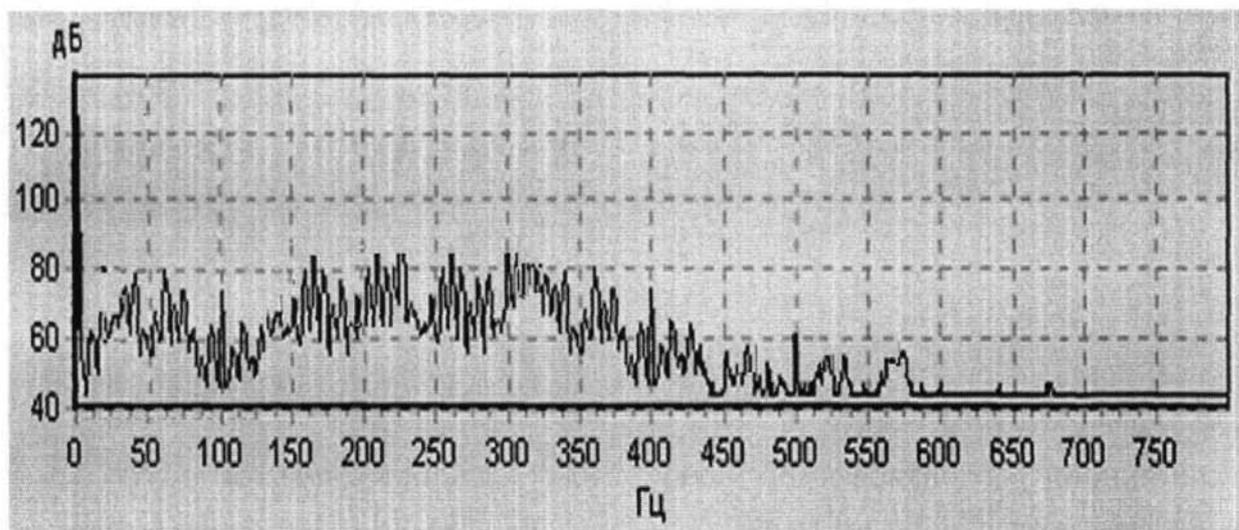


Рисунок 2.21 – Спектр вибрации бездефектного подшипника

Из анализа спектра можно сделать заключение о плавности

Результат вибродиагностики для дефекта раковина, имитация выкрашивания площадью 12 мм^2 , глубиной 2,5 представлен на рисунке 2.22.

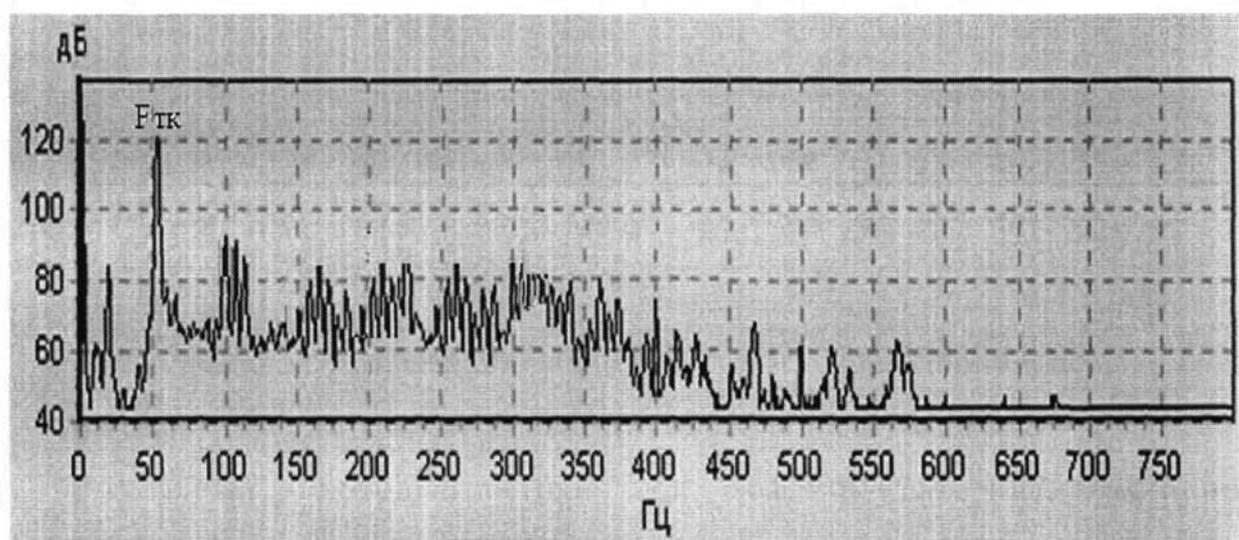


Рисунок 2.22 – Спектр вибрации подшипника

Результат вибродиагностики для дефекта дефекта раковина, имитация выкрашивания площадью 12 мм^2 , глубиной 2,5 мм на второй подшипник представлен на рисунке 2.23.

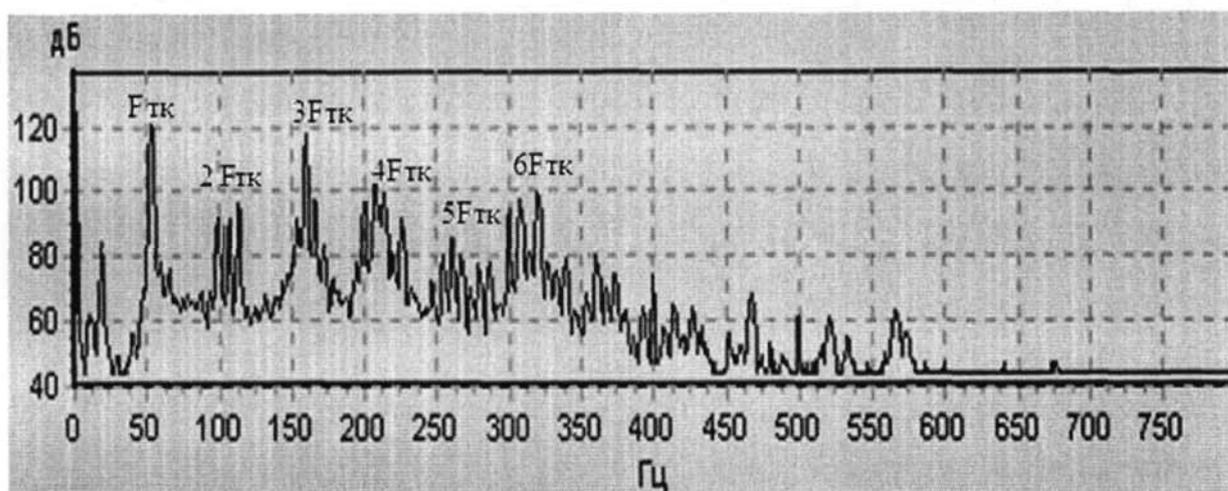


Рисунок 2.23 – Спектр вибрации подшипника

В процессе диагностики программно обнаружены следующие дефекты: раковины и сколы на телах качения выделив ряд диагностических признаков: 52.81 Гц (18%) Fтк, 105.66 Гц (11%) 2Fтк, 158.58 Гц (16%) 3Fтк, 211.58 Гц (10%) 4Fтк, 263.17 Гц (8%) 5Fтк, 317.88 Гц (12%) 6Fтк. По результатам диагностики выдана рекомендация произвести осмотр узла или перейти на ежедневный контроль вибрации.

Исследования по выявлению влияния дефектов роторного оборудования на потребляемый расход и потери электрической энергии показали наличие взаимосвязи между дефектами роторного оборудования и потерями электрической энергии.

В результате испытаний было задействовано восемь подшипников, из которых шесть находились в постоянных условиях, а на два наносились дефекты.

Измеренные значения измеряемых величин приведены в таблице 1 (Приложение Б).

По результатам проведенных испытаний можно сделать следующие выводы:

➤ Испытания подшипников **12309КМ:**

1. Прикатка нового подшипника сопровождается снижением уровня вибрации на 7,29 %, снижением тока на 29%;

2. Наличие дефекта – раковина объемом 30 мм^3 на поверхности качения одного ролика ведет к увеличению тока двигателя до 2 %, сопровождается увеличением вибрации на 10%;

3. Наличие дефектов – раковины объемом 60 мм^3 на поверхности качения двух роликов ведет к увеличению тока двигателя до 4 %; зафиксировано кратковременное повышение тока на 44%, сопровождается увеличением вибрации на 12,35%;

4. При изменении давления масла в системе от 4 кгс/см^2 до нуля т.е. при масляном голодании, а затем при обильной смазке до 4 кгс/см^2 , изменяется ток двигателя до 30 %.

➤ Испытания подшипников **6-7506A**:

1. Прикатка нового подшипника сопровождается повышением уровня вибрации на 1,5 %, снижением тока на 22,08%;

2. Наличие дефекта - раковина объемом 20 мм^3 на поверхности качения одного ролика ведет к увеличению тока двигателя до 0,5 %, сопровождается увеличением вибрации на 1%;

3. Наличие дефектов - раковины объемом 40 мм^3 на поверхности качения двух роликов ведет к увеличению тока двигателя до 8 %, сопровождается увеличением вибрации на 8,05%;

4. При изменении давления масла в системе, т.е. при обильной смазке 4 кгс/см^2 , а затем при масляном голодании подшипника 0 кгс/см^2 изменяется ток двигателя до 16 %.

Проведенные испытания по выявлению зависимости изменения расхода электрической энергии потребляемой электроприводом с новыми подшипниками и после имитации дефектов на рабочих поверхностях роликов показали, что для различных типов подшипников, в различных режимах нагрузки влияние дефектов на расход электрической энергии имеет различные зависимости, отраженные выше в выводах для исследованных подшипников.

Ведение непрерывного мониторинга и диагностики дефектов подшипников позволяет индивидуально для каждого исследуемого подшипника определять возрастание потребляемого расхода электрической энергии (рост технических потерь) от возникновения дефектов и их развития.

Таким образом, проведение испытаний двух типов подшипников показали наличие влияния дефектов роликов подшипников на потребляемый ток испытательной установки, а следовательно и на расход электрической энергии.

Получена классификация дефектов роторного оборудования, учитывающая влияние дефекта на увеличение расхода электрической энергии [75].

Таблица 2.1 - Классификация дефектов по воздействию на энергоэффективность роторного оборудования

Влияние дефекта на увеличение расхода электроэнергии, %	Дефекты подшипников качения:	Дефекты подшипников скольжения:	Дефекты вала ротора:	Дефекты рабочих колес насосов, турбин, вентиляторов и компрессоров:	Дефекты электромагнитной системы асинхронного двигателя:
10	Дефект смазки	Дефект смазки	-	-	-
20	Раковины, сколы на телах качения	Удары в подшипнике	-	-	-
30	Дефекты тел качения и сепаратора	-	-	-	-
Исследования по выявлению влияния дефектов на расход электроэнергии в данной работе не завершены	Обкатывание наружного кольца	Перекас подшипника	Неуравновешенность ротора	Неуравновешенность рабочего колеса	Дефекты обмоток (большой клетки) ротора.
	Неравномерный радиальный изгиб	Износ подшипника	Бой вала (муфты)	Бой рабочего колеса	Дефекты обмоток статора
	Перекас наружного кольца		Автоколебания вала (ротора)	Дефекты узлов крепления	Статический эксцентриситет воздушного зазора между ротором и статором.
	Износ наружного кольца		Дефекты узлов крепления	Дефекты лопастей	Насимметрия напряжения питания
	Раковины на наружном кольце		Дефекты соединительных муфт	Автоколебания рабочего колеса	Непокойные искажения напряжения питания
	Износ внутреннего кольца			Неоднородность потока	
	Раковины на внутреннем кольце			Кавитация	
	Износ тел качения и сепаратора				
	Сложный дефект				
Прокатывание кольца					

2.2 Модели измерительной информации

Учитывая имеющийся опыт экспериментального определения статистических характеристик случайных процессов, большой экспериментальный материал по исследованию динамики промышленных объектов, а также сущность самих технологических процессов, математическую модель измерительной информации можно представить в следующем виде [22, 23]:

$$G(t) = X(t) + N(t), \quad (2.3)$$

где $X(t)$ – полезный сигнал;

$N(t)$ – помеха измерения.

В свою очередь

$$X(t) = m_x(t) + \dot{X}(t), \quad (2.4)$$

где $m_x(t)$ – среднее значение, зависящее от времени (регулярная составляющая);

$\dot{X}(t)$ – центрированный случайный процесс (среднее значение равно нулю).

Случайные процессы в АСУТП в большинстве случаев имеют среднее значение $m_x(t)$, не равное нулю. Кроме того, величина $m_x(t)$ зависит, как правило, от времени. Если посмотреть на полученную экспериментально реализацию случайного процесса, обычно легко увидеть на фоне случайных флуктуаций параметра относительно медленное изменение среднего значения. При изменении среднего значения часто видны следующие составляющие: 1) сравнительно большая по величине постоянная или медленно изменяющаяся непериодическая составляющая; 2) существенная по величине периодическая или почти периодическая составляющая.

Медленное непериодическое изменение среднего значения обусловлено медленными, постепенными изменениями условий работы или характеристик технологического оборудования и свойств сырья, например

медленным изменением нагрузки агрегата по заданному графику, старением катализатора в химических реакторах, отложением солей на поверхностях нагрева теплообменников, медленным изменением зольности и влажности топлива.

Периодическая составляющая обусловлена самыми разнообразными периодическими явлениями и операциями: суточной периодичностью производственного процесса, периодическими технологическими циклами у потребителей продукции рассматриваемой системы управления, периодическими переключениями оборудования.

В общем виде среднее значение можно представить в виде тригонометрического полинома:

$$m_x(t) = \sum_{k=0}^n (a_k \cos k\omega_m t + b_k \sin k\omega_m t), \quad (2.5)$$

где a_k, b_k – постоянные коэффициенты, зависящие от конкретного вида $m_x(t)$;

ω_m – основная частота;

n – порядок полинома, определяющий количество учитываемых гармоник и частоту наиболее высокочастотной гармоники $\omega = n\omega_m$.

Тригонометрический полином (2.5) может содержать постоянную составляющую при $k=0$ и $a_0 \neq 0$, а также линейную составляющую при $k=1$, $b_1 \neq 0$ и ω_m , близком к нулю.

Случайный процесс $\dot{X}(t)$, формируемый в результате одновременного действия множества независимых или слабо связанных друг с другом факторов, сравнимых по эффекту своего участия в образовании $\dot{X}(t)$, в большинстве случаев можно считать стационарным, а его распределение – близким к нормальному.

Помеха измерения $N(t)$ представляет собой комбинацию различных случайных процессов, которые возникают в чувствительных элементах, преобразующих узлах датчиков, каналах связи, в измерительных

устройствах и преобразователях. Так, например, в месте установки чувствительного элемента источниками высокочастотных помех могут явиться пульсации давления, турбулентность потоков, вибрация технологического оборудования и т. п.

В зависимости от конструкций преобразующих узлов датчиков и измерительных устройств, источниками помех могут быть самые различные физические явления (дробовой эффект, генерация автоколебаний, колебания сопротивлений в контактах, изменения окружающих условий и т. д.).

В каналах связи помехи могут обычно вызываться различными наводками электрического и магнитного характера.

Для облегчения анализа целесообразно все составляющие помехи измерения привести к точке отбора первичного сигнала и рассматривать помеху измерения как некоторый случайный процесс, который суммируется с исследуемым случайным процессом $X(t)$.

В большинстве случаев помеха измерения $N(t)$ представляет собой стационарный случайный процесс, с нормальным законом распределения и нулевым средним значением, некоррелированный с измеряемым процессом $X(t)$.

Кроме того, в большинстве случайный процесс $\dot{X}(t)$ и помеха измерения $N(t)$ обладают эргодическим свойством. А это значит, что характеристики этих случайных процессов могут быть определены не как средние по множеству наблюдений, а как средние по времени.

Как известно, полной характеристикой случайного процесса является его многомерная плотность распределения вероятностей. Гауссовский (нормальный) случайный процесс полностью описывается первыми двумя моментами – математическим ожиданием и корреляционной функцией, позволяющими получить многомерную плотность распределения вероятностей.

Любой стационарный случайный процесс может быть с необходимой

степенью точности описан корреляционной функцией:

$$K(\tau) = \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 e^{-\omega_i |\tau|}, \quad (2.6)$$

Из этого следует, что результаты математических расчетов, основанных на экспоненциальных корреляционных функциях, можно распространить на более широкий класс полученных на практике корреляционных функций. Поэтому в качестве корреляционной функции измеряемого сигнала $X(t)$ естественно использовать:

$$K_x(\tau) = D_x e^{-\alpha |\tau|}, \quad (2.7)$$

а корреляционную функцию помехи измерения будем принимать равной

$$K_n(\tau) = D_n e^{-\beta |\tau|}, \quad (2.8)$$

где D_x – дисперсия измеряемого сигнала;
 α – коэффициент, характеризующий скорость убывания корреляционной функции измеряемого сигнала;
 D_n – дисперсия помехи,
 β – коэффициент, характеризующий скорость убывания корреляционной функции помехи.

При этом, как правило, помеха является более высокочастотной, чем измеряемый сигнал ($\beta > \alpha$).

Стационарные случайные процессы с корреляционными функциями (2.7) и (2.8) удобны при аналитических исследованиях и имитационном моделировании, результаты которых могут быть распространены и на другие процессы. Кроме того, в большинстве случаев получаемые оценки статистических характеристик полезного сигнала и, тем более, помехи слишком приближенные, чтобы принимать для их корреляционных функций более точные аппроксимации, чем выражения (2.7) и (2.8).

Следует отметить, что случайные стационарные процессы, корреляционные функции которых описываются моделями (2.7) и (2.8) обладают эргодическим свойством, что следует из существования у обеих

корреляционных функций предела при устремлении аргумента в бесконечность.

Для получения верхней оценки погрешности некоторых результатов измерения в качестве помехи измерения будем рассматривать помеху типа белый шум, с корреляционной функцией вида:

$$K_n(\tau) = S\delta(\tau), \quad (2.9)$$

где S – спектральная плотность помехи.

В дальнейшем прописными буквами, например $X(t)$, будем обозначать случайные функции, строчными буквами – отдельные реализации случайных функций (например, $x(t)$ есть реализация случайного процесса $X(t)$).

По экспериментальным данным для каждой величины были рассчитаны статистические характеристики: математическое ожидание, дисперсия и корреляционная функция соответственно [23] по формулам (2.10), (2.11), (2.12) и полученные в Приложении В:

$$m_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (2.10)$$

$$D_0 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [X_i - m_0]^2 \quad (2.11)$$

$$K_k = \frac{1}{N-k-1} \cdot \left[\sum_{i=0}^{N-k-1} ((X_i - m_0) \cdot (X_{i+k} - m_0)) \right] \quad (2.12)$$

Для моделирования сигналов корреляционные функции необходимо аппроксимировать экспоненциальными зависимостями. Результат аппроксимации напряжения показан на рисунке 2.24.

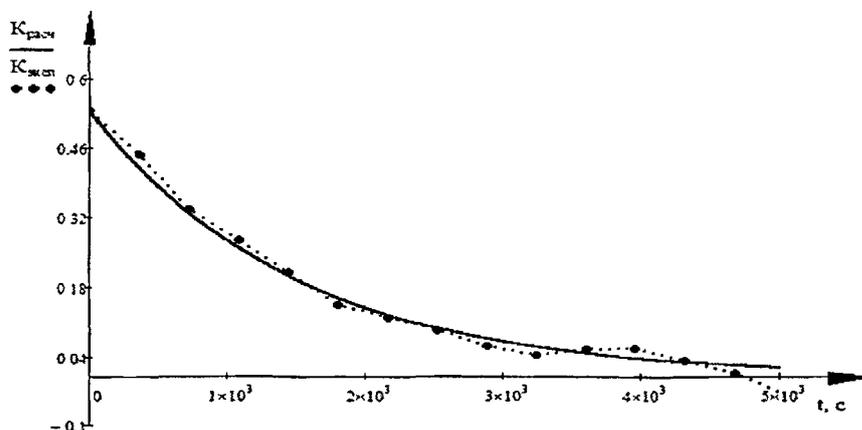


Рисунок 2.24 –
Рассчитанная $K_{\text{эсп}}$ и
аппроксимированная
 $K_{\text{расч}}$ корреляционная
функция напряжения

Функция, аппроксимирующая корреляционную функцию напряжения в соответствии с формулой (2.7):

$$K_U(t) = 0,513 \cdot e^{-6,83 \cdot 10^{-4} \cdot t} \quad (2.13)$$

Аналогичные исследования, проведенные с остальными сигналами, позволяют получить их модели в виде корреляционных функций.

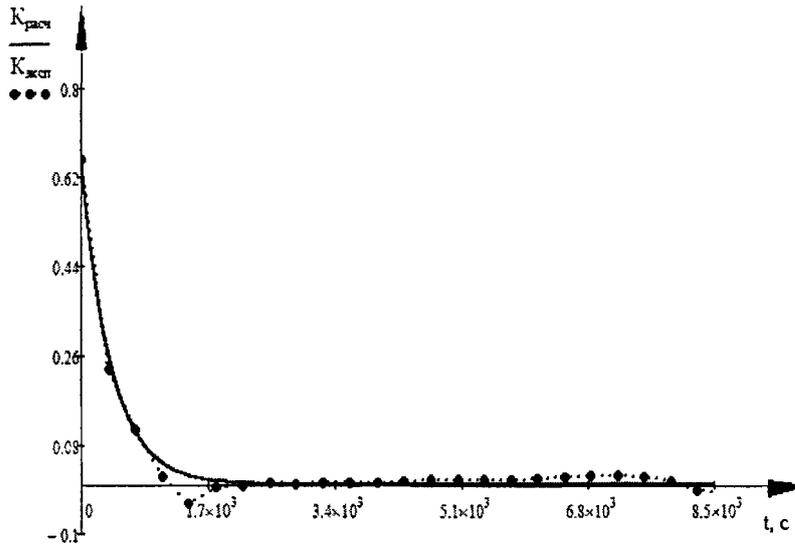


Рисунок 2.25 –
Рассчитанная $K_{\text{эксп}}$ и
аппроксимированная
 $K_{\text{расч}}$ корреляционная
функция тока

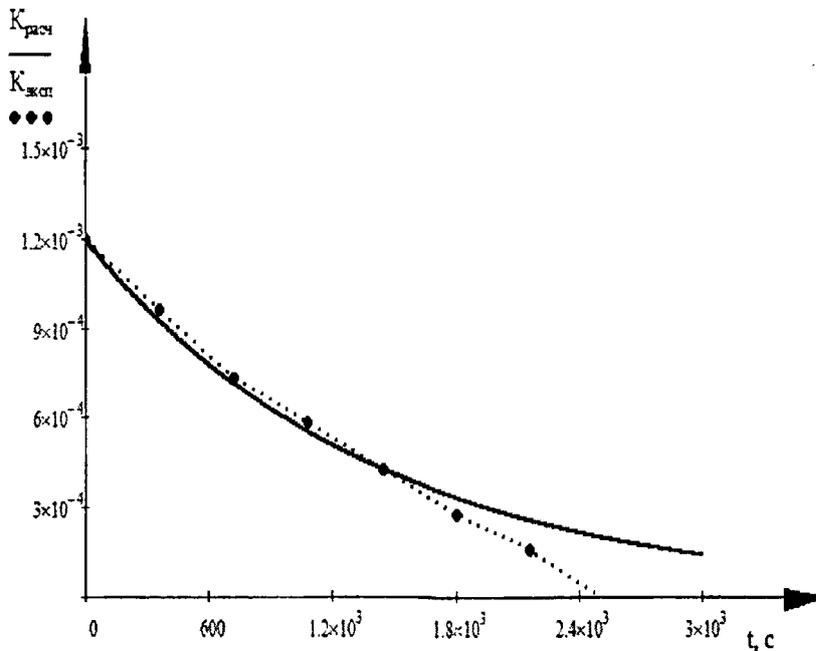


Рисунок 2.26 –
Рассчитанная $K_{\text{эксп}}$ и
аппроксимированная
 $K_{\text{расч}}$ корреляционная
функция \cos угла сдвига
фаз

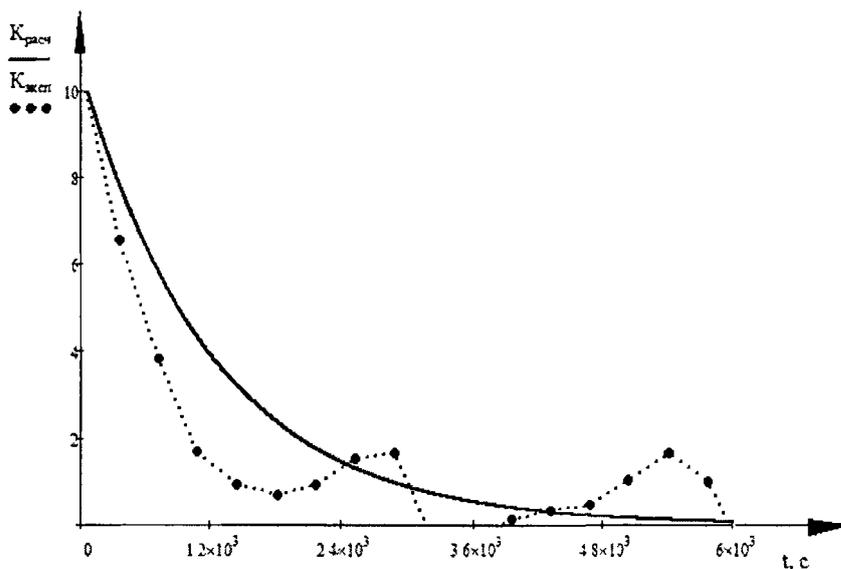


Рисунок 2.27 –
 Рассчитанная $K_{\text{эксп}}$ и
 аппроксимированная
 $K_{\text{расч}}$ корреляционная
 функция значений
 вибрации

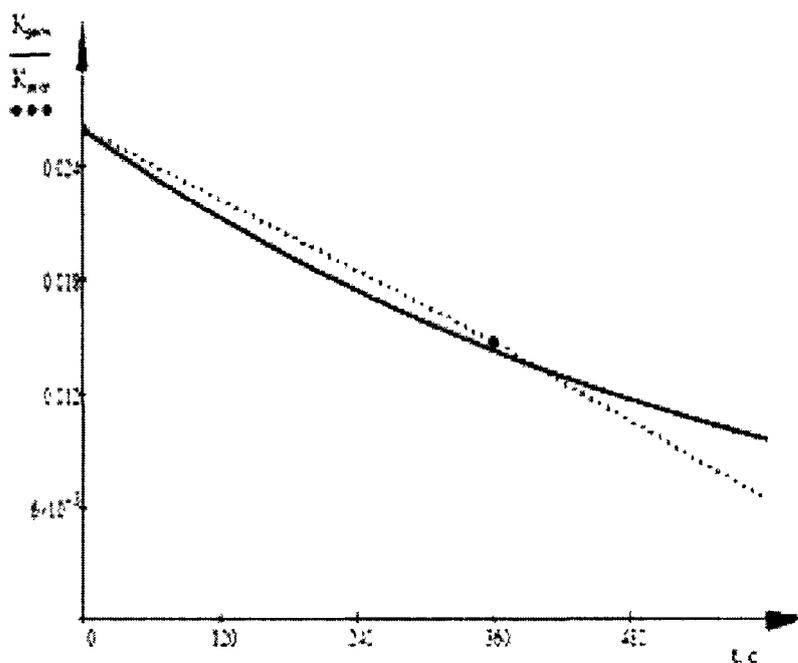


Рисунок 2.28 –
 Рассчитанная $K_{\text{эксп}}$ и
 аппроксимированная
 $K_{\text{расч}}$ корреляционная
 функция значений
 температуры

На рисунках 2.24 - 2.28 показаны корреляционные функции, которые были рассчитаны по экспериментальным данным, а также аппроксимирующие их экспоненциальные зависимости для сигналов тока, \cos угла сдвига фаз, значений вибрации и температуры.

Модели сигналов имеют вид:

– тока $K_I(t) = 0,35 \cdot e^{-2,5 \cdot 10^{-3} \cdot t}$

– напряжения $K_U(t) = 0,513 \cdot e^{-6,83 \cdot 10^{-4} \cdot t}$

– cos угла сдвига фаз $K_{\cos}(t) = 0,00119 \cdot e^{-7,194 \cdot 10^{-4} \cdot t}$

– значения вибрации $K_B(t) = 10,582 \cdot e^{-1,35 \cdot t}$

– температуры $K_t(t) = 0,026 \cdot e^{-1,667 \cdot 10^{-3} \cdot t}$

Значения математического ожидания, дисперсии и модели для каждого канала приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Модели измерительной информации

	m_0	D_0	$K(t)$
U	384.479 В	0.513 В ²	$K_U(t) = 0,513 \cdot e^{-6,83 \cdot 10^{-4} \cdot t}$
I	1.63 А	0.35 А ²	$K_I(t) = 0,35 \cdot e^{-2,5 \cdot 10^{-3} \cdot t}$
Cosφ	0.836	1.19 · 10 ⁻³	$K_{\cos}(t) = 1,19 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-7,194 \cdot 10^{-4} \cdot t}$
B	77.441 дБ	10,582 дБ ²	$K_B(t) = 10,582 \cdot e^{-1,351 \cdot 10^{-2} \cdot t}$
t	64,044 °С	0,026 °С ²	$K_t(t) = 0,026 \cdot e^{-1,667 \cdot 10^{-3} \cdot t}$

2.3 Проверка адекватности моделей измерительной информации

Как правило, проверка адекватности математической модели осуществляется путем проведения эксперимента на реальном объекте. При этом сопоставляются результаты, полученные расчетом по математической модели, с результатами, полученными в ходе эксперимента.

Оценка достоверности математической модели проведена на основе методики, предложенной в работе [59].

Проверка адекватности проводилась методом имитационного моделирования по методике из работы, согласно которой моделирование стационарных эргодических процессов должно быть основано на применении идеи формирующего фильтра и заключается в применении свойств прохождения случайных сигналов через линейные динамические звенья, когда сигнал типа «белый шум», подаваемый на вход динамического звена с импульсной характеристикой вида,

$$w(t) = \begin{cases} \frac{1}{T\Phi} \cdot e^{-\frac{t}{T\Phi}}, & \text{при } t \geq 0 \\ 0, & \text{при } t < 0 \end{cases} \quad (2.14)$$

преобразуется в случайный сигнал с корреляционной функцией:

$$K_x(\tau) = \frac{\sigma_u^2 \cdot K_0^2}{2T_0} \cdot \exp(-\alpha\tau), \quad (2.15)$$

или
$$K_{xx}(\tau) = \sigma_x^2 \cdot e^{-\frac{\tau}{T\Phi}} \quad (2.16)$$

где $T\Phi$ - постоянная времени динамического звена (фильтра); σ_x^2 - дисперсия сигнала.

Блок-схема моделирования входных параметров объекта и помехи показана на рисунке 2.29.

Блок - схема состоит из блока 1, который формирует случайное значение, блока 2, представляющего собой формирующий фильтр, и блока 3, позволяющего формировать заданные статические свойства.

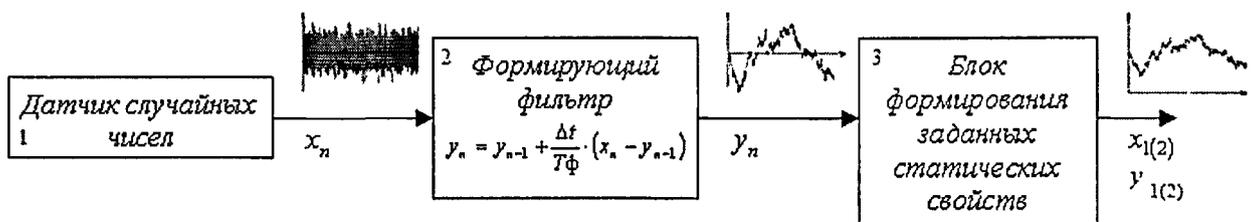


Рисунок 2.29 – Блок-схема моделирования стационарных эргодических процессов

Схема работает следующим образом: датчик случайных чисел (блок 1) обеспечивает равновероятность появления информации на вход формирующего фильтра. При этом математическое ожидание генерируемой информации нулевое для обеспечения стационарности итогового случайного процесса. Последовательность генерируемых случайных чисел имеет равномерный закон распределения:

$$P(x_n) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & , \text{ при } a \leq x_n \leq b \\ 0 & , \text{ вне интервала} \end{cases} \quad (2.17)$$

где a, b – диапазон изменения генерируемой величины, $a=0, b=1$. Если от каждого генерируемого числа отнимать 0.5, то получится равномерно распределенная последовательность с математическим ожиданием:

$$M_{x_n} = \int_0^1 (X_n - 0.5) \cdot P(X_n) \cdot dX_n = 0 \quad (2.18)$$

и дисперсией:

$$D^2_{x_n} = \int_0^1 (X_n - 0.5)^2 \cdot P(X_n) \cdot dX_n \approx 0.083 \quad (2.19)$$

Этими условиями обеспечивается генерация сигнала типа «белый шум», с известными статистическими характеристиками – математическим ожиданием равным нулю и дисперсией равной 0.083, которые легко могут быть трансформированы в любые другие в блоке формирования заданных статистических характеристик измерительной информации.

Известная, случайная, имеющая известные характеристики «белого шума» последовательность X_n поступает на вход формирующего фильтра (блок 2), работа которого описывается следующим рекуррентным соотношением:

$$y_n = y_{n-1} + \frac{dt}{T_\phi} \cdot (x_n - y_{n-1}), \quad (2.20)$$

где y_n - текущее значение формирующего фильтра; x_n - входной сигнал типа «белый шум»; T_ϕ – постоянная времени фильтра; dt - интервал дискретизации, с которым работает датчик случайных чисел.

Если в качестве постоянной времени T_ϕ использовать в формирующем фильтре постоянную времени математической модели корреляционной

функции измерительной информации, то на выходе из формирующего фильтра будет организовываться случайный процесс с корреляционной функцией вида (2.16):

$$K_{y_n}(\tau) = 0.083 \cdot e^{-\frac{\tau}{T_{\Phi}}}. \quad (2.21)$$

При этом по форме сигнал напоминает измерительную информацию, но статистические свойства этой информации полностью совпадают со свойствами генератора случайных чисел. Для того, чтобы сформировать измерительную информацию в виде наиболее приближенному к реальному в блоке формирования заданных статических свойств (блок 3) обеспечивается умножение последовательности Y_n на коэффициент усиления в соответствии с (2.20) и прибавление желаемого математического ожидания, M_x :

$$X_1(i \cdot dt) = K_m \cdot Y_n(i \cdot dt) + M_x \quad (2.22)$$

где $X_1(i \cdot dt)$ моделируемая последовательность измерительной информации с заданными статистическими характеристиками.

Коэффициент K_m находится в соответствии с моделью измерительной информации по следующему соотношению:

$$K_m = \sqrt{\frac{2 \cdot T_x \cdot D_x^2}{D_{гсч}^2}}, \quad (2.23)$$

где T_x – постоянная автокорреляционной функции измерительной информации; D_x^2 – дисперсия измерительной информации; $D_{гсч}^2$ – дисперсия генератора случайных чисел.

В качестве базы сравнения выбраны известные приборы, применяемые для вибродиагностики роторного оборудования и расхода электроэнергии, имеющие высокую точность измерений - виброанализатор СД-12М Российского производителя – ОАО «ВАСТ» город Санкт-Петербург и интеллектуальный счетчик электрической энергии СЕ 303 производитель – ЗАО «Концерн Энергомера» город Ставрополь.

Для подтверждения адекватности математических моделей создана экспериментальная лабораторная установка. Которая состоит из

асинхронного электродвигателя 4АМ80А4У3, мощностью 1,1 кВт с числом оборотов вала 1400 мин^{-1} , при помощи ременной передачи и двух шкивов ротор электродвигателя соединен с рабочим валом на котором смонтирован диск диаметром 200 мм с отверстиями для крепления масс различного веса для создания дисбаланса в различных экспериментальных режимах работы. Вибрационные характеристики двигателя и подшипников рабочего вала определяли с помощью виброанализатора СД-12М и разработанной информационно-измерительной системы, реализующей предложенный способ. Электрические характеристики питающей сети регистрировались интеллектуальным счетчиком электрической энергии СЕ 303 с передачей сигнала в режиме он-лайн в программную среду трейс-моуд [97] в которой с помощью реализованного алгоритма измеряемые параметры визуализируются.

Схема экспериментальной лабораторной установки представлена на рисунке 2.30.

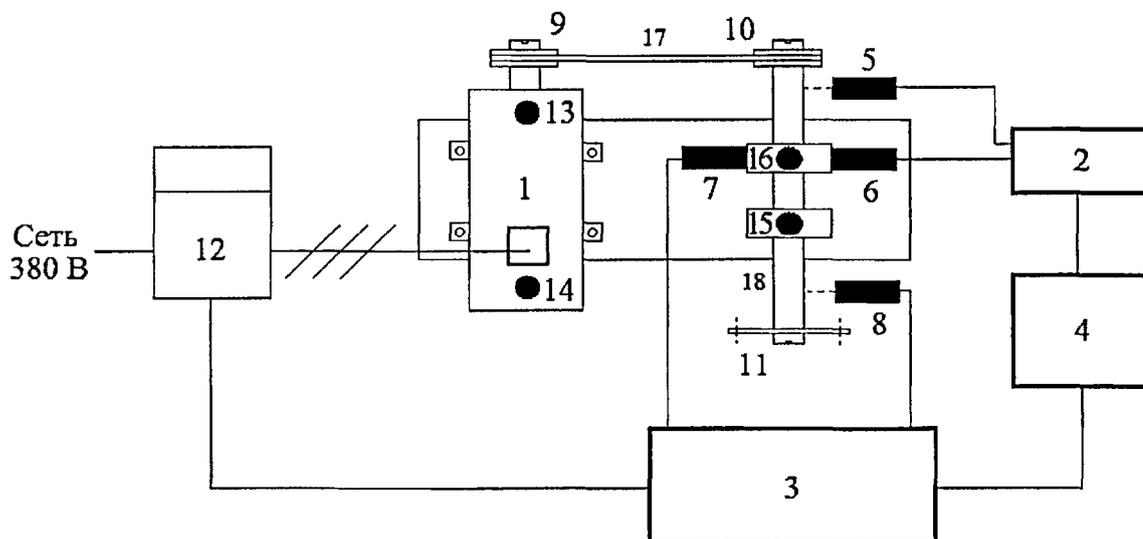


Рисунок 2.30 – Схема экспериментальной лабораторной установки

1 – асинхронный электродвигатель, тип 4АМ80А4У3, мощность 1,1 кВт с числом оборотов вала 1400 мин^{-1} ; 17 - ременная передача; 9, 10 – шкивы; 18 - рабочий вал; 11 - диск диаметром 200 мм с отверстиями для крепления масс различного веса; 2 – виброанализатор СД-12М; 3 – контроллер КР-500;

4 – ЭВМ; 5, 8 – датчики оборотов (тахометры); 6, 7 – датчики виброускорения; 12 – счетчик электрической энергии; 13-16 – точки контроля вибропараметров.

Измеряемые параметры в режиме он-лайн передаются на ЭВМ 4 в программную среду Trace Mode, в которой визуализируются.

На рисунках 2.31-2.35 представлены графики реальных и имитируемых сигналов. Расчеты представлены в приложении В.



Рисунок 2.31 – Реальный и имитированный сигнал линейного напряжения электрической сети питающей лабораторную установку

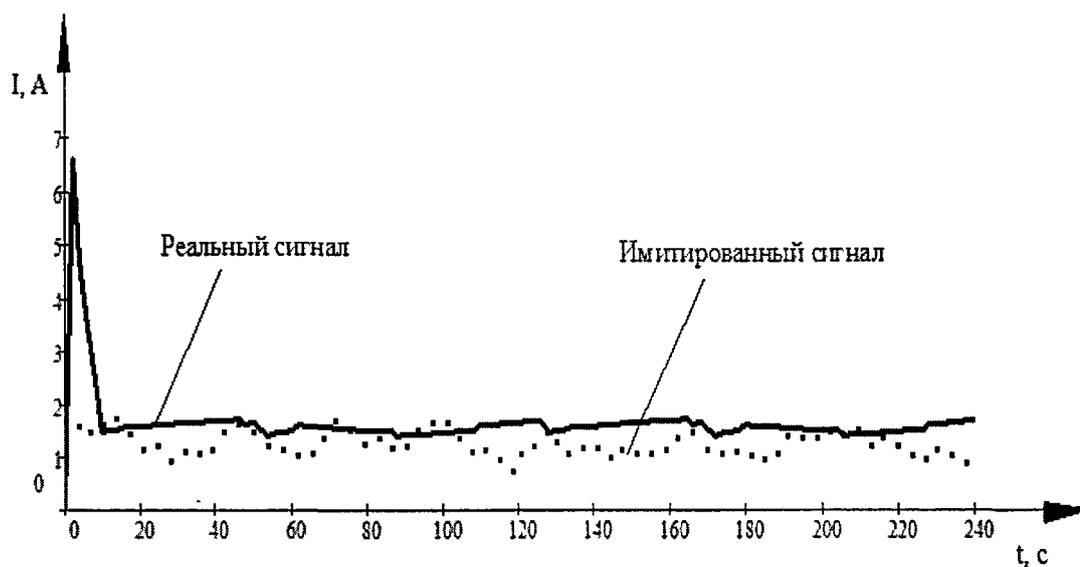


Рисунок 2.32 – Реальный и имитированный сигнал электрического тока фазы «А» потребляемого лабораторной установкой

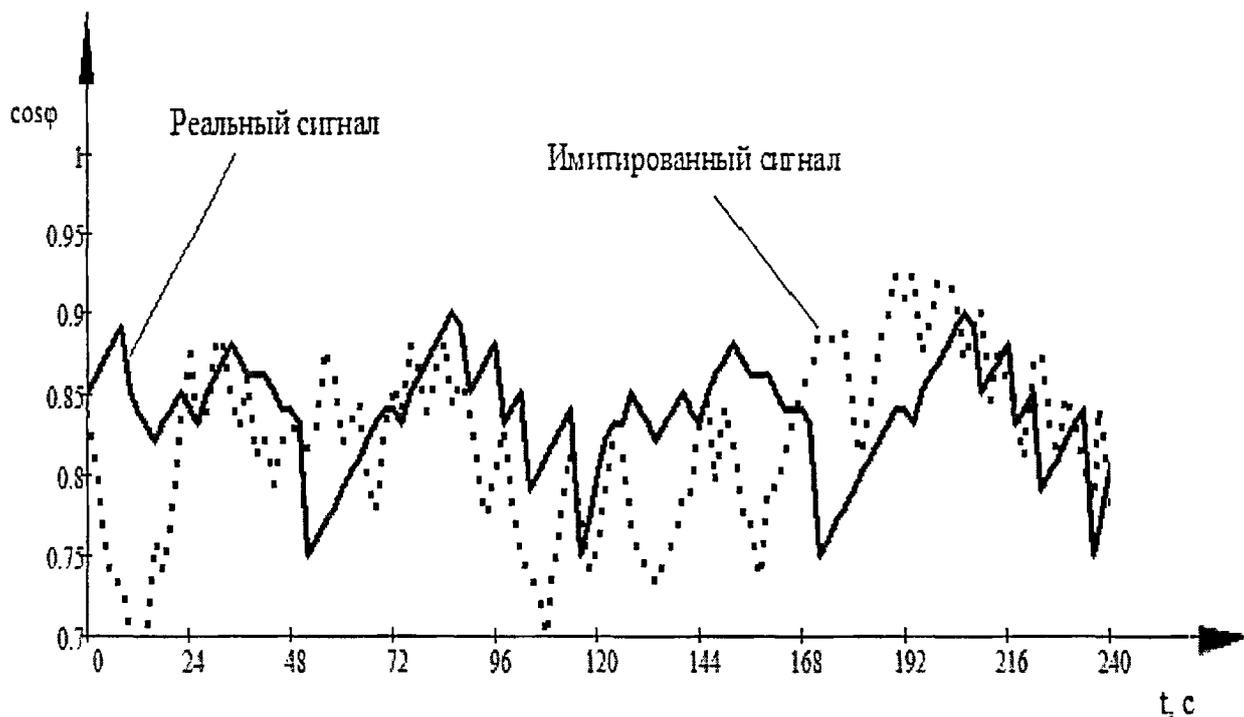


Рисунок 2.33 – Реальный и имитированный сигнал угла сдвига фаз напряжения и тока лабораторной установки

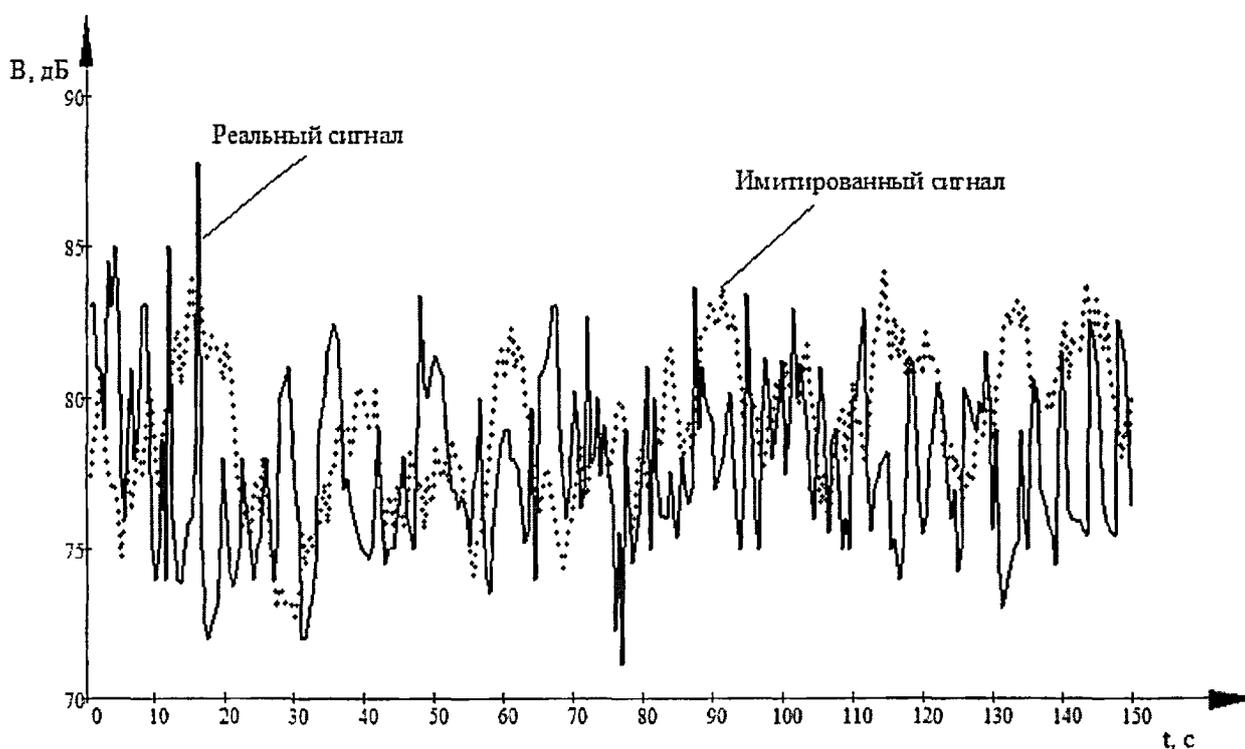


Рисунок 2.34 – Реальный и имитированный сигнал виброускорения подшипника лабораторной установки

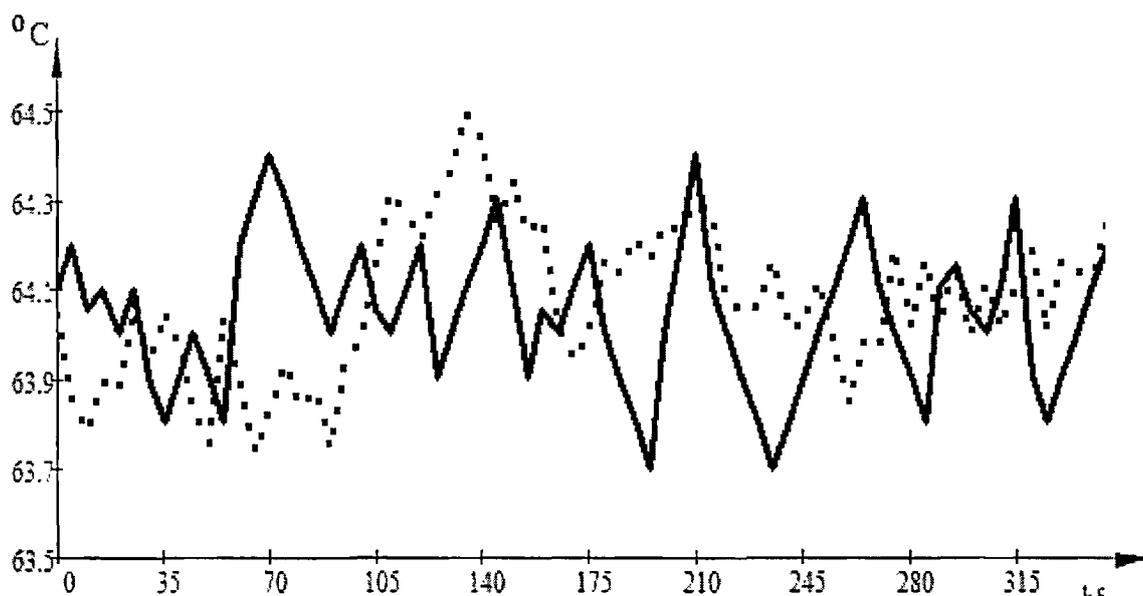


Рисунок 2.35 – Реальный и имитированный сигнал температуры подшипника лабораторной установки

Далее осуществляется проверка данной гипотезы при уровне значимости риска $q=0.05$ (5%), гарантирующем приемлемую мощность критерия H_0 .

Проверка гипотезы осуществляется следующим образом: вычисляется предварительная оценка математического ожидания случайного процесса $V(t)$:

$$\hat{m}_v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v(it_0), \quad (2.24)$$

где N – количество отсчетов реализации $v(t)$;

t_0 – интервал времени между двумя отсчетами реализации случайной функции $V(t)$.

При этом длина реализации $T=Nt_0$ выбиралась из весьма общих соображений.

Вычисляются предварительные оценки значений нормированной корреляционной функции:

$$\hat{K}_v(kt_0) = \frac{N-1}{N-k-1} \times \frac{\sum_{i=1}^{N-k} [v(it_0) - \hat{m}_v][v\{(i+k)t_0\} - \hat{m}_v]}{\sum_{j=1}^N [v(it_0) - \hat{m}_v]^2}, \quad (2.25)$$

где $k=0, 1, 2 \dots, l; l \leq 0.1N$.

Расчет значений нормированной корреляционной функции осуществляется до значения k_m , при котором $\hat{K}_v(k_m t_0) \leq 0.05$. Значения функции $V(t)$ через интервал корреляции $\tau_{к.м} = k_m t_0$ считаются некоррелированными, а так как процесс нормальный, то и статистически независимыми.

Далее формируется новая реализация длиной $T = \tau_{к.м} \cdot 10^2$. Оценки статистических характеристик, рассчитываемые по реализации такой длины имеют распределение близкое к нормальному. Интервал времени t_0 между соседними отсчетами принимается равным $\tau_{к.м}/100$.

По новой реализации вычисляется уточненные оценки математического ожидания \hat{m}_v , значений нормированной корреляционной функции $\hat{K}_v(kt_0)$ и интервала корреляции $\tau_{к.м}$. Кроме того, вычисляется оценка дисперсии:

$$\hat{D}_v = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [v(it_0) - \hat{m}_v]^2. \quad (2.26)$$

С помощью критерия t осуществляется проверка равенства математического ожидания формируемого случайного процесса $V(t)$ величине m_0 . Для этого вычисляется следующее отношение:

$$t = \frac{|\hat{m}_v - m_0|}{\sigma_{m_v}}, \quad (2.27)$$

где σ_{m_v} – среднеквадратическое отклонение оценки математического ожидания.

Значение среднеквадратического отклонения оценки математического ожидания равно:

$$\sigma_{m_v} = \sqrt{\frac{\hat{D}_v}{N} \left[1 + 2 \sum_{i=1}^{k_v} \left(1 - \frac{i}{N} \right) \hat{K}_v(it_0) \right]}, \quad (2.28)$$

Вычисленное значение t сравнивалось с табличным $t_{q,\nu}$ для распределения Стюдента, где q – уровень значимости риска, а ν – число степеней свободы, которое вычислялось из соотношения

$$\nu = \frac{2T}{\tau_{к.м}} = \frac{2Nt_0}{k_m t_0} = \frac{2N}{k_m}, \quad (2.29)$$

где T – длина реализации $v(t)$;

$\tau_{к.м}$ – максимальный интервал корреляции.

Отличие оценки математического ожидания \hat{m}_ν от значения m_0 считается несущественным, если $t < t_{q,\nu}$

С помощью критерия F (Фишера) осуществляется проверка равенства дисперсии случайного процесса $V(t)$ заданной величине D_0 . С этой целью вычисляется отношение:

$$F = \frac{\max[D_0, \hat{D}_\nu]}{\min[D_0, \hat{D}_\nu]}, \quad (2.30)$$

где $\max[D_0, \hat{D}_\nu]$, $\min[D_0, \hat{D}_\nu]$ – соответственно максимальная и минимальная из дисперсий.

Вычисленное значение F сравнивается с табличным $F_{табл}$ при данном для каждой дисперсии числе степеней свободы и избранном уровне значимости риска. Число степеней свободы для дисперсии D_0 принимается равным бесконечности, а для \hat{D}_ν – значению величины ν , вычисленному ранее по формуле (2.29). В случае если $F < F_{табл}$ различие между дисперсиями можно считать несущественным.

Проверка равенства скорости изменения моделируемого случайного процесса величине α_0 осуществляется путем анализа совпадения значений корреляционных функций $K_0(\tau)$ и $\hat{K}_\nu(\tau)$ при заданном временном сдвиге $\tau_{к.0.5}$. Интервал времени $\tau_{к.0.5}$ принимается равным $k_{0.5}t_0$ при условии, что $\hat{K}_\nu(k_{0.5}t_0) \leq 0.5$. Значение нормированной корреляционной функции $K_0(\tau)$

вычисляется по формуле:

$$K_0(\tau_{k,0.5}) = e^{-\alpha_0 |k_0 s t_0|}. \quad (2.31)$$

Равенство коэффициентов корреляции $K_0(\tau_{k,0.5})$ и $\hat{K}_v(\tau_{k,0.5})$ проверяется с помощью критерия t . Для чего вычислялось отношение:

$$t = \frac{|\hat{K}_v(\tau_{k,0.5}) - K_0(\tau_{k,0.5})|}{\sigma_{K_v(\tau_{k,0.5})}}, \quad (2.32)$$

где $\sigma_{K_v(\tau_{k,0.5})}$ – среднеквадратическое отклонение оценки значения $\hat{K}_v(\tau_{k,0.5})$ нормированной корреляционной функции. Значение $\sigma_{K_v(\tau_{k,0.5})}$ в последнем выражении согласно равно:

$$\sigma_{K_v(m_0)} = \sqrt{\frac{1}{N-n} \left[1 + \hat{K}_v^2(nt_0) + 2 \sum_{i=1}^{k_n} \left(1 - \frac{i}{N-n} \right) \left\{ \hat{K}_v^2(it_0) + \hat{K}_v[(i+n)t_0] \hat{K}_v[(i-n)t_0] \right\} \right]},$$

где $n = E \left[\frac{\tau_{k,0.5}}{t_0} \right]$. (2.33)

Вычисленное значение t сравнивалось с табличным $t_{q,v}$ для распределения Стьюдента. Отличие скорости изменения случайного процесса $V(t)$ от α_0 можно считать несущественным, если $t < t_{q,v}$.

Результаты расчетов по проверке соответствия статистических характеристик случайного сигнала, формируемого датчиком случайных чисел со статистическими характеристиками, полученными в ходе пассивного эксперимента представлены в таблице 2.3.

Сравнение рассчитанных значений критериев с табличными показало, что математическое ожидание, дисперсия и скорость изменения моделируемых реализаций отличаются от экспериментальных реализаций несущественно и, следовательно, нулевая гипотеза H_0 о соответствии экспериментальных реализаций моделируемым случайным сигналам верна.

Таблица 2.3 – Критерии оценки адекватности моделей измерительной информации

Канал	Напряжение, $Y_1(t)$	Сила тока, $Y_2(t)$	Cos угла сдвига фаз, $Y_3(t)$	Вибрация, $Y_4(t)$	Температура, $Y_5(t)$
Математическое ожидание, m_0	384,479	1,63	0,836	77,441	64,044
Математическое ожидание (моделирование), \hat{m}_v	384,695	1,636	0,839	78,69	64,071
Критерий оценки адекватности расчетный, t	0,991	0,016	0,356	0,576	0,545
Критерий оценки адекватности табличный (Стьюдента), $t_{кр}$	2,447	4,033	2,776	4,033	2,447
Дисперсия, D_0	0,513	0,35	$1,19 \cdot 10^{-3}$	10,582	0,026
Дисперсия (моделирование случайного процесса), \hat{D}_v	0,522	0,33	$1,19 \cdot 10^{-3}$	10,07	0,029
Критерий Фишера расчетный, F	1,018	1,06	1	1,051	1,029
Критерий Фишера табличный, $F_{табл.}$	3,67	19,50	5,63	19,50	2,09

2.4 Выводы и обсуждение результатов

На рисунке 2.1 показано существование минимальной точки в которой оплата потерь электрической энергии возрастает, а разница между стоимостью ремонтных работ и оплатой потерь электроэнергии снижается и достигает минимального значения. При дальнейшем развитии дефектов затраты на оплату потерь превышают стоимость проведения ремонтных работ [81].



Рисунок 2.37 – Визуализация измерительной информации

Анализ информационных потоков в автоматизированном рабочем месте по диагностике роторного оборудования показывает, что все измеряемые параметры можно разбить на три группы. **Первая группа** измеряемых сигналов (температура, давление масла) низко частотная. Они имеют математическую модель сигнала (на примере температуры) следующего вида (см. таблицу 2.2):

$$K_i(t) = 0,026 \cdot e^{-1.667 \cdot 10^{-3} \cdot t}$$

Такие сигналы отнесём к классу **низкочастотных** сигналов ($\alpha < 1$ 1/сек). Для таких сигналов обязательным является оценка динамических погрешностей цифровой обработки сигнала, поскольку скважность цифровой обработки информации не превышает 1 секунды и обеспечивается модулем ввода аналоговой информации контроллера КР-500. **Вторая группа** измеряемых сигналов (ток, напряжение) **среднечастотная**. Эти сигналы имеют математическую модель (на примере тока) следующего вида (см. таблицу 2.2):

$$K_i(t) = 0,35 \cdot e^{-2.5 \cdot 10^{-3} \cdot t}$$

Показатель экспоненты у этой математической модели показывает, что сигнал относится к классу **среднечастотных**. Он условно может быть

отнесен к сигналам с частотой до 100 Гц. Для таких сигналов также обязательным является оценка динамических погрешностей цифровой обработки сигнала, поскольку скважность цифровой обработки информации так же не превышает 1 секунды и обеспечивается модулем ввода аналоговой информации контроллера КР-500. И, наконец, третья группа измеряемых сигналов является высокочастотной. Эти сигналы имеют математическую модель (см. таблицу 2.2):

$$K_B(t) = 10.582 \cdot e^{-1.351 \cdot 10^{-3} \cdot t}$$

Показатель экспоненты у этой математической модели показывает, что сигнал относится к классу высокочастотных с частотой до 1 МГц.

Для таких сигналов оценка динамических погрешностей цифровой обработки сигнала не актуальна, поскольку скважность цифровой обработки информации составляет около 1Мкс и обеспечивается встроенным, в вибродатчик, контроллером. Погрешности цифровой обработки информации, при этом, относятся к классу инструментальных и полностью определяются качеством применяемого контроллера.

Экспериментальные исследования, проведенные в главе 2.2, показали, что расход электрической энергии, потребляемый электроприводом, изменяется в процессе развития дефекта, что позволяет сделать вывод о том, что расход электроэнергии можно использовать для прогноза развития дефекта.

Кроме того, исследования показали, что для разных типов подшипников, в различных режимах нагрузки влияние дефектов на расход электрической энергии имеет различные зависимости.

Это позволяет сделать вывод о том, что проведение непрерывного (в реальном масштабе времени) мониторинга и диагностики подшипников позволяет определить возрастание потребляемого расхода электрической энергии до критического и тем самым прогнозировать время останова на ремонт.