

КУРЬЯНОВ ВАСИЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ

**ДИАГНОСТИКА И ПРОГНОЗ ВРЕМЕНИ
ЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ РОТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Автоматизация технологических процессов и производств» в филиале национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» в г. Волжском.

Научный руководитель	доктор технических наук, профессор Шевчук Валерий Петрович.
Официальные оппоненты:	Лукиянов Виктор Сергеевич доктор технических наук, профессор Волгоградский государственный технический университет, профессор кафедры «Электронно-вычислительные машины и системы»; Стрекалов Сергей Дмитриевич доктор технических наук Урюпинский филиал Волгоградского государственного университета профессор кафедры «Экономика и менеджмент»
Ведущая организация	федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Астраханский государственный технический университет».

Защита состоится «25» декабря 2012 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д.212.028.04 при Волгоградском государственном техническом университете по адресу: 400005, Россия, Волгоград, пр. Ленина, 28, ауд. 210.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Волгоградского государственного технического университета.

Автореферат разослан «23» ноября 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Водопьянов Валентин Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 немыслима 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., Дуросов В.М., Коренякин 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 [1, 7];
2. Получены модели измерительной информации, по которым целесообразно проводить диагностику, отличающиеся от известных учетом развивающихся дефектов [2, 5, 6];
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 [2, 3];
4. Предложен алгоритм прогноза времени вывода роторного оборудования на ремонт, отличающийся от известных наличием контроля за изменением потерь электрической энергии, зависящих от дефектов [3].

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.) [4, 7, 8];
2. Разработан пакет прикладных программ для визуализации измеряемых трендов автоматизированного рабочего места энергетика для диагностики роторного оборудования [5, 10];
3. Предложена классификация дефектов по воздействию на энергоэффективность роторного электрооборудования [1];

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 [5, 10, 11]. 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость результатов работы, кратко изложено содержание диссертационной работы, приведены данные о структуре и объеме работы.

В первой главе диссертации проведен анализ существующих методов диагностики эффективности энергетического оборудования. Проведен анализ существующих информационно-измерительных систем по диагностике и неразрушающему контролю роторного оборудования, а также систем, количественно рассчитывающих потери электрической энергии.

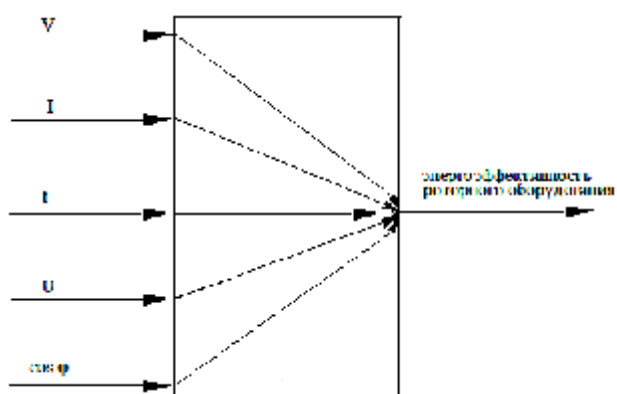


Рисунок 1 – Факторы, влияющие на энергоэффективность роторного оборудования

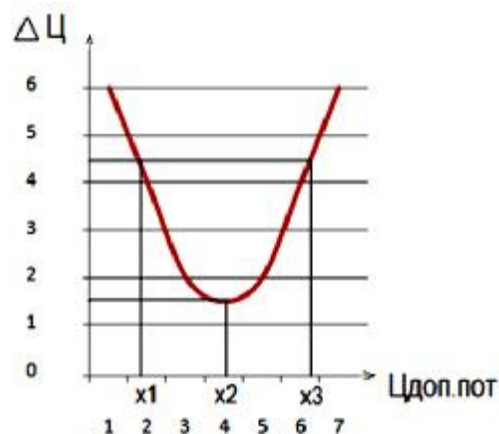


Рисунок 2 – Анализ затрат на эксплуатацию роторного оборудования

На рисунках 1 и 2: V – вибрация; U – напряжение; I – сила тока, t – температура; $\cos\varphi$ – коэффициент мощности; ΔC – разница между стоимостью ремонтных работ и стоимостью оплаты повышенных потерь электрической энергии (зависящих от дефектов); $C_{доп.пот}$ – 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.

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. Имеются патенты по распознаванию дефектов, но патентов по информационно-измерительной системе, определяющей энергоэффективность роторного оборудования, не обнаружено. На основе данных 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 существующих программных комплексов не учитывает в текущем времени последствия того или иного неисправного состояния роторного оборудования, приводящего к повышению расхода и потерь электрической энергии, соответственно теряется или расходуется нерационально до 30 % электрической энергии потребляемой роторным оборудованием.

Анализ литературных источников позволил составить классификацию дефектов по воздействию на энергоэффективность роторного оборудования.

Таблица 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	Перекос подшипника	Неуравновешенность ротора	Неуравновешенность рабочего колеса	Дефекты обмоток (беличьей клетки) ротора
	Неравномерный радиальный натяг	Износ подшипника	Бой вала (муфты)	Бой рабочего колеса	Дефекты обмоток статора
	Перекос 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				
Проскальзывание кольца					

Вторая глава посвящена выбору критерия эффективности работы роторного оборудования. Определению влияния дефектов подшипников на расход электрической энергии. Получению моделей измерительной информации. Проверке адекватности полученных моделей.

Уравнение измерения критерия энергоэффективности имеет следующий вид:

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

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; K_i – коэффициент адаптации.

$$d_{Xi}(t) = \frac{\Delta I(t)}{K_i}. \quad (2)$$

Для построения математических моделей измерительных сигналов был проведен эксперимент в испытательном центре ОАО «Волжский подшипниковый завод» на испытательной установке ЦКБ-50. Измерения проводились на оборудовании с новыми тестируемыми подшипниками и с последующим нанесением дефектов, приближенных к реальным, возникающих при длительной эксплуатации оборудования. Изменения токов и мощностей нового подшипника 12309КМ в процессе приработки представлены на рисунке 3. Далее на поверхность ролика подшипника нанесен дефект – раковина, имитация выкрашивания площадью 12 мм², глубиной 2,5 мм. Изменения токов и мощностей подшипника после нанесения дефекта № 1 представлены на диаграмме 4. Далее на поверхность второго ролика подшипника нанесен дефект – раковина, имитация выкрашивания площадью 12 мм², глубиной 2,5 мм. Изменение токов и мощностей после нанесения дефекта № 2 представлено на рисунке 5. На рисунках 3-5 представлены следующие значения: I_a – ток, протекающий в фазе «а» привода установки, А; I_b – ток, протекающий в фазе «в» привода установки, А; I_c – ток, протекающий в фазе «с» привода установки, А; P_{Σ} – активная мощность, потребляемая установкой, кВт; S_{Σ} – полная мощность, потребляемая установкой, кВА; Q_{Σ} – реактивная мощность, потребляемая установкой, кВар.

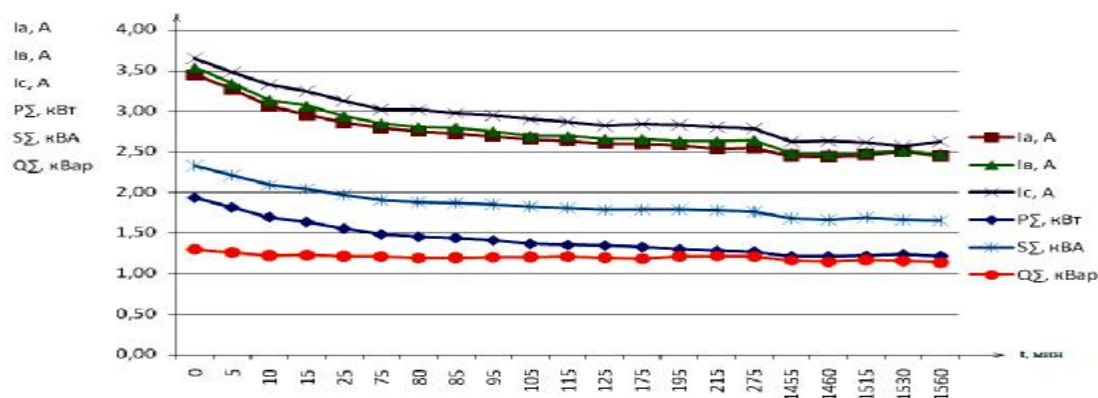


Рисунок 3 – Изменение токов и мощностей в процессе приработки нового подшипника 12309КМ

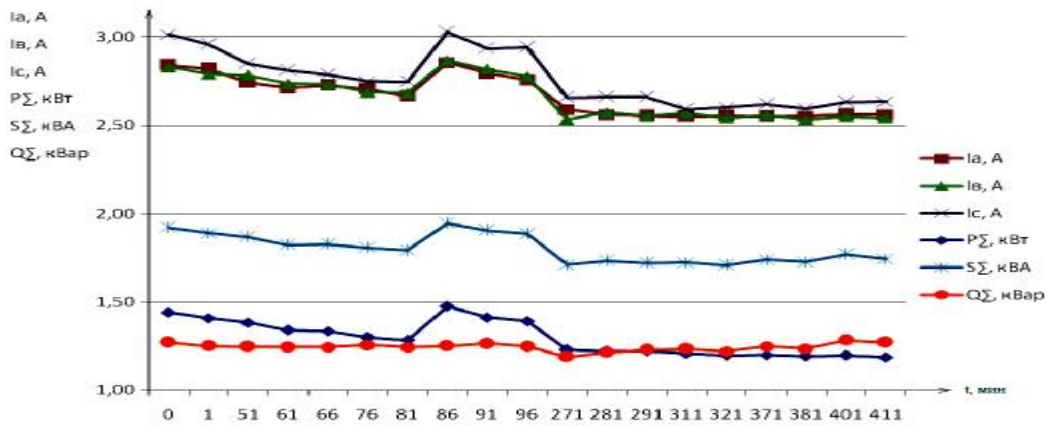


Рисунок 4 – Изменение токов и мощностей после нанесения дефекта на ролик подшипника 12309КМ, имитация выкрашивания

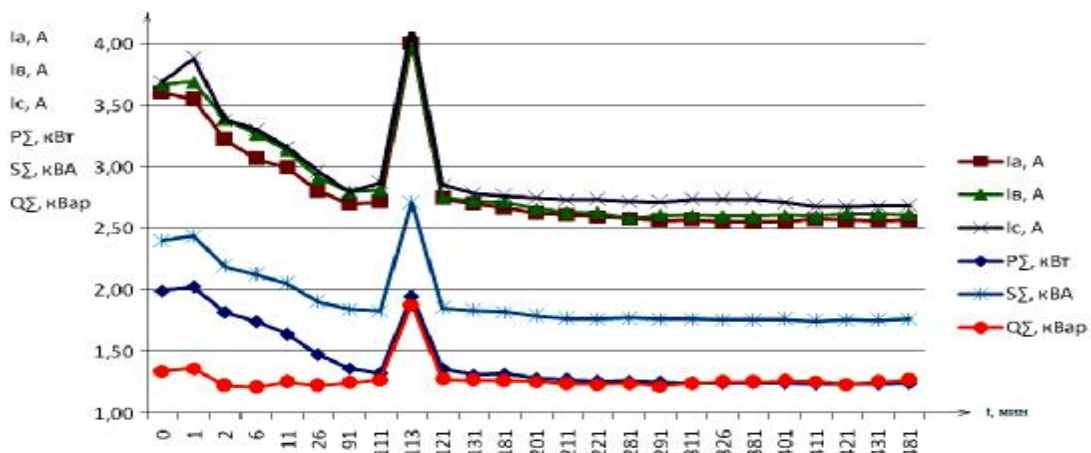


Рисунок 5 – Изменение токов и мощностей после нанесения второго дефекта на ролик подшипника 12309КМ, имитация выкрашивания

Зафиксирован рост потребления электрической энергии при появлении дефектов. Установившиеся значения токов и мощностей электрической энергии превышают аналогичные показатели при работе бездефектного подшипника.

Параллельно с измерениями проводилась и вибрационная диагностика. Результат вибродиагностики представлен на рисунке 6.

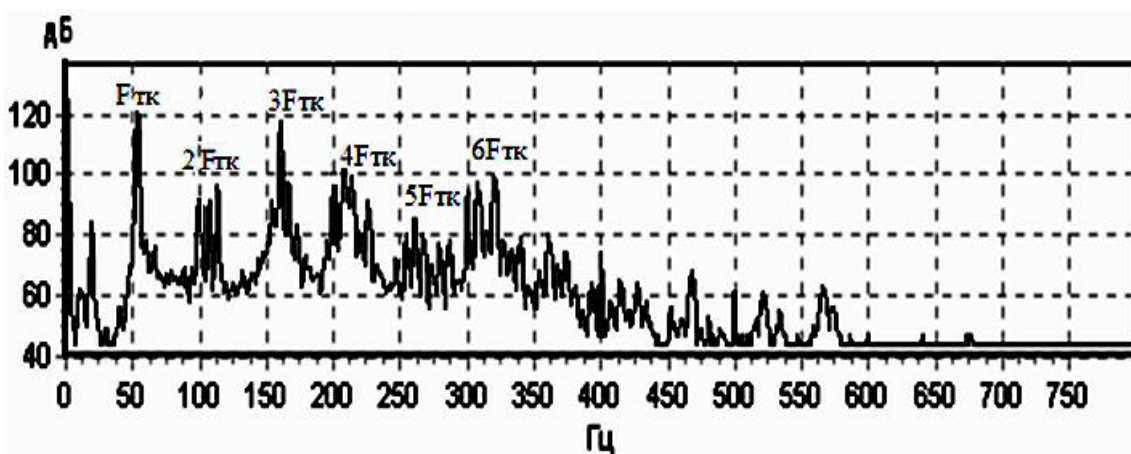


Рисунок 6 – Спектр вибрации подшипника

В процессе диагностики программа обнаружила следующие дефекты: раковины и сколы на телах качения, выделив ряд диагностических признаков: 52.81 Гц (18 %) Fтк; 105.66 Гц (0 %) 2Fтк; 158.58 Гц (16 %) 3Fтк; 211.58 Гц (0 %) 4Fтк, 263.17 Гц (0 %) 5Fтк; 317.88 Гц (0 %) 6Fтк.

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. Испытания подшипников 12309KM показали что:

1. Прикатка нового подшипника сопровождается снижением уровня вибрации на 7,29 % и снижением тока на 29 %;
2. Наличие дефекта – раковина объемом 30 мм³ на поверхности качения одного ролика – ведет к увеличению тока двигателя до 2 % и увеличению вибрации на 10 %;
3. Наличие дефектов – раковины объемом 60 мм³ на поверхности качения двух роликов – ведет к увеличению тока двигателя до 4 %. Зафиксировано кратковременное повышение тока на 44 % и увеличение вибрации на 12,35 %;
4. При изменении давления масла в системе от 4 кгс/см² до нуля, то есть при масляном голодании, а затем при обильной смазке до 4 кгс/см², изменяется ток двигателя до 30 %.

По данным эксперимента для каждой величины были рассчитаны статистические характеристики: математическое ожидание, дисперсия и корреляционная функция. Для моделирования сигналов корреляционные функции аппроксимированы экспоненциальными зависимостями. Результат моделирования сигналов представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты моделирования сигналов

	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	$K_{\cos\varphi}(t) = 1,19 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-7,19410^{-4} \cdot t}$
B	77.441 дБ	10,582 дБ ²	$K_B(t) = 10,582 \cdot e^{-1,35110^{-3} \cdot t}$
t	64,044 °С	0,026 °С ²	$K_t(t) = 0,026 \cdot e^{-1,667 \cdot 10^{-3} \cdot t}$

Для подтверждения адекватности математических моделей создана экспериментальная лабораторная установка, представленная на рисунке 7.

Установка состоит из: 1 – асинхронного электродвигателя типа 4АМ80А4У3 мощностью 1,1 кВт с числом оборотов вала 1 400 мин⁻¹. При помощи ременной передачи 17 и двух шкивов 9, 10 ротор электродвигателя соединен с рабочим валом 18 на котором смонтирован диск 11 диаметром 200 мм с отверстиями для крепления масс различного веса для создания дисбаланса в различных экспериментальных режимах работы; 2 – вибрoанализатора СД-12М; 3 – контроллера КР-500; 4 – ЭВМ;

5, 8 – датчиков оборотов (тахометров); 6, 7 – датчиков виброускорения; 12 – счетчика электрической энергии; 13-16 – точек контроля вибропараметров. Измеряемые параметры в режиме он-лайн передаются на ЭВМ 4 в программную среду Trace Mode, в которой визуализируются.

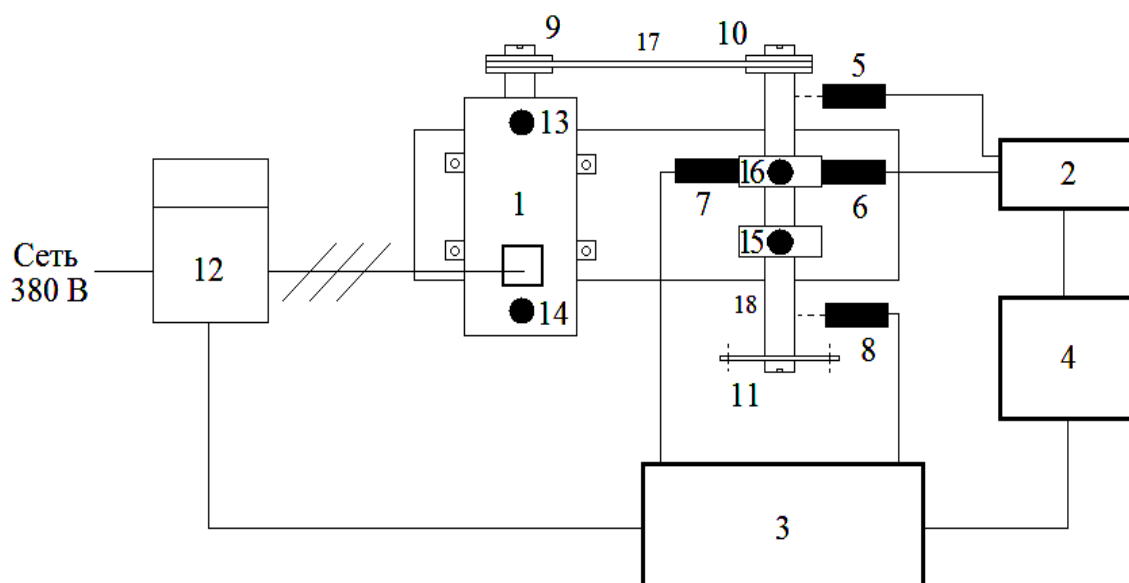


Рисунок 7 – Схема экспериментальной лабораторной установки

Результаты расчетов по проверке соответствия статистических характеристик случайного сигнала, формируемого датчиком случайных чисел, со статистическими характеристиками, полученными в ходе пассивного эксперимента, представлены в таблице 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 о соответствии экспериментальных реализаций моделируемым случайным сигналам верна.

Таблица 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, $Y_5(t)$
1	2	3	4	5	6
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

Окончание таблицы 3

1	2	3	4	5	6
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, $F_{\text{табл}}$	3,67	19,50	5,63	19,50	2,09

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.

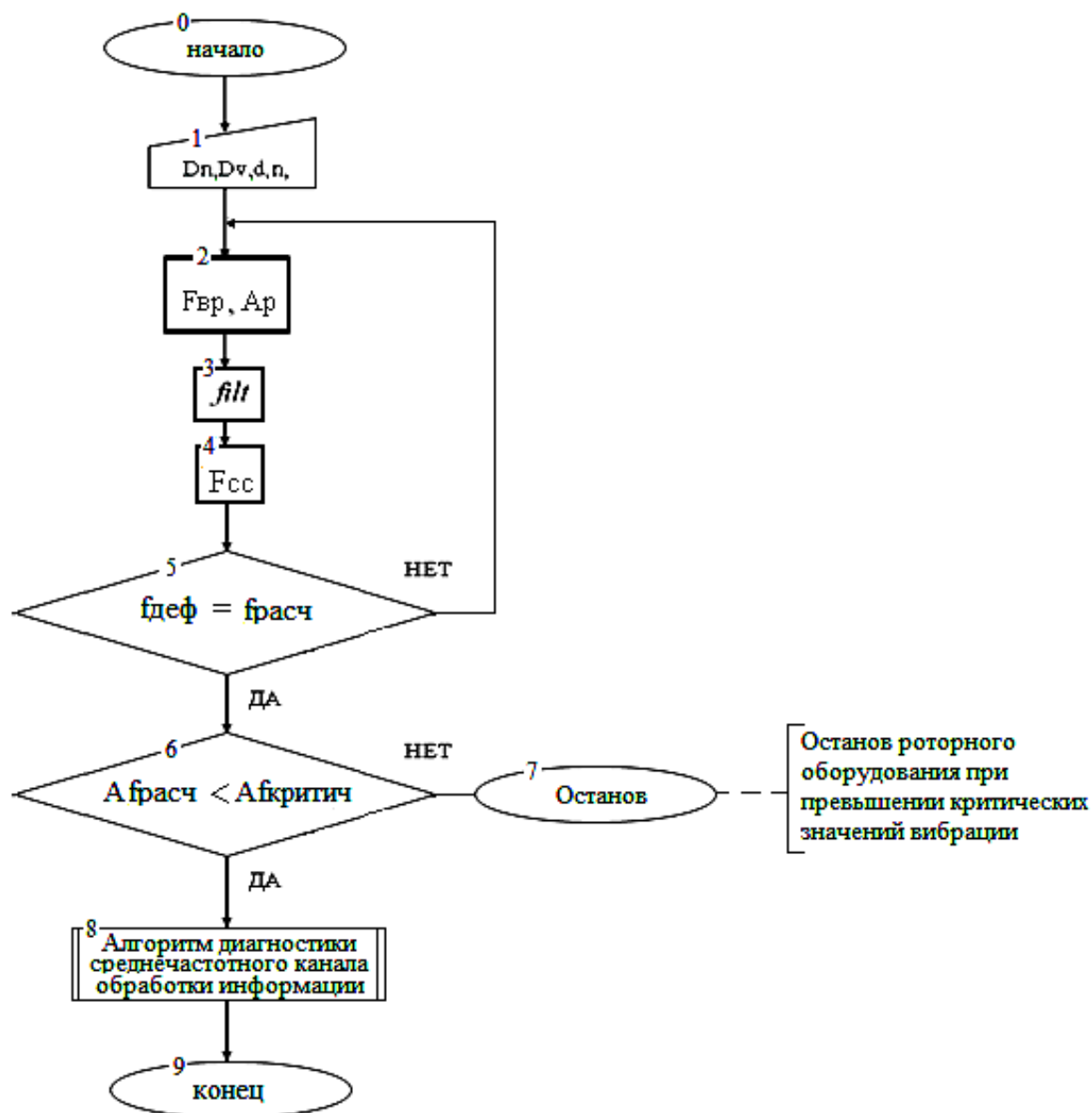


Рисунок 8 – Алгоритм диагностики высокочастотного канала обработки информации

Алгоритм состоит из следующих основных блоков: 1 – блок ввода первичной информации (типоразмеры подшипников); 2 – блок измерения виброускорения и частоты вращения ротора; 3 – блок фильтрации сигналов при помощи цифрового фильтра; 4 – Фурье преобразование полученных данных в спектр; 5, 6 – блоки сравнения частот дефектов с расчетными данными; 7, 8 – блоки вывода заключительной информации (блоки формирования отчетных форм).

В процессе эксплуатации в подшипниках развиваются дефекты, вызывающие появление в спектре вибраций дискретных составляющих, частоты которых определяются видом повреждения. Основные частоты вибраций возникают из-за повреждений элементов подшипников качения. На рисунке 8 в блоке 4 реализуется цифровая фильтрация, на рисунках 9, 10 представлены данные до и после фильтрации.

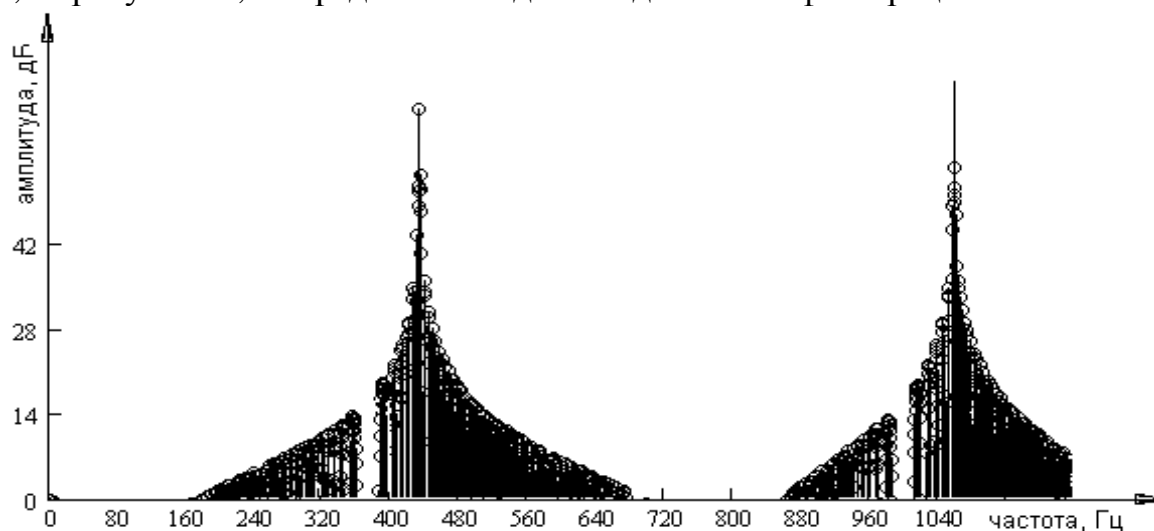


Рисунок 9 – Показания измерительного прибора без фильтра

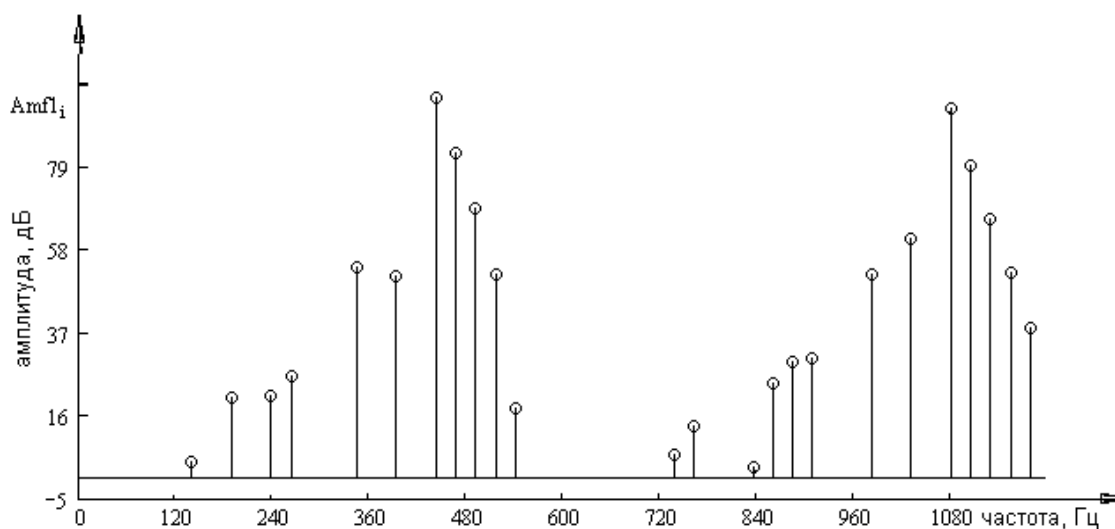


Рисунок 10 – Спектр вибрации подшипника отфильтрованный

На рисунке 10 очевидны периодические высокие пики, которые соответствуют по фигурности пикам на рисунке 9. Анализ формы сигнала высокочастотной вибрации, возбуждаемой ударным импульсом, показывает, что он весьма непродолжителен во времени (быстро затухает), а важнейшим показателем является отношение пикового значения к среднеквадратичному значению высокочастотной вибрации (величина пикфактора). Это позволяет обнаруживать, с одной стороны,

зарождающиеся дефекты смазки, при которых разрывы масляной пленки происходят редко и нерегулярно, и, с другой стороны, механические дефекты подшипника на нестабильных частотах вращения, причем, за короткое время, определяемое 2-3 оборотами ротора.

На рисунке 11 предоставлен алгоритм диагностики среднечастотного канала обработки информации по данным измерений параметров электрической энергии и расчету критерия эффективности.

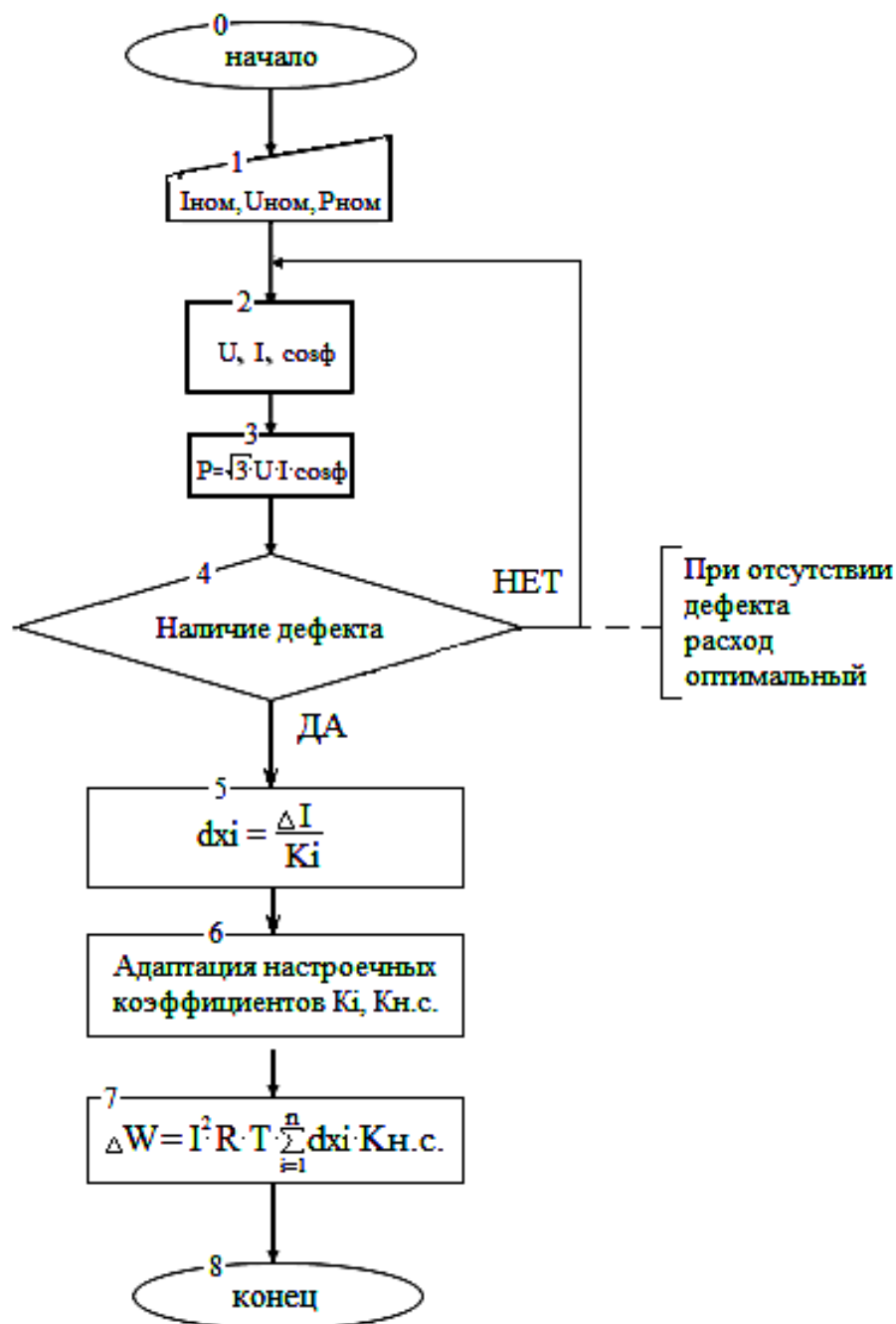


Рисунок 11 – Алгоритм диагностики среднечастотного канала обработки информации

Алгоритм состоит из следующих основных блоков: 1 – блок ввода технических данных диагностируемого оборудования (номинальные параметры, ток, напряжение, мощность); 2 – блок измерения параметров электрической энергии (напряжения, тока, $\cos\phi$); 3 – блок, реализующий расчет потребляемой активной мощности;

4 – блок наличия дефектов; 5, 6, 7 – блоки реализации расчета критерия энергоэффективности, блока адаптации настроечных коэффициентов; 7 – блок вывода заключительной информации.

На рисунке 12 предоставлен алгоритм диагностики низкочастотного канала обработки информации по данным измерений температуры поверхностей диагностируемого оборудования и мероприятий по изменению температуры до оптимальных значений.

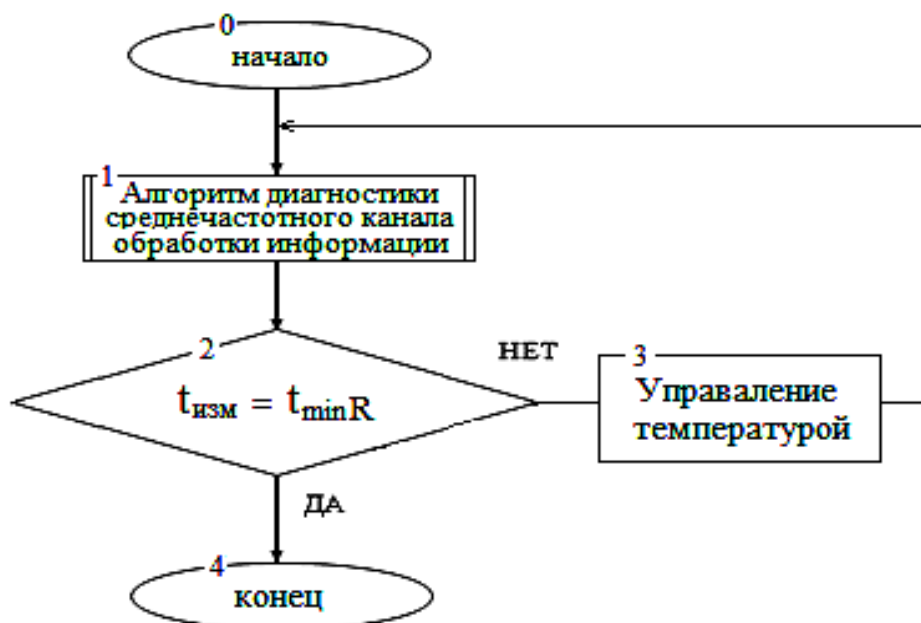


Рисунок 12 – Алгоритм диагностики низкочастотных каналов обработки информации

Алгоритм состоит из следующих основных блоков: 1 – блок расчета критерия эффективности; 2 – блок сравнения измеренной температуры с температурой минимальных значений сопротивления проводников (обмотки электромагнитной системы); 3 – блок управления температурой; 4 – блок вывода заключительной информации.

Четвертая глава посвящена разработке и исследованию алгоритма прогноза времени вывода роторного оборудования на ремонт. Исследованию алгоритмов диагностики и прогноза эффективности работы автоматизированного рабочего места. Разработке программного обеспечения и визуализации протекающих процессов. Появляющиеся дефекты и неисправности, а также износ и старение оборудования, вызывающие появление дополнительных потерь энергии, выявляются системой. Выводится сигнал о необходимости принятия мер по их устранению. Например, путем вывода оборудования в ремонт, переключения на резервный источник питания либо резервное оборудование.

На рисунке 13 представлен алгоритм прогноза времени вывода роторного оборудования на ремонт по данным расчета критерия эффективности и сравнения стоимости работ на проведение ремонтных мероприятий по устранению выявленных дефектов со стоимостью оплаты повышенных потерь, зависящих от развивающихся дефектов.

Алгоритм состоит из следующих основных блоков: 1 – блок ввода данных о стоимости ремонтных работ и тарифа на электрическую энергию; 2 – блок расчета критерия энергоэффективности; 3 – блок расчета стоимости повышенных потерь, зависящих от дефекта; 4 – блок сравнения стоимости оплаты повышенных потерь (cW) с разницей между стоимостью ремонтных работ и стоимостью оплаты повышенных потерь электрической энергии (Δc); 5, 6, 7 – блоки формирования отчетных форм.

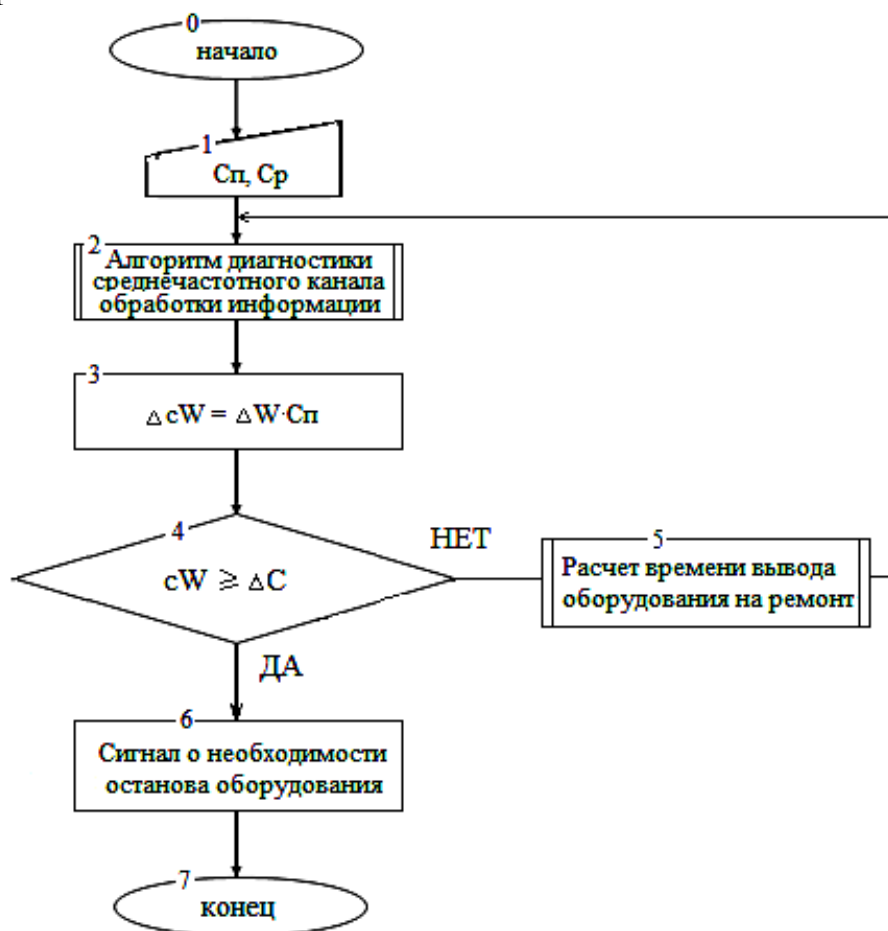


Рисунок 13 – Алгоритм прогноза времени вывода роторного оборудования на ремонт

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.

По уравнению (1) рассчитываем потери электроэнергии при наличии дефекта в подшипнике. Расходы электроэнергии за 10 суток работы роторного оборудования изображены на рисунке 14.

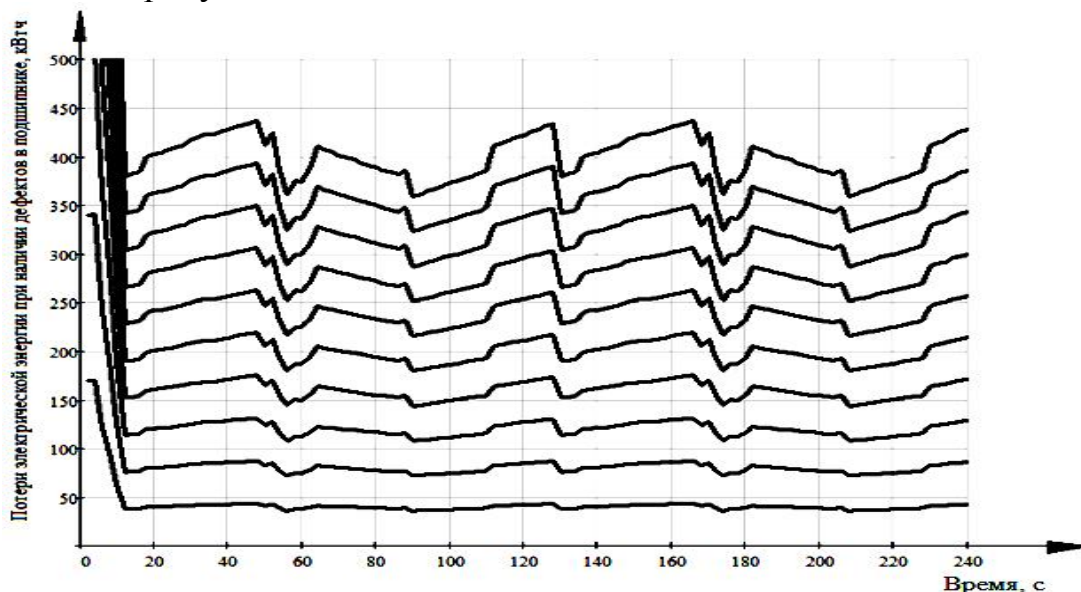


Рисунок 14 – Потери электрической энергии при наличии дефектов тел качения в подшипнике

Нижняя кривая рисунка 14 соответствует величине потерь электроэнергии за первые сутки, верхняя кривая – величине потерь на десятые сутки, соответственно. За первые сутки величина развивающихся дефектов невелика и составляет порядка 50 кВтч. На вторые сутки потери возрастают пропорционально степени развития дефекта и составляют порядка 100 кВтч. Далее кривые в последующие сутки приобретают более явные пики и минимумы, что связано с неоднозначным проявлением влияния имеющихся дефектов на изменение потерь электрической энергии. Минимальные значения связаны с некоторой прокаткой возникающих дефектов, а затем максимумы с более активным их развитием.

Визуализация работы синтезированных алгоритмов диагностики и прогноза времени вывода роторного оборудования на ремонт представлена на рисунке 15.

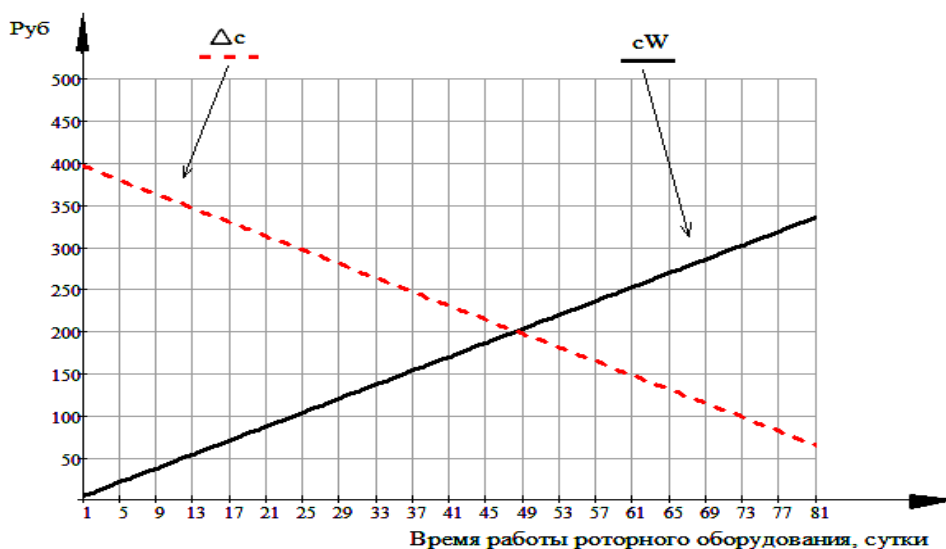


Рисунок 15 – Прогноз времени вывода роторного оборудования на ремонт

На рисунке: cW – стоимость оплаты повышенных потерь электрической энергии, руб; Δc – разница между стоимостью ремонтных работ и стоимостью оплаты повышенных потерь электрической энергии (зависящих от дефектов), руб.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод о том, что прогноз оптимального времени проведения работ по устранению дефекта подшипника качения является 48 суток работы роторного оборудования с момента возникновения дефекта.

Программный комплекс предназначен для исследования потерь электрической энергии при эксплуатации роторного оборудования, зависящих от дефектов роторного оборудования на опасных энергетических и промышленных объектах. Он позволяет: осуществлять оптимизацию расхода электрической энергии; проводить экспериментальное сопоставление влияния различных дефектов на потери электроэнергии; моделировать своевременное обнаружение признаков возникновения предаварийных ситуаций на опасных энергетических и промышленных объектах; вырабатывать рекомендации по своевременным ремонтным работам на опасных энергетических и промышленных объектах; свободно управлять модулями, окнами и основным меню.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основании проведенных экспериментальных и теоретических исследований в работе получены следующие результаты:

1. Разработана классификация дефектов по воздействию на энергоэффективность роторного электрооборудования, которая позволила объединить дефекты с энергопотерями и сформулировать критерий энергоэффективности. Классификация позволяет взглянуть по новому на проблему управления ремонтами по энергопотреблению как по важному диагностическому признаку состояния объекта;

2. Предложен критерий энергоэффективности работы энергетического оборудования, отличающийся от известных учетом потерь электрической энергии, зависящих от дефектов. Показано, что в качестве диагностического признака можно эффективно использовать действующее значение тока, которое несет важную диагностическую информацию о потерях электроэнергии дефектного объекта;

3. Разработаны новые алгоритмы диагностики эффективности функционирования роторного оборудования, отличающиеся от известных определением в реальном масштабе времени дефектов и расчетом потерь электрической энергии, зависящих от дефектов;

4. Разработан новый алгоритм прогноза времени вывода роторного оборудования на ремонт, отличающийся от известных наличием контроля за изменением потерь электрической энергии, зависящих от дефектов, и позволяющий планировать ремонтные работы на основе энергоэффективности роторного оборудования;

5. Разработан пакет прикладных программ для визуализации измеряемых трендов автоматизированного рабочего места энергетика, оптимизации эксплуатационных затрат при обнаружении дефектов и оценки их влияния на потери электрической энергии, применение которого повышает эффективность управления роторным оборудованием (получено свидетельство о государственной регистрации разработанного программного обеспечения в государственном Реестре программ для ЭВМ № 2012617022 от 6 августа 2012 г.).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные труды в журналах из перечня ВАК РФ

1. Курьянов В.Н., Курьянова Е.В. Информационно-измерительная система энергоэффективности вращающихся механизмов // Энергетик, ежемесячный производственно-массовый журнал, № 7 / Москва, 2012. – с. 23-26.

2. Шевчук В.П., Комиссарова Д.В., Курьянов В.Н. Погрешности обработки информации виброакустического измерительного канала // Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. науч. ст. № 6 (79) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – с. 84-87.

3. Шевчук В.П., Бельчанская Е.Н., Курьянов В.Н. Алгоритм диагностики роторного оборудования автоматизированного рабочего места энергетика // Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. науч. ст. № 10 (97) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – с 139-143.

Научные труды в других изданиях

4. Курьянов В.Н. Программный комплекс оптимизации затрат на эксплуатацию роторного оборудования по потерям электрической энергии оборудования «РОПОТ» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012617022, зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 6 августа 2012 / Авторы: Шевчук В.П, Курьянов В.Н., Лупачев А.А., Хлынова О.В.

5. Курьянов В.Н., Курьянова Е.В. Информационно-измерительная система диагностики энергоэффективности роторного оборудования // Восемнадцатая ежегодная международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиотехника, электротехника и энергетика», г. Москва, МЭИ 2012. – с. 6-7.

6. Шевчук В.П., Курьянов В.Н. Информационно-измерительная система для диагностики биений роторных машин // Семнадцатая ежегодная международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиотехника, электротехника и энергетика», г. Москва, МЭИ 2011. – с. 466-467.

7. Курьянов В.Н., Курьянова Е.В. Планирование ремонтов роторного оборудования по показаниям измерительной системы контроля расхода и потерь электрической энергии // IX Всероссийская научная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Информационные технологии, системный анализ и управление»: Сборник материалов. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – Т. 2. – с. 5-7.

8. Курьянов В.Н., Курьянова Е.В. Информационно-измерительная система энергоэффективности роторного оборудования // Межрегиональная научно-практическая конференция «Моделирование и создание объектов энерго- и ресурсосберегающих технологий», филиал МЭИ в г. Волжском, 2011 – с. 66-70.

9. Курьянов В.Н. Комиссарова Д.В. Моделирование переходных процессов в виброакустическом измерительном канале // Семнадцатая межвузовская научно-практическая конференция молодых ученых и студентов г. Волжского, филиал МЭИ в г. Волжском, 2011 – с. 39-41.

10. Курьянов В.Н. Измерительная система диагностики биений ротора // Ресурсо-энергосбережение и эколого-энергетическая безопасность промышленных городов. Третья всероссийская научно-практическая конференция, г. Волжский, МЭИ, 2010. – с. 41-43.

11. Кезина А.В., Курьянов В.Н. Моделирование метрологических характеристик программно-аппаратного счетчика электрической энергии // Семнадцатая межвузовская научно-практическая конференция молодых ученых и студентов г. Волжского. – Филиал МЭИ в г. Волжском, 2011 – с. 259-263.

12. Курьянов В.Н. Комиссарова Д.В. Анализ методов неразрушающего контроля промышленных объектов // Межрегиональная научно-практическая конференция «Моделирование и создание объектов энергоресурсо-сберегающих технологий». – Филиал МЭИ в г. Волжском, 2009 – с. 168-171.

13. Курьянов В.Н. Постановка задачи измерения параметров ветросолнечной электростанции // Пятнадцатая межвузовская научно-практическая конференция молодых ученых и студентов г. Волжского. – МЭИ, 2009 – с. 29-30.

14. Терентьев Г.Ф. Курьянов В.Н. Некоторые вопросы вибродиагностики электротехнического оборудования // IX межвузовская научно-практическая конференция молодых ученых и студентов г. Волжского. – ВПИ, 2003.

15. Курьянов В.Н. Нежилская Е.В. Обслуживание оборудования по фактическому состоянию // Материалы научно-практической конференции «Философия жизни волжан». – Волжский: Филиал ГОУВПО «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском, 2003.

Подписано в печать 22.11.2012.

Формат 60×84_{1/16}. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 419.

Филиал ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Волжском
404110, г. Волжский, пр. Ленина, 69