

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКА КАЧЕНИЯ ПО ЗНАЧЕНИЯМ ВИБРОУСКОРЕНИЯ

*Сарапулов Ю.В., Хасанов Р.А. (ПАО «Уралкалий»),
Сидоров В.А., д.т.н., Сушко А.Е. к.т.н. (ООО НПО «ДИАТЕХ»)*

Техническая безопасность любой технологической системы складывается из безотказной и предсказуемой работы отдельных элементов. Уровень предсказуемости, непосредственно связан с возможностью решения задачи прогнозирования, для получения информации, необходимой в сфере управления [1]. Задача прогнозирования определена как одна из основных в технической диагностике [2, 3]. Классические подходы к ее решению рассмотрены в работах [4, 5, 6, 7]. Возможности вибрационного контроля механического и энергетического оборудования, показанные в работах [8, 9, 10, 11, 12] позволяют сформировать необходимый массив исходных данных. В настоящее время идёт поиск наиболее рационального подхода в теоретическом и практическом плане [13, 14, 15, 16, 17].

Меняются подходы и в нормативных документах. Если в «Методических указаниях по проведению экспертных обследований вентиляторных установок главного проветривания. РД 03-427-01» [18] чётко фиксировалась периодичность проведения виброконтроля и анализа тенденций в зависимости от фактического состояния, то в ГОСТ Р ИСО 13381-1-2016 «Контроль состояния и диагностика машин. Прогнозирование технического состояния. Часть 1. Общее руководство» [19] указывается на сложность решения задачи прогнозирования, приводится перечень исходных данных, включая модели отказов: на основе описания статистических процессов, статистические, эвристические, гибридные, модели на основе данных и др.

Многообразие сценариев развития повреждений определяет большой объём исследований в области практического прогнозирования. Поэтому, несмотря на большой накопленный опыт диагностирования и мониторинга [20, 21, 22] насосов, вентиляторов, дымососов, эксгаустеров, турбин, генераторов и др. формирование базы знаний в виду индивидуальности условий эксплуатации является актуальным. Целью статьи является анализ последовательности прогнозирования технического состояния по вибрационным параметрам на примере развития повреждения подшипника электродвигателя насоса химического предприятия для обоснования необходимости использования многофакторного, комплексного подхода в рамках единого программного обеспечения.

В настоящее время, насчитывается свыше 150 различных методов прогнозирования. В качестве основных, на практике используется 15...20. Выбор приемлемого варианта связан с временем упреждения и точностью прогноза. Наиболее часто используются: метод экспертных оценок; метод анализа и прогнозирования рядов данных; метод причинно-следственных связей.

В качестве объекта прогнозирования был использован необслуживаемый подшипника качения 6310-2RSR с защитными шайбами, установленный на электродвигателе насоса циркуляции орошающей жидкости в скруббере аспирации. Для периодического мониторинга состояния данного подшипника на протяжении длительного периода было использовано значение общего уровня виброускорения в частотном диапазоне 100...4700 Гц.

В качестве параметра для прогнозирования технического состояния подшипника качения было выбрано значение общего уровня виброускорения в стандартной полосе частот 100 – 10 000 Гц, которое увеличивается при появлении повреждений, а перед разрушением показывает экспоненциальный рост. В результате проведенных измерений получен тренд значений виброускорения (рисунок 1) за весь жизненный цикл подшипника (с момента монтажа 11.03.2010 года до момента замены 12.04.2013 года). Наряду с указанными проводились измерения параметра виброускорения в частотном диапазоне 10...1000 Гц, в соответствии с рекомендациями ГОСТ ИСО 10816-3-2002 [23].

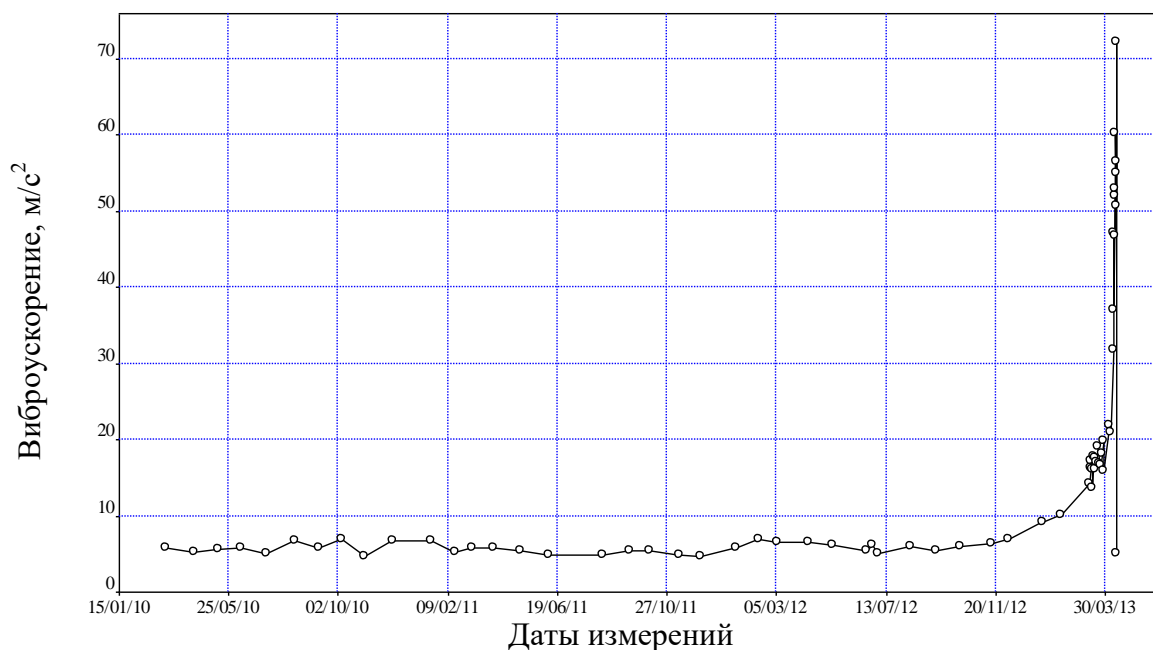


Рисунок 1 - Тренд общего уровня виброускорения подшипника качения 6310 электродвигателя, измеряемого в поперечном направлении.

Анализ, показанного тренда позволил выделить этапы развития повреждения подшипника:

1. *Этап нормальной работы подшипника* начинается с момента установки нового подшипника 11.03.2010 года до момента фиксации зарождения повреждений наружного кольца - 14.01.2013 года. Условно исключая непродолжительные простои на остановочные ремонты длительность этапа - 1023 дня. Линия тренда – прямолинейна, скорость роста виброускорения – менее 0,000982 м/с²/сутки.

2. *Этап зарождения поврежденных элементов подшипника* – после 14.01.2013 года появляются диагностические признаки дефекта наружного кольца подшипника качения. Продолжительность этапа - 57 дней, скорость роста виброускорения увеличивается в 100 раз и составляет 0,08533 м/с²/сутки. Зависимость увеличения значений виброускорения носит линейный характер и приводит к завышенному ошибочному прогнозу при экстраполяции значений до допустимого значения.

3. *Этап развития поврежденных элементов подшипника* начинается 11.03.2013 года – в этот день зафиксированы ранее не наблюдавшиеся диагностические признаки повреждения наружного кольца подшипника качения в спектрах виброскорости. Принято решение о сокращении периода между измерениями для контроля за развитием повреждения и фиксацией момента наступления следующего этапа. Продолжительность этапа составила 24 дня, скорость роста виброускорения увеличилась в 2,38 раза и составила 0,2032 м/с²/сутки.

4. *Этап ускоренного развития поврежденных элементов подшипника* сопровождается увеличением скорости роста значений виброускорения до 10 м/с²/сутки. За период наблюдения с 08.04.2013 г. по 12.04.2013 г. уровень виброускорения вырос с 31,07 м/с² до 71,76 м/с². Линия тренда превращается в почти вертикальную линию. На данном этапе требуется принятие решения об остановке оборудования в связи с риском аварийного разрушения подшипника.

Основные этапы развития повреждений подшипника показаны на рисунке 2. Результаты измерений приведены в таблице, а уравнения линии трендов и значений достоверности аппроксимации начального и заключительного этапов развития повреждения подшипника показаны на рисунке 3.

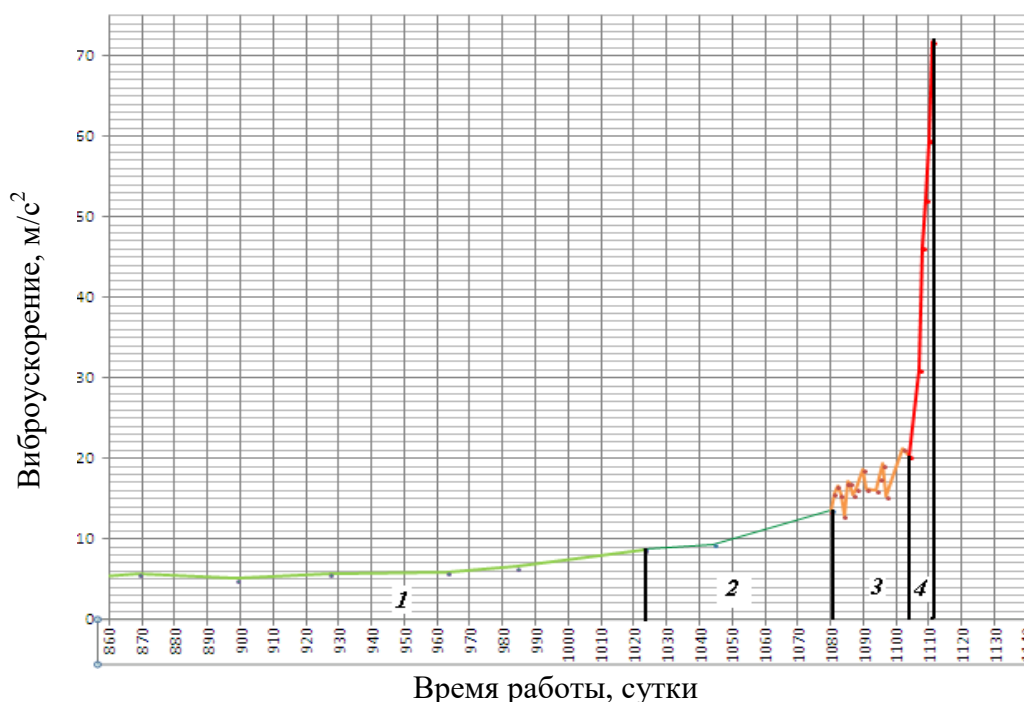


Рисунок 2 – Этапы развития повреждений подшипника опоры 1.

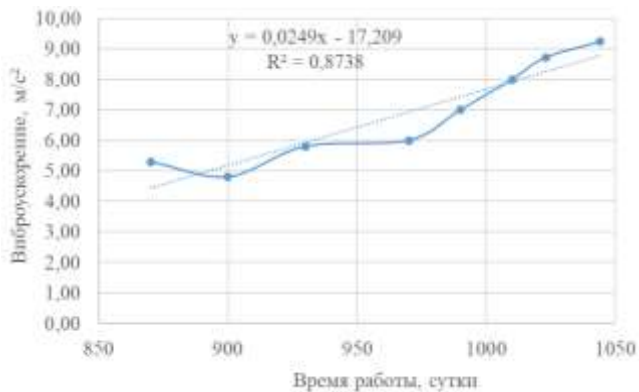
Таблица - Изменения значений виброускорения подшипниковой опоры № 1 электродвигателя при развитии повреждений.

Этап развития дефектов	Дата проведения виброобследования	Периодичность виброобследования, сутки	Время работы, сутки	Виброускорение м/с ² , частотный диапазон 100...4700 Гц	Скорость изменения виброускорения, м/с ² /сутки
Этап 2	14.01.2013	39	1023	8,7162	0,08533
	05.02.2013	21	1044	9,2325	
	11.03.2013	36	1080	13,58	
Этап 3	12.03.2013	1	1081	15,67	0,203217
	13.03.2013	1	1082	16,617	
	14.03.2013	1	1083	15,495	
	15.03.2013	1	1084	12,943	
	16.03.2013	1	1085	17,104	
	17.03.2013	1	1086	17,045	
	18.03.2013	1	1087	15,539	
	19.03.2013	1	1088	16,319	
	21.03.2013	2	1090	18,703	
	22.03.2013	1	1091	16,273	
	25.03.2013	3	1094	16,082	
	26.03.2013	1	1095	17,634	
	27.03.2013	1	1096	19,323	
	28.03.2013	1	1097	15,326	
	03.04.2013	5	1102	21,317	
05.04.2013	2	1104	20,344		
Этап 4	08.04.2013	3	1107	31,071	10,172
	09.04.2013	1	1108	46,266	
	10.04.2013	1	1109	52,18	
	11.04.2013	1	1110	59,447	
	12.04.2013	1	1111	71,759	

Проведенные наблюдения позволили установить границы разделяющие зоны технического состояния: A/B – 9,0 м/с²; B/C – 14,0 м/с²; C/D – 21,0 м/с². Зоны различаются скоростью роста виброускорения. Это характерно для износостойкой модели развития повреждения. Отличия связаны с отсутствием зоны приработки, изменением линейных закономерностей износа на первых этапах на степенную зависимость этапа ускоренного износа. Наличие кубических составляющих в уравнении линии тренда заключительного этапа позволяет провести аналогии с показателем степени ($p = 3$, для шариковых подшипников) в формуле расчёта долговечности подшипников качения. Возможно, дополнительная сила ΔF , действующая на подшипник будет пропорциональна значению, определяемому по формуле:

$$\Delta F = ma + hv + cS;$$

где m – масса; a – ускорение; v – скорость; S – перемещение; h – коэффициент демпфирования; c – жёсткость.



а)

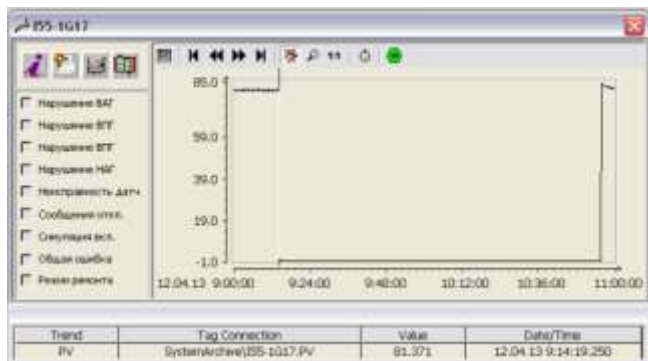


б)

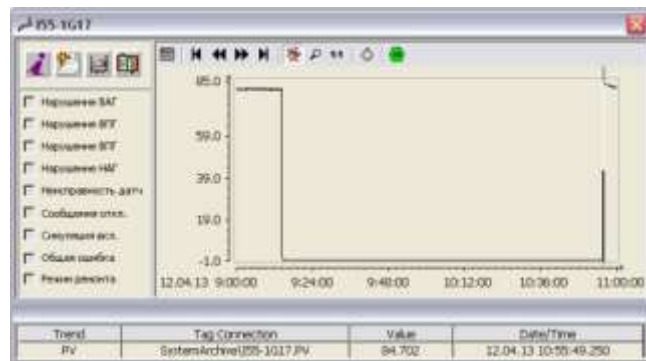
Рисунок 3 - Уравнения линии трендов развития повреждений подшипника для этапов: а) начального; б) заключительного

По результатам вибрационного мониторинга замена повреждённого подшипника опоры № 1 электродвигателя проведена во время остановочного ремонта. Время простоя насосного агрегата при замене подшипника зафиксировано:

1. На трендах тока электродвигателя вентилятора аспирации поз. 5.5-1G17, который выполняет функцию откачки запылённого воздуха с участка классификации отделения и не может работать без насоса циркуляции орошающей жидкости в скруббере. Выключение двигателя произошло в 9:14 (рисунок 4а), включение в 10:55 (рисунок 4б). Следовательно, время простоя вентилятора аспирации поз. 5.5-1G17, входящего в состав ПГУ участка классификации для замены подшипника качения двигателя вентилятора составило 1 час 41 минута.



а)



б)

Рисунок 4 – Регистрация времени простоя двигателя вентилятора аспирации: а) отключение; б) включение

2. По тренду виброускорения, измеренного в точке контроля № 1 электродвигателя до и после замены подшипника (рисунок 5). По данным тренда до замены подшипника запись измерения в память прибора выполнена в 9 часов 02 минуты. Запись аналогичного измерения при виброобследовании после замены подшипника выполнена в 10 часов 34 минуты - время на замену составило 1 час 32 минуты.

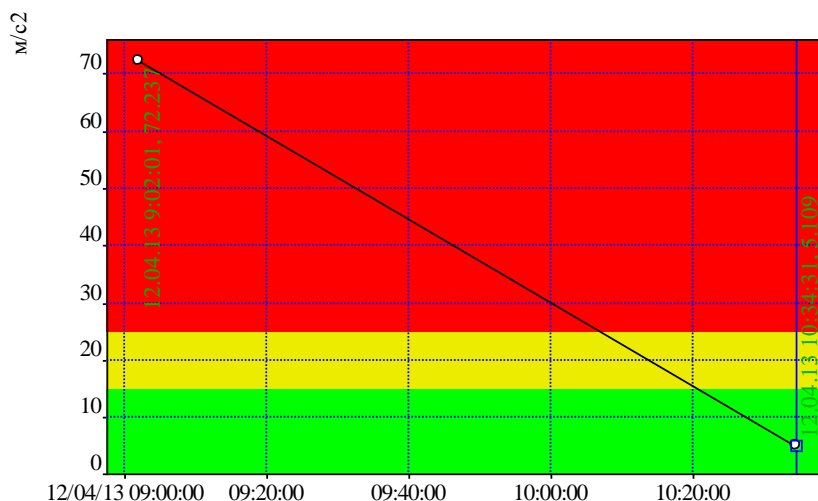


Рисунок 5 – Значения виброускорения до и после замены подшипника

Наличие диагностического программного обеспечения позволило контролировать значения вибрационных параметров, оперировать трендами их развития, подтвердить время простоя и оценить качество проведенного ремонта. Время простоя насосного агрегата, необходимого на замену подшипника снижено за счёт:

- своевременной подготовки нового подшипника качения 6310 (FAG);
- плановой подготовки инструментов и приспособлений, необходимого для замены подшипника;
- плановой подготовки людских ресурсов.

Планирование ремонта двигателя по результатам вибромониторинга позволило исключить риск длительного ремонта при внезапном отказе, из-за необходимости восстановления посадки подшипника на валу и в корпусе, возможного задевания ротора об обмотки статора, что дополнительно требует проведения балансировки ротора, а в отдельных случаях приводит к повреждению обмотки статора.

Промывка, разборка и визуальный осмотр повреждённого подшипника 6310 точки контроля № 1 электродвигателя подтвердила данные вибродиагностических измерений об износе наружного кольца подшипника – усталостное выкрашивание дорожки качения наружного кольца (рисунок 6). Установлено:

- усталостное выкрашивание на беговой дорожке наружного кольца;
- осевое смещение подшипника;
- усталостное выкрашивание на телах качения.



а)



б)

Рисунок 6 – Результаты визуального осмотра повреждённого подшипника:
а) осповидное выкрашивание беговой дорожки наружного кольца с осевым смещением; б) осповидное выкрашивание на теле качения

Исходя из изменения скорости развития повреждений возможно предположить следующий сценарий развития повреждений после установки нового подшипника 11.03.2010 года:

- осевая нагрузка на подшипник вызванная внутренними или внешними причинами, что проявилось 14.01.2013 г.

- зарождение и развитие усталостного выкрашивания на дорожке качения наружного кольца происходило относительно медленно в период 14.01. - 11.03.2013 года;

- зарождение и развитие усталостного выкрашивания на телах качения (оспины имеют острые края) стало завершающим этапом развития повреждения.

Дополнительным фактором могло быть изменение свойств смазочного материала и накопление продуктов износа в смазке.

Экономический эффект от проведения вибрационного мониторинга определен как исключение возможных потерь готового продукта при отсутствии информации о состоянии.

Насос для циркуляции орошающей жидкости в скруббере аспирации относится к ПГУ участка классификации. Согласно «ПРАВИЛА ЭКСПЛУАТАЦИИ УСТАНОВОК ОЧИСТКИ ГАЗА» п. 3.7. - эксплуатация технологического оборудования при отключенных установках очистки газа запрещается.

В случае аварийного выхода из строя подшипника насосного агрегата останавливается все отделение. Производительность отделения 300 т/ч. Замена подшипника при планировании времени проведения и объёма ремонта составила $\approx 1,5$ часа. В случае аварийного простоя потеря продукта составила бы более 450 тонн.

Использование отработанной методики для наблюдения значений виброускорения и контроля состояния аналогичного оборудования, показал аналогичные в целом, но индивидуальные по значениям развития результаты (рисунок 7). Изменение условий эксплуатации (по нагрузкам, количеству включений), техническому

обслуживанию и ремонту, а также физическое старение оборудования приводит к необходимости учёта всё большего количества факторов. Это указывает на необходимость накопления возможных сценариев развития событий для предсказания поведения механической системы при развитии различных повреждений.

В настоящее время, данный функционал с пользовательскими и автоматическими сценариями прогноза трендов для различных зон технического состояния и оценки остаточного ресурса реализован в программной платформе SAFE PLANT (НПО «ДИАТЕХ», Москва), которая более трех лет успешно применяется на ПАО «Уралкалий» в качестве единой диагностической платформы мониторинга и управления ТОиР, интегрированной в общекорпоративную систему ORACLE.

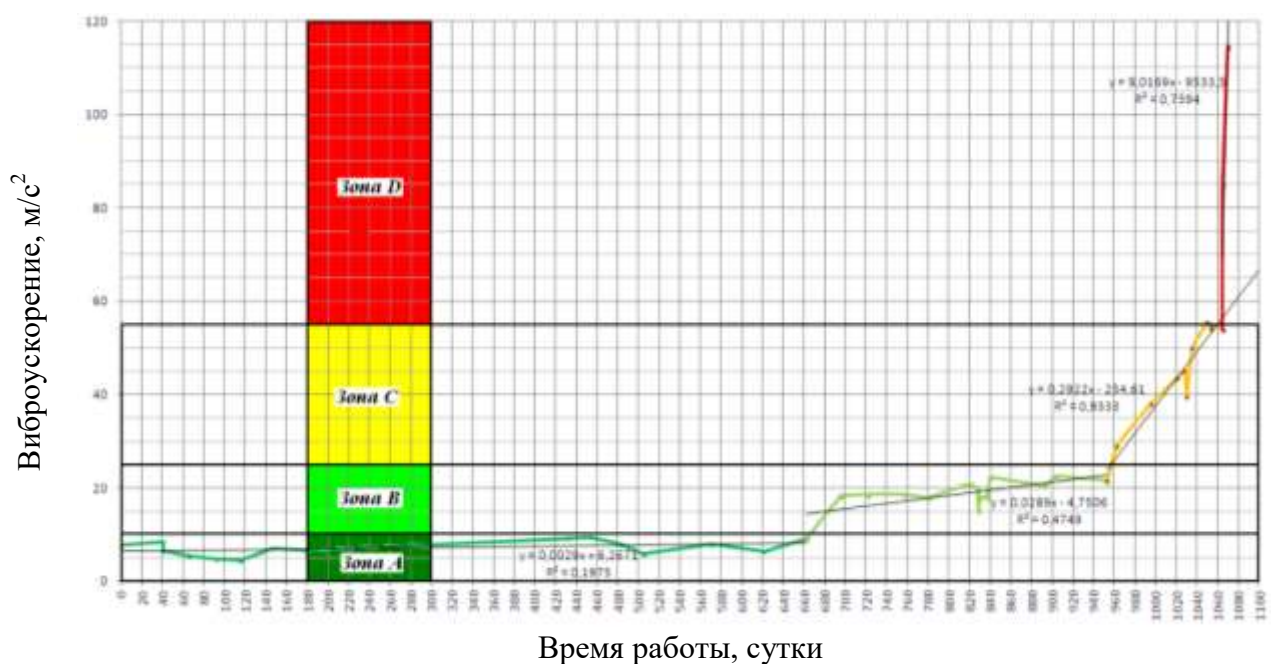


Рисунок 7 – Этапы развития повреждений подшипника опоры 3.

Выводы.

Проведенные исследования возможности прогнозирования изменений технического состояния подшипника качения по значениям виброускорения показали:

1. Возможность использования метода анализа и прогнозирования рядов данных для оценки изменения технического состояния подшипника качения. Скорость изменения вибропараметра определяет этапы развития повреждения, аналогичные в целом, но индивидуальные по значениям.

2. Износый характер развития повреждения подшипника может быть представлен как сумма линейных зависимостей с различными параметрами и увеличением скорости изменения. На заключительных этапах изменение значения виброускорения описывается уравнением третьей степени.

3. Для прогнозирования изменения технического состояния следует использовать метод причинно-следственных связей комплекса диагностических (вибра-

ция, температура, частота вращения и др.) и технологических параметров (частота включения, периодичность технического обслуживания и ремонта, действующие силы, влияние окружающей среды и др.) в рамках разработки сценариев возможного развития повреждений подшипника качения.

4. Показана эффективность вибрационного мониторинга, основанная на подготовке к своевременному проведению планового ремонта. Необходимым является снижение периодичности (увеличение количества) измерений при ухудшении состояния. Минимальная периодичность может быть определена на основе расчёта долговечности с учётом действующих дополнительных сил и предыдущих результатов визуального осмотра повреждённого подшипника для выявления видов механического износа и отклонений от исправного состояния.

5. Информационная реализация метода прогнозирования возможна при использовании комплекса данных, формализованных для работы в единой программной среде. Появляется возможность мониторинга, оценки изменения состояния, подтверждения времени и оценки качества проведенного ремонта. Повышение достоверности может достигаться за счёт дублирования каналов поступления данных.

6. Разработанные границы зон вибрационного состояния по параметру виброускорения можно стандартизировать во внутренней нормативной документации предприятия, занимающемся виброконтролем для нормирования данного параметра в любом диагностическом программном обеспечении.

Литература.

1. Постановление Правительства РФ «О мерах по обеспечению промышленной безопасности опасных производственных объектов на территории Российской Федерации» от 28.03.2001 №241.

2. Биргер, И. А. Техническая диагностика Текст. / И. А. Биргер. М.: Машиностроение, 1978. -239с.

3. Коллакот, Р.А. Диагностирование повреждений. Текст. / Р.А. Коллакот. - М.: Мир, 1989. - 512с.

4. Дж. Мартино (Joseph P. Martino) Технологическое прогнозирование (Перевод с английского Technological Forecasting for Decisionmaking New York – 1972) Изд-во «Прогресс» Москва 1977, 592с.

5. Почтенный Е. К. Прогнозирование долговечности и диагностика усталости деталей машин / Е. К. Почтенный; под ред. Б. И. Александрова. - Минск : Наука и техника, 1983. - 246 с.

6. Болотин, В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. Текст. / В.В. Болотин. - М.: Машиностроение, 1984. - 312с.

7. Четыркин, Е.Н. Статистические методы прогнозирования. Текст. / Е.Н. Четыркин. - М.: «Статистика», 1975.

8. Балицкий, М.А. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов. Текст. / М.А. Балицкий. - М.: Наука, 1984. - 256 с.
9. Барков, А.В. Диагностика и прогнозирование технического состояния подшипников качения по сигналу вибрации Текст. / А.В. Барков // Судостроение. 1985. - №3. - С.21-23.
10. Ширман, А.Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. Текст. / А.Р. Ширман, А.Д. Соловьев. - Москва, 1996. - 276 с.
11. Русов В. А. Спектральная вибродиагностика. — Пермь: Вибро-Центр, 1996.- 176 с.
12. Вибродиагностика. Монография / Г.Ш. Розенберг, Е.З. Мадорский, Е.С. Голуб и др. СПб.: ПЭИПК, 2003. - 284 с.
13. Костюков В.Н., Костюков А.В. Классификация трендов вибропараметров в задачах мониторинга технического состояния в реальном времени // Контроль. Диагностика. - 2011. - №12. - С.26-33.
14. Ершов Д. Ю. Техническое диагностирование и методы контроля механических узлов в машиностроении // Молодой ученый. — 2013. — №4. — С. 62-64. — URL <https://moluch.ru/archive/51/6463/> (дата обращения: 07.03.2020).
15. Гиоев, З. Г. Вибрационное прогнозирование технического состояния тяговых электрических машин локомотивов [Текст] / З. Г. Гиоев, В. М. Приходько, В. С. Козаев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – №1(25). – С. 15 – 25.
16. Белкин, А.П. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. «Моделирование вибросостояния и прогнозирование остаточного ресурса электродвигателей магистральных насосных». 2010. 163 с. Специальность ВАК РФ 25.00.19.
17. Бурлий, В.В. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. «Прогнозирование остаточного ресурса газотурбинного двигателя газоперекачивающего агрегата на основе оценки технического состояния лимитирующего его ресурс подшипникового узла». 2013. 138 с. Специальность ВАК РФ 05.02.13.
18. «Методические указания по проведению экспертных обследований вентиляторных установок главного проветривания. РД 03-427-01» (утв. Постановлением Госгортехнадзора РФ от 20.12.2001 N 61).
19. ГОСТ Р ИСО 13381-1-2016 Контроль состояния и диагностика машин. Прогнозирование технического состояния. Часть 1. Общее руководство.
20. Kostjukov A.V. Оценка работоспособности машин и агрегатов по трендам вибропараметров // Dynamics of machine aggregates: proc. of the 5th Intern, conf. Gabcikovo, 2000. С. 101-104.
21. Радчик, И.И. Из истории создания стационарной системы контроля вибрации «Алмаз - 7010» / И.И. Радчик - Вибрационная диагностика, 2006 - № 2, С.22-23.

22. Сушко, А.Е., Грибанов В.А. Проблемы оценки технического состояния динамического оборудования опасных производственных объектов / А.Е. Сушко, В.А. Грибанов // Безопасность труда в промышленности. – 2011. - №10. – С.58-65.

23. ГОСТ ИСО 10816-3-2002. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15000 мин в ст. минус 1.