

УДК 621.22

**Диагностика технического состояния подшипников качения  
в эксплуатации**

**В.Н. Костюков, Е.В. Тарасов**

НПЦ «Динамика»

**Diagnostics of technical condition of rolling bearings operation**

**V.N. Kostyukov, E.V. Tarasov**

*SPC Dynamics*

*При эксплуатации машинного оборудования на непрерывных технологических производствах одним из ключевых вопросов является своевременное обнаружение и безаварийный вывод из эксплуатации агрегатов с большой степенью деградации деталей и узлов до их разрушения и заклинивания. На нефтеперерабатывающих производствах широкое применение получили центробежные насосные агрегаты оснащенные подшипниками качения. Подшипники качения являются ключевым узлом, обеспечивающим несущую и рабочую функции динамического оборудования. В то же время подшипники качения в конструкции центробежного насосного агрегата являются самым уязвимым узлом, на работоспособность которого оказывают влияние различные структурные, производственные и эксплуатационные факторы. Актуальным является своевременное обнаружение зарождающихся дефектов и обеспечение мониторинга деградации узлов и деталей центробежного насосного агрегата в процессе эксплуатации. Вибрация центробежного насосного агрегата отражает деградационные процессы, происходящие при работе оборудования. Таким образом отслеживая вибрацию мы можем выполнять оценку технического состояния оборудования. Установлено, что разрушение центробежного насосного агрегата, его узлов и деталей происходит не мгновенно, а занимает определенные временные интервалы, на которых можно выполнить корректирующие действия и предотвратить развитие аварийной*

*ситуации. Так же установлено, что на некоторых насосных агрегатах процесс деградации идет стадийно и соответственно наблюдается скачкообразный характер изменения вибрации. Проведен анализ стадийного процесса деградации и разработаны алгоритмы обеспечивающие предупреждение персонала заблаговременно до выхода из строя агрегата. Применение подхода по контролю за стадийной деградацией в системах мониторинга технического состояния и автоматической диагностики позволило повысить эксплуатационную безопасность нефтеперерабатывающих производств.*

*Ключевые слова: вибрация, мониторинг, подшипник качения, скачок, стадийная деградация, центробежный насосный агрегат.*

*When operating machinery on continuous technological manufactures one of the key issues is the timely detection and trouble-free decommissioning of units with a high degree of degradation of parts and components to their destruction and jamming. At the refining industries wide application centrifugal pumps equipped with rolling bearings. Rolling bearings are a key node, providing supporting and working functions of the dynamic equipment. At the same time, rolling bearings in the construction of a centrifugal pump unit is the most vulnerable host. Topical is the timely detection of incipient defects and ensuring monitoring of degradation of units and parts of the centrifugal pump unit during operation. The vibration of a centrifugal pump unit reflects the degradation processes occurring during operation of the equipment. Thus the tracking vibration we can carry out an assessment the technical condition of the equipment. The destruction of a centrifugal pump unit does not occur instantaneously, and occupies defined time intervals. These the time intervals can take corrective action and prevent the development of an emergency situation. On some pumping units degradation process is the stage and accordingly there is jumplike character vibration changes. The analysis stepwise process of degradation and algorithms*

*have been developed to ensure a warning of staff in advance of a failure of the unit. Applying the approach for the control of degradation stage of technical condition monitoring and automatic diagnosis system has improved the operational safety of oil refineries.*

*Keywords: the vibration, monitoring, the rolling bearing, the jump, the degradation-stage, the centrifugal pump unit.*

Предприятия нефтепереработки являются достаточно сложным комплексом на ограниченной территориальной площади которого сосредоточено огромное количество технологического оборудования. Используемое технологическое оборудование подразделяется на два основных класса:

— статическое (печи, ректоры, регенераторы, колонны, емкости, трубопроводы и т.д.);

— динамическое (насосы, дымососы, воздуходувки, компрессора, аппараты воздушного охлаждения и т.д.).

Технологический процесс нефтеперерабатывающего предприятия относится к непрерывным, и в связи с этим все оборудование работает 24 часа в сутки все 365 дней в году, исключая время плановых капитальных ремонтов технологических комплексов. При эксплуатации динамического оборудования на непрерывных технологических производствах одним из ключевых вопросов является своевременное обнаружение и безаварийный вывод из эксплуатации агрегатов с большой степенью деградации деталей и узлов до их разрушения и заклинивания [1].

На нефтеперерабатывающих производствах широкое применение получили центробежные насосные агрегаты оснащенные подшипниками качения [2]. Подшипники качения являются ключевым узлом, обеспечивающим несущую и рабочую функции динамического оборудования [3]. В тоже время подшипники качения в конструкции центробежного насосного агрегата являются самым уязвимым узлом, на работоспособность которого оказывают влияние различные структурные, производственные и эксплуа-

тационные факторы [4]. Количество эксплуатируемых центробежных насосных агрегатов на нефтеперерабатывающем предприятии исчисляется тысячами и десятками тысяч единиц. При этом в одном центробежном насосном агрегате в типовом исполнении четыре подшипниковых узла. В связи с этим актуальным является своевременное обнаружение зарождающихся дефектов и обеспечение мониторинга деградации узлов и деталей центробежного насосного агрегата в процессе эксплуатации [1].

Вибрация центробежного насосного агрегата отражает деградационные процессы, происходящие при работе оборудования [5]. В настоящее время на нефтеперерабатывающих предприятиях стали широко применяться системы мониторинга технического состояния и автоматической диагностики, обеспечивающие контроль за работой динамического оборудования [6]. Типовым набором диагностических параметров систем мониторинга являются параметры: вибрации (виброускорения, виброскорости, виброперемещение), температуры, потребляемого тока и т.д. Таким образом, отслеживая вибрацию, мы проводим оценку технического состояния оборудования согласно нормам ГОСТ 32106–2013 [7]. Согласно нормативно - технической документации для центробежного насосного агрегата, находящегося в эксплуатации, определены следующие градации технического состояния:

— «Хорошо» - соответствует исправному состоянию агрегата и характеризует высокое качество проведенных ремонтных и монтажных работ;

— «Допустимо» - соответствует работоспособному состоянию агрегата при малой вероятности его отказа;

— «Требует принятия мер» (ТПМ) – соответствует постепенной утрате работоспособности, наличию развивающихся неисправностей и росте вероятности отказа агрегата;

— «Недопустимо» (НДП) - соответствует наличию развитых дефектов или высокой скорости их развития, достижении предельного состояния с высокой вероятностью отказа.

ГОСТ 32106–2013 нормирует вибрацию центробежных насосных агрегатов совместным использованием параметров виброускорения, виброскорости и виброперемещения, а также изменения во времени этих параметров для оценки технического состояния оборудования опасных производств.

Установлено, что поломка центробежного насосного агрегата, его узлов и деталей происходит не мгновенно, а занимает определенные временные интервалы, на которых можно выполнить корректирующие действия и предотвратить развитие аварийной ситуации [8]. Классическая теория разрушения [9] представляет жизненный цикл любого изделия в виде кривой износа (Рисунок 1):

Участок OA — приработка. При приработке на начальном этапе работы детали и узлы центробежного насосного агрегата притираются друг другу, в частности в подшипниках качения происходит приработка контактных поверхностей тел качения и дорожек качения на наружном и внутреннем кольце (Рисунок 2, участок 3). При приработке наблюдается повышенная скорость износа, которая по мере завершения процесса приработки снижается и переходит к равномерному изнашиванию;

Участок AB — период работы с постоянной скоростью деградации. Происходит равномерный износ деталей подшипника качения, старение узлов центробежного насосного агрегата (Рисунок 2, участок 1, 4);

Участок BC — период критически быстрого износа деталей, с высокой скоростью деградации. Происходит развитие выраженных дефектов в деталях. На контактных поверхностях деталей подшипников качения образуются трещины, язвы, сколы, приводящие к поломкам и отказам агрегатов (Рисунок 2, участок 2).

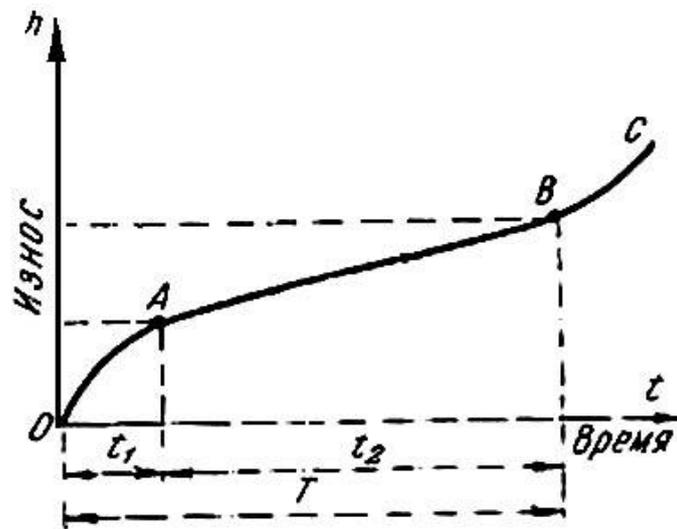


Рис. 1. Теоретическая кривая износа

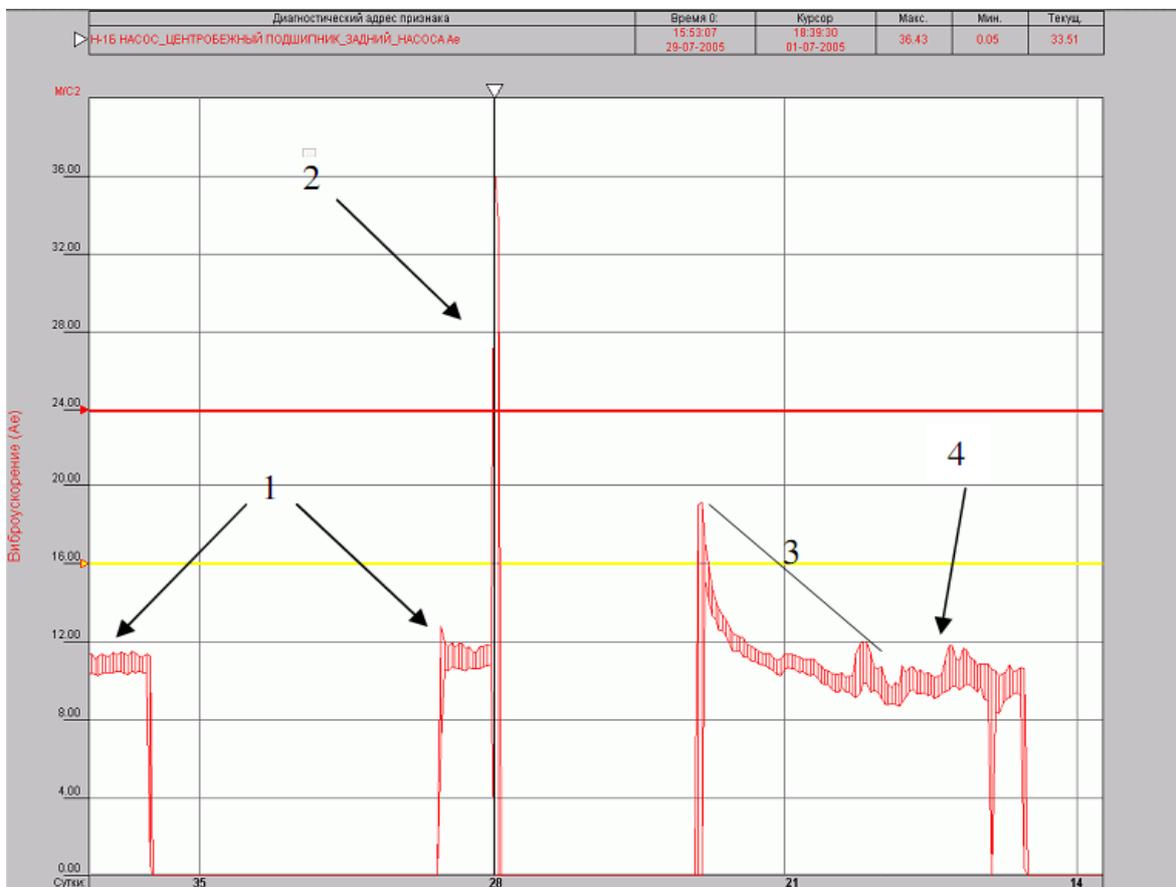


Рис. 2. Тренд вибрации центробежного насоса со стороны заднего подшипника

Оснащение парка динамического оборудования нефтеперерабатывающего предприятия системами мониторинга параметров вибрации позволило сделать видимым процесс деградации подшипников качения в режи-

ме реального времени [5]. Длительная эксплуатация большого парка агрегатов под контролем стационарных систем мониторинга и автоматической диагностики показала, что на ряде агрегатов процесс деградации подшипников качения, особенно период разрушения, отличается от классической теории износа. При работе агрегата наблюдаются периоды критически быстрого износа деталей подшипника, приводящего к появлению выбросов параметров вибрации (Рисунок 3), после которого процесс деградации опять возвращается к равномерному износу и отказа не происходит до тех пор, пока накопленные повреждения в структуре металла деталей подшипника качения, не достигнут критических значений [10].

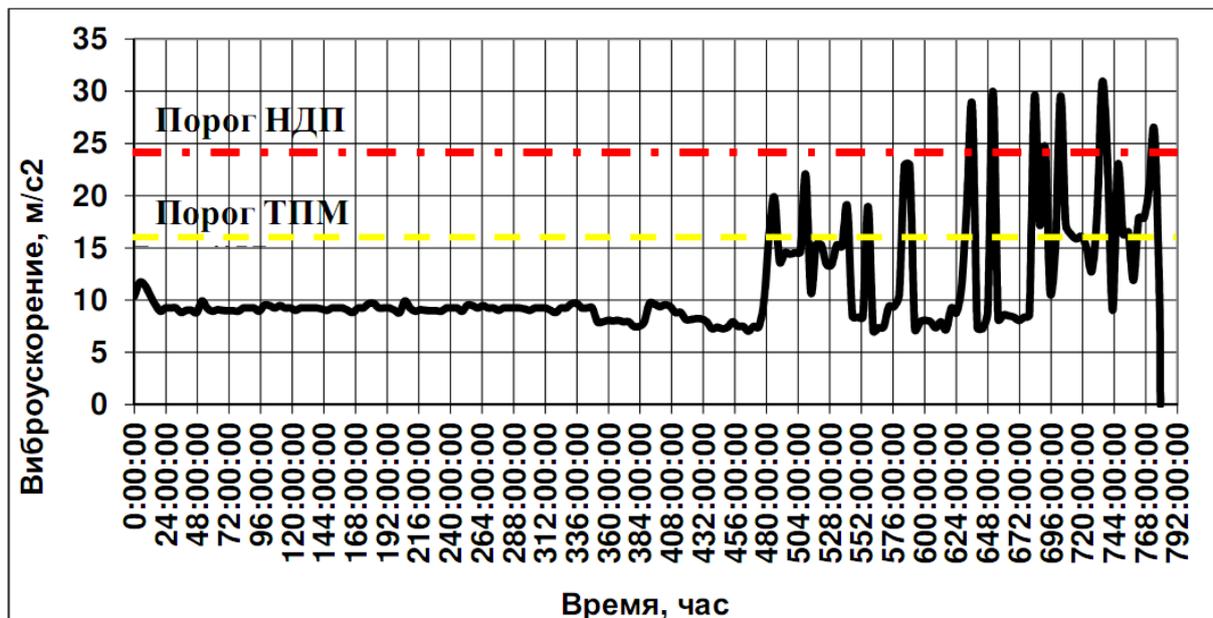


Рис.3. Тренд изменения вибрации электродвигателя со стороны переднего подшипника

Данное явление может проявляться неоднократно. Детали подшипника качения работают в условиях циклического изменения приложенных к ним нагрузок, что в свою очередь приводит к циклическому изменению их напряженно–деформированного состояния [9]. Процесс развития трещины в материале, выход ее на поверхность детали, отслаивание частиц с поверхности трения качения в металле происходит стадийно [11]. По мере работы происходит накопление дислокаций в материале, их рост, объеди-

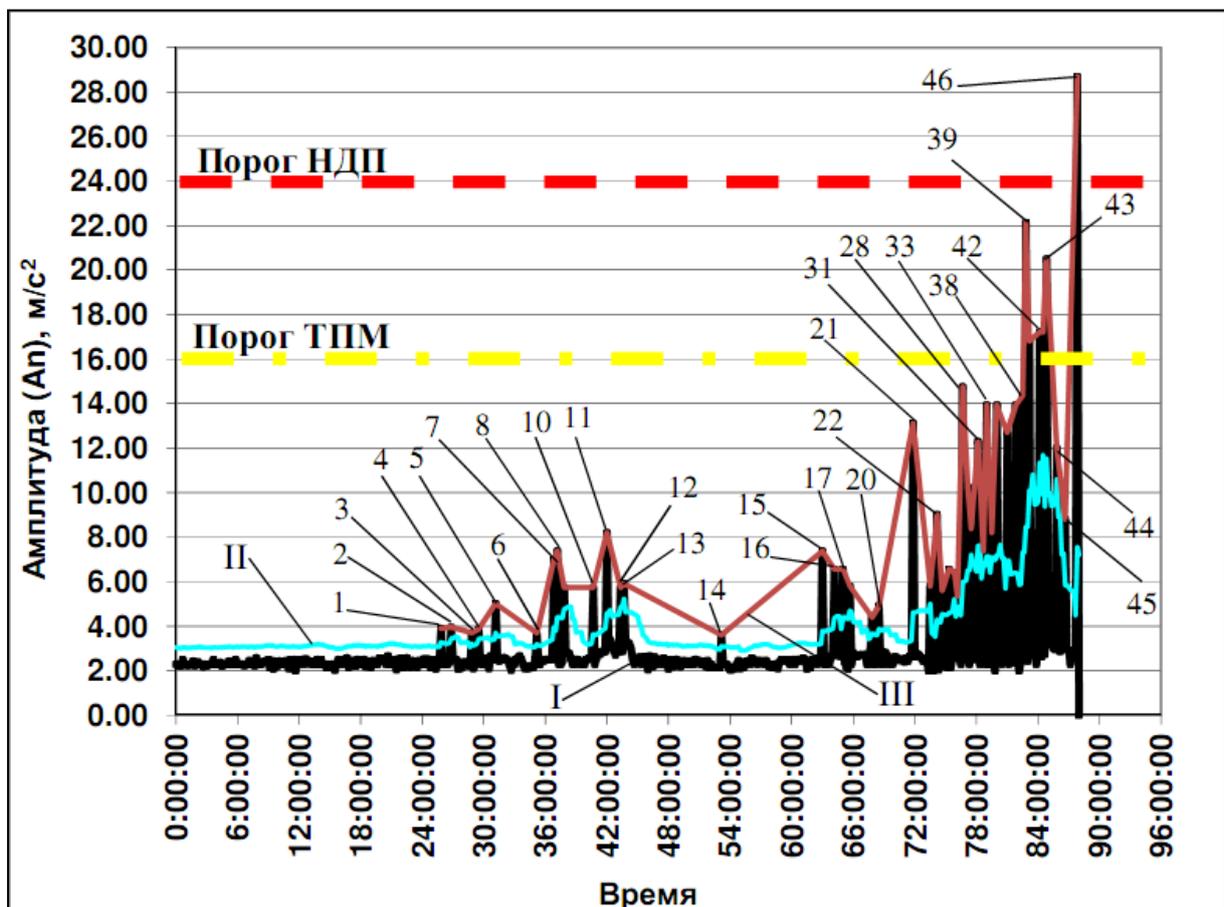
нение, что приводит к зарождению, последующему развитию и росту трещин с дальнейшим их выходом на поверхность деталей в местах контакта с отслаиванием и выкрашиванием металла [12]. Выход трещины на поверхность детали приводит к скачкообразному росту вибрации, а после приработки и закатки краев образовавшейся трещины, происходит снижение уровня вибрации. При этом на появление выбросов вибрации на работающем оборудовании технологический персонал, отвечающий за его эксплуатацию, зачастую не обращает внимание до тех пор, пока амплитуда выброса не превышает установленные пороги «Требуется принятия мер», либо «Недопустимо».

В связи с этим возникает задача обнаружения процессов усталостной деградации деталей подшипника качения на стадии зарождения и последующего контроля развития дефектов в деталях подшипника, контроль изменения технического состояния по уровню вибрации и своевременное предупреждение персонала о наличии проблем в работающем оборудовании, для принятия корректирующих действий – планирования ремонтных работ, либо прекращение эксплуатации.

Для решения поставленной задачи проведен сбор баз данных систем мониторинга технического состояния и автоматической диагностики по работе более семи тысяч единиц центробежных насосных агрегатов с подшипниками качения и установлены закономерности, которые позволили выработать общий подход к выявлению процессов стадийной деградации (Рисунок 4).

При работе центробежных насосных агрегатов система мониторинга технического состояния и диагностики в автоматическом режиме ведет контроль за уровнем вибрации (Рисунок 4, тренд I). Для своевременного выявления выбросов вибрации при работе агрегата (Рисунок 4, участки 1, 2, 3...46), по мере измерения параметров вибрации выполняем расчет скользящего среднего уровня вибрации, относительно него выставляем

пороговый уровень (Рисунок 4, тренд II) по превышению которого рост вибрации считаем выбросом вибрации. По мере появления выбросов вибрации выполняем их фиксирование, начиная с первой стадий развития дефектов, и проводим по ним построение трендов выбросов (Рисунок 4, тренд III). При этом технологическому персоналу визуализируется тренд выбросов, таким образом, визуализируется процесс деградации в деталях и обеспечивается раннее предупреждение персонала о наличии стадийной деградации подшипников качения в центробежном насосном агрегате уже при фиксировании второго выброса вибрации (Рисунок 4, тренд I, позиция 2) [13].



I — тренд вибропараметра; II — тренд порога «выброс»; III — тренд амплитуды выбросов (1, 2, 3...46)

Рис.4. Четырехсуточный тренд вибрации электродвигателя со стороны переднего подшипника

Зафиксировав начальный уровень повреждения деталей подшипника качения по уровню амплитуды первого выброса вибрации зафиксированного системой (Рисунок 4, тренд I, позиция 1) далее выполняем сравнение степени деградации агрегата при его дальнейшей эксплуатации, для этого при появлении новых выбросов вибрации, определяем отношение амплитуды последующих выбросов вибрации к амплитуде первого выброса вибрации

$$B_n = A_n/A_1.$$

где,  $A_1$  — амплитуда первого выброса вибрации,  $A_n$  — амплитуда последующих выбросов вибрации.

Выполняем построение трендов относительной амплитуды выбросов вибрации  $B_n$  (Рисунок 5, позиции 1–4б).

Для относительной амплитуды выбросов вибрации  $B_n$  устанавливаем пороговые значения «Требуется принятия мер» (ТПМ) и «Недопустимо» (НДП) на превышения амплитуды первого выброса вибрации [13].

В рассматриваемом случае при появлении пятого выброса (Рисунок 4, тренд I, позиция 5) относительная амплитуда выбросов вибрации превышает порог «Требуется принятия мер» (Рисунок 5, позиция 5) и система информирует персонал установки, более чем за 2 суток до вывода из эксплуатации агрегата, о том, что степень деградации деталей выросла более чем на 25% относительно установленного начального уровня повреждения деталей и необходимо провести планирование ремонтных работ. При продолжении эксплуатации при появлении седьмого выброса, относительная амплитуда выбросов вибрации превышает порог «Недопустимо» (Рисунок 5, позиция 7), то есть степень повреждения деталей машины увеличилась более чем на 50% относительно установленного начального уровня повреждения деталей машин. Таким образом, персонал получил информацию о необходимости останова центробежного насосного агрегата за 2 суток до остановки агрегата согласно принятым на настоящее время нормам [7].

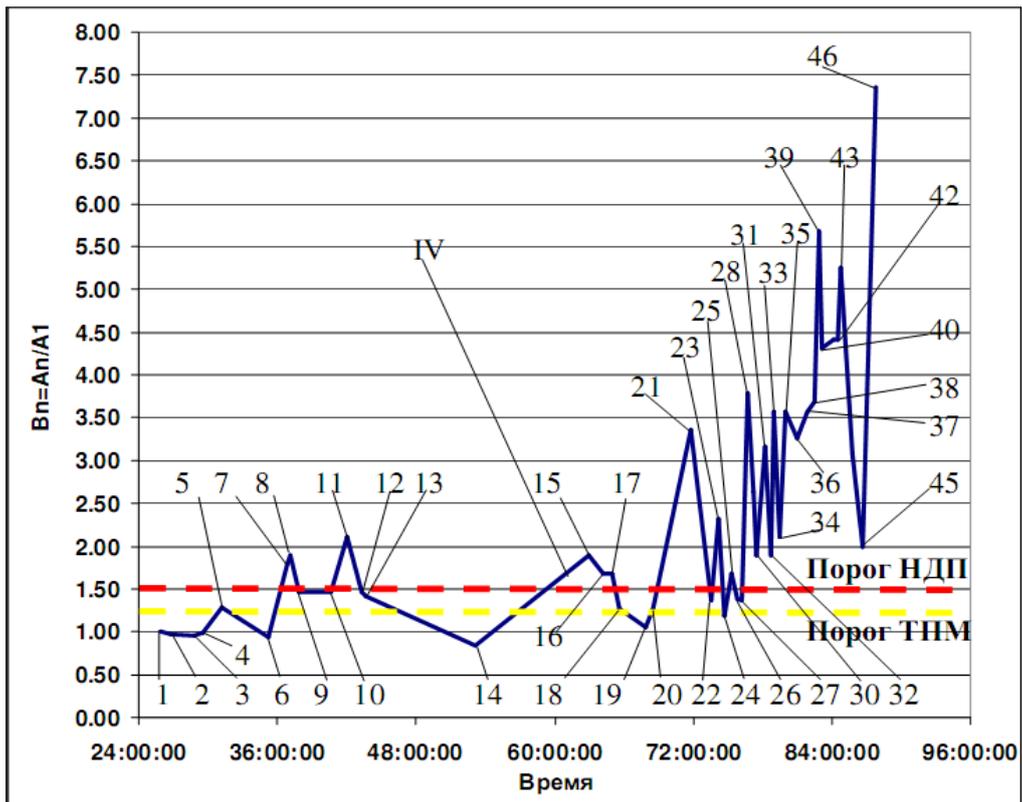


Рис. 5. – Тренд (IV) относительной амплитуды выбросов вибрации

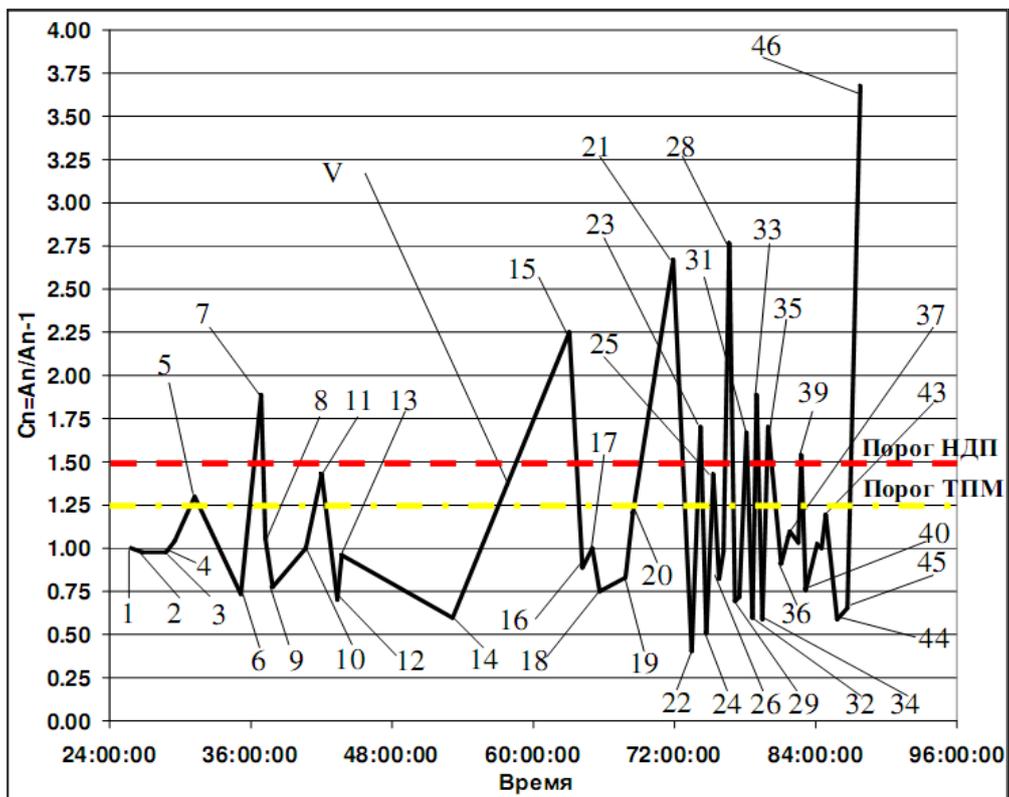


Рис. 6. Тренд (V) относительного приращения амплитуд выбросов вибрации

Так же фиксируя каждый выброс вибрации, проводим оперативное сравнение степени повреждения деталей от стадии к стадии на интервале между двумя соседними выбросами вибрации. Оцениваем относительные приращения амплитуд последующих выбросов вибрации к амплитуде предыдущего выброса

$$C_n = A_n/A_{n-1}.$$

где,  $A_n$  — амплитуда последующих выбросов вибрации,  $A_{n-1}$  — амплитуда предыдущего выброса вибрации.

Тренд относительного приращения амплитуды выбросов вибрации  $C_n$  (Рисунок 6, позиции 1–46) показывает степень повреждения деталей подшипника качения от стадии к стадии [13].

Установив пороговые значения «Требуется принятия мер» и «Недопустимо» для эксплуатации, выполняем отслеживание степени опасности повреждения деталей и узлов относительно предыдущей стадии повреждения. Так же как и в случае диагностического признака относительной амплитуды ( $B_n$ ), признак относительного приращения амплитуд выбросов вибрации ( $C_n$ ) при пятом и седьмом выбросе превысил пороги «Требуется принятия мер» и «Недопустимо» соответственно, обеспечив тем самым ранее предупреждение персонала (Рисунок 6, позиции 5, 7).

Экспериментальные результаты по диагностическому признаку относительной амплитуды выбросов вибрации  $B_n$  (Рисунок 5, позиции 1–46) показали, что на начальном этапе деградации с 1 по 15 выброс на интервале времени, чуть менее 2 суток, деградация деталей подшипников качения относительно начального уровня составила 2,1. После 21 выброса (Рисунок 5, позиция 21) скорость деградации узлов возросла, начался интенсивный износ деталей. На интервале времени 16 часов относительная амплитуда выбросов вибрации с 21 по 46 выброс выросла с 3,4 до 7,4 относительно начального уровня деградации.

Полученные результаты по диагностическому признаку относительные приращения амплитуд вибрации  $C_n$  (Рисунок 6, позиции 1–46) показали, что по мере работы агрегата деградация узлов и деталей от выброса к выбросу меняется при этом наблюдается общая тенденция к ухудшению состояния. На временном интервале 62 часа, относительное приращение амплитуд достигло 3,26 (Рисунок 6, позиция 46).

В результате применения новых диагностических признаков, первые предупреждения об усилении контроля за работой агрегата и планировании ремонта, были получены более чем за двое суток до вывода агрегата из эксплуатации по параметрам вибрации. Данный подход позволил контролировать деградацию деталей и узлов, начиная с ранних стадий развития дефектов.

Выводы:

1. Рассмотренный подход позволяет своевременно и последовательно отслеживать деградацию узлов и деталей, визуализировать процесс деградации, отслеживать рост дефектов, стадии деградации и степень их опасности на протяжении всего периода эксплуатации агрегата. В отличие от действующего в настоящий момент стандартного подхода по контролю параметров вибрации, применение новой методики позволяет применять корректирующие меры, пока степень деградации деталей не достигла критического уровня, и объем ремонтно-восстановительных работ будет минимально необходимым.

2. Применение данного подхода позволило повысить эксплуатационную надежность динамического оборудования и повысить безопасность нефтеперерабатывающего производства.

3. Использование относительной амплитуды выбросов вибрации позволяет выполнять долговременную диагностику деградации деталей с момента появления первого выброса.

4. Использование относительного приращения амплитуд выбросов вибрации позволяет обеспечить оперативную диагностику повреждения, отслеживать деградацию деталей от стадии к стадии, ее рост и опасность на интервале между двумя соседними выбросами вибрации.

Литература:

[1] Костюков В.Н. *Мониторинг безопасности производства*. Москва, Машиностроение, 2002. 224 с.

[2] Ломакин А.А. *Центробежные и осевые насосы*. Москва, Машиностроение, 1966. 260 с.

[3] Черменский О.Н. *Подшипники качения: справочник-каталог*. Москва, Машиностроение, 2003. 576 с.

[4] Костюков В.Н., Тарасов Е.В. *Исследование виброакустических характеристик подшипников качения высоковольтных электродвигателей в эксплуатации*. Главный энергетик, 2011, №8, с. 65–68.

[5] Костюков В.Н., Науменко А.П. *Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин*. 2-е изд., с уточн., Новосибирск, Издательство СО РАН, 2014. 378 с.

[6] Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Костюков А.В. *Автоматизированные системы управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств (АСУ БЭР - КОМПАКС®)*. Москва, Машиностроение, 1999. 163 с.

[7] ГОСТ 32106-2013. *Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Вибрация центробежных насосных и компрессорных агрегатов*. Введен с 01.11.14.– Москва, ФГУП «Стандартинформ», 2014. - 8 с.

[8] Костюков В.Н., Бронфин И.Б., Долгопятов В.Н., Павленко Б.А., Бойченко С.Н., Мелинг А.Я., Тарасов Е.В. *Опыт широкомасштабного внедрения стационарных систем вибродиагностики КОМПАКС®*. Химия и технология топлив и масел, 1997, №1, с. 10–13.

[9] Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин. Справочник, Москва, Машиностроение, 1993. 640 с.

[10] Костюков В.Н., Тарасов Е.В. *Мониторинг усталостного разрушения подшипников*. Сборник научных трудов по проблемам двигателестроения, посвященный 175-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана, под редакцией Н.А. Иващенко, Л.В. Грехова, Москва, 2005, с 36–39.

[11] Владимиров И.В. *Физическая природа разрушения металлов*. Москва, Металлургия, 1984. 280 с.

[12] Власов В.Т., Дубов А.А. *Физическая теория процесса «деформация-разрушение»*. Ч.1. *Физические критерии предельных состояний металла*. Москва, ЗАО «Тиссо», 2007. 517 с.

[13] Костюков В.Н., Тарасов Е.В., Костюков Ал.В., Бойченко С.Н. Способ диагностики повреждения деталей машин: Пат. 2540195 РФ, Оpubл. 10.02.15; Бюл. № 4.