

Такая операция плохо поддается автоматизации ввиду существенных различий между расчетными и полученными в эксперименте дисперсионными кривыми. Реальные дисперсионные кривые на спектрограмме могут быть зашумлены из-за влияния акустических и электромагнитных шумов, отражений и наложения сигналов, идущих в объекте сложной формы по разным путям. Зачастую многие участки реальных дисперсионных кривых не видны на спектрограмме из-за затухания акустического сигнала в объекте или неровностей АЧХ датчика. Для уверенности в правильности определения интегральной толщины эту операцию приходится производить вручную, что значительно осложняет и замедляет обработку больших объемов данных. При контроле крупных объектов таким методом возникает достаточно большой объем данных (до десятков тысяч осциллографов). Ручная обработка такого объема данных является неэффективной. Таким образом, автоматизация либо упрощение процесса обработки спектрограмм играет важную роль для развития метода интегральной толщинометрии. Для решения поставленной задачи используются искусственные нейронные сети.

В общем случае данные, полученные при использовании метода интегральной толщинометрии, содержат большое количество сигналов, на спектрограммах которых нет выраженных дисперсионных кривых. Наличие большого количества этих неинформативных сигналов значительно затрудняет обработку данных, что приводит к необходимости разделения сигналов на имеющие дисперсионные кривые и не имеющие. Для этого используется сверточная нейронная сеть, обученная классификации изображений. Сверточная нейронная сеть (англ. convolutional neural network, CNN) – специальная архитектура искусственных нейронных сетей, предложенная Яном Лекуном и нацеленная на эффективное распознавание изображений [2], входит в состав технологий глубинного обучения (англ. deep learning). Подавая на вход сверточной сети изображение спектрограммы сигнала, на выходе получают класс, к которому относиться спектрограмма. Таким образом, сеть производит классификацию спектрограмм на имеющие дисперсионные кривые и не имеющие.

Основные результаты

Затем на спектрограммах, выделенных на первом этапе, для определения интегральной толщины используется многослойный персептрон, обученный на основе спектральных параметров распознавать интегральную толщину объекта контроля. Многослойными персепtronами называют нейронные сети прямого распространения. Входной сигнал в таких сетях распространяется в прямом направлении, от слоя к слою [3]. Каждый слой рассчитывает нелинейное преобразование от линейной комбинации сигналов предыдущего слоя. Многослойный персептрон может формировать на выходе произвольную многомерную функцию при соответствующем выборе количества слоев, диапазона изменения сигналов и параметров нейро-

нов. Многослойные персептроны являются универсальным аппроксиматором функций. Так на вход многослойного персептрана подается ряд спектральных параметров сигнала, на основе которых заранее обученная нейронная сеть высчитывает значение интегральной толщины объекта контроля.

Обсуждение результатов

В ходе работы значительно упрощен процесс наложения дисперсионных кривых при использовании метода интегральной толщинометрии. Для решения этой задачи обучены и использованы искусственные нейронные сети такие как: многослойный персептрон и сверточная нейронная сеть. Получен опыт обработки данных акустической эмиссии с помощью искусственных нейронных сетей

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Терентьев Д. А. Интегральная толщинометрия // В мире НК. – 2014. – № 1. – С. 59 – 62.
2. LeCun Y., Bottou L., Bengio Y., Haffner P. Gradient-based learning applied to document recognition. Proc. of the IEEE, 1998.
3. Саймон Хайкин. Нейронные сети: Полный курс. 2-е изд., испр. / Пер. с англ. Университет McMaster. – Гамильтон, Онтарио, Канада: Изд-кий дом «Вильямс», 2008.

УДК 681.518.5 + 534.8

РАСПОЗНАВАНИЕ ОПАСНЫХ РАЗВИВАЮЩИХСЯ ДЕФЕКТОВ И ИХ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ В ПРОЦЕССЕ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Костюков А. В.¹ – канд. техн. наук, Бойченко С. Н.¹ – канд. техн. наук, Богомолов Д. Е.^{1,2} – магистрант ОмГТУ

¹ООО НПЦ «Динамика», г. Омск, Россия;
²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет», г. Омск, Россия)

Аннотация. В данном докладе приведен алгоритм распознавания экспоненциальных участков роста активности акустической эмиссии, основанный на аппроксимации сохраненных значений информативных параметров (далее по тексту – тренд) в процессе непрерывного мониторинга методом акустической эмиссии (АЭ). Кроме того, на основе параметров экспоненциальной аппроксимации трендов предложен метод расчета временного прогноза по достижению параметров акустической эмиссии критических (пороговых) значений.

Целью данной работы является разработка алгоритма обнаружения опасных развивающихся дефектов в процессе непрерывного мониторинга колонно-емкостного оборудования методом АЭ. Важнейшими задачами данной работы являются теоретическое исследование информативных параметров АЭ, рассматриваемых в качестве параметров для обнаружения опасных развивающихся дефектов, описание

алгоритма распознавания экспоненциальных участков роста тренда, а также аналитический вывод формулы, позволяющей прогнозировать наступление критического состояния объекта мониторинга. Предложенный алгоритм реализован в стационарной системе диагностики и мониторинга КОМПАКС® (далее по тексту – система), ней установленной на регенераторе, работающем в составе оборудования реакторно-регенераторного блока секции каталитического крекинга.

Использование предложенного подхода может найти применение в системах непрерывного мониторинга производственных объектов различного назначения.

Ключевые слова: АЭ, аппроксимация, прогнозирование, мониторинг, КОМПАКС®.

Наибольшую опасность при эксплуатации колонно-емкостного оборудования представляют трещиноподобные дефекты, которые чаще всего являются причинами аварий и разрушений [1, с. 307]. Согласно справочным данным [2, с. 76], обобщенная зависимость суммарной АЭ от временного развитием трещины при постоянной нагрузке имеет три основных развивающейся трещины до этапа: I – этап зарождения; II – этап равномерного развития трещины до критического размера; III – этап катастрофического разрушения. Экспоненциальная зависимость (на I и III этапах) подтверждается эмпирическими данными, приведенными в [1, с. 312; 2, с. 75] при статическом нагружении образца из стали 25ХН3МФА с дефектами различного размера. Подобные по форме зависимости также получены и в экспериментах по росту усталостных трещин для других марок сталей [2, с. 76], что подтверждает наличие экспоненциальных участков на кривой зависимости суммарного счета АЭ от времени при развивающихся дефектах типа трещины.

Целью данной работы является разработка алгоритма обнаружения опасных развивающихся дефектов в процессе непрерывного мониторинга колонно-емкостного оборудования методом АЭ. Важнейшими задачами данной работы являются теоретическое исследование информативных параметров АЭ, рассматриваемых в качестве параметров для обнаружения опасных развивающихся дефектов, описание алгоритма распознавания экспоненциальных участков роста тренда, а также аналитический вывод формулы, позволяющей прогнозировать наступление критичного состояния объекта мониторинга.

При довольно подробном изложении аспектов подготовки и проведения АЭ контроля объектов в ПБ 03-593-03 [3], раздел, посвященный оценке состояния объекта по параметрам АЭ, в основном является справочным и в большей степени описывает применение данного метода в процессе нагружения. Тем не менее, предложенный еще в 1976 г. в [4] подход при оценке опасности источников АЭ по их активности используется практически во всех случаях проведения АЭ контроля, который также может быть использован и в целях непрерывного мониторинга [5]. В качестве параметров активности обычно рассматривают характер изменения количества импульсов и энергетических параметров (амплитуда, энергия импульсов АЭ) [6, с. 90].

Описание алгоритма обнаружения опасных развивающихся дефектов

Как было описано выше, в качестве параметров активности АЭ обычно рассматривают параметры количества импульсов и энергетические параметры. Рассмотрим алгоритм обнаружения опасного развития дефектов на примере роста накопленного счета импульсов АЭ.

Для реализации данного подхода в программном обеспечении системы была разработана возможность аппроксимации трендов параметров акустической эмиссии. Данный подход подразумевает построение эмпирической функции распределения значений (ЭФР) параметра АЭ, преобразование ЭФР к линейному виду, линейное аппроксимирование (применяя метод наименьших квадратов), а также оценку достоверности аппроксимации R^2 по мере неопределенности Линдера. Таким образом, выражение функции аппроксимации экспонентных участков трендов имеет следующий вид [7]

$$y_i = Y + Ae^{nt_i}, \quad (1)$$

где y_i – значение аппроксимируемого параметра; Y – смещение экспоненты; A – масштабный коэффициент экспоненты; t – время; n – показатель экспоненты, при $i = 1 \dots l$, здесь l – количество точек аппроксимации экспонентой.

Изложим подробно пять основных этапов алгоритма подробнее.

1. Выполняется загрузка базы записанных данных мониторинга по параметру накопленного счета импульсов АЭ ΣN .

2. На основании формулы (1), выполняется последовательный расчет параметров аппроксимации A и n по методу наименьших квадратов; корректируется смещение экспоненты Y относительно нуля; оценивается достоверность аппроксимации R^2 по мере неопределенности Линдера для всех возможных интервалов тренда от момента текущего времени $t_{текущ}$. После завершения расчета параметров аппроксимаций для всех рассматриваемых интервалов тренда, выполняется их сохранение, для последующей обработки.

3. Следующим этапом выполняется поиск участка тренда с максимальной аппроксимацией R^2 , начиная с последнего значения в базе записанного тренда n_{max} , постепенно уменьшая интервал поиска на одно измерение до установленного минимального количества измерений n_{min} . Схематично процесс поиска участка тренда с максимальной R^2 приведен на рис. 1.

После обнаружения участка тренда с максимальной R^2 , выполняется сохранение всех параметров аппроксимации данного участка тренда R_i^2 , A_i , n_i и Y_i .

4. На четвертом этапе оценивается наличие роста тренда с максимальной достоверностью R^2 по параметрам A и n . При застое тренда или другими словами при отсутствии роста суммарного счета импульсов ΣN ,



Рис. 1. Схема распознавания участка тренда с максимальной достоверностью аппроксимации R^2

фактически, расчетные параметры показателя степени n и масштабного коэффициента экспоненты A принимают отрицательные значения. При наличии роста тренда ($A > 0$ и $n > 0$) данные аппроксимации передаются в следующий блок (этап 5), при его же отсутствии дальнейший расчет не выполняется.

5. На завершающем этапе алгоритма выполняется оценка опасности при наличии растущего тренда и прогноз достижения данным трендом порогового уровня на основании уже записанных значений.

Реализация временного прогноза достижения исследуемым трендом порогового уровня Tpr (Time of prediction)

Для возможности оценки временного прогноза Tpr по достижению тренда пороговых значений (если такие известны), из формулы (1) выразим параметр времени, используя метод логарифмирования и получим

$$t_i = \frac{1}{n} \ln \frac{y_i - Y}{A}. \quad (2)$$

Уравнение временного прогноза запишем как временную разницу между временем, за которое данный параметр достигнет порогового значения $T_{\text{нпп}}$ и временем, учитывающим текущее состояние параметра T , при фиксированных параметрах аппроксимации тренда (показателя, масштабного коэффициента экспоненты и смещения экспоненты) в следующем виде

$$\Delta T = Tpr = T_{\text{нпп}} - T; \quad (3)$$

$$Tpr = \frac{1}{n} \left(\ln \left(\frac{y_{\text{нпп}} - Y}{A} \right) - \ln \left(\frac{y_{\text{тек}} - Y}{A} \right) \right). \quad (4)$$

После преобразования формулы (4), результирующая формула расчета имеет вид

$$Tpr = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{y_{\text{нпп}} - Y}{y_{\text{тек}} - Y} \right). \quad (5)$$

Схематично, принцип расчета временного интервала прогноза приведен на рис. 2. Требуется уточнить, что для возможности прогноза нужно иметь экспериментальные данные критических (пороговых) значений аппроксимируемого параметра, например как приведено на рис. 2. При отсутствии данной зависимости, с чем часто сталкиваются на практике при проведении АЭ контроля, можно выполнять реализацию данного алгоритма для усредненных параметров (количество или энергии импульсов). В таком случае, можно использовать статистические методы определения пороговых значений на основании истории эксплуатации объекта мониторинга.

Подводя итоги, отметим результаты, полученные в данной работе:

- 1) проведено теоретическое исследование, на основе которого описана зависимость суммарной АЭ во времени при росте трещиноподобных дефектов разной величины;
- 2) рассмотрен алгоритм обнаружения развивающихся дефектов, разработанный для автоматизированного диагностирования в процессе непрерывного мониторинга;
- 3) приведен аналитический вывод формулы временного прогноза по достижению исследуемым трендом критического (порогового) значения.

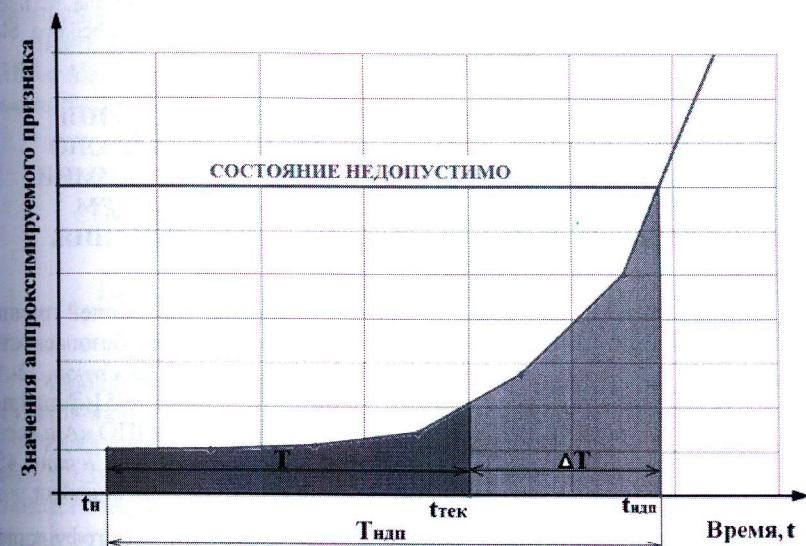


Рис. 2. Схематичное представление расчета параметра временного прогноза Tpr

Приведенный в данной работе алгоритм позволяет зафиксировать процесс разрушения и как следствие локализовать участок на объекте, наблюдать и изучать динамику его дальнейшего развития. Тем не менее, прогнозирование предельных состояний объекта наблюдения, используя метод АЭ, во многом зависит от имеющихся экспериментальных или эмпирических зависимостей параметров АЭ в совокупности с данными о размере растущего дефекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клюев В. В., Соснин Ф. Р., Ковалев А. В. и др. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник. 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.
2. Иванов В. И., Бигус Г. А., Власов И. Э. Диагностика безопасности. Акустическая эмиссия: Учебное пособие. – М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 192 с.
3. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акусто-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов (Утв. постановлением Гостротехнадзора РФ от 4.06.2003 г. № 77). – 35 с.
2. Standard Recommended Practice for Acoustic Emission Monitoring of Structures During Controlled Stimulation. ASTM E569–76, 1976.
5. Костюков В. Н. Мониторинг безопасности производства. – М.: Машиностроение, 2002. – 224 с.
6. Кузнецов Н. С. Теория и практика неразрушающего контроля изделий с помощью акустической эмиссии: Методическое пособие. – М.: Машиностроение, 1998. – 96 с.
7. Костюков А. В. Оценка работоспособности машин и агрегатов по трендам вибropараметров // Dynamics of Machine Aggregates. Proceedings of the 5th International Conference (June 27–29, Slovak University of Technology). – Gabčíkovo, Slovak Republic, 2000. – P. 101 – 104.

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ФАКТИЧЕСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОПО И ИХ КЛАССОВ В НЕФТЕПЕРЕРАБОТКЕ, НЕФТЕХИМИИ И ХИМИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА И СИСТЕМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ. ПРОБЛЕМЫ. РЕШЕНИЯ. РЕЗУЛЬТАТЫ

Махутов Н. А. – чл.-корр. РАН, председатель Рабочей группы при Президенте РАН по анализу риска и проблем безопасности (Россия, Москва, Ленинский проспект, 32-А; тел. (495) 930-80-78; e-mail: kei51@mail.ru)

Разуваев И. В., Генеральный директор ЗАО «НПО «Алькор» (Россия, г. Дзержинск, пр. Ленина, 48; тел. (8313) 25-26-10; e-mail: alcorg@alcorg.pro)

Переход на дистанционный многопараметрический и многофункциональный мониторинг промышленной безопасности является одним из важных мероприятий по снижению рисков промышленных аварий и катастроф.

Развитие микроэлектроники и методов НК сделало экономически эффективным применение высокотехнологичных комплексов мониторинга технического состояния ОПО в реальном времени. Внедрение таких комплексов позволяет существенно повысить уровень промышленной безопасности за счет обнаружения потенциальных дефектов на ранних стадиях развития. Непрерывный контроль состояния ОПО и параметров технологических процессов обеспечивает идентификацию причин образования дефектов. Все это позволяет реализовать программу компенсирующих мероприятий в рамках стратегии проактивного технического обслуживания и ремонта ОПО, т.е. работать на опережение. Как показывает передовой опыт, такой подход обеспечивает значительное, в разы, увеличение периода работоспособности производств.

Одним из наиболее эффективных для применения при интегральном дистанционном мониторинге фактического технического состояния оборудования нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств методов НК является метод акустической эмиссии (АЭ).

В докладе рассмотрены и проанализированы проблемы, возникавшие при создании и эксплуатации комплексов интегрального мониторинга (КИМ) с применением метода АЭ.

К ним относятся обеспечение надежной работы АЭ датчиков в условиях как высоких, так и криогенных температур, выбор оптимальных методов взрывозащиты, обеспечение помехоустойчивости АЭ-каналов КИМ при работе в условиях действующих производств и верификация данных мониторинга.

В докладе изложен многолетний опыт создания компонентов и систем КИМ с АЭ, а также намечены пути дальнейшего решения этих проблем для высокорисковых объектов нефтегазохимии.

ПЕРСПЕКТИВЫ АЭ МОНИТОРИНГА ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ И ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Петерсен Т. Б., Шемякин В. В., Самохвалов А. Б., Курносов Д. А.

(ООО «ДИАПАК», Москва, Россия)

Хорошо известной проблемой АЭ мониторинга производственных объектов является наличие нестационарных шумов, уровень которых в ряде случаев сравним с уровнем полезных сигналов. При этом шумы, источниками которых служит работа вспомогательного оборудования, динамика технологических сред и прочие процессы, связанные с эксплуатацией объекта, отражают характер протекания данных процессов и потому могут использоваться для диагностики общего состояния объекта. Накопление большого количества акустической информации по шумам, относящейся к



XXI ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

28 ФЕВРАЛЯ - 2 МАРТА 2017



СБОРНИК ТРУДОВ



РОССИЙСКОЕ ОБЩЕСТВО
ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ
ДИАГНОСТИКЕ

XXI ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ
И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

СБОРНИК ТРУДОВ

28 февраля – 2 марта 2017 г.



Москва, 2017

УДК [681.518.54+620.19](035)

ББК 30.82-5я2

Д25

Д25 **XXI Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике: сборник трудов.** Москва, 28 февраля – 2 марта 2017 г. – М.: Издательский дом «Спектр», 2017. – 364 с.: ил.

ISBN 978-5-4442-0125-1

DOI 10.14489/4442-0125-1

Сборник содержит научные труды (тезисы и доклады), представленные на XXI Всероссийской конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике. Изложены результаты работ ученых и специалистов российских и зарубежных фирм – мировых лидеров по производству средств неразрушающего контроля и технической диагностики. В состав сборника вошли работы по: акустической эмиссии; вибродиагностике; акустическим, магнитным, электромагнитным, оптическим, тепловым, микроволновым и радиационным методам неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики (ТД); методам НК и ТД при оценке техногенной безопасности; обучению, аттестации и сертификации.

УДК[681.518.54+620.19](035)

ББК 30.82-5я2

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ХХI ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

СБОРНИК ТРУДОВ

28 февраля – 2 марта 2017 г.

Корректор *А.И. Евсейчев*

Инженер по компьютерному макетированию *А.И. Евсейчев*

Художественное оформление *Н.И. Смольянина*

ISBN 978-5-4442-0125-1



9 785444 201251

Сдано в набор 31.01.2017 г. Подписано в печать 15.02.2017 г.

Формат 60×90 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная. Гарнитура Times.

Печать цифровая. Уч.-изд. л. 23. Тираж 200 экз. Заказ № 02112

ООО «Издательский дом «СПЕКТР»,
119048, Москва, ул. Усачева, д. 35, стр. 1. Тел.: (495) 514 76 50.
[Http://www.idspektr.ru](http://www.idspektr.ru). E-mail: info@idspektr.ru

Отпечатано в типографии ООО «Паблит»
127282, Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1

ISBN 978-5-4442-0125-1

© РОНКТД, 2017

Секция 3

ВИБРОДИАГНОСТИКА

Руководители секции: Г. В. Зусман, В. Н. Костюков

1. Новая методика диагностирования подшипниковых узлов рельсово-подвижного состава в процессе движения <i>Басакин В. В., Костюков В. Н., Костюков А. В., Казарин Д. В.</i>	145
2. Методика диагностики электротехнических устройств, содержащих обмотки и магнитопровод <i>Городнов А. В., Засухин В. В., Рущинский В. Н., Тренин С. А.</i>	152
3. Совершенствование методов и средств вибродиагностики колесно-моторных блоков подвижного состава <i>Зайцев А. В., Костюков А. В., Казарин Д. В.</i>	155
4. Результаты экспериментальных исследований, подтверждающие возможность регистрации механических колебаний намагниченных тел с помощью внешней обмотки <i>Засухин В. В., Рущинский В. Н., Тренин С. А.</i>	163
5. Вибрационный измерительный и диагностический канал КД8700 и резонансный метод контроля подшипников <i>Зусман Г. В.</i>	163
6. Опыт применения параметров характеристической функции для диагностики и мониторинга технического состояния подшипников качения <i>Костюков В. Н., Костюков А. В., Бойченко С. Н.</i>	165
7. Автоматические системы мониторинга «здоровья» оборудования производственно-транспортного комплекса, обеспечивающие высокую безопасность и эффективность <i>Костюков В. Н., Костюков Ан. В., Костюков А. В., Бойченко С. Н., Казарин Д. В.</i>	167
8. О дополнительных требованиях к системам виброконтроля и мониторинга технического состояния турбоагрегатов ТЭС и АЭС <i>Куменко А. И., Кузьминых Н. Ю.</i>	174
9. Критерии надежности и мониторинг технического состояния мощных турбоагрегатов с использованием статических и динамических сил в опорах валопроводов <i>Куменко А. И., Кузьминых Н. Ю., Тимин А. В.</i>	181
10. Мониторинг распределенной неуравновешенности экспериментального ротора с использованием датчиков вала <i>Куменко А. И., Кузьминых Н. Ю., Тимин А. В.</i>	186
11. Обобщенная модель механизма формирования и структуры виброакустического сигнала поршневой машины <i>Науменко А. П., Костюков В. Н.</i>	187