4. Tol S., Ozguven N. H. Dynamic Characterization of Structural Joints Using FRF Decoupling // Topics in Modal Analysis I. 2012. V. 5. P. 435–446.

5. Williams J. G., Anley R. E., Nash D. H., Gray T. G. F. Analysis of externally loaded bolted joints: Analytical, computational and experimental study // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2009. V. 86. P. 1–3.

УДК 621.3.04

КОМБИНИРОВАНИЕ МЕТОДОВ ВИБРОДИАГНОСТИКИ И ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

А.В. Костюков, С.Н. Бойченко, А.В. Щелканов, Е.А. Бурда
ООО «НПЦ «Динамика», г. Омск, Россия

***Аннотация* – В настоящее время для определения технического состояния динамического оборудования широко применяются методы вибродиагностики. Эти методы реализованы в переносных, стендовых и стационарных системах и адаптированы, в том числе, для диагностирования асинхронных электродвигателей по параметрам вибрации их подшипниковых узлов.**

Асинхронные электродвигатели могут иметь специфичные для них дефекты электромагнитной системы. Такие дефекты выявляются методами вибродиагностики, но их локализация и классификация зачастую затруднены. Это связано с тем, что в вибросигналах могут находить отражение процессы, происходящие в обмотках различных фаз статора, железе статора и проводящей системе ротора.

Применение метода частичных разрядов позволяет повысить точность диагностирования, так как различные дефекты электромагнитной системы имеют свои характерные значения параметров частичных разрядов. Например, появляется возможность определения фазы обмотки статора, в которой развивается дефект.

Комбинирование методов вибродиагностики и частичных разрядов дает возможность определять наличие дефектов электромагнитной системы асинхронных электродвигателей, используя различные физические эффекты одновременно, что повышает достоверность диагностирования.

***Ключевые слова:* вибрация, частичные разряды, диагностика, асинхронный электродвигатель.**

I. Введение

В современной производственной практике главенствующую роль должны играть вопросы обеспечения безопасности эксплуатации оборудования, особенно на опасных производственных объектах. И это, в первую очередь, определяется даже не желанием хозяйствующих субъектов снизить затраты на устранение экономических последствий потенциальных отказов оборудования, а необходимостью исключить ситуации, связанные с угрозой здоровью и жизни людей.

Исправность динамического оборудования (ДО) нефте- , газоперерабатывающих и химических предприятий во многом определяет стабильность технологических процессов, непосредственно влияющую на вопросы безопасности и экономической эффективности. Наиболее ответственные позиции оборудования находятся под непрерывным мониторингом, как автоматизированным, так и проводимым вручную [1]. Наиболее распространены в приводах ДО асинхронные электродвигатели (АЭД), соответственно, вопросам контроля их технического состояния уделяется большое внимание [2]. Как один из методов контроля широко применяется вибродиагностика (ВД). ВД имеет высокую эффективность в диагностировании механических дефектов АЭД – дефектов подшипниковых узлов, дисбалансов, эксцентриситетов и других дефектов, проявляющихся при вращении ротора АЭД. При этом дефекты электромагнитной системы, проявляющиеся в вибросигналах, зачастую остаются трудно распознаваемыми. Это связано как с ограничениями самих методов ВД, так и с тем, что внимание исследователей и диагностов обычно сфокусировано на одном методе, применением которого и пытаются решить задачи технической диагностики какого-либо ДО.

Комбинирование различных методов технической диагностики позволяет существенно повысить итоговую результативность диагностирования. Подбор методов, дополняющих друг друга в областях, недоступных им по отдельности, позволяет повысить глубину диагностирования. При этом чем более различаются физические основы процессов, использующихся для получения диагностической информации, тем более достоверными можно считать результаты, когда такие методы показывают наличие дефекта одного типа, подтверждая друг друга.

Так, для контроля электроразрядной активности в АЭД удобно использовать метод частичных разрядов (ЧР) [3]. Этот метод неразрушающего контроля может применяться автоматизированно, параллельно с методом ВД. Его использование позволяет увеличить глубину диагностирования АЭД в области контроля изоляции обмоток статоров, контактных соединений проводников статора и ротора, искровых процессов в железе статора. Применение этого метода совместно с методом ВД может повысить точность идентификации и локализации

дефектов электромагнитной системы АЭД, поскольку метод ЧР позволяет локализовать значительную часть этих дефектов, например, по фазам обмоток статоров.

Вышеизложенные доводы послужили основанием для изучения результатов диагностирования АЭД, проведённого одновременно методами ВД и ЧР, с целью поиска проявлений возможных дефектов электромагнитной системы АЭД в сигналах, полученных обоими методами одновременно.

II. Постановка задачи

Целью проводимых исследований являлся поиск и анализ случаев обнаружения дефектов электромагнитной системы АЭД в сигналах ВД и ЧР, получаемых одновременно. При этом интерес представляет также определение возможности идентификации указанных дефектов по параметрам ВД и ЧР и взаимосвязь этих параметров.

Для достижения указанной цели были решены следующие задачи:

– проведён анализ сигналов ВД и ЧР, полученных одновременно, в том числе для однотипных АЭД;

– показано соответствие типов дефектов электромагнитной системы АЭД, зафиксированных методами ВД и ЧР.

III. Теория

Дефекты электрической природы, возникающие в АЭД, влекут за собой нарушение симметрии электромагнитных сил. Как правило, это происходит из-за нарушения равенства токов, протекающих по обмоткам или стержням ротора. Нарушение симметрии сил, действующих на вращающийся ротор АЭД, приводит к появлению в спектре вибропараметров составляющих, зависящих от таких параметров, как частота питающей сети, количество пазов статора и стержней ротора, то есть от параметров электромагнитной системы АЭД.

Соответственно, при возникновении дефектов изоляции, например, при ухудшении её свойств или нарушении её целостности, возникают частичные разряды, проявляющиеся как пробой части изоляции, а не всей её толщины. Такой частичный пробой изоляции АЭД может быть зарегистрирован по высокочастотным импульсам напряжения и тока в линии питания АЭД, возникающим в этот момент.

В настоящее время одним из основных методов поиска дефектов, применяемых при вибродиагностировании АЭД, является анализ спектров вибропараметров. При этом полученный спектр вручную или в автоматическом режиме сравнивается с так называемой маской спектра дефекта и по результатам такого сравнения, в случае совпадения, ставится диагноз. Степень опасности дефекта при этом оценивается исходя из количественных значений таких вибропараметров, как виброускорение, виброскорость и виброперемещение.

Аналогично, ЧР обнаруживают себя на амплитудно-фазовых диаграммах распределения (матрицах ЧР) в виде определённых распределений, соответствующих различным типам дефектов. При этом метод ЧР позволяет локализовать место нахождения дефекта по фазе и конструктивной части обмотки.

Рассмотрение базовых принципов диагностирования методами ВД и ЧР выходит за рамки данной статьи. Подробное описание использованных в ходе работ методов ВД приведено в [4, 5], применявшийся метод ЧР описан в [6, 7].

Комбинированное применение методов ВД и ЧР при диагностике АЭД позволяет повысить достоверность и увеличить глубину диагностирования АЭД, что признаётся как отечественными, так и зарубежными специалистами [8].

IV. Результаты экспериментов

В ходе исследований были измерены параметры вибрации и частичных разрядов для различных АЭД с рабочим напряжением 6000 В и мощностью до 800 кВт. В рамках темы данной статьи показательными являются два случая диагностирования одинаковых АЭД типа ВАО2-450LB2 (6000 В, 400 кВт), которые позволили качественно оценить взаимосвязь между параметрами ВД и ЧР в зависимости от величины предполагаемого электрического дефекта для однотипных АЭД.

На рис. 1 показан результат измерения виброускорения на заднем подшипнике АЭД ВАО2-450LB2 №1.

Как видно из показанных спектров, основной вклад в уровень СКЗ сигналов виброускорения вносят гармоники сетевой частоты, которые прослеживаются вплоть до 10-й. Также явно выделяется пазовая гармоника 1893 Гц. Наличие преобладающих гармоник сетевой и пазовой частоты свидетельствует о наличии дефекта электрического характера.

В то же время гармоники высокой частоты, сдвинутые относительно пазовой на ±2 и ±4 fсети, выражены слабо, что позволяет определить предполагаемый дефект как повреждение изоляции обмотки статора.

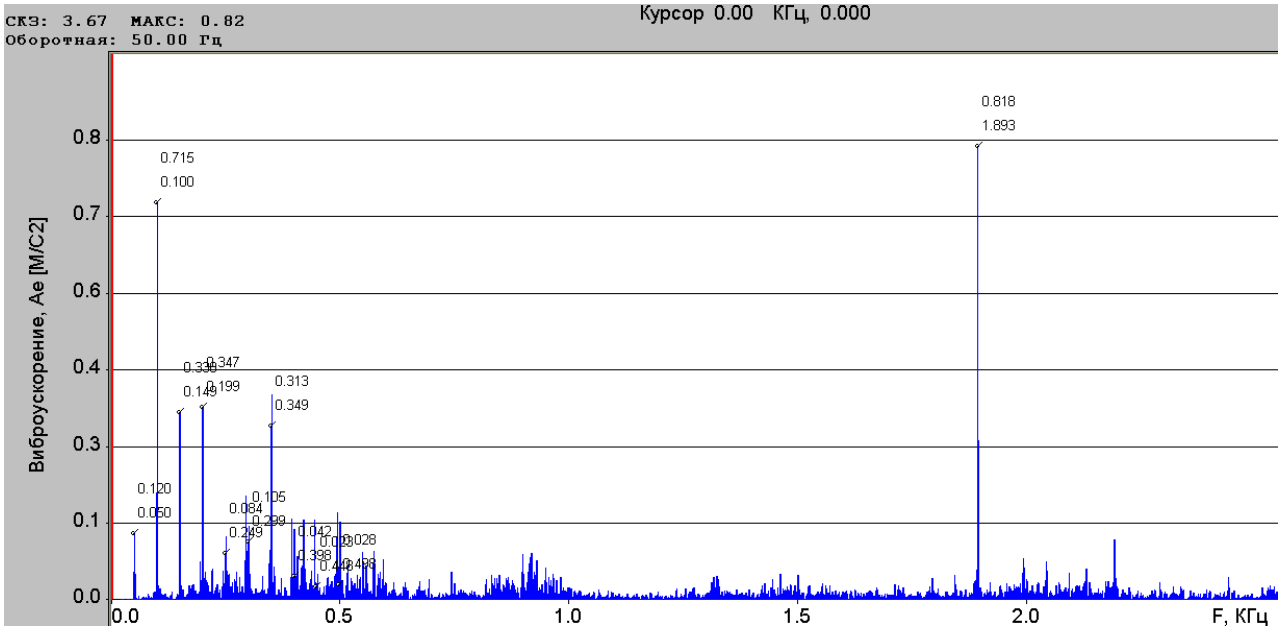

Рис. 1. Спектр виброускорения на заднем подшипнике АЭД ВАО2-450LB2 №1 (6000 В, 400 кВт)

Параметры ЧР в фазе С данного АЭД, показанные на рис. 2, достигали следующих значений: суммарная мощность до 0.1 мВт, амплитуда до 199 мВ, частота повторения импульсов ЧР до 50 имп/с, что соответствует состоянию изоляции «Норма». При этом в ходе испытаний фиксировались всплески амплитуды ЧР до 224 мВ и мощности ЧР до 0.2 мВт, что соответствует состоянию изоляции «Требует принятия мер» по амплитуде ЧР.

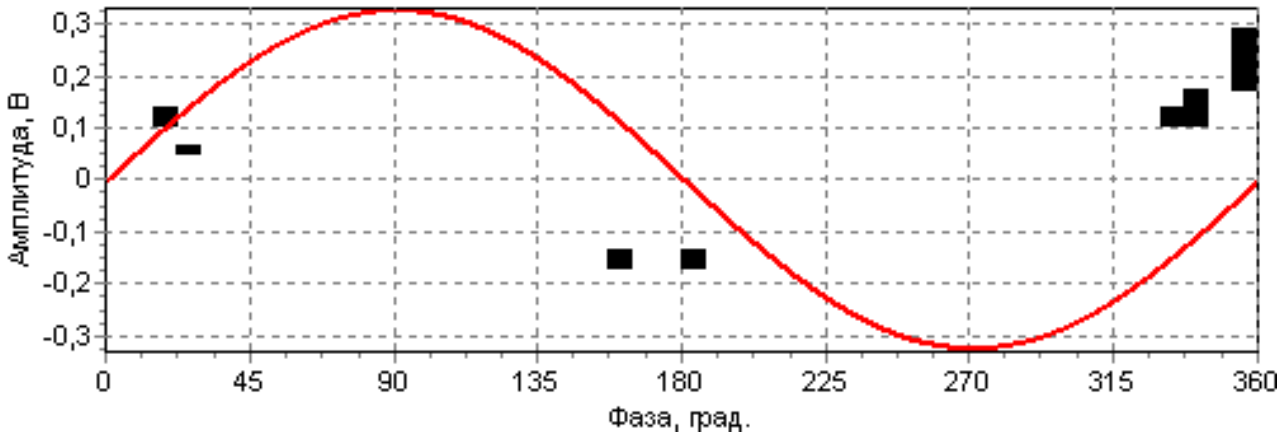

Рис. 2. Матрица ЧР для фазы С обмотки статора АЭД ВАО2-450LB2 №1 (6000 В, 400 кВт)

Матрица ЧР в фазе С соответствует наличию развивающегося дефекта в толще изоляции – расслоению или полости. Степень развития дефекта можно оценить как начальную.

Таким образом, результаты применения обоих методов – ВД и ЧР – показывают возможное наличие незначительного, зарождающегося дефекта электрической системы, при этом метод ЧР позволяет уточнить, что предполагаемый дефект находится в изоляции фазы С обмотки статора.

Представляет интерес сравнение показанных результатов диагностирования АЭД №1 с результатами диагностирования аналогичного АЭД №2. Подробно этот случай описан в [9], краткое описание этого случая приведено ниже.

Так, результаты измерения виброускорения на заднем подшипнике АЭД ВАО2-450LB2 №2 показаны на рис. 3. На показанном спектре видно, что, как и в случае с АЭД №1, основной вклад в уровень СКЗ сигналов виброускорения вносят гармонические составляющие на частотах 50, 100, 300 и 1893 Гц, при этом, как и в предыдущем случае, гармоники высокой частоты, сдвинутые относительно пазовой на ±2 и ±4 fсети, выражены слабо. Такая маска спектра, близкая к рассмотренной в предыдущем случае, также говорит о возможном дефекте электромагнитной системы АЭД, а именно о возможном повреждении изоляции обмотки статора АЭД №2.

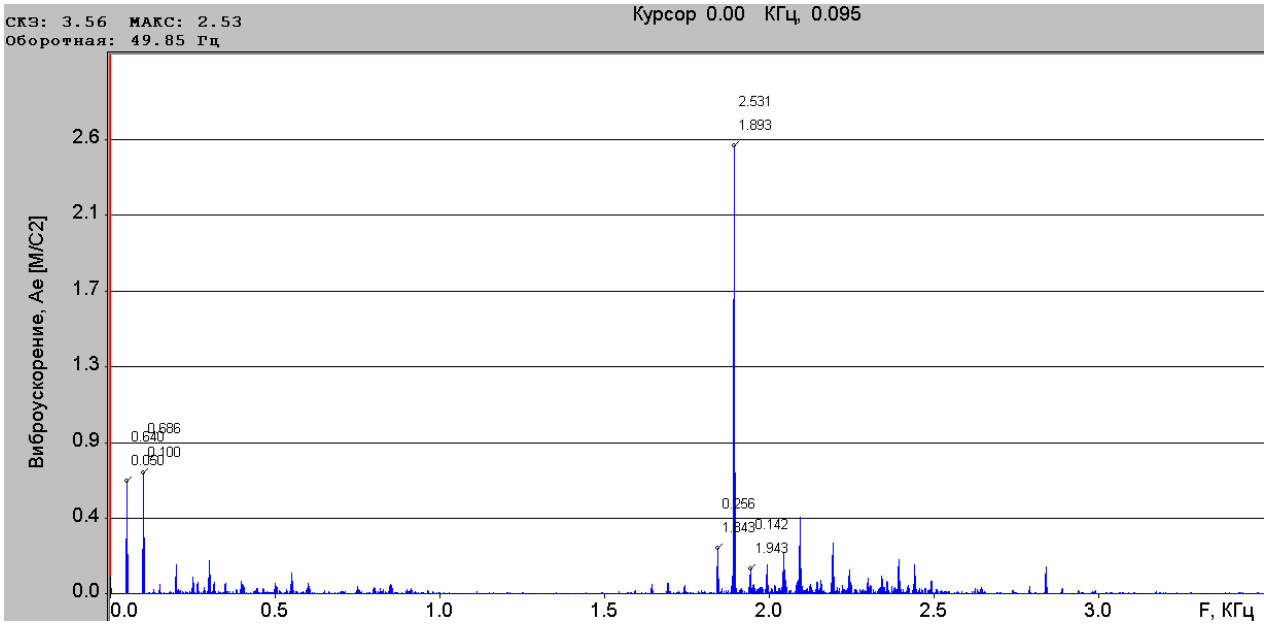

Рис. 3. Спектр виброускорения на подшипнике заднем АЭД ВАО2-450LB2 №2 (6000 В, 400 кВт)

На рис. 4 показана матрица ЧР для фазы А обмоток статора АЭД ВАО2-450LB2 №2. В этом случае суммарная мощность ЧР достигала 8.9 мВт, амплитуда 3631 мВ, а частота повторения импульсов ЧР 1645 имп/с. Исходя из этого состояние изоляции по ЧР оценивалось как «Недопустимо» по частоте повторения и амплитуде ЧР.

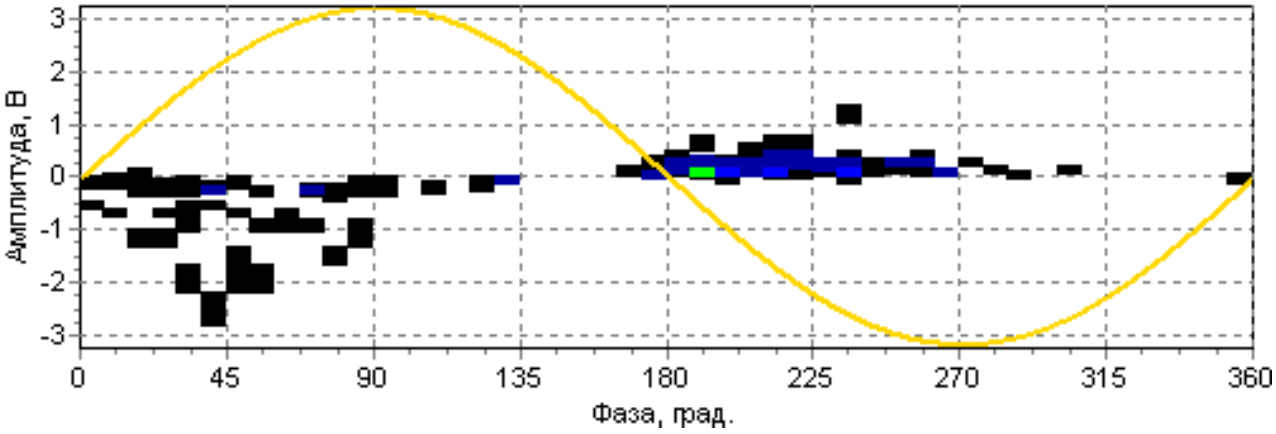

Рис. 4. Матрица ЧР для фазы А статора АЭД ВАО2-450LB2 №2 (6000 В, 400 кВт)

Таким образом, выводы, сделанные по результатам вибродиагностирования АЭД №2, говорят о наличии дефекта изоляции обмотки статора. В то же время показанная матрица ЧР в фазе А с разрядами большой амплитуды и с большой частотой повторения позволяет уточнить расположение и степень опасности этого дефекта – крупное расслоении или полость в изоляции фазы А обмотки статора, что является опасным дефектом.

V. Обсуждение результатов

Показанные в табл. 1 результаты испытаний двух однотипных АЭД подтверждают предположение о возможности комбинированного применения методов ВД и ЧР и схожести диагнозов, поставленных при испытаниях АЭД этими методами одновременно.

Следует отметить выявленную связь величин полученных вибропараметров и параметров ЧР, заключающуюся в их совместном росте при увеличении степени опасности предполагаемого дефекта.

ТАБЛИЦА 1
РЕЗУЛЬТАТЫ КОМБИНИРОВАННОГО ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ВД И ЧР

АЭД	**СКЗ гармоники 1893 Гц, м/с^2**	**Частота повторения импульсов ЧР, имп/с**	**Макс. амплитуда импульсов ЧР, мВ**	**Мощность импульсов ЧР, мВт**	**Предполагаемый дефект изоляции**	
					По методу ВД	**По методу ЧР**
ВАО2 -450LB2 №1	0.818	50	199…224	0.1…0.2	Повреждении изоляции обмотки статора	Зарождающееся расслоение или полость в изоляции обмотки фазы С
ВАО2 -450LB2 №2	2.531	1645	3631	8.9	Повреждении изоляции обмотки статора	Крупное расслоение или полость в изоляции обмотки фазы А

VI. Выводы и заключение

Проведённые исследования позволяют сделать вывод о возможности эффективного комбинированного использования методов ВД и ЧР для обнаружения и идентификация электромагнитных дефектов АЭД.

Важной является показанная возможность локализации дефекта изоляции по фазе обмоток статора, позволяющая упростить процесс поиска дефекта в случае проведения работ по восстановлению технического состояния изоляции.

Накопление статистических данных в ходе дальнейших работ позволит уточнить характеристики выявленной взаимосвязи параметров ВД и ЧР с целью применения их в исследовательских и практических работах по диагностированию АЭД.

Источник финансирования. Благодарности

Работа выполнена сотрудниками Омского научно-производственного центра «Динамика».

Научный руководитель – главный конструктор, научный руководитель НПЦ «Динамика», д-р техн. наук, проф. Костюков Владимир Николаевич.

Авторы благодарят д-ра техн. наук, проф. Науменко Александра Петровича за консультативную помощь в интерпретации экспериментальных данных.

Список литературы

1. Костюков В. Н. Мониторинг безопасности производства. М.: Машиностроение, 2002. 224 с.
2. Сидельников Л. Г., Афанасьев Д. О. Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело, 2013. № 7. С. 127–137.
3. ГОСТ Р 55191-2012. Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов. Введ. 2014-01-01. М: Стандартинформ, 2014. 56 с.
4. Клюев В. Балицкий Ф. Я., Барков А. В., Баркова Н. А. [и др.]. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 7: В 2 кн. Кн. 2: Вибродиагностика. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение, 2006. 829 с.
5. Костюков В. Н., Науменко А. П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин: учеб. пособие. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 360 с.
6. Русов В. А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2011. 368 с.
7. Диагностика изоляции вращающихся машин классов напряжения от 0,4 кВ до 24 кВ по характеристикам частичных разрядов. Методические указания: МУ 1.3.3.99.0036-2009: утв. ОАО «Концерн Росэнергоатом». 2009. 81 с.
8. Renforth L., Giussani R., Foxall M. On-line partial discharge (OLPD) testing and monitoring strategies for oil & gas HV assets // IEEE. PCIC Europe (will be assigned). 9 p.
9. Бурда Е. А., Костюков А. В., Бойченко С. Н., Щелканов А. В. Диагностирование состояния изоляции статоров асинхронных электродвигателей методом частичных разрядов // Динамика систем, механизмов и машин, 2016. № 1.Т. 3. С. 53–61.

**РОССИЯ МОЛОДАЯ:
ПЕРЕДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ –
В ПРОМЫШЛЕННОСТЬ**

Выходит два номера в год

№ 1, 2017

Учредитель
Омский государственный
технический университет

Главный редактор
А. В. Косых,
ректор ОмГТУ

Редакционная коллегия:
Е. А. Андреева, доктор технических наук
А. В. Бубнов, доктор технических наук
А. В. Зыкина, доктор физ.-мат. наук
И. А. Кировская, доктор химических наук
А. Г. Козлов, доктор технических наук
В. И. Левченко, доктор технических наук
А. П. Моргунов, доктор технических наук
В. С. Сердюк, доктор технических наук
А. Г. Янишевская, доктор технических наук

Ответственный секретарь
О. И. Бабенко, начальник ИПО ОмГТУ

Корректор
Т. П. Семина

Язык публикаций
русский

Дата и номер договора о включении
рецензируемого научного издания в систему
Российского индекса научного цитирования:
705-11/2013 от 20.11.2013 г.

Адрес в РИНЦ:
http://elibrary.ru/title_about.asp?id=41264

Адрес редакции:
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, каб. 203
Контактный телефон:
8 (381-2) 65-35-36
e-mail: fap_omsk@omgtu.ru
Телефон для рекламодателей: 65-35-36

© ОмГТУ, 2017

Подписано в печать 07.04.2017.
Формат 60×84 1/8. Усл. печ. л. 45,5.
Бумага офсетная.

Отпечатано на дупликаторе
в типографии ОмГТУ.
644050, г. Омск, пр. Мира, 11; т. 23-02-12.

Тираж 500 экз. Заказ 343.

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение

В.А. Адонин, С.А. Корнеев, В.С. Корнеев, И.А. Пеньков
Экспериментальный стенд для исследования нагрузочных характеристик пневматических упругих элементов 5

С.А. Бородихин, А.С. Лосев, Е.Н. Еремин
Влияние защитной атмосферы на структуру и свойства наплавленного высокохромистого металла 8

Ю.А. Бурьян, М.В. Силков, А.А. Иванов
Виброизоляционная опора с использованием эффекта квазинулевой жесткости 11

Б.П. Гриценко, Д.С. Реченко, Е.А. Рогачев
Исследование адгезионных показателей обработанных поверхностей твердосплавной пластины 15

Д.Я. Дудьев, С.В. Скачков, К.Е. Лежнин, В.И. Трушляков
Особенности наземных испытаний малоразмерных газотурбинных двигателей для беспилотных летательных аппаратов 21

Н.В. Захаренков
Анализ работоспособности резьбового соединения механизма регулировки в конструкции подшипника скольжения 24

А.В. Костюков, С.Н. Бойченко, А.В. Щелканов, Е.А. Бурда
Комбинирование методов вибродиагностики и частичных разрядов при диагностировании асинхронных электродвигателей 28

В.Н. Костюков, А.В. Зайцев, А.О. Тетерин, В.В. Басакин
Исследование законов распределения параметров вибрации, возникающей в роторных агрегатах в процессе эксплуатации 33

В.И. Крупников, В.В. Шалай
Деформационные свойства смеси «Песчаный грунт–гранулированный пенополистирол» 36

В.И. Крупников, В.В. Шалай
Моделирование закрытой неизолированной системы «Сжиженный природный газ–природный газ» 41

А.С. Перин, Д.В. Ситников
Расчет параметров системы управления квадрокоптера 48

А.В. Тигнибидин, Д.В. Тигнибидин, О.П. Пастухова, Ю.М. Афанасьев, П.Н. Марталлер
Способ проведения высокоточных измерений на координатно-измерительных машинах с применением низкоточного поворотного стола 53

А.В. Тигнибидин, С.В. Такаюк, Д.А.Шабанов, Д.В. Тигнибидин, Ю.М. Афанасьев, П.Н. Марталлер
Разработка универсального мобильного ручного прибора для координатных измерений геометрических характеристик деталей 56

А.А. Федоров, А.И. Блесман, Д.А. Полонянкин, Н.В. Бобков, Н.В. Скрипицина
Влияние режимов проволочно-вырезной электроэрозионной обработки на морфологию и шероховатость поверхности титанового сплава ВТ3–1 62

Р.Е. Хорошун, С.Б. Скобелев
Теоретические исследования возможности применения технологии ударно-акустической обработки для повышения износостойкости деталей из титана 67

И.К. Черных, Е.Н. Матузко, Е.В. Васильев, Е.В. Кривонос
Исследование влияния технологических факторов на качество шва, полученного сваркой трением с перемешиванием 70