

Проект направлен на разработку и исследование виброизолирующих и шумоподавляющих систем на основе управляемых гидравлических опор и муфт с новыми магниточувствительными упруговязкими материалами, использования методов направленного акустического воздействия в целях обеспечения устойчивой безаварийной работы объектов машиностроения и приборостроения, сохранения ресурса объектов защиты и безопасности персонала в изменяющихся условиях эксплуатации и внешней среды.

Исследованы многодвигательные объекты транспорта и технологических производственных установок методами волновой динамики в целях изучения распространения упруго-пластичных, изгибных, продольных, крутильных и акустических волн по элементам конструкций машин и электромеханических комплексов.

Проведено экспериментальное исследование взаимодействия акустических и вибрационных возмущений колебательной системы. В ходе экспериментального исследования взаимодействия акустических и вибрационных возмущений колебательной системы было установлено, что при взаимодействии акустических полей с более мощными вибрационными полями, последние практически не изменяются. Установлено, что среднее увеличение времени переходного процесса при пуске, торможении, изменении скорости электродвигателя составляет 10-25%, потребляемая мощность при этом увеличивалась в 1,5 – 2,5 раза, а температура двигателя – 100 – 150 °С.

Разработана конечно-элементная модель магнитореологического трансформатора, включающего в себя электромагнит с сердечником, дроссельные каналы, заполненные магнитореологической жидкостью. Модель позволяет определить пространственное распределение магнитной индукции в элементах магнитореологического трансформатора при той или иной его конфигурации, исследовать распределения реологических и магнитореологических параметров в канале с магнитореологической жидкостью.

Исследованы методики синтеза магнитоуправляемых вязкоупругих материалов. Синтез магнитоуправляемых вязкоупругих материалов осуществлялся путем последовательного смешения компонентов: диэтилбензолов - ди-(2-этилгексильный) эфир адипиновой кислоты - олеиновая кислота - железо, что обеспечивает низкую седиментации и свободное движение частиц для получения значительного увеличения вязкости при воздействии магнитного поля.

Проведены испытания виброизолятора с магнитореологическим трансформатором при статической нагрузке и динамических возмущениях на универсальной испытательной машине фирмы TiniusOlsenLtd, модель H100KU. Линейный участок был определен при разных значениях напряжённости управляющего магнитного поля. Относительное демпфирование виброизолятора при токе 100 мА составило 7,0 дБ.

Разработан метод аналитического конструирования элементов систем вибро- и шумозащиты на основании структурной и имитационной моделей.

Разработан адаптивный алгоритм управления виброзащитными системами неоднородных объектов, обеспечивающих заданные структуры и параметры передаточных функций виброизоляторов. На основании этого разработан цифровой алгоритм линейного изменения коэффициента демпфирования во времени при пусках отдельных электроприводов, что позволяет избежать «пробоя» и разрушения виброизолятора при повышенных амплитудах возмущающих виброускорений.

Разработан состав вязкоупругого магнитоуправляемый материала на основе акриловой смолы, высокодисперсных магнитных частиц (порошковое железо, его магнитный оксид или феррит, порошковый никель, кобальт), пластификатора (алкилфталат). Разработан лабораторный регламент синтеза магнитоуправляемых вязкоупругих материалов

Разработана лабораторная установка позволяющая измерить основные свойства и характеристики магнитоуправляемых материалов: предел текучести, пластическую вязкость, кривые течения, магнитореологическую характеристику и кривую намагничивания, по которым определяется модули упругости без и при воздействии магнитного поля.

Разработаны полупроводниковые преобразователи, создающие необходимый режим намагничивания возбуждающих электромагнитов. В целях исключения седиментации при работе виброзащитных опор разработан вариант с коаксиальным дроссельным зазором магнитореологического трансформатора и трёхфазным индуктором.

Исследованы процессы преобразования кластеров в магнитоуправляемых вязкоупругих материалах при действии переменных электромагнитных полей. Получено выражение для определения критерия магнитогидродинамического взаимодействия. Получены аналитические выражения и синтезированы электрические схемы устройств, формирующих магнитное поле заданного спектра. Для демпферных каналов плоского сечения определены скорости течения жидкости в постоянном магнитном поле при разных частотах вибровозмущений.

Разработана программа для ЭВМ «Программа для определения динамической жесткости упругой обечайки гидроопоры».

Разработаны методы управления акустическим полями посредством акустических активных компенсаторов, реализованных в составе полупроводниковых преобразователей электромеханических комплексов.

В целях снижения магнитных вибраций и шумов электрических машин авторами предложен и реализован метод управления спектром магнитного поля в воздушном зазоре двигателей или генераторов. Результаты, полученные в ходе конечно-элементного мультифизического моделирования, позволили исследовать магнитные поля в электрической

машине, звуковое давление, излучаемое двигателем, формы колебаний и деформаций твердотельной модели магнитопровода статора. Согласно результатам исследования предложенный способ позволяет уменьшить вибровозмущающую силу до 11% за счет подавления высших гармоник этой силы на 50-70%.

Проведено исследование конструкций основных типов металлорежущих станков и разработана расчётная физическая модель вязкоупругой системы станка для определения действующих сил, перемещений подвижных узлов и основных источников вибрации.

Проведена серия экспериментов по измерению виброускорений лазерным виброметром VECTOR HF с последующей разработкой математической модели передачи вибрации по элементам металлорежущего станка. В результате синтезированы корректирующие математические модели виброзащитных устройств.

Методами имитационного моделирования проведен многофакторный вычислительный эксперимент. Анализ полученных результатов, показывает, например, что увеличение жесткости соединения «консоль-станина» на 30% приводит к уменьшению амплитуды автоколебаний на 11%. Уменьшение жесткости соединения «салазки-консоль» приводит к уменьшению амплитуды на 33%. Увеличение демпфирования в соединениях «консоль-станина» и «салазки-консоль» приводит к уменьшению амплитуды автоколебаний на 18% и 33% соответственно.

Разработан комплексный лабораторный образец системы вибро- и шумозащиты, состоящей из управляемых виброизоляторов, виброизолирующих муфт с магнитореологическими трансформаторами и магнитоакустических активных компенсаторов.

Разработана программа для ЭВМ, предназначенная для оценки демпфирующих свойств соединительной муфты, использующейся для снижения переменных торсионных крутящих моментов вращающихся валов в стационарных режимах работы.

Произведена оценка метода активного снижения магнитных шумов, возникающих в статорах электрических машин, путем введения активного корректирующего устройства, позволяющего с помощью ШИМ-инвертора формировать дополнительный компенсационный ток электродвигателя для снижения гармоник магнитного поля.

Статьи

1. Erofeev V.I. A centrifugal pendulum tuned mass damper for rotor systems / Erofeev V.I., Mal'khanov A.O., Panovko G.Y., Sandalov V.M. // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2021. Т. 50. № 8. С. 671-678.

2. Gordeev B.A. Influence of Working Fluid in the Throttle Channels of Hydraulic Mounts on the Damping Properties / Gordeev B.A., Okhulkov S.N., Ivanov E.G., Osmekhin A.N., Titov D.Y.,

Plekhov A.S. // Russian Engineering Research, 2022, 42 (5), pp. 435-446. DOI: 10.3103/S1068798X22050112

3. Гордеев Б.А. Влияние температуры магнитореологической жидкости на демпфирование вибровозмущений гидравлическими опорами / Гордеев Б.А., Ермолаев А.И., Охулков С.Н., Плехов А.С., Титов Д.Ю. // Вестник машиностроения (2023 г.) В печати

4. Охулков С.Н. Calculation of the dynamic stiffness coefficient of the magnetorheological mount / Охулков С.Н., Ермолаев А.И., Титов Д.Ю. // AIP Conference proceedings (2023 г.) В печати

5. A. Ermolaev, Measuring of rotating shafts angular deformation by means of ultrasonic vibration meter / A. Ermolaev, B. Gordeev, S. Okhulkov, G. Panovko, and A. Plekhov // Journal of Measurements in Engineering, Vol. 11, No. 1, Dec. 2022, <https://doi.org/10.21595/jme.2022.22919>

6. Ermolaev A. The study of electric drive mutual influence in the multi-motor machines / Ermolaev A., Plekhov A., Titov D. // 2020 11th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2020 – Proceedings, 4 October 2020, Номер статьи 9249361. DOI: 10.1109/ICEPDS47235.2020.9249361

7. Ermolaev A.I. Thixotropic magnetorheological fluid for controlled vibration mounts / Ermolaev A.I., Gordeev B.A., Titov D.Yu., Titov E.Yu. // Materials Science Forum, 2021.

8. Гордеев Б.А. Влияние параметров внешнего магнитного поля и конфигурации дроссельных каналов на чувствительность магнитоуправляемых вязкоупругих материалов / Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Ермолаев А.И. // Вестник машиностроения. 2022. № 3. С. 10-17.

9. Ванягин А.В. Построение амплитудно-частотных характеристик магнитоуправляемой гидроопоры с учетом присоединенной массы, зависящей от температуры / Ванягин А.В., Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Титов Д.Ю., Плехов А.С. // Вестник машиностроения. 2020. № 9. С. 47-56.

10. Гордеев Б.А. Условия применимости линейных моделей, описывающих распространение акустических волн / Гордеев Б.А., Ерофеев В.И., Охулков С.Н., Плехов А.С., Ванягин А.В. // Вестник машиностроения. 2021. № 6. С. 18-20.

11. Ermolaev A. Active reduction of magnetic noise occurring in the stators of an induction motors / Ermolaev, A., Erofeev, V., Plekhov, A., Titov, D. // (2021) Vibroengineering Procedia, 38, pp. 172-178. DOI: 10.21595/vp.2021.22078

12. Daryenkov A. Hydromount elastic shell dynamic stiffness calculation using finite difference method / Daryenkov, A., Gordeev, B., Okhulkov, S., Ermolaev, A., Chernov, E. // (2021) *Vibroengineering Procedia*, 39, pp. 157-163. DOI: 10.21595/vp.2021.22286

13. Gordeev B. Vibration-based diagnostics of electrical engineering complexes motors over 40 kW / Gordeev, B., Okhulkov, S., Osmekhin, A., Ermolaev, A., Chernov, E. // (2021) *Vibroengineering Procedia*, 39, pp. 30-35. DOI: 10.21595/vp.2021.22287

14. Гордеев Б.А. Измерение угловой деформации вращающихся валов ультразвуковым измерителем вибрации / Гордеев Б.А., Ермолаев А.И., Охулков С.Н., Плехов А.С., Степанов К.С. // В сборнике: Актуальные проблемы электроэнергетики. Сборник научно-технических статей. Нижний Новгород, 2022. С. 87-97.

15. Гордеев Б.А. Стенд для испытаний управляемых магнитореологических муфт / Гордеев Б.А., Ермолаев А.И., Плехов А.С., Титов Д.Ю. // В сборнике: Актуальные проблемы электроэнергетики. Сборник научно-технических статей. Нижний Новгород, 2022. С. 98-102.

16. Ермолаев А.И. Разработка способа снижения магнитных вибраций статоров асинхронных электродвигателей / Ермолаев А.И., Ерофеев В.И., Плехов А.С. // В сборнике: Актуальные проблемы электроэнергетики. Сборник научно-технических статей конференции. Нижний Новгород, 2021. С. 95-105.

17. Ермолаев А.И. Способ снижения магнитного шума и вибрации статоров асинхронных электродвигателей / Ермолаев А.И., Ерофеев В.И., Плехов А.С. // *Машиностроение и инженерное образование*. 2020. № 4 (65). С. 3-13.

18. Ermolaev A.I. Calculation of a Magnetorheological Damper for Protection of Towers and Fittings of Overhead Power Lines / Ermolaev A.I., Plekhov A.S., Panovko G.Ya, Tishin I.V. // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2022, vol. 51, suppl. 1, pp. s100-s107 <https://doi.org/10.3103/S105261882209004>.

19. Ванягин А.В. Взаимодействие акустических волн с движущимися границами раздела сред / Ванягин А.В., Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Титов Д.Ю. // *Вестник машиностроения*. 2021. № 5. С. 58-60.

20. Ермолаев А.И. Исследование магнитной вибрации асинхронного электродвигателя посредством МКЭ-моделирования / Ермолаев А.И., Ерофеев В.И., Плехов А.С., Титов Д.Ю. // *Интеллектуальная электротехника*. 2021. № 3 (15). С. 37-56.

Результаты интеллектуальной деятельности

1. Программа для параметрической оптимизации магнитореологического трансформатора / Ермолаев А.И., Плехов А.С., Титов Д.Ю. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021610222, 12.01.2021. Заявка № 2020666693 от 17.12.2020.

2. Способ активного гашения магнитного шума электродвигателя и устройство для его осуществления / Ермолаев А.И., Ерофеев В.И., Плехов А.С., Титов Д.Ю. // Патент на изобретение 2769972 С1, 12.04.2022. Заявка № 2021130003 от 14.10.2021.

3. Программа для оценки демпфирующих свойств соединительной муфты / Ермолаев А.И., Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Титов Д.Ю. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022681038, 09.11.2022. Заявка № 2022680454 от 02.11.2022.

4. Способ настройки оптимального режима работы электродвигателей / Гордеев Б.А., Ерофеев В.И., Ермолаев А.И., Плехов А.С., Степанов К.С., Охулков С.Н., Ванягин А.В. // Подана заявка.

5. Способ настройки оптимального режима работы механизмов путем снижения вибраций и устройство для его осуществления / Гордеев Б.А., Ермолаев А.И., Плехов А.С., Степанов С.К., Охулков С.Н. // Подана заявка.

6. Способ измерения угла закрутки эластичной муфты, соединяющей два вала / Ванягин А.В., Гордеев Б.А., Ерофеев В.И., Охулков С.Н., Плехов А.С., Степанов К.С. // Подана заявка.

7. Способ ультразвукового измерения эксцентриситета вала / Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Степанов К.С., Плехов А.С. // Подана заявка.