

На правах рукописи

ГУМЕРОВА Марина Булатовна

**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ДЕМПФИРУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ
С ДВОЙНЫМ ПОЛЫМ РОТОРОМ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АМОРТИЗАТОРАМИ**

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2011

Работа выполнена на кафедре электромеханики ФГБОУ ВПО
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Исмагилов Флюр Рашитович
кафедра электромеханики Уфимского
государственного авиационного технического
университета

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ураксеев Марат Абдуллович
кафедра информационно-измерительной
техники Уфимского государственного
авиационного технического университета

доктор технических наук, профессор
Каяшев Александр Игнатьевич
кафедра автоматизированных технологий и
информационных систем Уфимского государ-
ственного нефтяного технического
университета, ф-л в г. Стерлитамак

Ведущая организация: ФГУП «Уфимское агрегатное
производственное объединение»

Защита состоится «24» июня 2011 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д212.288.02 Уфимского государственного авиационного технического университета по адресу: 450000, г. Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12, актовый зал 1-го корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного авиационного технического университета

Автореферат разослан «23» мая 2011.

Ученый секретарь диссертационного совета
д-р техн. наук, доцент

Фетисов В.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время особое значение приобретает исследование вопросов, связанных с управлением колебательными процессами и их демпфированием. Это обусловлено, с одной стороны, созданием новых видов транспорта, станков и механизмов, отличающихся большими мощностями и скоростью движения, а с другой стороны – ужесточающимися требованиями к элементам, выполняющим роль исполнительных механизмов в системах управления и автоматики.

Наиболее полно этим требованиям отвечают электродинамические демпфирующие элементы (ЭДЭ) систем управления и автоматики. Они характеризуются большими величинами демпфирующих сил, малым моментом инерции ротора, долговечностью и бесшумностью работы, обусловленной отсутствием трущихся частей, надежностью, технологичностью и простотой конструкции. Поэтому в настоящее время ЭДЭ нашли применение практически во всех отраслях промышленности: в наземном транспорте в качестве электродинамических тормозов; в испытательных стендах, в качестве нагрузочных машин или датчиков момента, угловой скорости или ускорения; в регулируемых электроприводах; в системах управления амортизаторами стыковочных механизмов.

ЭДЭ предназначены для поглощения и рассеяния энергии движущихся объектов, работа демпфирующего элемента сопровождается нагревом. Поэтому вопрос увеличения удельной энергоёмкости ЭДЭ, а также улучшение условий охлаждения является актуальным.

В диссертации проведен обзор работ посвященных исследованию электродинамических демпфирующих преобразователей энергии. В результате была предложена конструкция ЭДЭ, особенность которой заключается в наличии двойного полого ротора, что позволяет увеличить суммарную площадь рабочей поверхности и объем активной зоны, а, следовательно, улучшить условия охлаждения, повысить удельную энергоёмкость устройства, при соблюдении требования минимальной массы и габаритов. Однако, вопросы теории и расчета таких демпфирующих элементов до настоящего времени не рассмотрены, что не позволяет в полной мере оценить преимущества такого исполнения вторичной среды.

Электромеханическое демпфирование в амортизационной системе имеет динамический характер и в силу этого особенно актуально исследование переходных процессов в ЭДЭ. Ранее при изучении ЭДЭ принималось допущение об известном характере изменения скорости движения ротора. Однако, ЭДЭ оказывает влияние на скорость движения ротора, уменьшая ее, поэтому при исследовании динамических режимов работы необходимо совместное решение уравнений магнитного поля и движения проводящей среды.

Основание для выполнения работы. Работа выполнена в рамках проекта «Исследование процессов энергопреобразования в электромеханических колебательных системах с распределенной вторичной средой» аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)» Министерства образования и науки РФ.

Цель работы и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка и исследование электродинамического демпфирующего элемента с двойным полым ротором (ЭДЭ ДПР) системы управления амортизаторами, обладающего повышенной удельной энергоемкостью.

Для реализации указанной цели решены следующие **основные задачи:**

1. Разработка математической модели, позволяющей исследовать установившийся режим работы ЭДЭ ДПР.
2. Исследование механических характеристик ЭДЭ ДПР с помощью разработанной математической модели.
3. Разработка математической модели динамических режимов ЭДЭ ДПР, позволяющей проводить совместное исследование электромагнитных и электромеханических переходных процессов во вторичной среде.
4. Исследование выходных характеристик ЭДЭ ДПР при свободных колебаниях вторичного элемента, а также при колебаниях, вызванных внешней силой, постоянной во времени и изменяющейся по периодическому закону.
5. Проведение экспериментальных исследований опытного образца ЭДЭ ДПР, позволяющих подтвердить адекватность разработанной математической модели.

Методы исследований. Теоретические исследования проведены с помощью положений теории электромагнитного поля с использованием принципа суперпозиции. Для получения выходных характеристик ЭДЭ ДПР в динамическом режиме использованы методы численного моделирования в программном комплексе Maple, для выполнения и документирования инженерных и научных расчетов – MathCad.

На защиту выносятся:

1. Разработанная математическая модель ЭДЭ ДПР в установившемся режиме работы.
2. Разработанная математическая модель динамических режимов работы ЭДЭ ДПР.
3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований ЭДЭ ДПР в установившемся режиме.
4. Результаты моделирования переходных процессов в ЭДЭ ДПР.

Научная новизна:

1. Предложена и обоснована новая математическая модель установившихся режимов ЭДЭ ДПР, входящего в состав системы управления амортизатором с учетом поперечного краевого эффекта. Новизна программной реализации основных положений подтверждена свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2010612800, 2010615111.
2. Предложена и обоснована новая математическая модель динамических режимов работы ЭДЭ ДПР, основанная на совместном решении уравнений магнитного поля и движения вторичной проводящей среды, что позволяет анализировать влияние параметров ЭДЭ на величину момента и скорости, находить значение скорости в переходном и установившемся режимах, величину

ударных моментов, определять длительность переходного процесса, таким образом повысить эффективность работы, увеличить срок службы ЭДЭ.

Практическая значимость. Результаты работы позволяют создавать новый класс демпфирующих элементов с повышенной удельной энергоемкостью для управляемых амортизаторов в устройствах для аварийной посадки самолетов при отказе шасси (патент на изобретение № 2272756), а так же в устройствах для стыковки самолетов в воздухе (патент на изобретение № 2312043). Полученные математические модели существенно упрощают процесс разработки ЭДЭ с требуемыми выходными характеристиками.

Достоверность научных положений, выводов и результатов работы, корректность принятых допущений подтверждена экспериментальными исследованиями опытного образца ЭДЭ ДПР, а также совпадением предложенных математических моделей в частных случаях с результатами исследований, известных ранее.

Реализация результатов работы. Результаты исследований, представленные в диссертационной работе, использованы при разработке новых элементов систем управления в ОАО УЗ «Электроаппарат», а также внедрены в учебный процесс, используются при курсовом и дипломном проектировании.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских, республиканских научно-технических конференциях, в том числе:

- Пятнадцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» г. Москва, МЭИ, 2009 г.

- Конференция молодых ученых и инноваторов «Инно-Каспий». г. Астрахань 2009 г.

- Всероссийская молодежная научная конференция «Мавлютовские чтения». Уфа, 2009 г.

- Четвертая всероссийская зимняя школа-семинар аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники». Уфа, 2009 г.

- II Всероссийская научно-техническая конференция «Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий». Уфа, УГНТУ, 2009 г.

- Шестнадцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Москва, МЭИ, 2010 г.

- Пятая Всероссийская зимняя школа-семинар аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники». Уфа, УГАТУ. 2010 г.

- Международная молодежная научная конференция «XXXVI Гагаринские чтения». Москва, 6-10 апреля 2010.

- Международная научная конференция «Инновационные технологии в управлении, образовании, промышленности «АСТИНТЕХ-2010»». Астрахань, 11-14 мая 2010 г.

- VI-я Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения». Казань, 27 – 29 апреля 2011 г.

Публикации. Список публикаций автора по теме диссертации включает 21 научный труд, в том числе 2 публикации в изданиях перечня ВАК, 3 патента РФ на изобретение, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. Четыре публикации выполнены без соавторов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, приложений. Работа содержит 143 страницы машинописного текста и 152 наименований библиографических источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, приведены основные положения и результаты, выносимые на защиту, отмечена их новизна и практическая значимость. Приведены сведения о внедрении результатов, апробации работы и публикациях.

В первой главе проведен анализ работ, посвященных теоретическому исследованию рассматриваемых элементов, существующих конструктивных схем и новых направлений развития электродинамических демпфирующих элементов (ЭДЭ), рассмотрены области применения ЭДЭ и основные требования, предъявляемые к ним как элементам амортизационных систем.

Из анализа научно-технической литературы сделан вывод о том, что ЭДЭ находят широкое применение во многих отраслях промышленности, т.к. обладают рядом преимуществ по сравнению с применяемыми в настоящее время гидравлическими и фрикционными демпфирующими устройствами.

Из анализа существующих конструктивных схем демпфирующих элементов и на основании требований, поставленных для решения конкретной задачи, была выбрана оптимальная конструкция ЭДЭ с двойным полым ротором. Данная конструкция позволяет получить максимальный тормозной момент, улучшить условия охлаждения и повысить удельную энергоемкость устройства за счет увеличения площади поверхности и объема активной зоны ротора.

Электромагнитные процессы в ЭДЭ в общем случае схожи с процессами в таких электромеханических преобразователях, как двухроторные машины, многослойные электромагнитные модели, асинхронные машины с полым ротором, индукционные магнетогидродинамические машины, а также в тонких оболочках и пластинах, перемещающихся относительно магнитного поля. Поэтому в работе представлен обзор наиболее интересных теоретических работ и в этих областях. Однако, предложенные в них математические модели не могут непосредственно быть применены к анализу демпфирующих элементов с двойным полым ротором в силу конструктивных особенностей последних.

Установлено, что исследование электромагнитных и электромеханических переходных процессов в ЭДЭ ДПР на основе совместного решения уравнения магнитного поля и уравнения движения вторичной среды до настоящего времени не проводилось.

На основании проведенного обзора были определены цели и задачи работы.

Во второй главе получена математическая модель электромагнитных процессов в воздушном зазоре ЭДЭ ДПР. На основе полученной математической модели исследованы распределение магнитного поля, вихревые токи в роторе, а также механические характеристики ЭДЭ ДПР в установившемся режиме.

Двойной полый ротор представляет собой два полых коаксиально расположенных цилиндра из немагнитного проводящего материала, имеющих общее дно. Таким образом, возникает две зоны: I зона связана с внешним цилиндром, II – с внутренним (рис.1).

Электромагнитные явления в роторе ЭДЭ и в зазорах описываются системой уравнений Максвелла для медленно движущихся сред. Для упрощения расчетных выражений используются следующие допущения:

1. Обе зоны пронизаны единым магнитным потоком, который задан основной гармоникой первичного магнитного поля в воздушных зазорах.
2. Первичное магнитное поле вне индуктора отсутствует.
3. Магнитная проницаемость материала ротора равна магнитной проницаемости вакуума μ_0 , а стали магнитопровода $\mu_{ст} = \infty$.

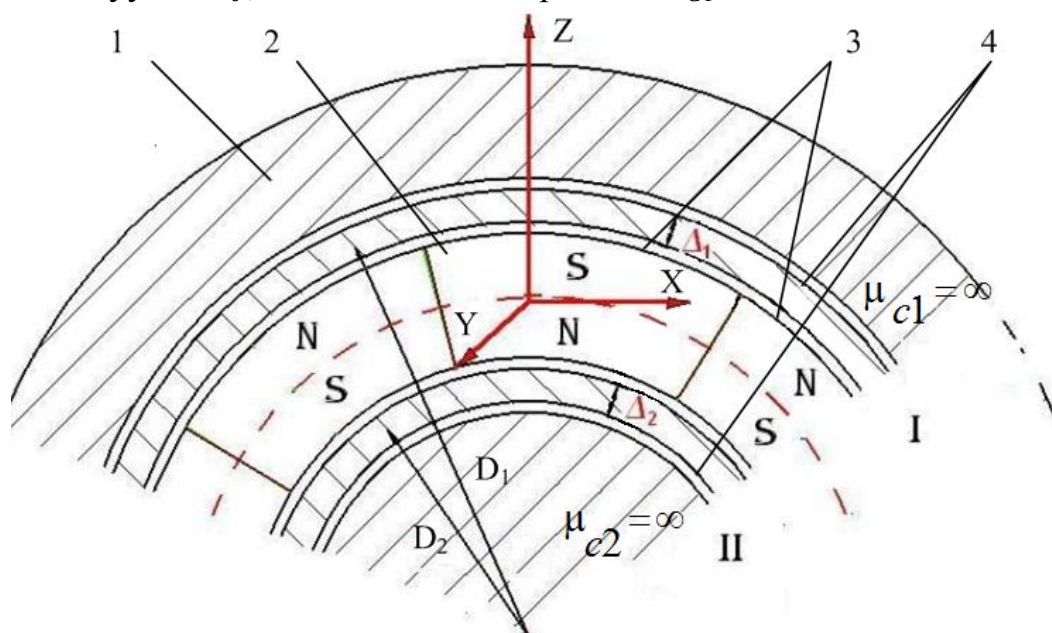


Рисунок 1 – Электродинамический демпфирующий элемент с двойным полым ротором: 1 – магнитопровод; 2 – индуктор в виде полого цилиндра; 3 – постоянные магниты; 4 – электропроводящий двойной полый ротор

В системе координат, связанной с индуктором, в установившемся режиме $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$, где $\vec{B}$ - вектор индукции результирующего магнитного поля. Скорость имеет одну составляющую по оси x (рис. 1).

С учетом этих допущений в работе были получены следующие уравнения для напряженностей магнитного поля вихревых токов в неподвижной системе координат:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \dot{H}_{1m}}{\partial y^2} - \alpha_1^2 (1 - j\varepsilon_1) \dot{H}_{1m} + j\varepsilon_1 \alpha_1^2 \frac{1}{\bar{K}_d K_\tau} \cdot \dot{H}_{2m} &= -j\alpha_1^2 \varepsilon_1 \frac{H_{0m}}{K_{d1}}; \\ \frac{\partial^2 \dot{H}_{2m}}{\partial y^2} - \alpha_2^2 (1 - j\varepsilon_2) \dot{H}_{2m} + j\varepsilon_2 \alpha_2^2 \cdot \bar{K}_d K_\tau \cdot \dot{H}_{1m} &= -j\alpha_2^2 \varepsilon_2 K_\tau \frac{H_{0m}}{K_{d2}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\dot{H}_{m1}$, $\dot{H}_{m2}$ – амплитуды напряженностей вторичных магнитных полей внешнего и внутреннего цилиндров соответственно; H_{0m} – амплитуда напряженности первичного магнитного поля для I зоны; $\alpha_1 = \frac{\pi}{\tau_1}$; $\alpha_2 = \frac{\pi}{\tau_2}$; $\tau_1 = \frac{\pi D_1}{2p}$, $\tau_2 = \frac{\pi D_2}{2p}$ – полюсные деления для первой и второй зон соответственно; D_1 , D_2 – средние диаметры внешнего (первого) и внутреннего (второго) цилиндров соответственно; p – число пар полюсов;

$$K_\tau = \frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{D_1}{D_2}; \quad (2)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1 \mu_0 \omega}{\alpha_1^2} K_{d1}; \quad \varepsilon_2 = \frac{\sigma_2 \mu_0 \omega}{\alpha_2^2} K_{d2}; \quad (3)$$

- магнитные числа Рейнольдса или безразмерные частоты, характеризующие интенсивность электромагнитных процессов во вторичной электропроводящей среде; $\omega = \alpha_1 V_1 = \alpha_2 V_2$ – угловая скорость вращения ротора. V_1 – линейная скорость вращения первого цилиндра; V_2 – линейная скорость вращения второго цилиндра; σ_1 , σ_2 – электрическая проводимость цилиндров I, II;

$K_{d1} = \frac{\Delta_1}{\gamma_\Sigma \left(1 + \frac{l_M}{\mu_M \gamma_\Sigma}\right)}$, $K_{d2} = \frac{\Delta_2 \cdot K_\tau}{\gamma_\Sigma \left(1 + \frac{l_M \cdot K_\tau}{\mu_M \gamma_\Sigma}\right)}$ – коэффициенты, учитывающие реальные

конструктивные особенности зазоров; Δ_1 , Δ_2 – толщины внешнего и внутреннего цилиндров ротора соответственно; $\gamma_\Sigma = \gamma_1 + \gamma_2 K_\tau$; γ_1 , γ_2 – величины воздушных зазоров в первой и второй зоне соответственно; l_M – толщина индуктора; μ_M – магнитная проницаемость постоянных магнитов; $\bar{K}_d = \frac{K_{d1}}{K_{d2}}$.

Из равенства угловой скорости вращения ротора для обеих зон найдена связь между ε_1 и ε_2 :

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{\bar{\sigma} \cdot \bar{K}_d \cdot K_\tau^2} \varepsilon_1, \quad (4)$$

где $\bar{\sigma} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$.

Со стороны дна вылет имеет цилиндрическую и дисковую часть (на рис. 1 не показаны). Толщина дисковой части больше, чем толщина цилиндров, поэтому можно считать, что тангенциальная (x) составляющая целиком замыкается в дисковой части дна цилиндра. Тогда тангенциальные составляющие напряженности электрического поля в зоне вылета будут равны нулю:

$$\dot{E}_{1x}|_{y=0} = 0; \quad \dot{E}_{2x}|_{y=0} = 0.$$

На границе $y=2a$, ($2a$ – ширина активной части ротора) нормальные составляющие токов дна равны нулю:

$$\dot{\delta}_{1y}|_{y=2a} = 0; \quad \dot{\delta}_{2y}|_{y=2a} = 0.$$

Решение системы уравнений (1) представится в виде:

$$\dot{H}_{1m} = \dot{C}_1 \cdot sh\dot{\lambda}_1 y + \dot{C}_2 \cdot ch\dot{\lambda}_1 y + \dot{C}_3 \cdot sh\dot{\lambda}_3 y + \dot{C}_4 \cdot ch\dot{\lambda}_3 y - \quad (5)$$

$$- \frac{\varepsilon_1(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{K_{d1}(1 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2)} H_{0m} + j \frac{\varepsilon_1}{K_{d1}(1 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2)} H_{0m},$$

$$\dot{H}_{2m} = j \frac{\bar{K}_d K_\tau (\dot{\lambda}_1^2 - \alpha_1^2 (1 - j\varepsilon_1))}{\varepsilon_1 \alpha_1^2} (\dot{C}_1 \cdot sh\dot{\lambda}_1 y + \dot{C}_2 \cdot ch\dot{\lambda}_1 y) +$$

$$+ j \frac{\bar{K}_d K_\tau (\dot{\lambda}_3^2 - \alpha_1^2 (1 - j\varepsilon_1))}{\varepsilon_1 \alpha_1^2} (\dot{C}_3 \cdot sh\dot{\lambda}_3 y + \dot{C}_4 \cdot ch\dot{\lambda}_3 y) -$$

$$- \frac{K_\tau \varepsilon_2 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{K_{d2}(1 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2)} H_{0m} + j \frac{K_\tau \varepsilon_2}{K_{d2}(1 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2)} H_{0m}.$$

где
$$\dot{\lambda}_1 = \sqrt{\frac{(\alpha_1^2 (1 - j\varepsilon_1) + \alpha_2^2 (1 - j\varepsilon_2)) + \sqrt{(\alpha_1^2 (1 - j\varepsilon_1) + \alpha_2^2 (1 - j\varepsilon_2))^2 - 4\alpha_1^2 \alpha_2^2 (1 - j(\varepsilon_1 + \varepsilon_2))}}{2}},$$

$$\dot{\lambda}_3 = \sqrt{\frac{(\alpha_1^2 (1 - j\varepsilon_1) + \alpha_2^2 (1 - j\varepsilon_2)) - \sqrt{(\alpha_1^2 (1 - j\varepsilon_1) + \alpha_2^2 (1 - j\varepsilon_2))^2 - 4\alpha_1^2 \alpha_2^2 (1 - j(\varepsilon_1 + \varepsilon_2))}}{2}}.$$

Аксиальные составляющие плотностей токов во внешнем и внутреннем цилиндрах:

$$\dot{\delta}_{y1} = -\frac{d\dot{H}_1}{dx} = j\alpha_1 \dot{H}_1; \quad \dot{\delta}_{y2} = -\frac{d\dot{H}_2}{dx} = j\alpha_2 \dot{H}_2. \quad (6)$$

Тангенциальные составляющие плотностей токов:

$$\dot{\delta}_{1x} = \frac{d\dot{H}_1}{dy}; \quad \dot{\delta}_{2x} = \frac{d\dot{H}_2}{dy}. \quad (7)$$

С учетом (6) и (7) из граничных условий получены постоянные интегрирования:

$$\begin{aligned} \dot{C}_1 &= 0; \\ \dot{C}_2 &= j \frac{\varepsilon_1 (1 + j(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)) (\dot{\lambda}_3^2 - \alpha_1^2 (1 - j(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)))}{K_{d1} (\dot{\lambda}_1^2 - \dot{\lambda}_3^2) \cdot ch(2\dot{\lambda}_1 a) \cdot (1 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2)} H_{0m}; \\ \dot{C}_3 &= 0; \\ \dot{C}_4 &= -j \frac{\varepsilon_1 (1 + j(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)) (\dot{\lambda}_1^2 - \alpha_1^2 (1 - j(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)))}{K_{d1} (\dot{\lambda}_1^2 - \dot{\lambda}_3^2) \cdot ch(2\dot{\lambda}_3 a) \cdot (1 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2)} H_{0m}. \end{aligned} \quad (8)$$

Результирующее магнитное поле в воздушном зазоре находится в виде суммы первичного и вторичных полей, тогда для I и II зон:

$$\dot{H}_I = K_{d1}\dot{H}_1 + \frac{K_{d2}}{K_\tau}\dot{H}_2 + \dot{H}_0; \quad (9)$$

$$\dot{H}_{II} = K_{d1}K_\tau\dot{H}_1 + K_{d2}\dot{H}_2 + K_\tau\dot{H}_0.$$

Анализ (9) показал, что с ростом безразмерной частоты ε_1 результирующее поле в зазоре ослабевает, что связано с размагничивающим действием реакции якоря. При $\frac{a}{\tau} \geq 1$ амплитуда результирующей напряженности магнитного поля практически неизменна вдоль зазора. При малых $\frac{a}{\tau}$ (отношение полуширины зазора к полюсному делению) краевые явления существенно влияют на распределение результирующего поля.

Электромагнитные моменты, создаваемые внешним и внутренним цилиндрами ЭДЭ ДПР соответственно:

$$M_1 = M_B m_1; \quad M_2 = M_B m_2, \quad (10)$$

где $M_B = p \frac{B_{0ml}^2}{4\mu_0 K_{d1}} \pi D_1 \Delta_1 \cdot 2a$ - базисное значение момента, в качестве которого принят максимальный момент внешнего цилиндра ЭДЭ ДПР; m_1, m_2 - относительные моменты, создаваемые в I и II зонах.

Моменты в относительных единицах:

$$m_1 = \operatorname{Re} \left(\frac{2\varepsilon_1(1+j(\varepsilon_1+\varepsilon_2))}{(1+(\varepsilon_1+\varepsilon_2)^2)} \left(-\frac{(\lambda_3^2 - \alpha_1^2(1-j(\varepsilon_1+\varepsilon_2)))}{(\lambda_1^2 - \lambda_3^2)} \cdot \frac{th(2\lambda_1 a)}{2\lambda_1 a} + \frac{(\lambda_1^2 - \alpha_1^2(1-j(\varepsilon_1+\varepsilon_2)))}{(\lambda_1^2 - \lambda_3^2)} \cdot \frac{th(2\lambda_3 a)}{2\lambda_3 a} - 1 \right) \right); \quad (11)$$

$$m_2 = \frac{\bar{K}_d \cdot K_\tau}{K_\Delta} \operatorname{Re} \left[\frac{2\varepsilon_2(1+j(\varepsilon_1+\varepsilon_2))}{(1+(\varepsilon_1+\varepsilon_2)^2)} \left(\frac{-j(\lambda_1^2 - \alpha_1^2(1-j\varepsilon_1))(\lambda_3^2 - \alpha_1^2(1-j(\varepsilon_1+\varepsilon_2)))}{\alpha_1^2 \varepsilon_2 (\lambda_1^2 - \lambda_3^2)} \cdot \frac{th 2\lambda_1 a}{2\lambda_1 a} + \right. \right. \\ \left. \left. + j \frac{(\lambda_3^2 - \alpha_1^2(1-j\varepsilon_1))(\lambda_1^2 - \alpha_1^2(1-j(\varepsilon_1+\varepsilon_2)))}{\alpha_1^2 \varepsilon_2 (\lambda_1^2 - \lambda_3^2)} \cdot \frac{th 2\lambda_3 a}{2\lambda_3 a} - 1 \right) \right],$$

где $K_\Delta = \frac{\Delta_1}{\Delta_2}.$

Относительный суммарный момент ЭДЭ ДПР равен сумме моментов, создаваемых каждым цилиндром в отдельности:

$$m = m_1 + m_2. \quad (12)$$

На рисунке 2 представлены зависимости $m_1 = f(\varepsilon_1)$, $m_2 = f(\varepsilon_1)$, $m = f(\varepsilon_1)$ по (11) и (12) с учетом (4), отражающие влияние поперечного краевого эффекта на тормозной момент ЭДЭ ДПР.

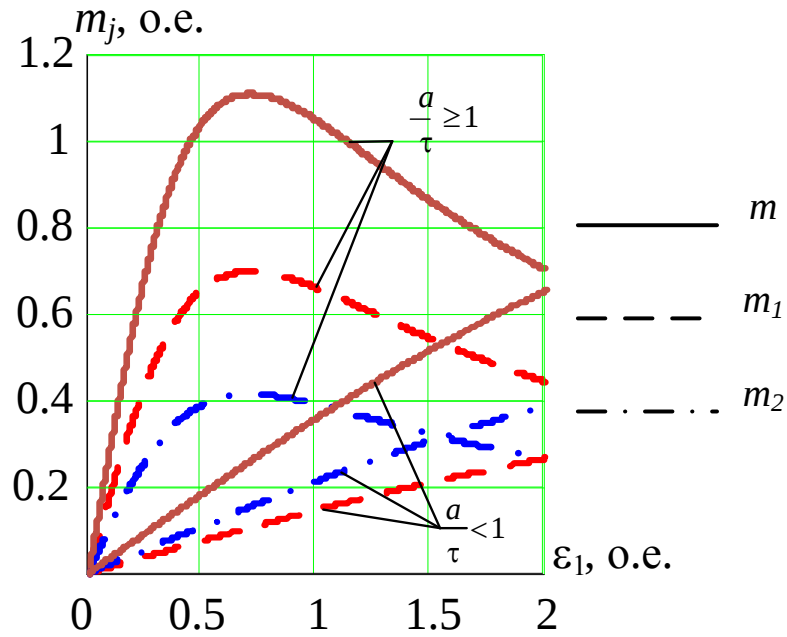


Рисунок 2 – Семейство механических характеристик ЭДЭ ДПР

Как видно из кривых для относительных моментов, чем больше $\frac{a}{\tau}$, тем менее выражен краевой эффект и больше значение электромагнитных моментов, а критическое значение ε_{1K} смещается в сторону меньших частот.

В третьей главе разработана математическая модель, основанная на совместном решении уравнения магнитного поля и уравнения движения ротора. Расчеты проводятся без учета краевых явлений. Дополнительно принимается, что радиусы цилиндров существенно больше толщины ротора и зазора, тогда можно считать, что их диаметры $D_1 \approx D_2 = D$ и $K_\tau \approx 1$, оба цилиндра движутся с одинаковой линейной скоростью $V_1 = V_2 = V$, при этом, $K_{d1} \approx K_{d2} = K_d$, $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$.

Математическая модель для исследования переходных процессов в ЭДЭ в относительных единицах:

$$\begin{aligned} \frac{d\dot{H}_m^*}{dt_\omega} + \left(\frac{1}{\varepsilon} - jV^* \right) \cdot \dot{H}_m^* &= jV^*; \\ \frac{d^2 X^*(t_\omega)}{dt_\omega^2} &= -k^* X^*(t_\omega) - F_m^* \cdot 2 \operatorname{Im} \{ \dot{H}_m^* \} + F_B^*; \\ V^* &= \frac{dX^*(t_\omega)}{dt_\omega}, \end{aligned} \quad (13)$$

где $\dot{H}_m$ – амплитуда напряженности вторичного магнитного поля; $\varepsilon = \frac{\sigma \mu_0 \omega_0}{\alpha^2} K_d$ – магнитное число Рейнольдса; $\omega_0 = V_0 \alpha$ – угловая скорость движения; $V^* = \frac{V}{V_0}$; V_0 – базовое значение скорости; $X^*(t_\omega) = X(t) \cdot \alpha$; $X(t)$ – закон движения проводящей среды, отражающий зависимость изменения положения ротора от времени; $t_\omega = t \cdot \omega_0$; $k^* = \frac{k}{m \omega_0^2}$; k – жесткость пружины; m – суммарная масса подвижных

частей; $F_m^* = \frac{B_{0m}^2 \alpha^2}{2\mu_0 K_d \omega_0^2 \rho}$; ρ – удельная плотность материала ротора; $F_B^* = F_B \frac{\alpha}{m\omega_0^2}$;

F_B – вынуждающая сила, внешняя по отношению к демпферу, определяющая характер движения ротора.

Начальные условия:

$$\dot{H}_m^*(0) = 0; \quad X^*(0) = 0; \quad V^*(0) = 1. \quad (14)$$

Полученная математическая модель представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка, поиск аналитического решения которой весьма затруднен. Поэтому были применены численные методы решения уравнений и получены частные случаи наиболее характерных режимов работы ЭДЭ.

1) Установление режима вынужденных колебаний, имеющих место, например, при использовании ЭДЭ в качестве элемента подвески транспортных средств. При этом $F_B^* = F_{Bm}^* \cos \omega t_\omega$, где F_{Bm}^* – амплитудное значение вынуждающей силы в относительных единицах; ω – частота колебаний вынуждающей силы.

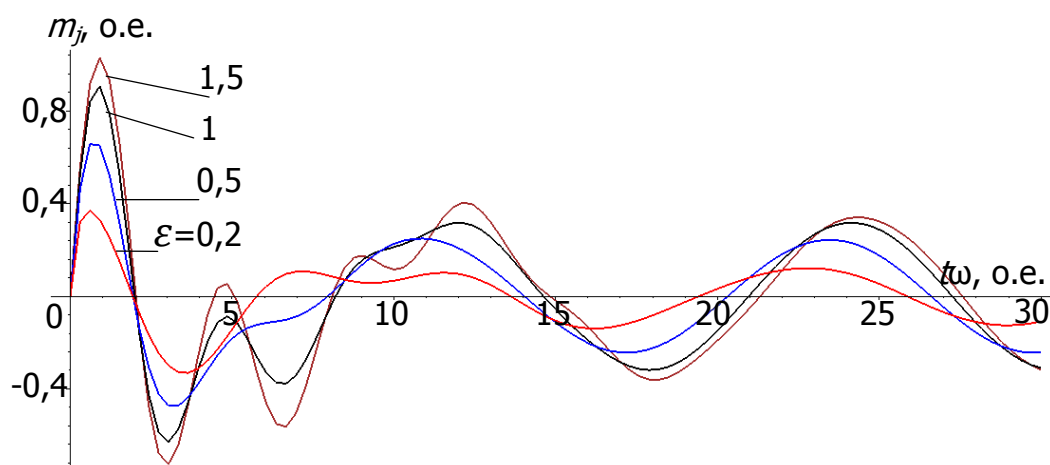


Рисунок 3 – Относительный электромагнитный момент при гармоническом изменении вынуждающей силы

Видно, что ударный момент наблюдается в первом периоде, примерно при $t_\omega = \frac{\pi}{2}$, величина которого тем больше, чем больше ϵ . При увеличении ϵ в 7,5 раз (от 0,2 до 1,5), ударный момент возрастает в 2,70 раза (с 0,37 до 1) и превышает максимальный момент ЭДЭ в 2-2,5 раза. Переходный процесс заканчивается через два периода колебаний, после чего устанавливается периодический колебательный процесс.

2) Режим свободных колебаний ($F_B^* = 0$, при $k^* = 1$). Данный режим имеет место в ЭДЭ, используемых для поглощения кинетической энергии сталкивающихся объектов (рис. 4).

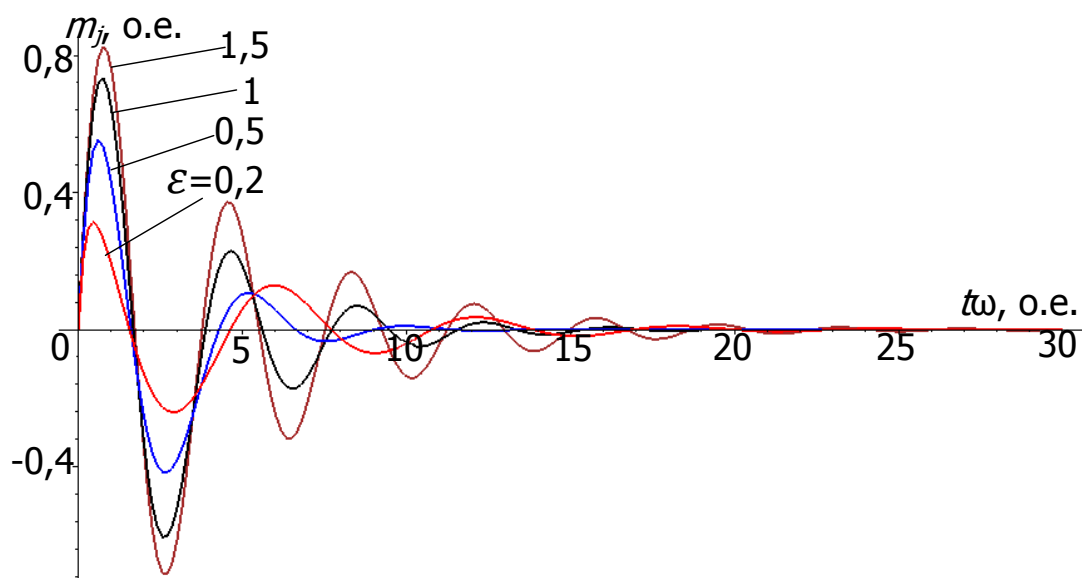


Рисунок 4 – Относительный электромагнитный момент для режима свободных колебаний ротора

Переходный процесс в рассматриваемом случае носит характер затухающих колебаний. Чем меньше величина ε , тем больше амплитуда колебаний и больше времени требуется для остановки. Величина ударного момента растет с ростом ε в 2,8 раза (с 0,32 до 0,9).

3) Установление режима работы ЭДЭ, при действии постоянной внешней силы ($F^*_B = \text{const}$, $k^* = 0$). Этот режим имеет место, например, в демпферах – замедлителях (рис. 5).

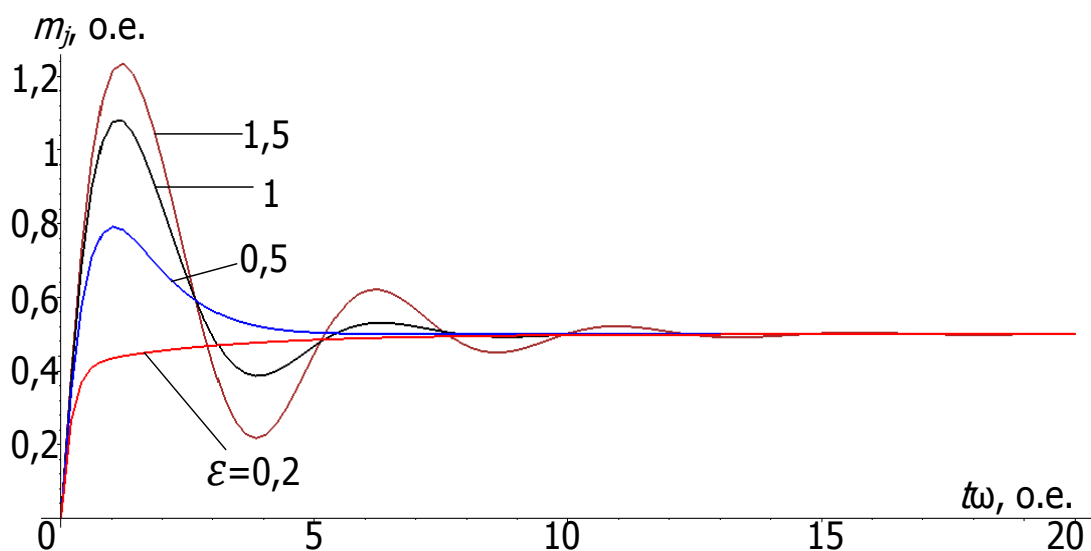


Рисунок 5 – Относительный электромагнитный момент при $F^*_B = \text{const}$

Анализируя полученные графики сделан вывод о том, что с увеличением ε уменьшается значение скорости в установившемся режиме. Увеличение безразмерной частоты ε приводит также к увеличению ударного момента (силы) в

2,82 раза (с 0,44 до 1,24). Ударный момент превышает установившееся значение в 1,1-2,7 раза.

В установившемся режиме при любом значении ε относительный электромагнитный момент имеет одно и то же значение, это связано с тем, что он должен в точности уравнивать приложенную внешнюю постоянную силу.

В четвертой главе проведена экспериментальная проверка достоверности математической модели ЭДЭ ДПР, которая подтвердила ее адекватность. Общий вид экспериментальной установки приведен на рисунке 6.

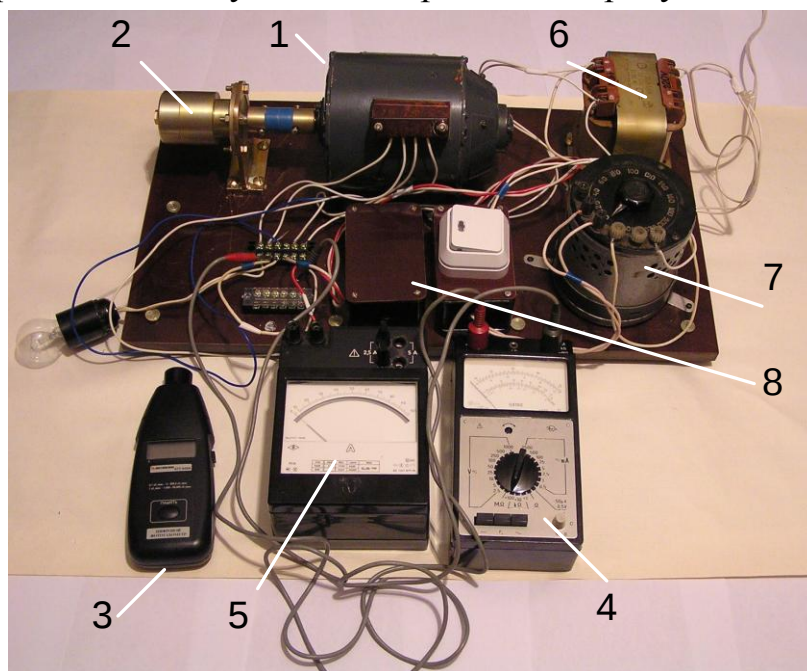


Рисунок 6 – Общий вид экспериментальной установки:

- 1- приводной двигатель; 2- исследуемый демпфирующий элемент;
3- цифровой фототахометр; 4- вольтметр; 5- амперметр;
6- трансформатор; 7- автотрансформатор 8- выпрямители

В работе использован способ *косвенного* измерения электромагнитного момента ЭДЭ, заключающийся в измерении тока и напряжения якоря двигателя постоянного тока (ДПТ) независимого возбуждения при изменении скорости вращения и при фиксированном токе в обмотке возбуждения.

$$M_{\text{ДПТ}} = \frac{E_a \cdot I_a}{\Omega}, \quad (15)$$

где $M_{\text{ДПТ}}$ – электромагнитный момент ДПТ; $E_a = U_a - I_a r$ – ЭДС якоря ДПТ; I_a – ток якоря; U_a – напряжение, приложенное к обмотке якоря ДПТ; $I_a r$ – падение напряжения в обмотке якоря; r – сопротивление обмотки якоря.

Искомый момент ЭДЭ ДПР будет отличаться от электромагнитного момента ДПТ на величину потерь:

$$M_{\text{ЭДЭ}} = M_{\text{ДПТ}} - M_{\text{п}}, \quad (16)$$

где $M_{\text{п}}$ – потери в ДПТ, ЭДЭ ДПР, а также муфте, опорах, вентиляционные потери от трения ротора о воздух.

Для экспериментального определения M_{Π} из исследуемого ЭДЭ ДПР убирают индуктор с постоянными магнитами и производят замеры тока, напряжения на якоре ДПТ, частоты вращения. Далее вычисляют момент по (15), который и будет равен суммарным потерям эксперимента. Наибольший интерес представляет начальный, линейный участок кривой механической характеристики ЭДЭ ДПР, построенной в относительных единицах, представленный на рисунке 7.

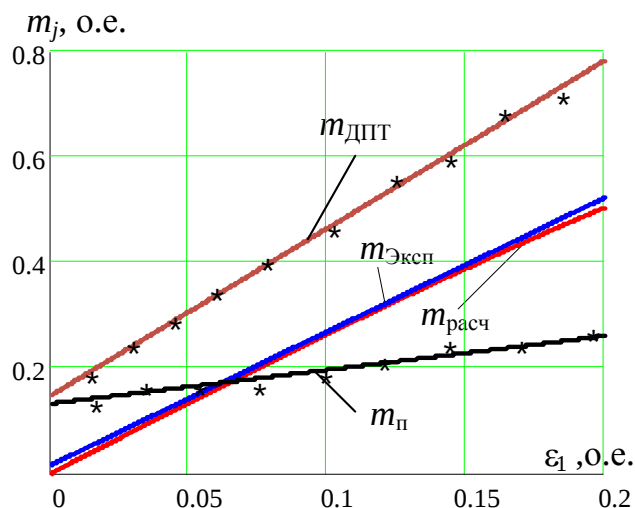


Рисунок 7 – Экспериментальные механические характеристики

Расхождение расчётных и опытных данных для ЭДЭ ДПР находится в пределах точности эксперимента 7 - 10 %.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Решением системы уравнений электромагнитного поля при принятых допущениях разработана математическая модель ЭДЭ ДПР, позволяющая проанализировать зависимости распределения магнитного поля, плотностей вихревых токов от геометрических соотношений ротора при различных безразмерных частотах ε_1 , а так же выражения для электромагнитных моментов каждого цилиндра и суммарного момента ЭДЭ ДПР в установившемся режиме.

2. Получены механические характеристики ЭДЭ ДПР и исследовано влияние на электромагнитный момент геометрических соотношений ротора, а также выбор материала цилиндров ротора.

В результате сделаны следующие выводы:

а) кривые распределения напряженности вторичного магнитного поля, результирующей напряженности и плотностей вихревых токов в каждой из зон по ширине зазора аналогичны соответствующим кривым для цилиндрического ЭДЭ с одним полым ротором;

б) чем больше $\frac{a}{\tau}$, тем менее выражен краевой эффект, при этом максимальный момент возрастает (до 11%), а критическое значение ε_{1K} смещается в сторону меньших частот;

в) увеличение удельной электрической проводимости внешнего цилиндра по сравнению с удельной электрической проводимостью внутреннего, приводит к увеличению максимального момента (до 10%) при одновременном уменьшении $\varepsilon_{1к}$ в 1,6 раза;

г) введение в конструкцию второго (внутреннего) цилиндра ведет к увеличению суммарной площади активной части ротора ЭДЭ ДПР благодаря чему достигается увеличение энергоемкости в 1,50-1,82 раза, а также улучшение охлаждения в 1,55-1,85 раза по сравнению с ЭДЭ с одинарным ротором.

3. Разработана математическая модель динамических режимов ЭДЭ ДПР позволяющей проводить совместное исследование электромагнитных и электромеханических переходных процессов во вторичной среде.

4. Проведено теоретическое исследование наиболее характерных частных случаев работы ЭДЭ, для которых получены графики зависимости напряженности вторичного магнитного поля, электромагнитного момента, скорости и перемещения ротора от времени.

В результате сделаны следующие выводы:

а) характер изменения относительной электромагнитной силы (момента) и скорости во времени определяется законом изменения вынуждающей силы F_B ;

б) длительность переходного процесса и величина ударного момента обратно пропорциональны ε ;

в) магнитное поле вихревых токов (вещественная часть) всегда имеет отрицательный знак, т.е. оно оказывает размагничивающее действие на первичное поле.

д) подтверждено, что работа ЭДЭ наиболее эффективна при $\varepsilon \approx 1$.

5. Проведены экспериментальные исследования опытного образца ЭДЭ ДПР, которые подтвердили достоверность разработанной математической модели в установившемся режиме. Расхождение расчётных и опытных данных для ЭДЭ ДПР находится в пределах точности эксперимента 7 - 10 %.

Рекомендации:

Полученная математическая модель ЭДЭ ДПР может быть использована при исследовании и разработке демпфирующих элементов.

Разработанная экспериментальная установка может быть рекомендована для использования в лабораторных исследованиях ДПТ, в том числе в учебном процессе.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

В рецензируемых журналах из списка ВАК:

1. Механические характеристики электромагнитных демпфирующих элементов с двойным ротором/ Р. Р. Саттаров, Ф.Р. Исмагилов, М.Б. Гумерова // Вестник ЮУрГУ: науч. журн. Южно-Уральск. гос. ун-та. 2010. №32(208). Серия «Энергетика» вып.14. С. 59-63.

2. Математическое моделирование динамических режимов электромагнитных демпфирующих элементов/ Ф.Р. Исмагилов, Р.Р. Саттаров, М.Б. Гумерова // Вестник УГАТУ: науч. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. 2010. Т.14, №5(40). С.86-90.

В других изданиях:

3. Вопросы оптимизации конструкции амортизатора/ В.А. Папернюк, Л.Р. Намазгулова, М.Б. Гумерова, Е.А. Полихач // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвузовский научный сборник. Уфа: УГАТУ, 2002г. С. 167-172.

4. Патент на изобретение РФ № 2272756. МПК В64F1/02. Устройство для аварийной посадки самолета при отказе шасси / Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Сыромятников В.С., Папернюк В.А., Намазгулова Л.Р., Гумерова М.Б. Опубл. 27.03.06., БИ № 06/2008.

5. Патент на изобретение РФ № 2312043. МПК В64D5/00, В64D25/00. Устройство для стыковки самолетов в воздухе/ Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Сыромятников В.С., Папернюк В.А., Намазгулова Л.Р., Гумерова М. Б. Опубл. 10.12.07., БИ № 14/2010.

6. Электромеханические переходные процессы в линейных демпферах/ Р.Р. Саттаров, М.Б. Гумерова // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвузовский научный сборник. Уфа: УГАТУ, 2008г. С. 70-76.

7. К вопросу об эффективности линейных электродинамических демпферов (ЛЭДЭ)/ М.Б. Гумерова // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Материалы 15 Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. В 3-х т. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. С. 16-18.

8. Линейные электродинамические демпфирующие преобразователи/ Р.Р. Саттаров, М.Б. Гумерова // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: Сб. науч. тр. II Всероссийской научно-технической конференции. В 2-х т. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2009. С. 114-117.

9. Электромагнитные силы в электромеханических преобразователях колебательного движения/ Р.Р. Саттаров, М.Б. Гумерова // Актуальные проблемы в науке и технике: Сборник трудов четвертой всероссийской зимней школы-семинара аспирантов и молодых ученых, Т.2. Уфа: Изд-во «Диалог», 2009. С. 324-327.

10. Патент на изобретение РФ № 2365022. МПК H02K49/04, H02K49/10. Управляемый магнитоэлектрический тормоз/ Саттаров Р.Р., Огуречникова И. А., Гумерова М. Б. Опубл. 20.08.09.

11. Оценка торможения проводящей полосы в магнитном поле/ М.Б. Гумерова // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция: сб.тр. в 5 т. Т.2. Уфимск.гос.авиацион.техн. ун-т. Уфа: УГАТУ, 2009. С. 20-22.

12. К вопросу расчета линейного демпфера при колебательном движении/ М.Б. Гумерова // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция: сб.тр. в 5 т. Т.2. Уфимск.гос.авиацион.техн. ун-т. Уфа: УГАТУ, 2009. С. 22-23.

13. Моделирование переходных процессов при гашении колебаний электромагнитным демпфером/ Р.Р. Саттаров, Т.Р. Терегулов, М.Б. Гумерова // Электротехнические комплексы и системы: Межвузовский научный сборник. Уфа: УГАТУ, 2009. С. 117-122.
14. Магнитоэлектрический тормоз/ М.Б. Гумерова // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Материалы 16 Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 3-х т. Т.2. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. С. 15-17.
15. Приближенная оценка динамических процессов в демпферах/ Р.Р. Саттаров, М.Б. Гумерова // Электронные устройства и системы: Межвузовский научный сборник. Уфа: УГАТУ, 2010. С. 253-259.
16. О современных подходах к исследованию электромагнитных демпферов при ударной нагрузке/ Р.Р. Саттаров, М.Б. Гумерова // Актуальные проблемы в науке и технике: Сб. трудов пятой всеросс. зимней школы-семинара аспирантов и молодых ученых. Т.4. Уфа: УГАТУ, 2010. С.82-84.
17. Программный анализ надежности и формирования диагностических критериев электродинамических демпферов стыковочных механизмов космических аппаратов/ В.Е. Вавилов, М.Б. Гумерова, М.В. Охотников // XXXVI Гагаринские чтения: Научные труды Междунар. молодежн. науч. конф. в 8 томах. М.: МАТИ, 2010. Т.2. С. 38-40.
18. Современные конструкции электромагнитных демпфирующих элементов с улучшенными механическими характеристиками/ Ф. Р. Исмагилов, Р.Р. Саттаров, В.Е. Вавилов, М.Б. Гумерова // Инновационные технологии в управлении, образовании, промышленности «АСТИНТЕХ-2010»: в 3 т.: Материалы Международной научной конференции. Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2010. Т.2. С. 29-30.
19. Свидетельство № 2010612800. Расчет внешнего магнитного поля электродинамического демпфера/ Вавилов В.Е., Пашали Д.Ю., Хайруллин И.Х., Гумерова М.Б., Бойкова О.А. Зарегист. 23.04.2010 г.
20. Свидетельство № 2010615111. Программа формирования диагностических критериев электромеханического демпфирующего преобразователя с распределенной вторичной средой с учетом технологических и эксплуатационных параметров/ Вавилов В.Е., Пашали Д.Ю., Хайруллин И.Х., Гумерова М.Б., Бойкова О.А., Охотников М.В., Исмагилов Ф.Р., Афанасьев Ю.В. Зарегист. 9.08.2010 г.
21. Управляемый магнитоэлектрический тормоз/ Р.Р. Саттаров, М.Б. Гумерова // Изобретатели-машиностроению: «Машиздат». Выпуск 3(78). 2011. С.25.

ГУМЕРОВА Марина Булатовна

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ДЕМПФИРУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ
С ДВОЙНЫМ ПОЛЫМ РОТОРОМ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АМОРТИЗАТОРАМИ

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 20.05.2011 . Формат 60×80 1/16
Бумага офисная. Печать плоская. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 1,0
Уч. – изд. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ № 168.

ФГБОУ ВПО Уфимский государственный авиационный
технический университет
Центр оперативной полиграфии
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12