

ОТЧЕТ за 2019-2023 гг.

1. *Наименование Научной школы: Уральская школа «Энергосберегающие электромеханические и электротехнологические установки и системы»*
2. *ФИО руководителя(ей):* Сарапулов Федор Никитич, Пластун Анатолий Трофимович.
3. *Количество и список членов научной школы, работающих в настоящее время в УРФУ:*
 1. Сарапулов Ф.Н. – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электротехника»
 2. Пластун А.Т. – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электротехника»
 3. Денисенко В.И. – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электротехника»
 4. Давиденко И.В. – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электротехника»
 5. Коняев А.Ю. – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электротехника»
 6. Сидоров О.Ю. – д-р техн. наук, профессор, профессор департамента естественно-научного образования Нижнетагильского технологического института
 7. Сарапулов С.Ф. – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Электротехника» директор УралЭНИН УрФУ
 8. Черных И.В. – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Электротехника»
 9. Фризен В.Э. – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника»
 10. Тарасов Ф.Е. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электротехника»
 11. Бычков С.А. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электротехника»
 12. Назаров С.Л. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электротехника»
 13. Смольянов И.А. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электротехника»
 14. Лузгин В.И. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электротехника»
 15. Соколов И.В. – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника»
 16. Родионов И.Е. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электротехника»
 17. Новиков Н.Н. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электротехника»
 18. Моисейченков А.Н. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электротехника»
 19. Малыгин И.В. – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника»
 20. Прахт В.А. – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника»
 21. Дмитриевский В.А. – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника»
 22. Казакбаев В.М. – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника»
 23. Шмаков Е.И. – ассистент кафедры «Электротехника»
 24. Поповцев В.В. – ассистент кафедры «Электротехника»

4. *Результаты деятельности за 2019-2023 гг.*

В рамках научной школы работают несколько научных коллективов, занимающихся решением актуальных задач в различных областях электромеханики, электрических аппаратов и электротехнологий.

По направлению МГД-установки исследования проводятся в тесном сотрудничестве с Институтом механики сплошных сред (г. Пермь), а также осуществляется работа по внедрению устройств перекачивания жидкого металла для ОАО «Каменск-уральский металлургический завод». Основные исследования направлены на выявление закономерностей в процессах перемешивания расплавов в ваннах металлургических агрегатов и кристаллизации при воздействии на жидкую фазу кристаллизующегося слитка внешнего магнитного поля. Проведено численное исследование влияния электромагнитных сил на конвективный потоки при затвердевании SnPb сплава. Получены зависимости числа Рейнольдса и глобального индекса сегрегации

от параметра электромагнитного силового воздействия. Разработана верифицированная и валидированная численная модель столбчатого затвердевания двухкомпонентного сплава. Проведено численное исследование взаимодействия между вертикальной конвекцией и электромагнитным перемешиванием. Получены зависимости чисел Рейнольдса и Нуссельта от отношения параметра электромагнитного силового воздействия к числу Грасгофа. Определены режимы доминирования электромагнитных или сил плавучести, а также переходные зоны между ними. Исследованы неустойчивые состояния потока жидкости под воздействием магнитного поля в диапазоне чисел Гартмана от 0 до 7500 и Рейнольдса от 10 до 50000. Проведена оценка влияния естественной конвекции на поведения потока в прямоугольном канале. Проведены исследования по оценки точности результатов для расчетов задач магнитной гидродинамики в зависимости от типа сетки и способов решения систем линейных уравнений. Решалась проблема неравномерного распределения примесей в жидком металле при его перемешивании за счет электромагнитных сил. В рамках работы были предложены новые зависимости параметров течений металла, вызванных неоднородным бегущим магнитным полем индуктора электромагнитного перемешивателя, и времени эффективного перемешивания от соотношения амплитуд, а также от фазового угла составляющих трехфазной системы токов питания. Проведено численное исследование неустойчивых течений жидкости под воздействием магнитного поля. Результатами исследования являются верифицированные и апробированные численные модели для расчета связанных задач гидродинамики, а также магнитного и температурного полей с возможностью учета фазового перехода; алгоритмы для расчета связанных задач в программах с открытым кодом; закономерности влияния магнитных краевых эффектов на устойчивость потока жидкости и возникающих из-за них гидродинамических явлений; новые критерии устойчивости потока жидкости под воздействием внешнего магнитного поля; проведена количественная оценка влияния тепловых явлений на поведение потока жидкости в безразмерной постановке задачи для прямоугольного канала. Проводятся исследования в области управления движением расплавленного металла в индукционных тигельных печах, разработаны новые схемы питания индукторов тигельных печей, позволяющих повысить энергоэффективность этих агрегатов. Разработан расчетный алгоритм для учета термогравитационных явлений в расплаве в тигле индукционной тигельной печи.

В области развития электромеханических преобразователей энергии за последние 5 лет получены следующие результаты. Разработан метод регулирования насосного привода для увеличения срока службы насосной установки. Предложен компромиссный метод для регулирования системы с более чем одним параллельным насосом, оснащенной только одним преобразователем частоты (система с несколькими насосами и одним регулируемым приводом). Произведено совершенствование методики проектирования одноименнополюсного синхронного двигателя (ОСД). Целевая функция составлена в первую очередь для улучшения следующих характеристик тягового ОСД: суммарные потери мощности двигателя и максимальный ток обмотки якоря. Кроме того, в целевую функцию вводятся члены, позволяющие ограничить напряжение, потери в обмотке возбуждения и максимальную плотность магнитного потока в нешихтованных частях магнитопровода. Произведено совершенствование методики оценки энергоэффективности и экологичности электрических двигателей различных типов с питанием от преобразователя частоты и напрямую от сети в вентиляторных и насосных приложениях: был рассчитан экономический эффект от использования конденсаторов в приводах с постоянной скоростью вращения насосной станции при использовании

энергоэффективных двигателей различных типов. Проведен сравнительный анализ показателей потребления электроэнергии и выбросов CO₂ для 4-полюсных асинхронных двигателей (АД) классов эффективности IE3 и IE4 номинальной мощностью 2,2-200 кВт в насосном агрегате регулируемой скорости. Кроме того, рассматривались инновационные синхронные реактивные двигатели (СРД) класса энергоэффективности IE4 с питанием от преобразователя частоты. В рамках выполнения проекта по исследованию особенностей применения двухнаправленной стали в изготовлении статора и ротора асинхронных двигателей, синхронных реактивных двигателей и синхронных двигателей на постоянных магнитах был проведен сравнительный анализ КПД, пульсаций момента коэффициента мощности и ряда других показателей. В данном исследовании сравнения производились для каждого типа электрического двигателя для мощностей 1, 10 и 100 кВт с исполнением статора и ротора из изотропной и двухнаправленной сталей. Научным коллективом проводится изучение электромагнитных свойств и конструкции асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками с керамической изоляцией (далее – АДКО), предназначенного для переработки ядерных отходов. Основная цель исследования – повышение значения максимального электромагнитного момента, снижение индуктивного сопротивления рассеяния и увеличение взаимного индуктивного сопротивления двигателя типа АДКО. С учетом данных испытаний первого опытного образца АДКО, спроектированного совместно с ЗАО «Уралэлектромаш», построена расчетно-цифровая модель АДКО первого опытного образца, определены параметры ее схемы замещения и электромагнитный момент, значения которых сравнивались с параметрами, полученными в ходе испытаний. С учетом внесенных в конструкцию ядра машины изменений были построены новые расчетно-цифровые модели АДКО, для которых путем вычислительного эксперимента определялись параметры схемы замещения и значения максимального электромагнитного момента. Проведенные расчеты показали, что такие внедрения позволяют увеличить электромагнитный момент машины в 5 раз по сравнению со значениями, полученными в результате испытаний первого опытного образца АДКО.

Актуальной задачей является мониторинг состояния различного электромеханического и коммутационного оборудования. При решении этой задачи были достигнуты следующие результаты. По результатам испытаний физических моделей синхронных машин в эксплуатационных режимах работы выполнено тестирование и корректировка алгоритмов для системы мониторинга синхронной машины по результатам измерения мгновенных значений электрических напряжений и силы тока обмотки якоря и обмотки возбуждения, угловой скорости вращения ротора и/или углового положения ротора. Разработаны элементы комплексной *on-line* системы мониторинга, диагностирования и управления техническим состоянием силового трансформатора с верификацией *on-line* измерений и прогнозированием технического состояния. Разработан алгоритм расчета температуры наиболее нагретой точки и сокращения срока службы бумажной изоляции маслонаполненного трансформаторного оборудования, контроля перегрузочной способности. Реализован численный расчёт коммутации при постановке задачи с подвижной сеткой на основе реальных данных, выданных по запросу от ФСК ЕЭС МЭС Урала (ПС 220/110/10 кВ «Калининская», ПС 220/110/10 кВ «Травянская»). В качестве апробации выбран высоковольтный баковый элегазовый выключатель ВЭБ-110. Данное исследование актуально в силу Цифровой политики компании ПАО «ФСК-Россети», в которой предусмотрено создание эффективной системы онлайн-мониторинга коммутационного оборудования, являющейся драйвером перехода от планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по фактическому состоянию.

За 2019-2023 гг. получены и получили надлежащую правовую охрану 13 РИД, из них 12 патентов на изобретения и полезные модели, 1 патент на программу ЭВМ.

Учебные пособия, изданные членами научной школы в 2019-2023 гг.: 4

4.1. *Количество статей в журналах ВАК:* 31

4.2. *Количество статей в WoS/Scopus и проиндексированных в РИНЦ:* 71

Из них статей в 1-4 квартилях SJR (в Q1 - 5, в Q2 - 25, в Q3 - 13, в Q4 - 28).

4.3. *Количество проведенных научных конференций/мероприятий:* 2

4.4. *Количество и объем выигранных научных грантов (тип, название, руководитель):* 2 гранта, 2 иное.

Общая сумма финансирования научно-исследовательских работ составляет: 155 017 367 руб.

4.5. *Количество защит кандидатских и докторских диссертации членами коллектива:*

- Абдуллаев Жахонгир Одашжонович, кандидатская диссертация «Линейные индукционные машины со встречно бегущими магнитными полями», дата защиты – 18 марта 2020 г. (рук. А.Ю. Коняев)
- Швыдкий Евгений Леонидович, кандидатская диссертация «Исследование гидродинамических процессов в жидкометаллическом вторичном элементе индукционных МГД машин», дата защиты – 21 октября 2020 г. (рук. Ф.Н. Сарапулов)
- Смольянов Иван Александрович, кандидатская диссертация «Численное моделирование неустойчивых течений жидкости под воздействием магнитного поля», дата защиты – 15 июня 2022 г. (рук. С.Ф. Сарапулов)
- Соколов Игорь Владимирович, кандидатская диссертация «Влияние структуры магнитного поля на характер магнитогидродинамических течений в электромагнитных перемешивателях расплавов», дата защиты – 19 октября 2022 г. (рук. В.Э. Фризен)