

Yu. N. Khizhnyakov, A. A. Yuzhakov
Perm national research polytechnic university

VECTOR MATRIX FUZZY CONTROL OF THE ROTATIONAL SPEED OF A TURBOPROP ENGINE FREE TURBINE

The methods of fuzzy logic have found wide application in control problems. However, when using the fuzzy logic apparatus, it is necessary to choose models of fuzzy logic operations, which are selected from empirical considerations. This makes it difficult to construct algorithms for solving specific problems. The use of «classical» operations is justified only for solving simple problems and does not require a large number of rules. The use of vector models aimed at ease of implementation, high speed and expansion of the application area is suggested. The use of the matrix device replaces the projections of the vector of the linguistic variable (term-set) with fuzzy vectors. The basic operations on fuzzy vectors are given in the works of Marcenyuk MA, on the basis of which the design of a vector fuzzy speed controller for a turboprop engine is considered. New is the use of a singleton base for the activation of fuzzy vector fuzzyfikator, the application of the method of difference areas as a method of defuzzification.

Predicates, product rules, fuzzy direct implication, fuzzy reverse implication, fuzzy vector regulator, turboprop engine

УДК 621.314

С. В. Дзлиев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Ведущая научно-педагогическая школа «Электротехнология» – исследования и разработки

описаны направления научных исследований и разработок в области обработки металлов токами высокой частоты (ТВЧ), а также приведены примеры технологий и оборудования, разработанные и внедренные в промышленность Межотраслевой лабораторией «Современные электротехнологии» (МОЛ СЭТ) учебно-научного центра «Высокочастотная электротехника» (УНЦ ВЧЭТ) факультета электротехники и автоматики (ФЭА) СПбГЭТУ совместно с ООО «Научно-исследовательский, образовательный и производственный центр высокочастотных электротехнологий» (ООО «ИНТЕРМ»). Основные направления деятельности: разработка мощных высокочастотных транзисторных преобразователей; разработка автоматизированных станков с программируемой системой управления для индукционной поверхностной закалки деталей сложной формы, например рабочих поверхностей железнодорожных авто сцепных устройств, где после сканирования поверхности лазерным датчиком строится траектория движения индуктора; разработка установок индукционной пайки, например прецизионной пайки в вакууме большого числа бериллиевых пластин на элемент внутренней поверхности камеры токамак по проекту ИТЭР; разработка технологий и оборудования для горячей посадки, индукционного отпуска сварных швов, правки плоских сварных настилов из стали и алюминиевых сплавов, импульсной термомеханической обработки поверхности стальных деталей, нагрева нефти и многое другое. Широко используются программируемые системы управления для закалочных станков автоматов, позволяющих выполнять в автоматическом режиме закалку ТВЧ большой номенклатуры машиностроительных деталей, внедряются аддитивные технологии для производства некоторых элементов индукционных установок, спрейеров, трансформаторов тока, согласующих устройств и т. п. По части направлений выпущено и внедрено оборудование, по другим проведены НИРОКР и построены опытные образцы, еще части требуется проведение НИР, программы обучения студентов бакалавриата и магистратуры нуждаются в модернизации. Все это говорит о том, что в области индукционных технологий также идет подготовка к четвертой промышленной революции и данное направление будет востребовано в ближайшем будущем, поэтому особую роль играет подготовка кадров высшей квалификации на новом уровне.

Электротехнология, индукционный нагрев, электромагнитная обработка металлов, нагрев нефти, транзисторные преобразователи частоты, аддитивные технологии, четвертая промышленная революция

Академик В. П. Вологдин – основоположник электротермии – отрасли народного хозяйства

СССР, в которой на государственном уровне комплексно решались проблемы подготовки науч-

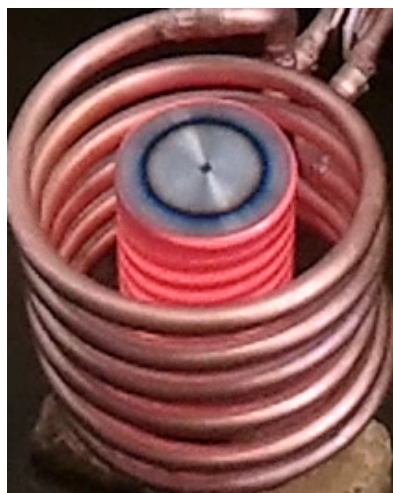
ных, инженерных и рабочих кадров, научных исследований, промышленного производства электротермических установок и их внедрения на машиностроительных и металлургических предприятиях [1]. Это обеспечило лидирующие позиции советской школы электротермии в мире.

Сегодня в промышленности в еще большей степени востребованы технологии электромагнитной обработки материалов, а современные элементная база силовых высокочастотных преобразователей, средства автоматизации и управления, средства компьютерного моделирования процессов открыли новые возможности и расширили область применения индукционного нагрева.

Ведущая научно-педагогическая школа «Электротехнология» в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» продолжает развитие этого направления силами кафедры ЭТПТ и межотраслевой лаборатории МОЛ СЭТ, готовит бакалавров и магистров, а также кадры высшей квалификации в аспирантуре и докторантуре, выполняет совместно с профильными предприятиями научные исследования и опытно-конструкторские работы по созданию электротермических технологий и оборудования для промышленности.

Далее кратко описаны основные направления НИР и НИОКР, а также промышленное высокочастотное электротермическое оборудование, разработанное МОЛ СЭТ СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и тесно сотрудничающей с «ЛЭТИ» фирмой «Научно-технический, образовательный и производственный центр высокочастотных электротехнологий „ИНТЕРМ“» [2].

Моделирование электромагнитных и тепловых полей, напряжений и деформаций в процессе индукционного нагрева стало рабочим инструментом и используется при разработке индукционных систем и технологических процессов. В качестве примера на рис. 1 показаны результаты экспериментального исследования и компьютерного моделирования процесса индукционного нагрева цилиндрической детали из магнитной стали, который приводит к интересному эффекту – полосатому нагреву при прохождении температуры поверхности через точку Кюри, т. е. через температуру потери магнитных свойств стали. Результаты исследования неустойчивости изотермы Кюри, приводящей к полосатому нагреву в статических и динамических режимах, описаны в ряде публикаций [3]–[5]. На рис. 1, а показана фотография стального цилиндра в индукторе, где отчетливо видна неравномерность температуры поверхности в виде отдельных колец, причем на светлых кольцах температура превышает температуру Кюри, а на темных – ниже нее. На рис. 1, б виден спиральный след, оставшийся после сканирующей закалки ТВЧ с вращением цилиндрической стальной детали, который также может быть следствием полосатого нагрева. На рис. 1, в представлен трехмерный график зависимости температуры на поверхности цилиндрической детали из магнитной стали от координаты x по длине детали с течением времени, полученный с помощью компьютерного моделирования. Гребни на поверхности показывают, когда зарождаются полосы нагрева и где они локализованы по длине цилиндра.



а



б

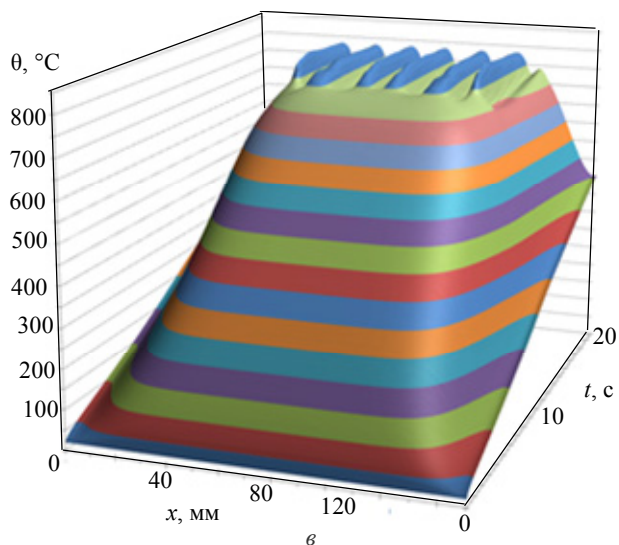


Рис. 1

Транзисторные генераторы для индукционного нагрева. ООО «ИНТЕРМ» разработано серия генераторов ТГИ мощностью 10, 40, 60, 100 и 160 кВт в частотных диапазонах 66 и 440 кГц. Налажено мелкосерийное производство этих генераторов для комплектации электротермических установок по заказам промышленности [6]–[11].



Рис. 2

На рис. 2 представлена фотография транзисторного генератора ТГИ40-66. Генераторы серии ТГИ имеют программируемую систему управления, позволяющую настроить генератор на стабилизацию или регулирование по программе выходной мощности, тока или температуры нагрева детали. Сенсорный экран дает возможность оперативно получать информацию о выходных параметрах генератора, о температуре нагреваемого объекта, диагностическую информацию о температуре его внутренних элементов, расходе охлаждающей жидкости, скорости вращения вентиляторов, причинах аварийного отключения и пр. Имеется также возможность вывести на экран выходную характеристику генератора с отображением текущей рабочей точки, что позволяет судить об оптимальности согласования генератора с индуктором. Основные параметры режима работы генератора сохраняются на внешнем носителе в режиме реального времени и могут быть проанализированы в графическом виде, в том числе могут быть построены годографы вектора полного сопротивления индуктора, необходимые для оптимального согласования источника с нагрузкой.

Выполнена НИР и подготовлена кандидатская диссертация по проблеме устойчивости транзисторных преобразователей к помехам со стороны нагрузки, наводимым на индуктор от других близкорасположенных индукторов [12], [13].

Высокочастотные трансформаторы и согласующие устройства для индукционных нагревателей. Разработаны типовые проекты, по которым создаются устройства, согласующие серийные ге-

нераторы с уникальными индукционными системами. Преимущество данной разработки состоит в высоком КПД и отсутствии внешних полей, что делает их эксплуатацию безопасной [14]. ООО «ИНТЕРМ» налажен их мелкосерийный выпуск.

Высокочастотный гибкий полосковый кабель на ток до 400 А. Обеспечивает передачу энергии от генератора к согласующему устройству на расстояние до десятков метров, не требует охлаждения, защищен от высокочастотных разрядов и механических повреждений, не имеет внешнего электромагнитного поля, легко прокладывается с изгибами без ухудшения параметров. ООО «ИНТЕРМ» налажен его мелкосерийный выпуск.

Высокочастотный скользящий силовой контакт на ток до 400 А. Обеспечивает передачу энергии от генератора к вращающемуся или движущемуся согласующему устройству при сканирующей закалке цилиндрических или кольцевых поверхностей крупногабаритных деталей. Совместно с ООО «ИНТЕРМ» выполнен НИР.

Проектирование индукторов и спрейеров, ориентированных на аддитивные технологии производства. Использование 3D-печати позволяет не только изготавливать смешные игрушки (рис. 3, а), но и создавать оптимальные устройства для охлаждения (спрейеры) при закалке ТВЧ (рис. 3, б). После появления на рынке качественных 3D-принтеров, печатающих медью, появится возможность распространить эту технологию на проектирование и изготовление индукторов и индукторов-спрейеров, которые за счет точности изготовления, применения новых конструктивных решений и легкости копирования позволят существенно повысить качество закалки ТВЧ, снизить трудоемкость и себестоимость продукции.

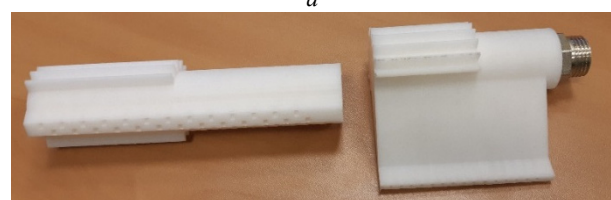


Рис. 3



Рис. 4



Рис. 5

Разработка технологических процессов и закалка ТВЧ партий машиностроительных деталей по заказам промышленных предприятий: валы и шлицевые валы, колеса, зубчатые колеса и венцы большого диаметра с модулем от 6 и выше, погоны, рельсы, детали автосцепок [15] и пятников балок железнодорожных вагонов, детали привода железнодорожных стрелок, захваты, звездочки, балансиры, коромысла, компенсаторы, колеса с ребрами и без них, трубы и пр. Разработанная в ООО «ИНТЕРМ» база закалочного оборудования и механизированной оснастки позволяет выполнять эти работы в кратчайшие сроки. На рис. 4 показаны рабочие моменты закалки ТВЧ звездочки и рельса, а на рис. 5 – закаленное ТВЧ зубчатое колесо диаметром 3300 мм (410 зубьев, модуль 8).

Оборудование для одновременной индукционной пайки короткозамыкающих колец к стержням обмоток ротора двигателя. ООО «ИНТЕРМ» разработано и поставлено в ОАО «Силловые машины» оборудование – генератор ТГИ160,

блок согласования, индукционная система, система управления с контролем температуры нагрева. Требуется НИОКР для совершенствования технологии пайки высокотемпературными припоями. Тема предложена сотруднику ПАО «Силловые машины», принятому в аспирантуру СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Технология и оборудование для индукционной пайки в вакууме твердым припоем одновременно более ста бериллиевых пластин на элементы внутренней поверхности камеры токамак по проекту ИТЭР разработаны и внедрены ООО «ИНТЕРМ» в НИИЭФА. На рис. 6 представлена фотография процесса пайки на воздухе макета с молибденовыми пластинами, заменяющими при исследовании бериллиевые. Разработанная прецизионная система индукционного нагрева обеспечивает требуемый максимальный разброс температуры по площади пайки в пределах $\pm 15^\circ\text{C}$. В данном комплексе используется генератор ТГИ 100-66 мощностью 100 кВт в частотном диапазоне 66 кГц, а для контроля и регулирования темпера-

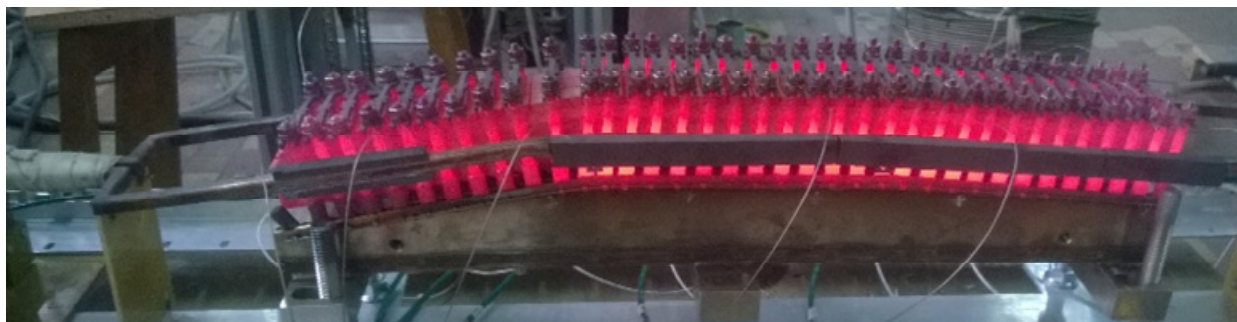


Рис. 6

туры – 12 термопар, сигналы от которых анализируются микроконтроллером.

Индукционная правка сварных листовых конструкций за счет локального интенсивного индукционного нагрева. Технология актуальна для судостроительных заводов при изготовлении корпусов кораблей. Совместно с ООО «ИНТЕРМ» разработаны компьютерные модели и исследованы процессы термической деформации стальных и алюминиевых оболочек, в том числе при механических нагрузках. Проведены экспериментальные исследования на элементах палубы корабля из алюминиевого сплава по заданию завода «Алмаз». Доведение технологии до промышленного применения потребует проведения дорогостоящих НИОКР, связанных не только с созданием эффективных индукционных систем локального нагрева с контролем температуры, но и с разработкой стратегии нагрева оболочек с характерными деформациями и анизотропными свойствами для получения технологического эффекта правки. Заинтересованность в проведении совместной с СПбГЭТУ «ЛЭТИ» НИОКР высказали Выборгский судостроительный завод и ООО «ИНТЕРМ».

Утилизация автомобильных шин с помощью индукционного нагрева стального корта для уменьшения сцепления с резиной. Совместно с ООО «ИНТЕРМ» проведены исследования, разработана и внедрена установка сканирующего индукционного нагрева предварительно разрезанной движущейся плоской части шины. Для широкого внедрения требуется проведение дорогостоящего НИОКР, который позволит исключить загрязнение окружающей среды и полностью утилизировать все составляющие шин. Желательна поддержка государственных или городских структур.

Упрочнение ТВЧ поверхности деталей автосцепок железнодорожных вагонов. Совместно с «ИНТЕРМ» и ВНИЦТТ разработана технология поверхностного упрочнения деталей автосцепок железнодорожных вагонов и получен па-

тент [15]. ООО «ИНТЕРМ» разработан, изготовлен и поставлен на один из вагоностроительных заводов России автоматизированный высокопроизводительный комплекс закалки рабочих поверхностей корпусов и замков автосцепок, в котором установленная на трехкоординатный станок деталь предварительно сканируется с помощью лазерного датчика расстояния, строится траектория движения индуктора, обеспечивающая зазор между индуктором и закаливаемой поверхностью детали 1...1.5 мм, а затем выполняется сканирующая закалка ТВЧ.

Упрочнение ТВЧ поверхности пятника балки железнодорожного вагона. Совместно с «ИНТЕРМ» и ВНИЦТТ разработана технология поверхностного упрочнения плоской кольцевой поверхности крупногабаритных деталей и подана заявка на патент. ООО «ИНТЕРМ» разработана и поставлена на один из вагоностроительных заводов России установка для сканирующей закалки плоской кольцевой и цилиндрической поверхностей пятника с поворотом индуктора на 360°. В плане совершенствования узла передачи высокочастотной энергии на вращающуюся платформу разработан вышеописанный скользящий контакт.

Монтаж и демонтаж насадных деталей с нагревом ТВЧ. Впервые применен фирмой «ИНТЕРМ» на заводе «Электросила» для нагрева бандажных колец роторов турбогенераторов в результате совместной разработки технологии нагрева и патентования гибкого индуктора [16]–[20]. Технология оказалась настолько эффективной, что завод «Электросила» разработал конструкцию титановых бандажей роторов мощных турбогенераторов (890...1200 МВт) с учетом ее возможностей, а установки нагрева ТВЧ ООО «ИНТЕРМ» включены в ремкомплект турбогенераторов, поставляемых на атомные электростанции (ЛАЭС, Белоярская АЭС и др.). Разработанная технология и оборудование нагрева ТВЧ ши-



Рис. 7

роко применяются также при монтаже и демонтаже рабочих колес паровых турбин массой до 3 т на ЛМЗ ПАО «Силовые машины» (рис. 7, а), всех насадных деталей роторов турбогенераторов (рис. 7, б) и мощных электродвигателей (рис. 7, в), газоперекачивающих агрегатов на магистральных газопроводах «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» (рис. 7, г и д) и пр. Кроме того, по заявкам промышленных предприятий ООО «ИНТЕРМ» выполняет работы по демонтажу насадных деталей с выездом на объект. При необходимости перед работами по демонтажу насадных деталей с индукционным нагревом выполняется компьютерное моделирование с целью определения условий их расцепления. По теме монтажа и демонтажа насадных деталей с нагревом ТВЧ защищена кандидатская диссертация.

Отпуск сварных швов труб и предварительный нагрев перед сваркой с применением индукционного нагрева – перспективная технология, которая широко используется при строительстве магистральных трубопроводов, трубопроводов высокого давления на электростанциях, теплоцентралях, на кораблях и других объектах. МОЛ СЭТ и ООО «ИНТЕРМ» проводят НИОКР и выполняют практические работы с выездом на объекты по этой тематике [21]–[24]. Аспирант МОЛ СЭТ выполняет научные исследования по этой теме.

Высокоинтенсивная индукционная сканирующая закалка, т. е. закалка, при которой быстрое охлаждение после нагрева ТВЧ происходит за счет отвода тепла во внутренние холодные слои металла детали, имеет существенные преимущества перед закалкой с интенсивным внешним охлаждением с поверхности, так как в закаленном слое не возникают растягивающие напряжения и снижается опасность образования трещин. Высокоинтенсивная закалка в частотном диапазоне выше 66 кГц возможна при удельной мощности 5...25 кВт/см² для большинства применяемых в машиностроении марок стали (первоначальные исследования проведены совместно с ЦЗЛ завода «Электросила» на сталях 45, 40Х, У9 и др.) и позволяет получить глубину закаленного слоя 0.8...2 мм. Дополнительным большим преимуществом высокоинтенсивной сканирующей закали является отсутствие спрейера, который принципиально не обеспечивает одинаковых условий охлаждения при закалке поверхностей сложной формы. Примером успешного применения технологии высокоинтенсивной закали служит разработанная ООО «ИНТЕРМ» для Казахстана установка с программируемой системой управления для закали деталей привода железнодорожных стрелок, которая обеспечивает закалку сложных поверхностей на семи различных деталях из двух марок стали без смены индуктора; для закали конкретной детали необходимо лишь загрузить соответствующую программу.

Технология высокоинтенсивной импульсной закалки с электромеханическим наклепом является перспективным способом упрочнения поверхности с получением мелкозернистой кристаллической или даже аморфной структуры металла. Совместно с ООО «ИНТЕРМ» проведены экспериментальные исследования на различных марках сталей и получены положительные результаты. В экспериментах использовался специально разработанный импульсный транзисторный генератор ТГИ 100-66 мощностью 100 кВт на частоте 66 кГц с программируемой длительностью импульса и паузы в диапазоне от 20 мс с шагом 20 мс. Технология может быть полезна, например, при поверхностном упрочнении тонколистовых конструкций для специальных применений. Для доведения технологии до промышленного применения потребуются дорогостоящие НИОКР.

Технология индукционного сканирующего отпуска после закалки ТВЧ создает перспективы существенного ускорения и упрощения процесса отпуска, позволяет, не используя муфельную печь, не снимая с закалочного станка деталь и не меняя индуктор, произвести не только низкий отпуск для снятия напряжений, но и высокий отпуск для снижения твердости закаленного слоя до заданных в чертеже значений. Технология будет полезна при отпуске длинномерных деталей (валы, рельсы, ножи), деталей большого диаметра (погоны), а также при отпуске локальных участков крупногабаритных деталей после закалки ТВЧ. Совместно с ООО «ИНТЕРМ» выполнены экспериментальные исследования влияния температуры и длительности нагрева на твердость закаленного слоя для одной марки стали. По этой теме защищена магистерская диссертация. Для разработки технологии и доведения ее до практического использования потребуются дорогостоящая НИОКР.

Индукционные программируемые закалочные станки позволяют выполнять закалку и отпуск партий деталей с высокой производительностью и повторяемостью результатов и легко перестраивать установку для закалки однотипных деталей разных типоразмеров за счет изменения программы закалки. Далее приведены примеры таких станков, разработанных и внедренных ООО «ИНТЕРМ»:

– станок-автомат для закалки большой номенклатуры муфт (автоматическая загрузка цилиндрических муфт разных типоразмеров с лотка и выгрузка после закалки в тару);

– станок для закалки деталей привода железнодорожных стрелок (двухкоординатный привод, высокоинтенсивная закалка без внешнего охлаждения, без смены индуктора);

– станок для закалки валов (вертикальный закалочный станок) (рис. 8, а);

– станок для закалки литых деталей сложной формы – автосцепок железнодорожных вагонов (трехкоординатный привод, сканирование детали лазерным датчиком расстояния, построение траектории перемещения индуктора при закалке ТВЧ);

– станок для закалки широкой номенклатуры ползунов (двухкоординатный привод, высокоинтенсивная закалка без смены индуктора) (рис. 8, б);

– станок для закалки погонов, зубчатых венцов и звездочек диаметром до 3,5 м;

– станок для закалки валов и труб с вращением в горизонтальном положении.

Индукционный нагрев нефти – планируется совместная НИОКР МОЛ СЭТ СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и ООО «ИНТЕРМ» по индукционному нагреву нефти непосредственно после добычи из скважины для снижения вязкости перед очисткой и транспортировкой по нефтепроводу. Цель – создание опытного образца установки мощностью 2 МВт, промышленная эксплуатация его на скважине, разработка конструкторской документации и организация промышленного производства в интересах нефтедобывающих компаний. На данной стадии ООО «ИНТЕРМ» предложено перспективное техническое решение, проведены предварительные оценки и оформляются патенты.

Все перечисленные разработки выполнены при активном участии аспирантов МОЛ СЭТ и студентов кафедры ЭТПТ, которые привлекались к ним при прохождении практики, выполнении выпускных работ бакалавров и магистров. В 2018/19 учеб. г. число студентов, одновременно выполняющих учебные работы или работающих по совместительству в ООО «ИНТЕРМ», достигало 20 чел.

Подготовка специалистов играет ключевую роль в развитии направления высокочастотной электротермии. Наиболее востребованы промышленностью на данном этапе:

– специалисты по моделированию систем индукционного нагрева (моделирование электромагнитных и тепловых процессов, напряжений и деформаций при индукционном нагреве, развитие моделирующих программ);



а



б

Рис. 8

– конструкторы (силовая ВЧ-электроника, индукторы, печатные платы, системы электропривода, схемы электрические принципиальные, знание современной элементной базы, ориентирование на современные технологии изготовления – металлообрабатывающие станки ЧПУ и обрабатывающие центры, лазерная, плазменная и гидроабразивная резка, аддитивные технологии);

– программисты (программирование контроллеров для автоматизации технологических установок, управление силовыми транзисторными преобразователями частоты и электроприводом);

– технологи-термисты (знание марок сталей, режимов закалки ТВЧ, режимов отпуска после закалки, проектирование индукторов для оптимального нагрева и охлаждения при закалке ТВЧ, металлографические исследования);

– специалисты по внедрению, пуско-наладочным работам и ремонту электротермического оборудования;

– системные интеграторы (проектирование электротермических установок для решения конкретной задачи с использованием оборудования ведущих производителей, а также с привлечением фирм, способных выполнить и внедрить проект).

В настоящее время потребность промышленности по каждой специализации невелика, но она будет быстро возрастать в связи с ростом промышленного производства в стране, причем будут нужны специалисты высокого уровня, способные решать практические задачи по своей специальности. Для подготовки таких специалистов необходимы соответствующие преподавательские кадры. Формально факультет ФЭА СПбГЭТУ «ЛЭТИ» имеет такие компетенции, но для достижения современного уровня преподавания, по видимому, потребуются привлечение ведущих специалистов из промышленности и, возможно, оптимизация структуры факультета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головин Г. И. Пионер высокочастотной техники: Жизнь и деятельность Валентина Петровича Володина / под ред. д-ра техн. наук Г. Ф. Головина и доц. В. В. Володина; вступ. ст. акад. А. И. Берга. М.: Связь, 1970.

2. Сайт ООО «Научно-исследовательский, производственный и образовательный центр высокочастотных электротехнологий „ИНТЕРМ“». URL: www.interm.su (дата обращения 12.10.19).

3. Неустойчивость при индукционном нагреве магнитной стали / С. В. Дзлиев, А. А. Завороткин, Д. М. Жнакин, К. Е. Пищалева, Ю. Ю. Перевалов // Индукционный нагрев. 2013. № 1 (23). С. 36–41.
4. Автоколебания при сканирующем индукционном нагреве магнитной стали / С. В. Дзлиев, А. А. Завороткин, Д. М. Жнакин, К. Е. Пищалева, Ю. Ю. Перевалов // Индукционный нагрев. 2013. № 2 (24). С. 37–43.
5. Curie isotherm instability during scanning induction heating of magnetic steel strip / S. V. Dzljev, M. S. Golubev, K. E. Pishchalev, A. A. Zavorotkin // 2019 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). St Petersburg, 2019. P. 955–960.
6. Дзлиев С. В., Патанов Д. А. Характеристики резонансного транзисторного инвертора напряжения при фазовом и частотном регулировании // Актуальные проблемы теории и практики индукционного нагрева (АПИН-2005): материалы междунар. науч.-техн. конф. СПб., 2005. С. 363–369.
7. Васильев А. С., Конрад Г., Дзлиев С. В. Источники питания высокочастотных электротермических установок: Т. 4. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006 (Серия «Современные электротехнологии»).
8. Дзлиев С. В. Транзисторные источники питания индукционных нагревательных комплексов // Индукционный нагрев. 2009. № 2. С. 15–21.
9. Дзлиев С. В. Источники питания индукционных нагревательных комплексов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009.
10. Согласование транзисторных преобразователей частоты с индукционными нагревателями / С. В. Дзлиев, А. А. Завороткин, Ю. Ю. Перевалов, К. Е. Пищалева // Индукционный нагрев. 2012. № 3. С. 33–40.
11. Дзлиев С. В. Транзисторные генераторы для индукционного нагрева. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012.
12. Dzljev S. V., Abdulhakov I. U. A group work of semiconductor resonant inverters of magnetically coupled induction systems // Intern. Scientific Electric Power Conf. ISEPC-2019. St Petersburg, 2019. Vol. 643, № 1. P 1–7.
13. Абдулхаков И. Ю., Дзлиев С. В. Исследование магнитной связи двух близкорасположенных индукторов при нагреве стальных заготовок // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. № 1. С. 52–59.
14. Жукова А. А., Хоршев А. А., Дзлиев С. В. Согласование индуктора с транзисторным инвертором напряжения при магнитной и немагнитной нагрузке // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 9 ч. / под ред. А. В. Гадюкиной. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. Ч. 5. С. 34–39.
15. Пат. RU 2673437C1. Способ создания твердого поверхностного слоя на детали автосцепки грузового вагона / Р. А. Савушкин, К. В. Кякк, М. И. Тереньев, Ю. А. Безобразов, О. А. Бройтман, С. В. Дзлиев, Ю. Ю. Перевалов; № 2018110172; 22.03.2018. Заявл. 22.03.2018. Опубл. 26.11.2018. Бюл. № 33. 11 с.
16. Пат. RU 2251823C2. Гибкий индуктор для нагрева цилиндрических тел / С. В. Дзлиев, И. А. Кади-Оглы, О. Л. Кийло; № 2003117586/09, 10.06.2003, Заявл. 10.06.2003. Опубл. 10.05.2005. Бюл. № 13. 5 с.
17. Исследование нагрева бандажей роторов турбогенераторов высокочастотным индукционным методом / И. А. Кади-Оглы, О. Л. Кийло, С. В. Дзлиев, И. В. Позняк // Электричество. 2003. № 5. С. 23–31.
18. Высокочастотный индукционный нагрев при горячей посадке бандажных колец турбогенераторов и рабочих колес паровых турбин / С. В. Дзлиев, К. Е. Пищалева, Д. М. Жнакин, Ю. Ю. Перевалов // Индукционный нагрев. 2012. № 2. С. 25–28.
19. Высокочастотный индукционный нагрев крупногабаритных деталей / С. В. Дзлиев, К. Е. Пищалева, Д. М. Жнакин, Ю. Ю. Перевалов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. Вып. 5. С. 92–98.
20. Dzljev S V., Pishchalev K. E. High-frequency induction heating of shrink-fitting parts of turbogenerators // Intern. Scientific Electric Power Conf. ISEPC-2019. СПб., 2019. P. 1–7.
21. Хоршев А. А., Цветков И. А., Дзлиев С. В. Повышение КПД индукционного нагрева протяженного изделия с заданным неравномерным теплосъемом // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 9 ч. / под ред. А. В. Гадюкиной. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. Ч. 5. С. 83–87.
22. Цветков И. А., Дзлиев С. В., Жукова А. А. Индуктор для нагрева трубы из магнитной стали // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 9 ч. / под ред. А. В. Гадюкиной. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. Ч. 5. С. 88–92.
23. Influence of magnetic steel induction heating power density on inductor resistance range / S. V. Dzljev, A. Khorshev, A. Zhukova, I. Tsvetkov, K. E. Pishchalev // IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). St. Petersburg, 2019. P. 951–954.
24. Induction annealing of pipe weld seams with layed over inductor / S. V. Dzljev, D. N. Bondarenko, M. S. Golubev, K. E. Pishchalev, S. Adoh // Intern. Scientific Conf. «Far East Con». (FEFU). Vladivostok: Far Eastern Federal University, 2019. P. 1–3.

S. V. Dzlhev

Saint Petersburg Electrotechnical University

LEADING SCIENTIFIC AND PEDAGOGICAL SCHOOL «ELECTROTECHNOLOGY» – RESEARCH AND DEVELOPMENT

Describes research directions in the area of high-frequency currents metal treatment and contains samples of technologies and equipment, developed and implemented to production by Interdisciplinary Laboratory «Modern Electrotechnologies» of Academic and Research Center «High-Frequency Electrotechnics» of Faculty of Industrial Automation and Electrical Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University in co-operation with «High-Frequency Electrotechnologies Research-and-Development, Education, and Manufacture Center» (INTERM LLC). Main areas of activity are: development of high-power high-frequency transistor convertors; development of automated CNC machines for induction thermohardening of complex-shaped parts, e.g. operating surfaces of railroad automatic couplers, which are scanned first with laser probe to build inductor movement trajectory; development of induction brazing units, e.g. for precision vacuum brazing of multiple beryllium plates on inner chamber surface of ITER project TOKAMAK section; development of technologies and equipment for large-sized parts shrink fitting, induction annealing of weld seams, flat welded steel and aluminum decks leveling, pulse thermomechanical treatment of steel parts surfaces, oil heating and many other directions. Programmable control systems are widely used for hardening machines of automatic machines, which allow automatic hardening of high frequency currents of a large range of machine-building parts, additive technologies are introduced for the production of some elements of induction plants, sprayers, current transformers, matching devices, etc. Researches in several directions resulted in equipment producing and commissioning, several resulted in Research-and-Development studies and prototypes building, several still require some researches to be done, Bachelor and Master programs require modernization. All this suggests that preparations are underway for the fourth industrial revolution in the field of induction technologies, and this area will be in demand in the near future, therefore training of highly qualified personnel at a new level plays a special role.

Electrotechnologies, induction heating, metals electromagnetic treatment, oil heating, transistor frequency convertors, additive technologies, fourth industrial revolution
