

Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования «Ивановский государственный  
энергетический университет имени В.И. Ленина»

Академия технологических наук Российской Федерации  
Верхне-Волжское отделение АТН РФ

## **МАТЕРИАЛЫ**

Международной научно-технической конференции

### **«СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ»**

(XIII Бенардосовские чтения)

***18-20 октября***

***К 125-летию открытия сварки Н.Н. Бенардосом***

**Иваново 2006**

В материалах научно-технической конференции отражены результаты научных исследований в области теории и практики энергетики и электротехнологии.

Редакционная коллегия:

акад. МАИ, д-р техн. наук, проф. **В.Н. НУЖДИН** (председатель),  
д-р техн. наук, проф. **В.П. ЖУКОВ** (зам. председателя),  
д-р техн. наук, проф. **Ю.А. МИТЬКИН**,  
д-р техн. наук, проф. **В.А. МАРТЫНОВ**,  
д-р техн. наук, проф. **В.Е. МИЗОНОВ**,  
заведующая РИО **С.В. КЛЮНИНА**

*Отпечатано с оригиналов, представленных авторами – участниками конференции.*

ISBN 5-89482-418-4  
ный

© □ ГОУ ВПО «Ивановский государственный  
энергетический университет  
имени В.И. Ленина», 2006.

## СЕКЦИЯ 2. ПРОБЛЕМЫ СВАРКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

УДК 621.791:061.3

Б.Е. ПАТОН, академик, директор  
(Институт электросварки им. Е.О. Патона, Киев)

### Выдающийся вклад в научно-технический прогресс

В 1981 году по решению ЮНЕСКО весь мир отметил столетие одного из крупнейших изобретений XIX века – электрической дуговой сварки.

К этому времени всё возрастающее применение металлов в промышленности стран Европы и Северной Америки потребовало разработки нового высокопроизводительного технологического процесса получения прочных соединений деталей и узлов ответственных инженерных конструкций вместо клепки и кузнечной сварки. Одновременно значительных успехов достигла развивающаяся электротехника. В создание научных основ металлургии и электротехники внесли заметный вклад и российские ученые, изобретатели, практики. Возможностью использовать тепловые и световые свойства электрического дугового разряда, открытого В.В. Петровым и Г. Деви, воспользовались П.Н. Яблочков, В.Н. Чиколев, Н.Н. Бенардос и др. В конце 1880-х годов Николай Николаевич трудился в собственных мастерских вблизи города Лух и в Санкт-Петербурге в фирме «Яблочков-изобретатель и К<sup>о</sup>», где создал и совершенствовал принципиально новый метод соединения материалов. Он сумел решить множество таких сложных технических задач как возбуждение и питание сварочной дуги, управление её технологическими свойствами, разработать источник питания, аппараты и приспособления, укомплектовав первый в мире сварочный пост, спроектировать рациональные сварные соединения. Бенардосом предложены способы управления сварочным процессом, приемы улучшения качества и пр. Технология сварки и сварочные аппараты Н.Н. Бенардоса были настолько удачны, что длительное время применялись без каких-либо существенных изменений. Кроме того он изобрёл один из способов контактной сварки – точечную сварку, нашедшую также широкое применение.

В 1881 г. Н.Н. Бенардос продемонстрировал свой способ соединения металлов в Париже и применил его для подготовки экспозиции П.Н. Яблочкова. В течение 1885-1887 гг. Бенардосу были выданы патенты во многих странах Европы и США. В 1886 г. в С.-Петербурге было создано товарищество «Электрогефест» и первое в мире специализированное предприятие по сварочному производству. Бенардос лично внедрил сварку на многих предприятиях России, Франции, Великобритании, Испании ... Фирмы промышленно-развитых стран высоко оценили новый технологический процесс – уже к 1895 г. он был внедрен более чем на 100 заводах. Наибольшее применение дуговая сварка нашла применение в паровозостроении и энергетике –

тех отраслях промышленности, где в конце прошлого века были сосредоточены передовые достижения науки и техники.

Первый способ дуговой сварки недолго оставался единственным. В октябре 1888 г. в Перми Н.Г. Славянов демонстрировал свой способ сварки плавящимся электродом группе металлургов и электротехников. В этот же период немецкий изобретатель С. Церенер и американский изобретатель А. Коффин развили способ Бенардоса, Шведский инженер О. Кьельберг предложил ручную дуговую сварку плавящимся электродом, к усовершенствованию которой подключились изобретатели других стран.

С середины 1920-х годов в Советском Союзе начинается совершенствование и выпуск отечественных источников питания для дуговой сварки. Крупнейшие по тем временам сварные конструкции были изготовлены на Дальнем Востоке под руководством В.П. Вологодина. Замена клепки на сварку ряда конструкций при строительстве Кузнецкого и Магнитогорского металлургических комбинатов. В 1929 г. были созданы Автогенный комитет при ВСНХ СРСР и Электросварочная лаборатория при Всеукраинской академии наук, преобразованная в 1934 г. в Институт электросварки. Е.О. Патон впервые в мире разработал комплексную программу решения проблем и развития сварочного производства и этим задачам соответствовала структура первого в мире специализированного научно-исследовательского института. В 1930–50-х годах в Институте электросварки под руководством Е.О. Патона, в МВТУ им. Н.Э. Баумана Г.А. Николаевым, К.К. Хреновым, В.П. Никитиным, Н.Н. Рыкалиным, в ряде других организациях и вузах В.П. Вологдиным, Н.О. Окербломом, Г.М. Тиходеевым и другими были заложены основы современной сварочной науки. Интенсивные научные исследования и внедрение сварки проводились и зарубежными коллегами.

К концу 1930-х годов была создана отечественная технология автоматической сварки под флюсом, усовершенствованы электроды для ручной сварки и др. Большую роль сыграла сварка в ускорении выпуска оружия в годы Великой Отечественной войны. Так, разработанная в Институте электросварки технология сварки броневых сталей, позволила выпустить в Советском Союзе танков больше, в других странах, участвовавших во второй мировой войне. Послевоенные годы сварка сыграла решающую роль в восстановлении промышленности и решении проблем научно-технического прогресса. В СССР впервые в мире были созданы новые виды сварки, наплавки и напыления: электрошлаковая, дуговая в углекислом газе, электродной лентой, плазменная и микроплазменная на переменном токе и др.

На протяжении второй половины XX века продолжали совершенствоваться способы сварки, основанные на дуговых процессах. Кроме того, сварочные источники нагрева, в том числе и дуговой разряд, используются для производства особо чистых металлов, сплавов с уникальными свойствами. Так, например, для разработанного в институте способа плазменно-индукционного зонного выращивания монокристаллов практически не существует каких-либо ограничений, как по размеру, так и

по профилю поперечного сечения (круг, квадрат, пластина, труба и т.п.). Сочетаное пламенного и индукционного нагревом позволяет удерживать ванну жидкого металла в электромагнитном поле без контакта с охлаждаемой медью. Это предопределило перспективы данного способа в выращивании крупных и сверхкрупных монокристаллов тугоплавких металлов. Ведутся работы по созданию новых конструкционных хорошо свариваемых титановых, алюминиевых и других сплавов для аэрокосмической техники, химического машиностроения, медицины и др.

Специалисты в разных странах продолжают исследования, направленные на улучшение качества сварных конструкций. В ИЭС им. Е.О. Патона одна из работ последних лет посвящена решению проблем сварки конструкций из высокопрочных низколегированных сталей, прежде всего предупреждению хрупкого разрушения сварных соединений, связанные со структурными превращениями и охрупчивающим действием водорода. Абсорбция водорода из плазмы дугового разряда определяется степенью её ионизации и зависит от температуры дуги. Результаты исследований использованы для разработок сварочных материалов – электродов и агломерированных флюсов, обеспечивающих получение ультранизких содержаний водорода в металле швов.

В последние годы в институте сформировалось новое направление в создании наукоемких технологий – гибридные способы сварки, в том числе и с использованием дуговых процессов. Разработан способ, основанный на совместном действии лазерного излучения и дуги с плавящимся электродом, а также лазерного излучения и плазмы. Скорость такой гибридной сварки может достигать 300 км/ч.

Создание многих современных машин, работающих в экстремальных условиях, становится возможным благодаря применению новых сварочных материалов и технологий соединения, учитывающих свариваемость материалов. В настоящее время ни одна отрасль техники не обходится без сварки и родственных технологий, эффективно участвуя в решении важных и сложных проблем научно-технического прогресса.

Диапазон применения сварки и родственных технологий простирается от космоса до мирового океана, от строительства крупнейших сооружений до микроэлектроники и медицины.

Тенденции, заложенные основателем института Е.О. Патонам, базируются на сочетании целенаправленных фундаментальных теоретических исследованиях с инженерно-прикладными разработками, тесными творческими связями с промышленными предприятиями, что отличает их от таковых многих других научно-исследовательских организаций. Институт является крупнейшим научно-исследовательским центром в области сварки и родственных технологий. В настоящее время совершенствуются его структура и система управления с целью дальнейшего развития сварки и родственных процессов, а также решения базовых проблем промышленного производства в новых условиях.

Научно-техническое сотрудничество в области сварки, одного из наиболее распространенных процессов металлообработки, является

мощным рычагом развития и интенсификации производства. Прямые научные, производственные и торговые связи между организациями и фирмами, объединенными организационной структурой в виде Международной Ассоциации «Сварка», создают оптимальные условия самого широкого использования современных форм научно-технического и экономического сотрудничества.

Дополненные возможностью получения оперативной информации обо всех достижениях в области сварочной науки и техники, информацией о спросе и предложениях; такие связи позволяют организовывать высокоэффективное сотрудничество заинтересованных сторон. В частности, ИЭС им. Е.О. Патона активно расширяет информационные потоки о новых научных достижениях, о прогрессивных процессах сварки и родственных технологиях. Важным элементом оперативной информации являются и научно-технические конференции, среди которых Бенардосовские чтения, ставшие уже традиционными, занимают заметное место.

УДК 6(09)

А.Н. КОРНИЕНКО, к.т.н., ведущий науч. сотр.  
(Институт электросварки им. Е.О. Патона)

## **Исследование жизни и увековечение деятельности Н.Н. Бенардоса**

Имя Николая Николаевича Бенардоса давно стало нарицательным – зафиксировано в названии первого способа электродуговой сварки. К концу первой половины XX столетия этот вид сварки после ряда усовершенствований насчитывал несколько способов и по объему применения занял первое место среди всех других технологий неразъемных соединений металлов. При этом биография изобретателя была малоизвестна, место и дата изобретения указывались разные. Однако, к тому времени о Бенардосе и его изобретениях было написано несколько книг, и поэтому заниматься уточнением его биографических данных считалось неинтересным. Краткий итог известных (и как положено, вроде бы, неоспоримых) сведений о нем был изложен в 1970 г. в «Большой Советской энциклопедии», в которой отмечалось: «В 1882 г. предложил изобретенный им способ соединения и разъединения металлов непосредственным действием электрического тока (названный им «Электрогефест». Запатентовал свое изобретение в 1885 г. в Германии, Франции, России, Италии, Англии, США, Бельгии и других странах» (том 2, стр. 260). Однако неожиданно в 1976 г. в западных сварочных журналах появилась статья руководителя лаборатории сварки НАСА А. Нуньеса, предлагавшего отметить столетие изобретения дуговой сварки французским электротехником О. Меритеном в 1981 г.

Было делом престижа сохранить приоритет Н.Н. Бенардоса и первенство страны в создании важнейшей технологии современности, и академик Б.Е. Патон (президент Академии наук УССР директор ИЭС им. Е.О. Патона) обратился к специалистам по истории сварки академику К.К. Хренову и д.т.н. А.А. Чеканову (сотруднику Института естествознания истории и техники АН СССР) с просьбой прокомментировать статью и дать предложения. Смысл ответов сводился к тому, что не следует поддаваться на провокацию и что весь мир знает – сварка была изобретена Бенардосом в 1882 году в том же самом Париже.

Было известно, что Нуньес занимался плазменной сваркой ракетных и космических конструкций, в статьях часто дезинформировал коллег, указывая неверные режимы, составы сплавов и технологические приемы, чем вызывал недоверие к нашим работам наших заказчиков. Поскольку пламенно-дуговая сварка алюминиевых сплавов на переменном токе была впервые в мире разработана в ИЭС им. Е.О. Патона и лидерство сохранялось, на американские статьи мы не ориентировались. Но с попыткой отвергнуть приоритет Бенардоса следовало разобраться, что и взяла на себя Лаборатория пламенной сварки ИЭС. Выполнению задачи служили личная заинтересованность и научно-технические методы исследования.

Работа велась по нескольким направлениям: изучение отечественных и зарубежных и научных источников начиная с 1870-х годов; поиск архивных данных о жизни и деятельности; основательное знакомство с историческим фоном, состоянием электротехники, металлургии и промышленного производства сложных инженерных конструкций; анализ патентных законов; просмотр семейного архива. Требовалось доказать, что Бенардос имел возможность, хотел и сумел разработать электро-сварку самостоятельно, продемонстрировал уже полностью готовое техническое решение, но почему-то не смог запатентовать его сразу. Кроме того, необходимо было сравнить существенные признаки изобретений О. Меритана и Н.Н. Бенардоса и оценить их технические возможности и влияние на дальнейшее развитие сварочного производства, понять, почему способ не был назван именем достаточно известного французского электротехника (изобретатель магнето и др.).

Многие биографические данные о Николае Николаевиче: его родословная, деятельность деда и отца, адреса жизни в С.-Петербурге и другое были уже известны из семейного архива. Причем в списке изобретений, написанных им собственноручно, «Электрогефест» был отмечен 1881 годом (Правда, этого было недостаточно для доказательства приоритета).

Вся собранная информация была сведена в таблицы, в которых отмечалось, как описывали различные авторы жизнь и деятельность изобретателя и сразу стали видны противоречия и пробелы. Многочисленные отечественные и зарубежные прижизненные публикации сведений о биографии не содержали. Они касались только изобретений Бенардоса, но из них можно было установить, что еще в 1887 году во

французских, немецких, американских и российских журналах писали, что именно российский электротехник изобрел электросварку, которую и демонстрировал в 1881 году. И как это обычно бывает, современники – коллеги мало интересовались подробностями личной жизни, во всяком случае, записей не оставили. Так, в 1920 г. А.К. Тимирязев в «Очерках по истории физики в России» отмечал, что «технические приемы и достижения Бенардоса подробно описаны в литературе, но никаких данных биографического характера о Бенардосе, кроме того, что он был дворянином, найти не удалось. Его способ сварки применяется и доныне». Первая биографическая статья об изобретении электродуговой сварки, написанная К.К. Хреновым и опубликованная в 1936 г., была посвящена «50-летию этого изобретения в России». Дата изобретения устанавливалась на основе привилегии (патента) Росси, заявку на которую Н.Н. Бенардос подал в 1885 г. Однако в этой же статье указывалось, что «Первую крупную аккумуляторную батарею изобретенной им системы он устанавливает в Испании, в Барселоне в 1882 г. По-видимому, при монтаже аккумуляторных батарей он изобретает свой способ сварки угольной дугой, применив его для соединения отдельных свинцовых пластинок аккумулятора его системы». Указанная дата и стала считаться датой изобретения дуговой сварки.

Однако, следовало знать, что в то время патенты брали, как правило, не сразу после того как создавалось изобретение, не после решения определенной технической задачи, а после нахождения средств для выплаты значительных пошлин и средств для реализации (внедрения) изобретения. Если эксплуатация в течение непродолжительного срока (1-3 года) не была налажена, то патент аннулировали. Учитывая, что патенты почти во всех странах Европы выдавались без указания действительного автора, часто просто какой-либо компании или анонимному обществу, считать патент документом, подтверждающим приоритет или авторство, нельзя. Более того, в ряде стран (например, в США) приоритет можно доказать и оспорить патент на основании документов, подтверждающих более раннюю дату (например, записями в лабораторных журналах). Очевидно, что эти особенности патентного права биографами Бенардоса не принимались во внимание, иначе они установили бы обстоятельства создания нового способа и уточнили бы биографические данные, хотя бы касающиеся этого периода.

В ряде публикаций отмечалось, что Н.Н. Бенардос «вынужден был после разорения выехать со своей семьей в захолустный г. Лух Костромской губернии»; в других, – что «Н.Н. Бенардос начал свою самостоятельную жизнь в Лухе, там обзавелся семьей и выехал оттуда в молодом возрасте в 25 лет». Некоторые более поздние биографические данные о Бенардосе подтвержденные документально, опровергали высказывания предшествующих биографов. Долгое время противоречивыми оставались и сведения о месте и дате рождения изобретателя

Для того чтобы решить проблему авторства с учетом патентного права, экономической заинтересованности, технических возможностей и



других факторов, необходимо было ответить на вопросы: где находился Бенардос во время создания сварки, чем занимался, какими материальными средствами располагал, была ли у него личная потребность в новом способе соединения; был ли он готов к выдвиганию новых идей и имел ли возможность реализовать их? К сожалению именно период жизни и деятельности изобретателя сварки в 1870-1880 гг. не был документирован и описания этого периода различными исследователями во многом расходились. Что касается города Лух, то биографы и не предполагали возможность создания электросварки. Все считали, что жизнь его в Костромской губернии не имела отношения к сварке (Где там было взята электричество?). По мере изучения нами губернских и уездных статистических отчетов и газет, донесений полицмейстеров и рекламных проспектов, городских справочников и описаний некрополей, популярных журналов и фотоальбомов, экспонатов музеев и частных коллекций, удалось определить, что истоки нового технологического процесса связаны именно с Костромской губернией, куда в 1869 г. переехал на жительство Бенардос, получивший от матери в наследство участок лесных угодий и построивший там дом, мастерские, школу и аптеку (Сохранилась грамота царя Алексея Михайловича, выданная в 1565 году (по новому стилю) предку матери изобретателя Афанасию Симанскому на владение деревнями в Костромском крае (Краснопеево и др.)). Сам изобретатель в рукописных списках, дневниках, в выпущенной им книжке о пароходе, переходящем мели, в статье в «Земледельческой газете», указывал Костромскую губернию, как место создания ряда изобретений. В 1870-е годы изобретатель, живя в Лухе, реализовывает свои проекты, в том числе и проекты крупных металлоемких конструкций (конструкции парохода, аккумуляторы и др.). У нас возникло предположение, не воспользовался ли Бенардос электрической дугой, чтобы нагревать для кузнечной сварки участки крупных изделий, которые не помещались в печь, и не обнаружил ли случайно, что сплавлять кромки можно и без проковки (т.е. чистой дуговой сваркой). В ИЭС им. Е.О. Патона был смоделирован процесс нагрева стальных пластин дугой с угольного электрода по способу Бенардоса и доказана надежность соединения.

Ближе всех к ответу на вопрос о технических возможностях Бенардоса подошел В.Е. Бочков, который обратил внимание на то, что в г. Кинешме неподалеку от Луха, в 70-х годах XIX столетия был создан один из первых русских электротехнических заводов, где делали дуговые светильники. С 1878 г. владельцем завода стал приятель Бенардоса электротехник А.И. Бюксенмейстер. Увлечение Бенардоса электричеством подтверждается найденными в архивах документами о его работе с П.Н. Яблочковым в период не позднее 1880 г. Именно тогда в товариществе «Яблочков-изобретатель и К<sup>о</sup>» в Петербурге работали почти все известные русские электротехники.

В авторском экземпляре в числе изобретений 1881 г. под номером 46 записано: «Париж, электрическое паяние металлов – электрогефест». Теперь необходимо было установить, когда и почему Бенардос оказался

в Париже и когда он применил свое изобретение? Поиски в архивах МИД, ЦГАОР СССР, ЦГИА СССР и других, где могли бы храниться сведения о выезде изобретателя за рубеж и о его поведении там, не дали положительных результатов. Бенардос не упоминался ни в полицейских досье, ни в донесениях послов и консулов. Оставалось только прибегнуть к анализу деятельности П.Н. Яблочкова – руководителя фирмы, где работал в то время Н.Н. Бенардос. Правительство Франции, признавая особые заслуги П.Н. Яблочкова, пригласило его участвовать во Всемирной электрической выставке. В конце 1880 г. изобретатель «русского света» приезжает в Париж и вскоре вызывает сюда и Бенардоса. Базой для подготовки экспозиции Яблочкова в Париже была электротехническая лаборатория, содиректором которой был русский физик Н.И. Кабат. Используя в 1881 г. электродуговую сварку как технологический процесс, облегчающий изготовление и монтаж экспонатов Яблочкова, изобретатель не придавал еще особого значения новому способу соединения.

Почему он не запатентовал свое изобретение тогда же, в 1881 г.? Исследователи, пытавшиеся ответить на этот вопрос, выдвигали различные причины. Наиболее существенным была та, что «процесс еще не был готов для внедрения». Изучая историю русского изобретательства, мы обнаружили, что занятие это было чрезвычайно разорительным. В условиях царской России после 1861 г. изобретатели в большинстве своем не получали доходы от внедрения передовой техники и если не имели иных средств к существованию, поступали на государственную службу или на работу в частные компании. Такая же судьба постигла Н.Н. Бенардоса. С 1870 г. по 1880 г. земельный надел, полученный изобретателем от матери, систематически уменьшался, а в 1882 г. Бенардос уже не числится в списках землевладельцев. В 1885 г. появилось объявление о продаже ипотечным банком усадьбы «Привольное». Вероятно деньги Бенардос использовал для оформления привилегии. Заявку на привилегию России на способ соединения и разъединения металлов электрическим током он подал в 1885 г. (единолично). Спустя нескольких месяцев Бенардос начинает подавать заявки на зарубежные патенты, совладельцем которых (именно совладельцем – подлинное авторство вообще не требовалось указывать) был записан купец-инженер С.А. Ольшевский, владелец доходных домов в С.-Петербурге. Они беспрепятственно получили патенты в США и в странах Европы, в том числе во Франции. Патент Бенардоса и Ольшевского О. Меритан не опротестовывал и, весьма вероятно, что к тому времени лишился прав на патент, поскольку не внедрил его в промышленность. Заявок на патенты в другие страны он вообще не подавал.

Триумфальное шествие «электрогегфеста» описано многими авторами. Однако патентом Бенардоса и созданными им в 1885 году в Петербурге товариществом «Электрогегфест» (по эксплуатации и внедрению электросварки и других изобретений) и первой в мире показательной мастерской сварочных работ по его способу завладели авантюристы, которые окончательно разорили изобретателя. К началу

1890-го года дуговая сварка была внедрена на сотне предприятий Великобритании, Германии, Франции, США, России и других странах. На электротехнической выставке в Петербурге в 1892 г. «электрогефест» был удостоен высшей награды – золотой медали; в 1899 г. Петербургский электротехнический институт присвоил Бенардосу звание почетного инженера-электрика.

В конце 1890-х годов здоровье изобретателя ухудшилось, он долго лечится в Москве, живет у сына, возвращается в Петербург. В архивах и библиотеках были найдены материалы о бедственном материальном положении выдающегося изобретателя. Временами тяжело больному Николай Николаевичу не за что было купить хлеб, но как только у него появились деньги, он тратил их на приобретение железа и инструментов и принимался за изготовление очередной модели своих разнообразных изобретений. Официальных сведений о нём больше нет. По утверждению К.К. Хренова (написавшего со слов сына изобретателя), М.А. Шателена, (лично хорошо знавшего самого Н.Н. Бенардоса), изобретатель сварки последние годы жил в Петербурге, где и скончался. В 1950 году историк электротехники Б.Н. Ржонсницкий нашел документы о том, что Н.Н. Бенардос в 1900 году он отправил заявку на патент на конструкцию стальной бороны из Киева. Б.Н. Ржонсницкий нашел в областном архиве запись о кончине Бенардоса в Фастове (Киевской губернии) в 1905 году. По заметкам в дневнике и акварельным рисункам Бенардоса нами было найдено место, где с 1899 года располагалась мастерская изобретателя в селе Бышев вблизи Фастова, проведены раскопки и найдены образцы дуговой сварки и резки, аккумуляторные пластины, утварь.

Собранные и систематизированные материалы об истории изобретения первого способа электросварки, анализ развития, оценка современниками и значение работ Н.Н. Бенардоса были поданы от УССР в комиссию ЮНЕСКО с предложением о внесении столетнего юбилея в Календарь памятных дат за 1981 год. Не дожидаясь положительного решения ИЭС им. Е.О. Патона развернул работу по увековечению жизни и деятельности выдающегося отечественного изобретателя. Для того чтобы раз и навсегда закрыть вопросы кто такой Бенардос, когда и что он дал научно-техническому прогрессу, следовало задействовать все средства информации. Были разработаны проекты памятников и музеев в г. Фастове, селе Бенардосовка (ныне с. Мостовое) Николаевской области и пгт. Лух Ивановской области. Министерство связи удовлетворило ходатайство Б.Е. Патона и выпустило почтовую марку и специальные конверты, и информация о Бенардосе вошла в филателистические каталоги мира. Снятый по нашему сценарию фильм демонстрировался много раз по центральному телевидению. Правда, несмотря на все способы информации, в том числе и публикации, биографию и обстоятельства изобретения до сих пор искажают. Музей Н.Н. Бенардоса удалось создать в Переяслав-Хмельницком Киевской области (6 отдельных залов площадью более 200 кв. м) и отдельную экспозицию в Фастове. К сожалению, Николаевский обком партии и облисполком не приняли никакого решения

о создании памятника и музея на родине изобретателя и отправленные туда детали памятника (в том числе бронзовый бюст), личные вещи, инструменты пропали.

Горячо и энергично поддержал идею мероприятий «по Бенардосу» первый секретарь Ивановского обкома КПСС В.Г. Ключев. Он согласился со всеми нашими предложениями и на первом же совещании дал поручения руководителям соответствующих отделов обкома и облисполкома о проведении торжественного заседания, научной конференции и, главное, о сооружении памятника, создании музея и ремонте дороги Иваново – Лух. Памятник (чтобы не добиваться разрешения Москвы) решено было назвать памятным знаком. Времени оставалось в обрез, но проект и рабочие чертежи уже были готовы. Основным элементом памятника является эллипс, разорванный сверху и похожий на спираль – символ развития; в одном из фокусов эллипса помещен бронзовый бюст Бенардоса, отлитый в Киевских мастерских, в другом – «искра» (пентаэдр, на гранях которого размещены пятигранные разновысокие призмы из титана), сваренная в ИЭС им. Е.О. Патона. Эллипс из нержавеющей стали и монтаж памятника делался заводом Ивтекмаш под нашим руководством. На лицевой стенке эллипса наплавлен список основных изобретений Бенардоса, на обратной – фамилии авторов памятника. К созданию музея подключились сотрудники Ивановского краеведческого музея и большой энтузиаст местный краевед Ф.М. Волков. (К сожалению, отдельного помещения не нашлось и пришлось потеснить Лухский краеведческий музей). Гордостью Лухского музея Н.Н. Бенардоса являются подлинные чертежи Бенардоса, полученные от Н.С. Бенардос. В музее находится и фотография Николая Николаевича 1902 г., подаренная им сыну во время пребывания в Москве. В ИЭС им. Е.О. Патона были реконструированы образцы изобретений, которые вошли в экспозицию.

Мероприятия в Иваново и Лухе состоялись в начале июня 1981 года, через три недели после окончания запланированных мероприятий на Киевщине. На родину электросварки для участия в торжественном собрании, конференции и открытии памятника и музея прибыли академики А.П. Александров, Б.Е. Патон, И.К. Походня, Д.А. Дудко, космонавт В.Н. Кубасов, другие известные ученые, общественные деятели. В течение трех дней гости отдавали дань памяти выдающемуся изобретателю. Однако, несмотря на то, что почти всё задуманное по увековечению деятельности Бенардоса удалось реализовать (кроме мемориала в Николаевской области, дальнейшего развития Лухского музея Бенардоса в музей истории электротехники и родственных технологий и включения Луха в туристические маршруты Золотого кольца России) оставалось опасение, что Бенардос опять будет забыт. И на прощальном ужине у В.Г. Ключева после одобрительного тоста о выполненной работе возникла идея проводить Бенардосовские чтения, поддержанная всеми академиками. Было решено оформить такое мероприятие в Госкомитете по науке и технике СССР и проводить его через каждые два года по очереди в Иваново, Киеве и Николаеве. Думается, что пока будут проводиться такие конференции, о

Бенардосе будут вспоминать хотя бы специалисты (Особенно, если возобновит работу секция истории естествознания и техники).

К сожалению, несмотря на то, что 1981 год был объявлен «Годом изобретения электросварки Бенардосом», СССР, как страна заявитель, не смогла найти средства для проведения полномасштабной Международной конференции. Научные журналы большинства Европейских стран опубликовали наши статьи об истории создания электросварки. А в 1985 году Международная конференция, посвященная столетию получения Бенардосом первого в мире патента на электросварку, была организована в Великобритании (Там патент выдали раньше, чем привилегию в России).

Николай Николаевич Бенардос был одним из мировой когорты изобретателей-энциклопедистов XIX века. Одни из его проектов (электромагнитная пушка, корабельный винт с поворотными лопастями, локальная гальванизация поверхностей, рёберная пуля, гидроэлектростанция и многие другие) опередили своё время, другие сразу же получили развитие и эффективно использованы для решения проблем научно технического прогресса. Н.Н. Бенардос награждался медалями выставок, он был избран действительным членом Императорского русского технического общества. 7 декабря 1899 г. ему вместе с А.С. Поповым (изобретатель радио) и А.Н. Ладыгиным (изобретатель лампы накаливания) Петербургским электротехническим институтом было присвоено звание почетного инженера-электрика. На Первом электротехническом съезде (Российском), который состоялся 27 декабря 1899 г. Н.Н. Бенардос присутствовать не мог из-за болезни. На открытии председатель съезда Н.П. Петров об изобретении электросварки сказал: «...Бенардос достиг раньше, чем кто-либо практически примененного в больших размерах спаивания и сваривания металлов».

## **Работы института электросварки им. Е.О. Патона в области сварки трением**

2006 – юбилейный год для сварки трением (СТ). Исполняется 50 лет этому способу сварки давлением, а в более широком смысле – совокупности технологических процессов, использующих нагрев трением для соединения различных материалов.

Именно 1956 год считается отправной точкой в развитии сварки трением, несмотря на то, что идея об использовании энергии трения для сварки металлов возникла еще в конце XIX века. Мало кому известно, что первое упоминание о работах по сварке трением в Украине относится к 1952 году [1]. Академиком К.К. Хреновым приведены примеры практического использования механической сварки, при которой энергия, выделяющаяся при трении, используется для соединения металлов.

В настоящее время развитие способов сварки трением происходит в следующих направлениях:

- исследование свариваемости и создание технологий соединения новых материалов в однородном и разнородном сочетаниях, в том числе, композиционных, керамических материалов, различных сплавов на основе никеля, кобальта, циркония, титана, алюминия, магния и других металлов, обеспечивающих уникальные сочетания удельной прочности, износостойкости, жаростойкости, жаропрочности.

- совершенствование сварочного и вспомогательного оборудования, конструирование технологической оснастки; создание высокоэффективных компьютеризованных систем управления процессом сварки и диагностики качества соединений, технических средств, обеспечивающих заданную взаимную ориентацию заготовок после сварки, механическое удаление образующегося усиления.

Основным направлением исследовательских работ, проводимых в ИЭС, является изучение свариваемости и создание технологических основ соединения различных металлов и трудносвариваемых сплавов в однородном и разнородном сочетаниях.

При получении разнородных соединений возникают проблемы, связанные с различием теплофизических свойств свариваемых материалов. Наибольшие трудности возникают при сварке материалов, образующих при совместном нагреве интерметаллидные соединения.

При изучении кинетики образования интерметаллидной фазы в биметаллических соединениях (алюминия с медью и сталью, титана со сталью и никелевыми сплавами) установлен эффект ускорения массопереноса в условиях сварки трением. Деформационный цикл при СТ создает высокую плотность дефектов кристаллической решетки, поэтому ре-

альные скорости диффузии при сварке трением соизмеримы с таковыми для технологических процессов с импульсным приложением нагрузки. Методами электронной микроскопии соединений и поверхностей изломов установлено, что латентный период образования дисперсных выделений интерметаллидных фаз в местах возникновения и разрушения фрикционных связей практически отсутствует. Время формирования интерметаллидного слоя на этих участках составляет менее 1 с и, как правило, превышает длительность процесса сварки.

При сварке биметаллических соединений наблюдается смещение поверхности трения, и формирование переходного слоя, что затрудняет диспергирование и вытеснение из стыка поверхностных слоев веществ и образующейся интерметаллидной прослойки. Использование метода радиоактивных изотопов при изучении поведения контактирующих поверхностных слоев при СТ биметаллических соединений позволило установить, что первоочередной задачей заключительной стадии процесса сварки является расширение зоны сдвиговой деформации и вовлечение в эту зону переходного слоя.

На основе проведенных исследований разработаны принципы управления процессом формирования биметаллических соединений, в развитие которых предложен способ сварки трением с регулируемым торможением вращения. Способ отличается программируемым изменением частоты вращения и осевого усилия в процессе нагрева и формирования соединения (проковки). Эффективность способа основана на максимально быстром нагреве зоны соединения и интенсификации сдвиговой деформации по поверхности первоначального контакта на стадии проковки.

Проведены комплексные исследования формирования соединений при сварке трением с регулируемым торможением различных сочетаний материалов: алюминия с медью; алюминия и его сплавов со сталями аустенитного и перлитного классов; титана и его сплавов с нержавеющейми сталями; жаропрочных сталей и никелевых сплавов с конструкционными сталями; меди с композиционными материалами на медно-вольфрамовой основе; жаропрочных никелевых сплавов деформируемых (ЭИ437Б, ЭИ698ВД) и полученных методом металлургии гранул (ЭП741НП) с содержанием  $\gamma'$ -фазы 15...60% в однородном и разнородном сочетаниях; алюминиевых сплавов, полученных методами быстрой кристаллизации и интенсивной пластической деформации.

Например, при СТ с регулируемым торможением вращения качественные соединения заготовок диаметром 15...55 мм (рис. 1,а,б) обеспечиваются при давлении 70...120 МПа, что позволяет значительно расширить технологические возможности сварочного оборудования. Биметаллические переходники медь-алюминий в указанном диапазоне диаметров получены на одной сварочной установке – модернизированной машине МСТ-2001.

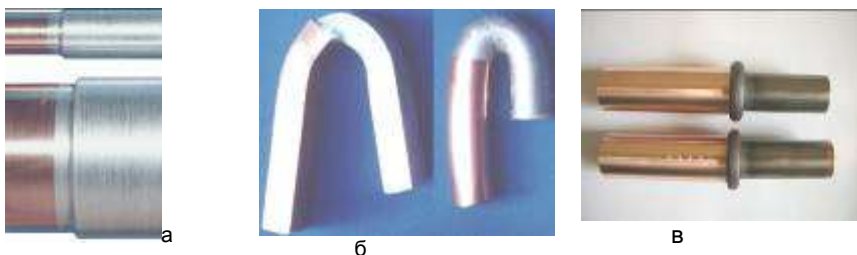


Рис. 1. Переходники медь-алюминий (а), образцы после испытаний на ударный загиб (б), соединения медь – сплав W-Cu-Ni

Положительные результаты получены при СТ меди с дисперсно-упрочненным частицами хрома KM на медной основе, а также вольфрам-медным (**70%W+26%Cu+4%Ni**) псевдосплавом, полученным методом порошковой металлургии (рис.1,в). Прочность сварных соединений на разрыв соответствует прочности меди в отожженном состоянии.

Успешно проводятся исследования по сварке трением сплавов на интерметаллидной основе, в частности  $\gamma$ -алюминидов титана. Решение проблемы сварки сплавов на основе алюминидов титана и соединения их с другими материалами позволит обеспечить изготовление деталей из жаропрочных материалов нового класса для создания авиационных и автомобильных двигателей.

Перспективным направлением применения сварки трением при ремонте является заварка дефектных участков конструкций вращающейся расходуемой вставкой.

Этот технологический процесс может найти использование при ремонте конструкций из высокопрочных алюминиевых сплавов благодаря минимизации сварочных напряжений и деформаций, которая обеспечивается за счет благоприятного термического цикла при сварке трением.



Рис. 2. Имитация заваренного дефекта в пластине сплава 1420 сваркой трением вращающейся расходуемой вставкой

Для реализации технологии сварки трением с регулируемым торможением вращения необходимо расширение технологических возможностей сварочного оборудования за счет создания возможности программирования динамики изменения частоты вращения и осевого усилия. Созданы машины, позволяющие в зависимости от конкретных условий реализовать режимы сварки, при которых обеспечиваются термомодеформационные условия образования соединения, характерные для конвенционной, комбинированной и инерционной СТ.

#### Литература

1. Хренов К.К. Сварка, резка и пайка металлов. – Киев: Укр. отд. МАШГИЗА. – 1952. – 384 с.



УДК 621. 791:061.3

В.А. МАРТЫНОВ, д.т.н., проф., А.Н. КОРОЛЁВ, к.т.н., проф.  
(ИГЭУ)

## Наследие Российских учёных в электротехнологических процессах

Основу электротехнологических процессов представляет непосредственное воздействие электрической энергии на технологическую среду. Причём взаимосвязь многофакторности воздействия электрического тока на технологическую среду с совершенствованием средств реализации этого воздействия просматривается исторически, начиная с эпохального открытия Василием Владимировичем Петровым электрической дуги в 1802 году. Сделав это открытие и предсказав дальнейшие способы использования электрической дуги в практических целях, он не мог полностью реализовать их из-за отсутствия необходимых источников электрической энергии. Потребовалось ещё более 80 лет, прежде чем эти источники были созданы, и появилась возможность в полной мере оценить полученный В.В. Петровым результат.

Гениальность Николая Николаевича Бенардоса, начавшего научно-изобретательскую деятельность на территории нынешней Ивановской области, как раз и заключалась в широте охвата проблем, с которыми он встречался. Если для получения электрической дуги нужен источник энергии, то его надо создать. Этот этап изобретательской деятельности Н.Н. Бенардоса отражается следующими заявками на изобретения: «Способ изготовления свинцового порошка для аккумуляторов», «Свинцовая губка для аккумуляторов», «Горизонтальный аккумулятор», «Гофрированный аккумулятор», «Губчатые аккумуляторы и способ изолировки аккумуляторных пластин пемзой», «Регулятор тока для аккумуляторов». И Н.Н. Бенардос создаёт аккумуляторный источник, позволяющий не только длительно удерживать дугу, но и регулировать ток в ней, что даёт возможность исследовать её свойства и рекомендовать её для электрической сварки. Получив, таким образом, совершенно новый способ технологии изготовления и ремонта изделий из металла, Н.Н. Бенардос сделал революцию в промышленном производстве, на многие годы, определив электросварку, как один из важнейших компонентов технологического процесса практически во всех отраслях промышленности. Причём, необходимо отметить, что Н.Н. Бенардос не ограничился простым открытием электросварки. Его пылкий ум продолжал работать над её совершенствованием, над расширением сфер её применения, что во многом определило направления последующих инженерных решений, в том числе и в наше время. Так в списке его более чем двухсот официально зарегистрированных изобретений числятся и такие: «Автоматы для сварки металлургическим электродом», «Автоматы для сварки угольным электродом (несколько систем)», «Сварка косвенно действующей дугой, горящей между двумя или несколькими электродами», «Дуговая сварка в струе защитно-

го газа», «Магнитное управление сварочной дугой», «Контактная точечная электросварка».

Продолжая заложенные российскими учёными традиции в области электротехнологии на кафедре «Теоретических основ электротехники и электротехнологии» ИГЭУ многие годы занимались глубоким изучением взаимодействия электрического тока с окружающей средой и совершенствованием электротехнического и электротехнологического оборудования.

Одной из крупных составных частей работы по этим направлениям являются теоретические исследования и прикладные разработки в технологии сварки и оборудования для неё. Так в восьмидесятых годах решалась проблема электромагнитного формирования потолочных швов.

Научно-исследовательская работа по автоматизации сварочных автоматов и роботов базировалась на создании регулируемого электропривода переменного тока для подачи сварочной проволоки в соответствии с показателями сварочного процесса. Задача обеспечения широкого диапазона изменения скорости при требуемой плавности работы на низких скоростях была решена применением многофазного асинхронного электродвигателя, работающего в замкнутой системе управления [1]. При этом в связи с неординарностью многофазного асинхронного электродвигателя как объекта управления был разработан математический аппарат приведённых спектральных векторов [2] и метод модульно-фазового управления электроприводом [3], позволяющий значительно упростить его схему. Одновременно многофазность электропривода дала возможность создать более надёжную и компактную установку.

Основной проблемой при создании тренажёра для электросварщиков была получение информации о положении электрода во время выполнения обучаемым тренировочного задания. При этом оказался неприемлемым широко используемый при построении систем автоматического управления объектами подход с установкой датчиков по отдельным координатам. Наиболее рациональным для тренажёра является применение электромагнитных матриц, позволяющих по наведённым ЭДС от источника электромагнитного поля, жёстко связанного с электродом, определять как его отклонение от заданной траектории, так и скорость передвижения по ней [4].

В настоящее время на кафедре широко поставлена работа по математическому моделированию статики и динамики сварочных трансформаторов и сварочных источников на их основе. Электромагнитные процессы в сварочных трансформаторах существенно отличаются от процессов в силовых трансформаторах. Однако до настоящего времени анализ режимов работы сварочных трансформаторов, как правило, проводился теми же методами, что и силовых трансформаторов, с использованием схемы замещения и символического метода. Очевидно, что такой подход базировался на довольно грубых допущениях и неадекватен возможностям современной вычислительной техники. Поэтому задачу расчёта и оптимизации сварочных трансформаторов было предложено решать наиболее современными методами переменных состояния и зубцо-

вых контуров. На основе этих методов была разработана универсальная математическая модель [5], позволяющая анализировать статические и динамические процессы в сварочных трансформаторах самых разнообразных конструкций.

В нашем регионе широчайшее применение электросварки столкнулось с недостаточным количеством и качеством подготовки инженерных кадров для организации сварочного процесса. Именно поэтому региональным руководством была поддержана инициатива ИГЭУ по открытию новой специальности «Электротехнологические установки и системы» со специализацией «Электросварочные установки и системы». Причём кафедры «Теоретические основы электротехники и электротехнологий», на которой осуществляется подготовка специалистов, организовала учебный процесс таким образом, чтобы он строился не только на изучении основ конструирования и эксплуатации электротехнологических и электросварочных источников питания и современных способов управления ими, но и на глубоком освоении технологических аспектов различных видов электротехнологий и электросварки. То есть было гармонизировано изучение сочетаний требований конкретных технологий со способами их реализации с помощью источников электропитания и управления ими. Это позволило в 2006 году осуществить первый выпуск грамотных и высококвалифицированных инженеров, количество заявок на трудоустройство которых, превзошло количество выпускников.

#### Литература

1. **Королёв А.Н., Голубев А.Н., Куликов К.В.** Многофазный частотно-управляемый электропривод / Материалы науч.-техн. конф. «Бенардосовские чтения». – Иваново, 1983.
2. **Королёв А.Н.** Аппарат приведённых спектральных векторов для анализа и синтеза многофазных асинхронных электромеханических систем / Межвуз. сб. тр. «Исследование электромагнитных процессов в энергетических установках». – Иваново, 1988. – 8с.
3. **Королёв А.Н.** Принцип модульно-фазового управления многофазными асинхронными двигателями / Межвуз. сб. тр. «Методы анализа и синтеза систем управления многодвигательными электроприводами». – Иваново, 1985. – 5с.
4. **Korolev A.N., Nikiforov A.P., Motovilov A.S.** Induction indicator of location in a limited volume. Actual problems of electrical drives and industry automation. – Tallinn, 2003. – 2p.
5. **Королёв А.Н. Мартынов В.А.** Универсальная математическая модель сварочного трансформатора / Тр. Всерос. конф. «Актуальные проблемы ресурсо- и энергосберегающих технологий». – Екатеринбург, 2006. – С. 410-413.

## Устойчивость горения сварочной дуги

Специфической особенностью сварочной дуги переменного тока, является то, что ток дважды за период, переходит нулевое значение, т.е. дуга дважды за период гаснет и зажигается. Эта особенность накладывает определенные требования к источнику питания и на термодинамические условия горения дуги.

Обычно, в качестве источника питания используется сварочный трансформатор, работающий на промышленной частоте. Следовательно, для обеспечения надежного повторного зажигания и устойчивого горения должны быть согласованы динамические параметры источника питания и сварочной дуги [1, 2, 3]. При неизменных условиях горения стабильность повторного зажигания определяется свойствами источника питания, т.е. скоростью восстановления напряжения на дуговом промежутке.

Анализ устойчивости, стабильности и надежности повторного зажигания сварочной дуги требуют построения математической модели всей системы, одновременно учитывающей электрические и тепловые процессы, которые оказывают определяющее влияние при повторном возбуждении дуги. Учет многообразия факторов, влияющих на тепловые процессы в дуге и динамических свойств источника питания, приводит к анализу системы нелинейных дифференциальных уравнений. Попытка аналитического расчета характеристик дуги неизбежно сталкивается с серьезными допущениями, что приводит к приближенной математической модели [1, 2]. Трудности, возникающие при совместном рассмотрении процессов в столбе дуги и в источнике питания, требуют поиска упрощенного метода решения поставленной задачи. Наиболее распространенным, в настоящее время, является метод раздельного рассмотрения процессов в дуге и в источнике питания. Такой анализ сложных процессов позволяет учесть динамические свойства сварочного оборудования, которые наиболее полно раскрываются в процессе восстановления напряжения на дуговом промежутке вблизи перехода сварочного тока через нулевое значение.

В дальнейшем будем считать тепловые процессы в дуговом промежутке стабильными и характеризующимися постоянной мощностью теплоотвода  $P_{om}$  и теплосодержания  $Q_o$  на единицу длины дуги, т.е. неизменной постоянной времени дуги

$$\theta = \frac{Q_o}{P_{om}}$$

В динамическом режиме источник питания можно представить цепью первого порядка, содержащей эквивалентные параметры  $R$ ,  $L$ . В процессе повторного возбуждения сварочной дуги можно считать, что вос-

становление электрической прочности дугового промежутка растет от какого-то первоначального значения по экспоненциальному закону. При определенном значении возвращающейся составляющей восстанавливающегося напряжения источник должен обладать скоростью восстановления напряжения больше определенного критического значения. В противном случае дуга не загорится. Нижний предел этой величины определяется напряжением зажигания дуги.

Скорость нарастания восстанавливающейся прочности дугового промежутка определяется инерционностью тепловых процессов, т.е. тепловой постоянной сварочной дуги и динамическими свойствами источника питания. Динамические свойства сварочной дуги выявлены не полностью и оптимальные меры воздействия на нее пока не найдены. В дальнейшем будем считать, что они неизменные. Следовательно, при принятых допущениях, процесс повторного возбуждения определяется динамическими свойствами источника питания.

Для оценки динамических свойств источника удобно использовать индикаторный метод. Он основан на использовании теоремы Тевенена, сущность которого заключается в том, что восстанавливающееся напряжение по величине и форме совпадает с напряжением, которое необходимо приложить к дуговому промежутку, чтобы вызвать протекание в ней тока, равному разрываемому.

При работе сварочного трансформатора в элементах возникают вихревые токи, оказывающие существенное влияние на процесс восстановления напряжения. Влияние этих токов в схеме замещения трансформатора, могут быть учтены дополнительным короткозамкнутым контуром с эквивалентными параметрами  $R_B$  и  $L_B$ , индуктивно связанным со вторичной обмоткой трансформатора. Такая упрощенная схема позволяет рассчитать свободную составляющую переходного процесса вызванного повторным зажиганием дуги и определить основные параметры, определяющие надежность повторного возбуждения [1,2].

Как следует из теории электрических цепей, скорость нарастания напряжения на дуговом промежутке будет определяться постоянной времени источника питания, причем, желательно чтобы в момент повторного зажигания источник имел наименьшую индуктивность.

Таким источником с переменной индуктивностью можно считать нелинейный источник питания сварочной дуги [4], который представляет собой трансформатор с переменным коэффициентом трансформации. Его вторичная обмотка состоит из двух секций. Причем, первая секция размещена на основном участке магнитопровода и в ней наводится синусоидальная эдс. Она определяет рабочий режим горения сварочной дуги. Вторая секция расположена на насыщающемся участке магнитопровода и в ней наводится импульсная эдс, максимальное значение которой совпадает с моментом перехода сварочного тока через нуль, что эквивалентно использованию поджигающего импульса. Таким образом, в момент повторного зажигания на дуговой промежуток прикладывается повышенное напряжение при неизменном эффективном значении выходно-

го напряжения, что способствует надежному повторному зажиганию, устойчивому и эластичному горению сварочной дуги.

Оценка устойчивости горения определялась по вольт-амперным характеристикам сварочной дуги  $u(i)$  (рис. 1) и по проекции фазовой траектории  $u = f(di/dt)$  (рис. 2). Количественная оценка скорости нарастания проводилась по проекции фазовой траектории.



Рис. 1. Вольт-амперные характеристики сварочной дуги:  
а – синусоидальный источник питания; б – нелинейный источник питания



Рис. 2. Проекция фазовой траектории сварочной дуги:  
а – синусоидальный источник питания; б – нелинейный источник питания

Из сравнения вольт-амперных характеристик и фазовых траекторий следует, что сварочная дуга, питаемая от нелинейного источника питания горит значительно устойчивее, чем от серийного сварочного трансформатора.

Таким образом, увеличению устойчивости горения дуги, питаемой от нелинейного источника питания, способствуют два основных фактора:

- 1) увеличение мгновенного значения напряжения зажигания дуги за счет кратковременного импульса;
- 2) уменьшение эквивалентной индуктивности трансформатора в момент повторного зажигания.

### Литература

1. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. – М.: Машиностроение, 1970.
2. Патон Б.Е., Лебедев В.К. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки. – М.: Машиностроение, 1966.
3. Лесков Г.И., Заруба И.И. Пути повышения устойчивости высокоэффективных сварочных дуг // Автоматическая сварка. – 1959. – №12.
4. Новиков О.Я., Мякишев В.М. Нелинейный источник питания сварочной дуги // Автоматическая сварка. – 1971. – №11.

## Исследование устойчивости сварочной дуги с помощью прямого метода Ляпунова

Анализ динамической системы электрической цепи – сварочной дуги, предлагается провести с использованием приближенного представления процесса в виде двух движений: медленного и быстрого. В качестве медленного движения для цепи переменного тока рассматривается периодический режим. Для этого приближенно определяются значения тока и напряжения как функций времени с учетом токоограничения от дуги, имеющего в электросварочных цепях существенное значение, а также отыскиваются условия устойчивости этого режима. Затем, используя полученные при анализе периодического режима результаты, вычисляется остаточная проводимость столба дуги и определяются параметры эквивалентной автономной системы, в которой проводится анализ процессов после перехода тока через нулевое значение, то есть исследование повторного зажигания дуги. Этот этап может рассматриваться как быстрое движение, так как процессы в нуле тока, скорость которых определяется постоянной времени дуги и постоянной времени цепи, вычисленной с учетом остаточного сопротивления дуги, занимают малую часть периода промышленной частоты. Исследование вопроса о повторном зажигании дуги при переходе тока через нулевое значение проводится с помощью анализа устойчивости в большом эквивалентной автономной системы. Этот этап может быть использован и для определения допустимых возмущений в цепи со сварочной дугой постоянного тока.

Если представить дугу статической вольт-амперной характеристикой, то есть принять постоянную времени дуги равной нулю, то уравнение цепи будет описывать симметричные колебания в существенно нелинейной системе.

Пусть статическая вольт-амперная характеристика имеет вид

$$f(i) = U_0 \operatorname{sign}(i) + R_d i, \quad (1)$$

что соответствует при  $R_d > 0$  возрастающей зависимости напряжения от тока, при  $R_d < 0$  – падающей. Случай  $R_d = 0$  относится к дуге, имеющей жесткую статическую характеристику.

Методом гармонической линеаризации получаем зависимость амплитуды тока и угла сдвига между векторами тока и ЭДС от параметров цепи и дуги:

$$I_m = \frac{-\frac{4}{\pi} U_0 (r + R_d) + \left[ \frac{16U_0^2 (r + R_d)}{\pi^2} - \left( \frac{16U_0^2}{\pi^2} - E_m^2 \right) \left( L^2 \omega^2 + (r + R_d)^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}}}{L^2 \omega^2 + (r + R_d)^2}$$

$$\varphi = -\arctg \frac{\omega L I_m}{I_m (r + R_d) + 4U_0 \pi^{-1}}, \quad (2)$$

где  $r$ ,  $L\omega$  – активное и индуктивное сопротивление цепи,  $E_m$  – амплитудное значение ЭДС,  $\pi=3,14$ .

Периодический режим горения дуги, определяемый формулами (2), будет иметь место, если выполняется условие положительности напряжения на дуге при максимуме тока  $U_0 + I_m R_d > 0$  и критерий устойчивости.

Критерий для рассматриваемого примера имеет вид

$$r + R_d + \frac{2}{\pi} \frac{U_0}{I_m} > 0. \quad (3)$$

По результатам анализа периодического режима определяется остаточная проводимость  $g_0$ , то есть значение проводимости в нуле тока. Значение  $g_0$  остаточной проводимости при использовании модели Майра равно:

$$g_0 = 2\omega^2 \theta^2 I_m^2 \frac{1}{N(1 + 4\omega^4 \theta^4)}, \quad (4)$$

где  $\theta$ ,  $N$  – постоянная времени дуги и мощность теплоотвода от дуги

Полученное значение  $g_0$  сравнивается с критическим значением остаточной проводимости  $g_{кр}$ , определяемым по результатам анализа устойчивости в большом автономной системы. Уравнения электродуговой системы для анализа устойчивости в большом записываются для цепи, имеющей ту же конфигурацию и значения элементов, что и исходная. Значение э.д.с. принимается неизменным во времени и равными  $E_n = E_m \sin \varphi$ , где  $\varphi$  определяется по формуле (2). В заданной таким образом электродуговой автономной системе находятся равновесные режимы и определяются области притяжения этих режимов. Значение проводимости, при котором сепаратриса, разделяющая режимы горения и гашения, пересекается с осью  $i=0$ , является критическим. Если  $g_0 > g_{кр}$ , то будет наблюдаться повторное зажигание, если  $g_0 < g_{кр}$ , то будет иметь место гашение дуги. Критическое значение проводимости, определяемое прямым методом Ляпунова с использованием энергетической функции, равно:



$$g_{кр} = \frac{E_m \sin \varphi - \sqrt{E_m^2 \sin^2 \varphi - 4Nr}}{r \left( E_m \sin \varphi + \sqrt{E_m^2 \sin^2 \varphi - 4Nr} \right)} \cdot \exp \left( \frac{L \left( E_m \sin \varphi - \sqrt{E_m^2 \sin^2 \varphi - 4Nr} \right)^2}{8\theta r^2 N} \right). \quad (5)$$

Совместное рассмотрение критерия устойчивости в малом периодического режима (3) и условия повторного зажигания в нуле позволяет более обоснованно судить о влиянии параметров цепи и дуги на устойчивость режима горения сварочной дуги. Так, согласно критерию (3) индуктивность оказывает положительное влияние на устойчивость периодического режима медленного движения. Влияние индуктивности на быстрое движение в зоне нуля тока определяется как через множитель в показателе экспоненты в выражении (5), так и через значение угла  $\varphi$ . В области достаточно больших значений индуктивности увеличение  $L$  приводит к ухудшению условий повторного зажигания. Это связано с тем, что при  $L \rightarrow \infty, g_{кр} \rightarrow \infty$ . Если  $L$  мало, то  $\varphi \rightarrow 0, E_n \rightarrow 0$  и режим горения существовать не может. Таким образом, может быть определен допустимый диапазон индуктивности по условиям устойчивости режима горения дуги в цепи переменного тока.

УДК 621.791.75

А.П. СТЕПАНОВ, к.т.н., доц., зав. каф., В.Н. САЛОМАТОВ, д.ф.-м.н., проф.,  
М.В. ЛОПАТИН, к.т.н., доц., Н.Ф. БУДУНОВ, к.т.н., доц.  
(Иркутский государственный университет путей сообщения,  
кафедра теоретических основ электротехники)

## **О возможности контроля и управления процессом электродуговой сварки на основе гармонического анализа тока**

В сварочном производстве наибольшее распространение получила сварка плавлением, использующая электрическую дугу. Большое промышленное применение получила сварка под флюсом. В процессе этой сварки дуга находится под слоем флюса, который затрудняет наблюдение за формированием шва. Поэтому важнейшей проблемой электросварки является автоматизация управления электрической дугой.

Качество электродуговой сварки существенно зависит от длины дуги, силы тока, материала и размеров сварочных электродов, состава и давления газа и других факторов. Изменение длины сварочной дуги, силы тока и т.д. могут быть использованы при автоматическом управлении процессом сварки, если мгновенно определяется состояние дуги.

Известная практика выбора и реализации режимов электросварки учитывает в каждом частном случае различные формы сочетания характерных параметров процесса (напряжение, сила и плотность тока и т.д.), в основе выбора которых лежит богатый опыт выполнения сварочных работ с участием различных материалов. Однако, при всём многообразии способов и приемов сварки, всем им присущ один общий недостаток – отсутствие возможности обобщенной мгновенной оценки качества электросварки с целью ее контроля и улучшения непосредственно в ходе процесса электросварки [1]. Не используется широко известный в электротехнике и радиотехнике метод гармонического анализа [2.3].

Предлагаемый способ контроля на основе гармонического анализа тока должен мгновенно давать интегральную оценку качества процесса электросварки, что позволит управлять процессом электросварки в реальном масштабе времени и оптимизировать его.

Сущность способа заключается в использовании способности частотного спектра электрического тока электросварки интегрально характеризовать плазменный процесс электросварки.

При этом электрическая дуга электросварки представляется в виде нелинейного элемента, который является генератором токов высших гармоник при подаче на него напряжения любой формы, например, синусоидального или постоянного. Параметры этого нелинейного элемента зависят от таких факторов процесса электросварки, как марки электродов и свариваемых материалов, чистоты свариваемых поверхностей, и других факторов, связанных с взаимным положением материалов, а также с окружающей средой. Стандартным способом осуществляется разложение тока электросварки на гармоники, и из полученного спектра тока исключаются гармоники, связанные с напряжением, подаваемым на электрод. Конечный результат – выделенная часть спектра тока, характеризующая электрическую дугу по перечисленным выше основным факторам.

Таким образом, для конкретных пар «электрод-материал» экспериментально создаётся эталонная база частотных спектров, характеризующих оптимальный процесс электросварки пар свариваемого материала разнообразного сочетания, что в дальнейшем позволяет контролировать процесс электросварки и управлять им в реальном масштабе времени на различных объектах сварки. Критерии оптимальности процесса электросварки устанавливаются в зависимости от поставленных целей.

На способ контроля и управления процессом электросварки и структурную схему его реализации была подана заявка на получение патента (регистрационный № 2005136650 от 24.11.2005 г.).

## Литература

1. **Справочник** «Сварка. Резка. Контроль»; Под ред. Алёшина Н.П. – М.: Машиностроение, 2005. – 437с.
2. **Гольдман С.** Гармонический анализ, модуляция и шумы. – М.: Издательство иностранной литературы, 1951. – 408с
3. **Зевеке Г.В.** и др. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

УДК 621. 791. 75.

А.П. ЛИТВИНОВ, к.т.н., доц.  
(Азовский морской институт ОНМА)

## Некоторые проблемы и пути развития способов управления свариваемостью при дуговой сварке

Известно, что в то время, когда Н.Н. Бенардос нашел пути получения удовлетворительного сварного соединения, имелась одна возможность управлять дуговым процессом плавления металла – изменением силы тока [1] (О плотности энергии навряд ли можно говорить, так как диаметр угольного электрода был намного больше, чем требовалось для ограничения площади активного пятна). Однако, вскоре Н.Г. Славянов (1888 г.), О. Кьельберг (1904 г.) и ряд других первопроходцев сварки использовали для улучшения качества металлургический фактор – флюсы и покрытия при сварке плавящимся электродом [2, 3]. Одновременно стало возможно изменять плотность энергии, вводимой в сварочную ванну. С того времени, на протяжении более ста лет этот фактор активно используется при разработке новых процессов и конкретных технологий, в том числе и как составляющая часть борьбы за свариваемость новых сплавов.

Начиная со второй половины XX столетия интенсивно разрабатываются новые сплавы с повышенными эксплуатационными характеристиками, соответствующие специальным требованиям материалов энергетического оборудования, криогенной техники и т.п. Причем, применение улучшенных материалов еще не гарантировало получение необходимых функциональных, служебных свойств изделия в том случае, если для их изготовления применялась сварка плавлением. Поэтому разработка соответствующих технологий сварки стала важнейшей задачей создания ответственных конструкций. Резкое увеличение номенклатуры специальных комплексно-легированных сплавов (высокопрочных суперсталей, алюминиевых и титановых сплавов и других) усложнило создание необходимых специальных сварочных материалов. В этой ситуации атомно-водородная, а тем более и сварка в инертных газах не потребовали сложных металлургических расчетов и экспериментов, определяющих составы и структуры металла шва. Однако, вместе с тем, и отпал «ме-

таллургический» фактор – важный для управления свойством сварного соединения.

Значение свариваемости среди других целей и условий, движущих развитие сварочного производства (производительность, стабильность качества, простоты исполнения, упрощение подготовки и контроля и т.п.) возрастало по мере возникновения и усложнения ответственных инженерных конструкций, работающих в экстремальных условиях. Особенно это касалось сплавов, создаваемых специально для этих конструкций. Уже на стадии разработки новых сплавов (разумеется, улучшенных по своим эксплуатационным свойствам) к работе подключаются специалисты сварочного производства: металлведы, технологи, «прочнисты» и др. Сварные соединения начали рассматривать как разнородные части конструкции, при этом определяются слабые места и оценивается их влияние на поведение конструкции в процессе эксплуатации.

Для современного представления о свариваемости характерно положение о том, что целостность металла может быть достигнута применением соответствующей технологии. Это означает, что один и тот же сплав можно считать «свариваемым» или «не свариваемым» в зависимости от конкретной технологии. Решение проблемы обеспечения требуемого качества сложного изделия лежит на стыке знаний металлведов, проектировщиков-конструкторов, инженеров производственников и ученых-сварщиков. Кроме всего, перед сварщиками возникают проблемы, вызванные воздействием термических циклов, иногда одновременно с механическими напряжениями, изменением химического состава, микроструктуры и соединений компонентов. Поэтому усилия многих исследователей в различных странах мира направлены на разработку способов управления теплотенергетическими процессами при сварке, кристаллизации и охлаждением, плавлением присадочного и электродного материала и другими процессами, которые могут повлиять на качество сварного соединения.

Проблема уменьшения тепловложения, перегрева металла ванны и сведения к минимуму ухудшения свойств основного металла в зоне термического влияния не теряет актуальности на протяжении последних нескольких десятилетий. Причем, электронно-лучевые и лазерные технологии, несмотря на более высокую плотность вводимой в изделие энергии нагрева, не обладают универсальностью многих дуговых технологий. В частности, например, сварка в защитных газах или самозащитной порошковой проволокой может выполняться в любом пространственном положении, как на воздухе, так и в воде и в не глубоком вакууме.

С середины XX века начался интенсивный поиск новых способов, технологических приемов, составов присадочных материалов; усилились исследования дуги металлургических процессов.

Знание физических процессов в сварочной дуге необходимо для разработки способов управления вводимой в изделие энергией. Исследованию влияния состава защитной среды на контрагирование (сжатие) дуги уделяло большое внимание [4]. Для технологических целей

предпочтительнее дуга с высокой степенью конрагирования. Сжимая столб дуги периферийным газом (микроплазменная и плазменно-дуговая сварка), можно в широких пределах не изменяя силы тока управлять технологическими параметрами процесса [5]. Так, например, изменяя параметры режима плазменной дуги можно регулировать структуру упрочняющего слоя, наплавленного на алюминиевые поршни никельсодержащей проволокой [6].

В 1960-1962 годах в ИЭС им. Е.О. Патона было разработано несколько вариантов импульсно-дуговой сварки в аргоне [7]. Возможность регулирования плавлением и переносом электродного металла, а также другими характеристиками достигается изменением параметров импульсов тока или мгновенной мощности. Импульсно-дуговой процесс при сварке с постоянной скоростью подачи электрода и принудительных коротких замыканий был разработан в НИАТ. Аналогичный процесс получен позже в США. В 1990-х годах фирмой Клоуз Велдинг для сварки тонких профилей разработан процесс, при котором сварочный импульс разделяется на две серии импульсов: на базовом токе для подогрева проволоки и поверхности металла и на высоком импульсном токе, обеспечивающем направленный и контролируемый перенос металла [8]. Технологический комплекс, созданный в ИЭС им. Е.О. Патона для автоматической и механизированной импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом, включает специализированный источник питания, блок модуляции вида защитных газов (аргон, углекислый газ и газовые смеси) и устройство синхронизации рода сварочного тока с видом защитного газа, например, Аг – импульсный ток, позволяет сваривать соединения из различных марок сталей малых, средних и больших толщин и обеспечивает повышение на 30% механических свойств, возможность управления глубиной и формой проплавления, уменьшение разбрызгивания [9].

В середине 1960-х годов в ИЭС им. Е.О. Патона разработан процесс сварки вольфрамовым электродом в аргоне по слою флюса [10]. Особенность процесса – сжатие столба дуги и повышение напряжения дуги, в результате чего возрастает абсолютное значение и градиент температуры в столбе дуги, уменьшается размер активного пятна на изделии [10]. В последнее время разработано новое поколение активирующих флюсов – азрозольные активаторы для сварки коррозионностойких сталей, никелевых сплавов типа Нимоник, Хастеллой, Инконель, жаропрочных и теплостойких сталей. Доказаны технологические и экономические преимущества ручной и механизированной сварки тонкого и толстого металла при выполнении стыковых, угловых, нахлесточных, тавровых соединений в различных конструкциях [12].

Роль защитного газа в достижении оптимальных качеств сварных соединений и производительности сварочных процессов изучается многие годы. Еще в 1950-х годах в США как защитный газ при сварке – ТИГ алюминиевых сплавов на прямой полярности использовали гелий. Поскольку в гелии выделяется в 1,5-2 раза больше энергии, чем в аргоне, удалось получить более глубокое проплавление при меньшем разогреве

основного металла, поднять скорость сварки и уменьшить зону термического влияния. Важным условием достижения максимального эффекта является заточка конца электрода на острый угол с невеликим притуплением. В некоторой степени эффективность этого процесса сохраняется при использовании смеси аргона (40%) и гелия. В 1949 г. для сварки изделий из высокоактивных металлов толщиной менее 1 мм в НИАТ разработана смесь аргона с 5-10% водорода, что позволило активно воздействовать на ход металлургических процессов, повысило скорость сварки при удовлетворительном качестве шва. С помощью гелие-дуговой сварки удалось получить прочное соединение композиционного материала (алюминиевая матрица борные волокна [13]. Так, в конце 1990-х годов новые защитные смеси Ferramax Plus (Великобритания) для дуговой сварки плавящимися электродами сталей обеспечили улучшенные качества швов, повышенную скорость сварки, снижение разбрызгивания [14]. В Германии предложен способ защитной газовой смеси, предназначенной для применения при дуговой сварке и представляющей собой смесь Ar с легирующим газом в количестве (в % по объему) 0,001–0,7, причем смесь подготавливают испарением из жидкой фазы легирующего газа NO, O<sub>2</sub> или CO<sub>2</sub> или их смеси.

В 1966 г. в ИЭС был изобретен способ биполярной сварки – сварки с двумя встречными дугами, который в последнее время интенсивно разрабатывается. Технологический процесс двусторонней сварки, при котором плавящийся электрод находится впереди неплавящегося при перемещении их в одном направлении, позволяет увеличить производительность сварочных работ по сравнению со способом сварки, предусматривающим поочередное выполнение швов, и повысить качество тавровых соединений [16]. При изготовлении высокоскоростных поездов в Канаде и Германии из алюминиевых профилей и панелей применена сварка плавящимся электродом в инертном газе двумя горелками с тандемным расположением проволок в каждой, что сводит к минимуму тепловложение и, следовательно, коробления [17]. Система управления, работающая в реальном времени реализована на персональном компьютере и полностью автоматизирует все операции сварки.

Сварка с программированным тепловложением особенно необходима при изготовлении изделий из разнородных металлов с резко различающимся теплопроводом и с разными теплофизическими свойствами. К таковым, например, относятся контактные (концевые) аппаратные зажимы для подключения проводов линий электропередач. Такое изделие состоит из плоского прямоугольника из алюминия (толщина 6-8 мм) плакированного с двух сторон тонким слоем меди и массивного оголовка из штампованного алюминия. Получить надежные соединения и прочностью удается плазменной или электронно-лучевой сваркой с программированием режима тепловложения.

Определенные перспективы имеют технологии, основанные на нагреве дуговым разрядом в вакууме. Исследования начаты в ИЭС им. Е.О. Патона в 1963 г. и в МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1964 г. с целью при-

менения этого источника нагрева для космических технологий [18]. Это направление в последнее время считается одним из перспективных. Еще одним перспективным направлением развития процессов сварки является магнитное управление, начало которому положили изобретения Н.Н. Бенардоса [1]. Не исчерпаны возможности сварки погруженным электродом. В последнее время исследованы технологические особенности, показаны преимущества этого способа и области его применения для изделий из различных сталей и цветных сплавов.

Значительного улучшения структуры и механических свойств сварных соединений удаётся достигнуть при сопутствующем охлаждении зоны термического влияния «активированным бурлящим слоем». Так, на Луганском тепловозостроительном заводе благодаря охлаждению сварного соединения со скоростью 110...115°С/сек освоена новая высокопрочная коррозионнотойкая сталь, что позволило снизить массу изделия на 20%. В качестве активаторов жидкости при сварке в аргоне применяли углекислый газ [19].

В ИЭС им. Е.О. Патона поднят вопрос о необходимости пересмотра термина «свариваемость» и разработки обобщённого количественного критерия его оценки. Доказана возможность управления свариваемостью при комбинированных процессах сварки [20].

### Литература

- 1. Бенардос Н.Н.** Научно-технические изобретения и проекты: Избр. труды. – Киев: Наукова думка, 1982. – 239с.
- 2. Славянов Н.Г.** Труды и изобретения. – Пермь: Пермское книж. изд-во. – 1998. – 299с.
- 3. Корниенко А.Н.** Становление и основные этапы развития дуговой сварки // Сб. науч. тр. Всесоюз. науч.-техн. конф. Ч.1. – Пермь, 1989. – С.14-19
- 4. Гвоздецкий В.С.** Контрагирование столба сварочной дуги // Автоматическая сварка. – 1974. – № 2. – С. 3-4.
- 5. Гвоздецкий В.С., Дудко Д.А.** и др. Вольт-амперные характеристики микроплазменной дуги постоянного тока // Автоматическая сварка. – 1970. – №7. – С.5-8.
- 6. Рябов В.Р., Рабкин Д.М., Муравейник А.Н.** и др. Структура алюминиевого сплава АК4-1, наплавленного составной проволокой // Автоматическая сварка. – 1982. – №8. – С. 20-21.
- 7. Патон Б.Е., Потапьевский А.Г.** Виды процессов сварки в защитных газах стационарной и импульсной дугой // Автоматическая сварка. – 1973. – С.1-8.
- 8. Young Ken, Pick Craig.** Second pulse and added plas // Weld. And Metal fabric. – 1999. – №2. – S.14-15.
- 9. Технология** и оборудование для сварки плавящимся электродом с программируемым изменением газовой защиты и модуляцией сварочного тока (ИЭС НАН Украины // Сварщик. – 2003. – №4. – С.4.
- 10. Макара А.М., Кушниренко Б.Н., Замков В.Н.** Аргонно-дуговая сварка высокопрочных сталей мартенситного класса с применением флюса // Автоматическая сварка. – 1968. – № 7. – С. 73-74.
- 11. Замков В.Н., Прилуцкий В.П.** Теория и практика TIG – F сварки (A-TIG ) // Автоматическая сварка. – 2004. – №9. – С. 12-15.

12. Ющенко К.А., Коваленко Д.В., Коваленко И.В. Применение активаторов при дуговой сварке вольфрамовым в инертных газах сталей и сплавов // Автоматическая сварка. – 2001. – №7. – С. 37-43.
13. Рябов В.Р., Дыхно И.С., Будник В.П. и др. Гелие-дуговая сварка композиционного материала ВКА-2 // Автоматическая сварка. – 1991. – №9. – С.62-65.
14. Craig H., Aaron W. Developing a shielding gas for today's as welding market // Welding and Metal fabr. – 1999. – S. 8, 10, 12.
16. Жуков М.Б., Пенчук П.Н., Редчиц В.В. и др. Двусторонняя сварка тавровых соединений двумя дугами в общую ванну // Автоматическая сварка. – 1987. – №7. – С.46-48.
17. The ICE train cometh Welding and Metal fabric. – 1999. – №6. – S.6, 8, 10.
18. Ямпольский В.М., Неровный В.М. Исследование возможности применения дугового разряда в вакууме для целей космической технологии / Тр. 20 чтений «К.Э. Циолковский». – М., 1987. – С.27-33.
19. Гедрович А.И., Гальцов И.Ф., Ткаченко А.Н. Сварка коррозионностойкой стали 10Х13Г18ДУ // Оборуд. и инструмент для профессионалов. – 2004. – №2. – С.42-43.
20. Ющенко К.А. Свариваемость и перспективные процессы сварки материалов // Автомат. сварка. – 2004. – №9. – С. 40-45.



УДК 621.791.754: 621.643.411

О.Б. ГЕЦКИН, инж., Б.Л. ГЕЦКИН, инж.  
(НПП «ТехноТрон»)  
С.И. ПОЛОСКОВ, к.т.н.  
(НИКИМТ)

## **Практическая реализация управляемого тепломассопереноса капель при автоматической орбитальной сварке плавящимся электродом**

Сварка плавящимся электродом является наиболее распространенным способом дуговой сварки из-за простоты осуществления процесса. В то же время этот процесс при орбитальной сварке плавящимся электродом наименее управляем с точки зрения стабильности проплавления металла в корне шва и разбрызгивания при формировании наплавочных проходов [1]. В связи с этим наибольшее внимание уделяется изучению особенностей переноса капель электродного металла через дугу и управлению этим процессом. В основу принципов управляемого переноса капель в сварочную ванну положено принудительное изменение величины и времени приложения сил, определяющих процессы образования и перехода в сварочную ванну капли электродного металла. Для этих целей осуществляют механические воздействия на проволоку с целью придания ей продольных импульсов при подаче в зону горения дуги, импульсное изменение характеристик источника сварочного тока, силовое воздействие потока газа в зоне горения дуги на перенос капли и введение в дугу активирующих веществ.

Наиболее простым в реализации является управление переносом капли по данным о ее касании поверхности ванны в процессе сварки с коротким замыканием (КЗ) каплей дугового промежутка [2]. Такой процесс состоит из трех стадий: снижения (отключения) тока в момент касания каплей поверхности ванны; подачи импульса тока через определенное время после касания и увеличения тока после разрыва перемычки. Если первая и третья стадии управления переносом определяются изменением рабочего напряжения в момент касания и разрыва перемычки, то вторая стадия не имеет четкого сигнала.

Связано это с тем, что при сварке с КЗ, когда дуговой промежуток соизмерим с диаметром капли электродного металла, могут одновременно существовать две жидкие перемычки металла: одна – в месте касания каплей поверхности ванны, а вторая – в зоне «капля – электродная проволока». Вместе с тем, подачу импульса необходимо производить только после образования самого узкого по диаметру места зоны «проволока – капля» в системе «проволока – капля – ванна» с тем, чтобы пинч-эффект способствовал разрушению перемычки между проволокой и каплей для перехода ее в ванну. В противном случае возможно отталкивание капли от поверхности ванны. В основу управления массопереносом при сварке с КЗ положен выбор режимов сварки, обеспечивающих гарантированный перенос каждой капли электродного металла.



Анализ кинограмм скоростной киносъемки процесса сварки с КЗ дугового промежутка показал, что время деформации капли (рис. 1) до образования перемычки определяется не только ее объемом  $V_k$ , но и наличием или отсутствием тока в момент касания капель поверхности сварочной ванны. При этом для переноса каплей оптимального размера используется импульсный ввод энергии на стадии короткого замыкания дугового промежутка каплей электродного металла.

На стабильность процесса (каждая капля переходит в ванну при первом касании), прежде всего, влияет площадь соприкосновения капли с поверхностью ванны. При малой площади касания сила от пинч-эффекта (при наличии тока в момент касания) действует быстрее, чем нарастает сила от поверхностной энергии (поверхностного натяжения) – одной из главных сил в процессе поглощения капли сварочной ванной [3]. Увеличение сил поверхностного натяжения способствует отрыву капли электродного металла, но препятствует поглощению ее сварочной ванны. Поэтому силы поверхностного натяжения при сварке с управляемым тепломассопереносом могут изменять течение процесса сварки с КЗ. Экспериментально установлено, что чем меньше объем капли  $V_k$ , тем меньшее время необходимо для сужения капли до оптимальных размеров с образованием перемычки в районе «проволока – капля». При наличии тока в момент касания время сужения возрастает. Поэтому время начала подачи импульса  $t_H$  тока (или время задержки подачи импульса с момента касания капель поверхности ванны) необходимо задавать в зависимости от объема каждой капли электродного металла.

Рис. 1. Кинограмма образования и перехода капли в сварочную ванну:

- горение дуги,
  - образование капли,
  - касание поверхности ванны,
  - образование устойчивой перемычки «капля – ванна»,
  - разрыв перемычки «капля – электродная проволока»
  - поглощение капли ванной
- повторное касание проволоки поверхности ванны и повторное зажигание дуги  
(3600 кадров/с)

В работе [4] показано, что комбинированная двухслойная защита (вокруг электродной проволоки – аргон, внешний поток – углекислый газ, защищающий расплавленный металл сварочной ванны) изменяет величину сил поверхностного натяжения на границе фаз «расплав – газ», что существенно расширяет границы перехода сварки с непрерывным горением дуги к процессу сварки с КЗ и позволяет воздействовать на тепло-массоперенос капель электродного металла.

Наряду с воздействием газовой среды на стабильность процесса сварки плавящимся электродом влияет кратковременное скачкообразное увеличение скорости подачи электродной проволоки («выстреливание») вследствие релаксации изгибов накапливающихся при ее перемещении по направляющему тракту. Следовательно, чтобы обеспечить стабильность процесса перехода каждой капли в соответствии с определенным для каждого диаметра проволоки диапазоном ее заглужения в ванну необходимо осуществить подбор оптимального внутреннего диаметра тракта, с обеспечением его продольной жесткости [5]. Приведенные данные показывают, что для каждого  $d_3$  существует область оптимального сочетания  $d_{тр} / d_3$  полностью исключающая кратковременные изменения скорости подачи проволоки.

Наряду с нестабильностью подачи электродной проволоки при ее перемещению по тракту, представляет интерес оценка зависимости скорости подачи от возмущений в электрической части установки, в частности от стабильности работы электропривода, так как изменение скорости подачи электродной проволоки изменяет характер массопереноса капель. Изменение геометрических размеров шва и разбрызгивание – наиболее серьезные последствия отказов в системе подачи проволоки. Оценка влияния скорости подачи электродной проволоки на частоту коротких замыканий дает допустимую величину изменения скорости подачи проволоки до  $\pm 10\%$  в зависимости от ее диаметра.

Рассмотренные особенности управляемого теплопереноса капель [6] реализованы при орбитальной сварке стыков труб плавящимся электродом. На рис. 2 представлен опытно-промышленный образец установки УАСТ-1, обеспечивающий автоматическую орбитальную сварку труб диаметром от 219 до 1420 мм и толщинами стенок до 16...18 мм в различных пространственных положениях.

Установка состоит из сварочной головки с направляющим кольцом для перемещения по стыку, блока управления процессом сварки, инверторного сварочного источника и пульта дистанционного управления.

В процессе сварки можно регулировать следующие параметры:

- скорость перемещения сварочной головки по стыку;
- скорость подачи электродной проволоки;
- амплитуду и частоту колебаний горелки;
- временные задержки электрода на кромках разделки;
- изменение тока сварки в каждом микроцикле сварки;
- изменения временных фронтов сварочного тока в микроцикле;
- изменение угла наклона горелки при перемещении по стыку.



Рис. 2. Общий вид установки УАСТ-1 для орбитальной сварки неповоротных стыков труб плавящимся электродом

Технические характеристики установки УАСТ-1 для автоматической орбитальной сварки плавящимся электродом приведены в табл.

#### Технические характеристики установки УАСТ-1

Показатель	Значение
Диапазон диаметров свариваемых труб, мм	219-1420
Скорость вращения сварочной головки, мм/сек	0,5-12
Скорость подачи электродной проволоки, мм/сек	16-200
Диаметр электродной проволоки, мм	0,8-2,0
Амплитуда колебаний горелки, мм	0-20
Скорость колебаний горелки, мм/сек	10-100
Время «задержки на кромках», с	0-1,0
Масса, кг, не более	
головки	25
блока управления	8
источника сварочного тока	40

Применение автоматической орбитальной сварки плавящимся электродом с управляемым тепломассопереносом капли позволяет эффективно регулировать тепловложение в сварочную ванну за счет уменьшения количества наплавляемого металла при сварке в щелевые разделки и возможности реализации процесса на минимально возможной погонной энергии с применением проволок малых диаметров. Сварка корневых проходов во многом определяет качество всего сварного соединения. Проведенные исследования показали, что наиболее предпочтительным вариантом орбитальной сварки является тот, когда сварка осуществляется за два полуоборота «сверху - вниз». При формировании корня шва в V-образную разделку необходима сборка стыка с гарантированным зазором до 2...3 мм и колебаниями дуги в разделке (рис. 3,а). Сварку в щелевую U-образную разделку можно выполнять ниточными швами (рис. 3,б).

Заполнение разделки в зависимости от угла раскрытия кромок можно осуществлять с колебаниями дуги, либо ниточными швами.

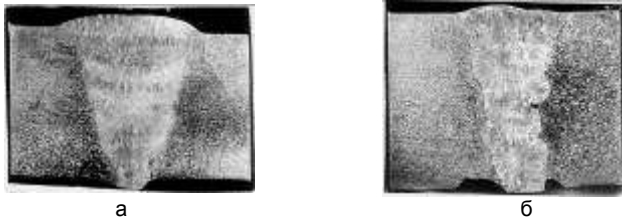


Рис. 3. Макрошлифы соединений, выполненных автоматической орбитальной сваркой плавящимся электродом:

- а – с колебаниями электрода в V-образной разделке;
- б – ниточными швами в U-образную щелевую разделку

Следует отметить, что для качественного формирования шва в потолочном положении целесообразно изменять угол наклона подачи электродной проволоки с переходом от сварки «углом назад» при сварке на спуск, к сварке с расположением горелки перпендикулярно поверхности ванны в потолочном положении. Установлено, что при сварке плавящимся электродом задержки дуги у кромок разделки влияют в значительно меньшей степени на сплавление металла ванны с основным металлом, чем при сварке неплавящимся электродом. Разработан алгоритм замыкания шва в потолочном положении. Можно констатировать, что основные проблемы, препятствующие ранее внедрению орбитальной сварки плавящимся электродом, после разработки быстрodeйствующих источников сварочного тока и аппаратур управления с широким применением микропроцессорной техники позволили практически реализовать управляемый тепломассоперенос при орбитальной сварке. При этом сварку трубопроводов из сталей аустенитного класса рекомендуется выполнять в смеси инертных газов He и Ar, с небольшими добавками CO<sub>2</sub>. Сварку трубопроводов из сталей перлитного класса целесообразно выполнять

сплошной проволокой Св-08Г2С или Св-08ГС в  $\text{CO}_2$ , либо самозащитной проволокой типа Innershield. Возможно применение порошковой проволоки FilArc с дополнительной защитой в необходимых случаях в  $\text{CO}_2$  или смесях Ar и  $\text{CO}_2$ .

Однако, не смотря на положительные результаты предварительных исследований, для промышленного внедрения технологий и оборудования для орбитальной сварки плавящимся электродом на потенциально опасных производствах необходимо в установленном порядке завершить исследовательские и производственные аттестации предлагаемого метода сварки. Только по завершении всего комплекса работ, включая исследование коррозионной стойкости швов, можно будет принять решение о целесообразности применения сварки плавящимся электродом для сварки трубопроводов со стенками более 16...18 мм.

### Выводы

1. Можно констатировать, что основные проблемы, препятствующие ранее внедрению автоматической орбитальной сварки плавящимся электродом, после разработки быстрodeйствующих инверторных источников сварочного тока и аппаратур управления с применением микропроцессорной техники позволили практически реализовать управляемый тепломассоперенос при сварке неповоротных стыков труб.

2. Для внедрения на потенциально опасных производствах технологий и оборудования для сварки плавящимся электродом необходимо в установленном порядке завершить исследовательские и производственные аттестации предлагаемого метода сварки.

### Литература

- 1. Рощин В.В., Кузнецов И.К., Хаванов В.А.** Сварка неповоротных стыков труб плавящимся электродом // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Сварочное производство. – 1980. – Вып. 1 (7). – С. 55-63.
- 2. Управление** переносом капли при сварке плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка / С.И. Полосков, Ю.С. Ищенко, В.А. Лебедев, О.Б. Гецкин // Сварочное производство. – 2001. – №6. – С. 6-9.
- 3. Управление** параметрами короткого замыкания в процессе сварки плавящимся электродом / С.И. Полосков, Ю.С. Ищенко, В.А. Лебедев, О.Б. Гецкин // Сварочное производство. – 2001. – №12. – С. 3-7.
- 4. Влияние** особенностей газовой защиты сварочной ванны на некоторые технологические параметры процесса сварки плавящимся электродом / С.И. Полосков, Ю.С. Ищенко, В.А. Лебедев, О.Б. Гецкин // Сварка и смежные технологии. – М.: МЭИ (ТУ), 2000. – С. 26-28.
- 5. Влияние** возмущений в системе подачи электродной проволоки на качество сварных соединений / С.И. Полосков, Ю.С. Ищенко, В.А. Лебедев, О.Б. Гецкин // Сварочное производство. – 2001. – №8. – С. 3-7.
- 6. Особенности** управляемого тепломассопереноса при сварке плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка / С.И. Полосков, Ю.С. Ищенко, В.А. Лебедев, О.Б. Гецкин // Сварочное производство. – 2002. – №7. – С. 6-13.

## **Разработка микропроцессорного контроллера для машины контактной сварки**

На кафедре ТОЭЭ ИГЭУ ведется разработка микропроцессорного регулятора контактной сварки. Работа выполняется в учебных целях и должна завершиться установкой разработанного устройства на машине контактной сварки МТР-2401 [1], размещенной в учебной лаборатории кафедры. Разрабатываемое микропроцессорное устройство должно быть по своим функциям сходно с прототипом РКС-502 [2], построенным на жесткой логике, но при этом иметь значительно более простую схему.

За основу взят однокристалльный микроконтроллер PIC16F628, относящийся к среднему семейству микроконтроллеров PICMICRO фирмы Microchip. Для ввода технологических параметров к нему добавлен трехразрядный семисегментный светодиодный индикатор и четырехкнопочная клавиатура. К входам контроллера подключена педаль управления сварочным циклом и оптронный датчик напряжения на тиристорном ключе в цепи сварочного трансформатора. К выходам микроконтроллера через схемы сопряжения подключен тиристорный контактор и пневматический привод, сжатия сварочных электродов.

Анализ технологического процесса контактной сварки и изучение документации на имеющийся регулятор показали, что регулятор должен:

- 1) по однократному нажатию на педаль обрабатывать временной цикл, состоящий из этапов предварительного сжатия, нагрева, проковки и паузы;
- 2) по длительному нажатию на педаль периодически повторять сварочный цикл с заменой этапа предварительного сжатия на этап циклического сжатия, отличающегося меньшей длительностью;
- 3) в режиме настройки обеспечивать цифровое отображение и корректировку длительностей этапов сварочного цикла и величины сварочного тока;
- 4) управлять тиристорным контактором и обеспечивать регулирование величины сварочного тока;
- 5) при регулировании угла зажигания тиристоров автоматически настраиваться на текущий коэффициент мощности сварочной машины;
- 6) каждый сварочный цикл начинать с полупериода сети, противоположного по знаку первому полупериоду предыдущего сварочного цикла, что снижает подмагничивание сварочного трансформатора;
- 7) стабилизировать действующее значения сварочного тока при колебаниях напряжения питающей сети.

Из перечисленных выше требований следует, что микроконтроллер должен одновременно решать несколько задач. Предложено обеспечить

многозадачный режим работы, разделив задачи на две группы. Задачи, жестко привязанные ко времени предложено решать в прерывающей программе, периодически вызываемой таймером. Остальные задачи, скорость решения которых не критична, вынесены в основную программу. Отсчет времени целесообразно реализовать путем подсчета количества прерываний.

Компиляция и отладка программы ведется в среде MPLab [3], бесплатно распространяемой фирмой Microchip. Для отладки используется симулятор среды MPLab и программа ISIS из пакета Proteus [4].

В настоящее время спроектирован и изготовлен макет микроконтроллерной части разрабатываемого РКС, отлажены алгоритмы, обеспечивающие разделение времени между задачами, алгоритмы динамической индикации, опроса кнопок и алгоритм отработки основного сварочного цикла. Идет работа над устройствами сопряжения микроконтроллера с объектом управления, прорабатываются алгоритмы диалогового ввода технологических параметров и алгоритм регулировки сварочного тока.

Проделанная часть разработки подтвердила возможность использования микроконтроллера PIC16F628 для построения устройства управления машиной контактной сварки и показала возможность резкого упрощения схемотехники устройства управления при сохранении или даже расширении его функциональности за счет перехода на микропроцессорную элементную базу.

#### Литература

1. **Машина** контактной сварки МТР-2401 УХЛ4 / АО «Искра». – Первоуральск. – 24 с.
2. **Регулятор** контактной сварки РКС-502. Паспорт / ОАО «Фирма СЭЛМА». – Симферополь. – 16 с.
3. [www.microchip.com](http://www.microchip.com).
4. [www.labcenter.co.uk](http://www.labcenter.co.uk).

УДК 621. 791. 754. 052

А.Н. КОРНИЕНКО, к.т.н., в.н.с.  
(ИЭС Е.О. Патона, Киев, Украина)

### Некоторые схемы плазменной сварки ответственных инженерных конструкций

Требования к сварным конструкциям ракет и самолетов, криогенной техники сухопутного и морского транспорта и энергетическому оборудованию непрерывно возрастают. Причем одновременно с требованием повышения прочности и надежности, выдвигаются условия снижения веса и повышения производительности технологий изготовления. Основные пути повышения прочности – это применение новых высокопрочных



сплавов (комплекснолегированных сталей, алюминиево-литиевых сплавов и др.) и новых способов сварки, обеспечивающих высокое качество металла шва с сохранением свойств основного металла в зоне термического влияния. Снижение веса достигается также за счет применения более прочных сплавов и более рациональных узлов и конструкций изделия в целом. Выполнение этих условий также зависит от способа сварки.

С точки зрения перечисленных требований наилучшими технологическими свойствами обладают способы, основанные на концентрированных источниках нагрева: электронно-лучевая сварка, лазерная сварка и плазменно-дуговая сварка. Эти виды сварки, а так же аргоно-дуговая и контактная занимают ведущее место в производстве конструкций ответственного назначения и продолжают наиболее активно совершенствоваться. Плазменная сварка согласно систематизированным данным международного института сварки одна из наиболее развивающихся технологий соединения (по темпам развития ее опережают только лазерные технологии, пайка и сварка трением).

Плазменная сварка – сварка сжатой дугой – сварка плавлением, при которой нагрев соединяемых деталей производят дугой, сжатой потоком газа или внешним магнитным полем, выполняется плазмотроном. При сжатии дуги повышается концентрация энергии, температура столба и уменьшается пятно нагрева по сравнению со свободно горящей дугой. Отличается высокой производительностью и обладает широкими технологическими возможностями (соединение разнотолщинных материалов, металлических листов толщиной до 40 мм). Микроплазменная сварка (сила тока 0,1-40 А) применяется при изготовлении мембран, сифонов, теплообменников и др. изделий из титана, алюминия, молибдена, золота.

В последнее время разработано несколько принципиально новых процессов, расширяющих возможности плазменно-дуговой сварки. Наиболее перспективными следует считать способы, основанные на: 1) комбинации сжатой дуги с лучом лазера и дугой, горящей плавящегося электрода; 2) двусторонней сварке биполярной дугой (или дугами) в общую ванну; 3) применении специальных устройств и приёмов формирования шва при увеличении степени сжатия. Плазма ТИГ сварка – плазменная сварка с использованием дополнительного вольфрамового (неплавящегося) электрода в инертном газе с отдельным электрическим питанием. Плазма МИГ сварка – плазменная сварка с использованием дополнительного плавящегося электрода в инертном газе с отдельным электрическим питанием. Сварка биполярной дугой – при которой две электрические дуги прямого действия горят между электродами, расположенными с противоположных сторон соединяемых заготовок. Гибридный способ сварки – сварка, при которой металл плавится от двух источников нагрева – дуги и лазерного луча (причем развития получил процесс комбинированного действия плазменной дуги с полым электродом, через который проходит луч).

Для удерживания ванны во всех пространственных положениях при сквозном проплавлении предложено применять в качестве прокладки сетку из материала, более тугоплавкого, чем основной свариваемый ме-

талл. В отличие от остающихся подкладных колец, при сварке труб, тонкая сетка почти не уменьшает проходное сечение, пропускает плазменно-газовый поток и предотвращает вытекание и провисание металла со дна ванны. Такая технология была применена, например, при изготовлении конструкций ракет из алюминиевых сплавов.

Для первых космических исследований в Институте электросварки им. Е.О. Патона плазменные процессы были выбраны как одни из перспективных процессов сварки и резки. Для проведения исследований в наземных и летающих лабораториях были разработаны и изготовлены специальные испытательные стенды. На летающей лаборатории в барокамере сжатой плазменной дугой с полым катодом сваривались в вакууме титановые сплавы и нержавеющие стали толщиной 1,0...1,5 мм. Первые эксперименты по сварке и резке в космосе были проведены в октябре 1969 г. на космическом корабле «Союз-6» летчиками-космонавтами СССР Г. Шониным и В. Кубасовым на автоматической сварочной установке «Вулкан». Впервые в мире было установлено, что в космосе, как и на Земле, можно обеспечивать нормальные условия для формирования контрагированной дуги низкого давления в парах свариваемого металла.

Требования современной морской техники обуславливают необходимость проведения сварки и резки на глубинах более 300 м. Из-за высокого гидродавления многие сварочные процессы в таких условиях невозможно осуществить. Достигнуть удовлетворительного качества удаётся с помощью плазмотронов с дополнительными соплами, образующими защитный газовый пузырь.

УДК 621.375.826

Е.А. ЧАЩИН, к.т.н., доц., А.В. ФЕДИН, д.т.н., проф., И.В. ШИЛОВ, доц.  
(ГОУ ВПО Ковровская государственная академия им. В.А. Дегтярева, Ковров)

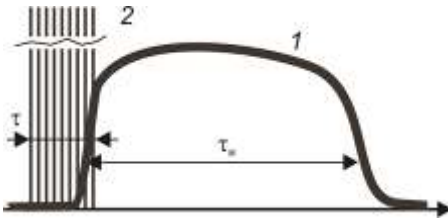
## **Режимы сварки алюминиевых сплавов комбинированным лазерным излучением для получения бездефектных соединений**

Получение качественных сварных соединений алюминиевых сплавов является приоритетной задачей многих отраслей машиностроения. Лазерные технологии сварки имеют ряд таких преимуществ, как локальность воздействия, малая зона термического влияния (ЗТВ), однако для алюминиевых сплавов имеются общие для всех способов сварки проблемы – пористость металла сварной ванны.

При дуговой сварке проблема пористости решается в первую очередь за счет интенсификации процессов дегазации расплавленного металла [1]. При лазерной сварке для достижения достаточной дегазации расплава требуется либо удлинение времени воздействия, с одновре-

менным ростом ЗТВ и удельной энергии обработки, либо значительное увеличение интенсивности воздействия. Последний подход может сопровождаться нестабильностью проплавления, неуправляемым переходом в режим кинжального проплавления, выплеском расплава и недостаточным количеством расплавленного металла, т.е. непроваром.

Нами предложен способ сварки алюминиевых сплавов системой комбинированного излучения, где проблема пористости металла сварной ванны решается кардинальным способом: путем удаления со свариваемых поверхностей окисной пленки – основного источника газообразования в расплаве. При этом удаление окисла должно производиться непосредственно самим излучением



в начале обработки до образования ванны расплава, что обеспечивает изначально низкий уровень газификации расплава и обуславливает получение бездефектных соединений [2, 3].

Рис. 1. Совмещенная огибающая цуга модулированного излучения (2) и плавящего миллисекундного импульса (1)

Для определения параметров комбинируемого излучения (рис. 1), обеспечивающего «раннее» удаление окисла со свариваемых поверхностей, была составлена математическая модель лазерного нагрева, плавления и испарения металла ( $T_2$ ) покрытого окисным слоем толщиной  $H_1$ :

Уравнение теплопроводности	$\tilde{C}_2(T_2)\rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2(T) \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2}$
Граничные условия	$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = q_{\text{ПОГЛ}} - \rho_{1,2} \frac{L_{V1,2}(z)}{M_{1,2}} V_{S1,2}(z),$ $q_{\text{ПОГЛ}} = q_{\text{ПАД}}(r) \cdot A_{1,2}(z, T_S), \quad z = Z_S(r)$
Зависимость скорости фронта испарения $V_S$ от температуры поверхности металла $T_S$	$V_S = \begin{cases} 0.82 \frac{P_{S1}(T_S)}{\rho_1} \sqrt{\frac{M_1}{2\pi RT_S}}, & z < H_1 \\ 0.82 \frac{P_{S2}(T_S)}{\rho_2} \sqrt{\frac{M_2}{2\pi RT_S}}, & z \geq H_1 \end{cases}$
Давление на поверхности испарения	$P_S(T_S) = 0.55 \cdot P_{\text{атм}} \cdot \exp\left(-\frac{L_V}{R} \left(\frac{1}{T_V} - \frac{1}{T_S}\right)\right)$

где  $L_V$  – удельная энергия испарения;  $\rho$  – плотность;  $\lambda$  – теплопроводность;  $M$  – молярная масса;  $P_{атм}$  – давление внешней среды;  $T_V$  – температура кипения;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

В динамике нагрева и движения фронта испарения  $Z_S$  учитывалось изменение поглощательной способности окисленного металла  $A_{1,2}$  от температуры поверхности и остаточной толщины испаряемого окисла  $h_{ox}$  (квадратичная зависимость):

$$A_{1,2}(Z_S, T_S) = \begin{cases} A_{Al_2O_3}(Z_S, T_S), & h_{ox} > 3 \text{ мкм} \\ a + b \cdot h_{Al_2O_3}^2, & 0 < h_{ox} < 3 \text{ мкм} \\ A_{Al}(Z_S, T_S), & h_{ox} = 0 \end{cases}$$

$$h_{ox} = \begin{cases} H_1 - Z_S, & Z_S < H_1 \\ 0, & Z_S \geq H_1 \end{cases}$$

Плавнение металла учитывалось с помощью эффективной функциональной зависимости теплоемкости от температуры  $\tilde{C}_2(T_2)$  [4], включающей в себя удельную энергию плавления.

Для проверки возможности удаления окисла со свариваемых поверхностей помимо испарения через выплеск расплава, мы использовали решение уравнения для скорости движения расплава  $V_m$  в приближении импульсного воздействия [5]

$$V_m(z, r, t) = -\frac{1}{\rho} \nabla_r \int_{tm(z,r,t)}^t P_S(r, \xi) d\xi,$$

где для каждой глубины  $z$  время плавления  $t_m$  задается динамикой фронта плавления  $Z_m$ , определяемого через решение тепловой задачи.

С помощью математической модели были рассмотрены начальные фазы режимов сварки алюминиевых сплавов комбинированным лазерным излучением и одиночным миллисекундным плавящим импульсом:

Комбинированное воздействие: синхронное начало длинного плавящего импульса и цуга коротких импульсов ( $\tau = 60$ нс; $f = 20$ кГц).	Одиночный длинный плавящий импульс ( $\tau_n = 4$ мс; $f_n = 10$ Гц; $W_n = 25$ Дж)
1. В каждом импульсе цуга реализуется интенсивное испарение с плавлением металла до 10-20 мкм. Начиная с 4-го импульса металл не застывает и глубина плавления непрерывно растет.	Процесс испарения начинается с 70 мкс и медленно растет. Давление отдачи пара долгое время остается существенно меньше атмосферного. За 200 мкс глубина плавления достигает 180 мкм.
2. Скорости течения расплава порядка 10 см/с и примерно одинаковые по всей глубине плавления	Скорости течения расплава достигают 100 см/с. С глубиной проплавления скорость течения существенно уменьшается.
3. Кинетическая энергия ванны расплава недостаточна для выплеска	Кинетическая энергия расплава на 2 порядка выше, однако из-за большого

окисла вместе с расплавленным металлом.	объема расплава энергии для выплеска недостаточно.
---	--

Из полученных результатов видно, что независимо от типа воздействия, при образовании ванны расплава, удаления окисла из ванны расплава через выплеск не происходит. Напротив, гидродинамические эффекты способствуют попаданию окисла внутрь ванны расплава. Таким образом, для получения соединений с низкой пористостью, выбор режимов обработки следует проводить из условия исключения попадания окисла внутрь ванны расплава путем для удаления окисла в режиме сухого испарения. В приведенном примере для  $H_1 = 10$  мкм, этому условию соответствует режим комбинированного воздействия, в котором цуг импульсов модулированного излучения воздействует на материал на 4 импульса (см. рис. 1) раньше плавящего импульса.

### Литература

1. **В.И. Рязанцев, В.А. Федосеев, А.Н. Савостиков.** Угледородная гипотеза металлургической пористости при сварке алюминиевых сплавов // Сварочное производство. – М., 1998. – № 5. – С. 22-26.
2. **Басиев Т.Т., Федин А.В., Шилов И.В., Чащин Е.А.** Способ лазерной сварки металлов и сплавов. Патент РФ N 2186667.
3. **Федин А.В., Чащин Е.А.** Сварка алюминиевых сплавов комбинированным излучением // Изв. АН. Сер. Физическая. – 2002, т. 66. – № 7. – С. 973-975.
4. **Григорьянц А.Г.** Основы лазерной обработки материалов. – М.: Высш. шк., 1989. – 304 с.
5. **Арутюнян Р.В., Баранов В.Ю., Большаков Л.А. и др.** Воздействие лазерного излучения на материалы. – М.: Наука, 1989. – 367 с.

УДК 622.311.22.019

А.В. БЕЛЯКОВ, к.т.н., проф.  
(ИГЭУ)

## Особенности параметров формирования износостойких жаростойких ЭИЛ покрытий из никелевых сплавов вращающимся электродом

Формирование жаростойких покрытий из сплавов на основе никеля методом ЭИЛ представляет важную проблему из-за эффекта «залипания» электродного материала к подложке. В частности, формирование фреттинг- и износостойких высокотемпературных покрытий из хромоникелевых сплавов ВЖЛ2 и ВЖЛ2М [1], имеющих гетерогенную структуру ( $\gamma + \gamma'$ ) с большим количеством интерметаллидных фаз типа на

$\text{Fe}_2\text{W}$ ,  $\text{Fe}_2\text{Mo}$ ,  $\text{Fe}_7\text{W}_6$  на никелевый сплав ЭП693-ВД (ХН68ВМТЮК-ВД) с гомогенной структурой представляет сложную задачу. Сплав ЭП693-ВД в основном предназначен для дефлекторов охлаждаемых лопаток турбин авиадвигателей. При температурах охлаждающего воздуха, проходящего через дефлектор, до  $650^\circ\text{C}$  используется в качестве износостойкого материала покрытия металлокерамический твердый сплав Т15К6 на основе карбида вольфрама. Достижение большей температуры предопределяет использование более жаростойких материалов, например таких, как ВЖЛ2 или ВЖЛ2М. Для формирования покрытий из твердого сплава Т15К6 на дефлекторах используются полуавтоматические установки Ф6396-6035 Ф6396-6036 с энергией единичного импульса 0.324 Дж [2], которые, соответственно, предназначены для нанесения покрытия на ребра спинки дефлектора и корыта, хотя установки больших принципиальных конструктивных отличий не имеют.

Покрытия из сплава Т15К6 формируются на ребре за счет движения дефлектора вдоль ребра относительно электрода за несколько проходов со скоростью 2 мм/с и вибрации электрода с частотой 100 Гц. Для получения максимальной сплошности и равномерности формируемого покрытия электрод имеет осциллирующее движение в поперечном направлении относительно ребра со скоростью до 0.2 мм/с.

Для получения требуемой толщины покрытия 30 – 40 мкм количество двойных проходов должно составлять не менее 7.

Процесс формирования покрытия из сплава ВЖЛ2 (ВЖЛ2М) отличается от процесса формирования покрытия из твердого сплава Т15К6. Основой сплава Т15К6 является карбид вольфрама, что определяет его высокую температуру плавления по сравнению с температурой плавления сплава ВЖЛ2 (ВЖЛ2М), у которого основой сплава является никель. Во время протекания единичного разряда ( $10^{-3}$  –  $10^{-5}$  с) количество материала Т15К6, переносимого с анода на катод, меньше количества сплава ВЖЛ2 (ВЖЛ2М). Время кристаллизации жидкой фазы сплава Т15К6 много меньше времени кристаллизации жидкой фазы сплава ВЖЛ2 (ВЖЛ2М). Так как вибрация электрода установок Ф6396-6035 (Ф6396-6036) осуществляется с частотой 100 Гц, то в случае нанесения сплава Т15К6 ударное воздействие электрода происходит по закристаллизованной массе слоя покрытия Т15К6 и поэтому не происходит микросваривания электрода и подложки из сплава ЭП693-ВД. В случае нанесения сплава ВЖЛ2 (ВЖЛ2М) ударное воздействие электрода осуществляется по слою, находящемуся в полужидком состоянии с большим количеством жидкой фазы, не успевшей закристаллизоваться до ударного воздействия электрода. В результате этого происходит процесс микросваривания электрода со слоем из сплава ВЖЛ2 (ВЖЛ2М), настолько сильно, что для отрыва электрода требуется усилие, равное 1-10 Н. Для преодоления эффекта «залипания» было предложено использовать дополнительное вращение электрода вокруг своей оси с целью обрывания «сварочного мостика» между электродом и обрабатываемой деталью за счет момента инерции, ко-

торый запасает электрод при вращении. Вращающийся электрод должен срезать сварочный мостик за счет запасенного количества движения.

Предварительные исследования показали, что для того, чтобы обрыв «сварочного мостика» был осуществлен для сплава ВЖЛ2 (ВЖЛ2М) без помехи протекания последующего импульса, отношение частоты вращения электрода к частоте вибрации электрода должно быть не менее 1. При этом увеличение этого параметра является наиболее предпочтительным.

Экспериментально это положение было подтверждено при использовании электродов с диаметрами 2–3 мм: устойчивое исчезновение «эффекта залипания» происходило при частоте вращения электрода 100–125 Гц.

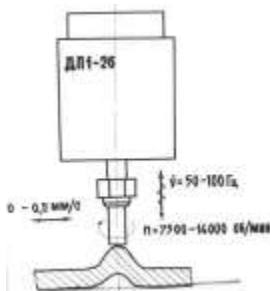


Рис. 1. Схема обработки ребра дефлектора из сплава ЭП693-ВД электродом из сплава ВЖЛ2М

На рис. 1 представлена схема обработки ребра дефлектора с вращающимся электродом с при вводом от двигателя постоянного тока ДП1-26 с указанием взаимных перемещений электрода.

Формирование покрытия из сплава ВЖЛ2 (ВЖЛ2М) с использованием вращения электрода вокруг своей оси отличается от формирования покрытия из сплава Т15К6. Это отличие заключается в том, что покрытие, полностью неуспевающее закристаллизоваться, размазывается по поверхности ребра дефлектора торцевой контактирующей поверхностью электрода, образуя слоя со 100% сплошностью, схема которого представлена на рис. 2.

На рис. 3 представлены зависимости привеса дефлекторов от количества двойных проходов электрода из сплава ВЖЛ2М. Зависимость привеса при обработке ребер как новых, так и ремонтных дефлекторов имеет, практически, линейный характер.



Рис. 2. Схема поперечного сечения ребра со сформированным покрытием вращающимся электродом из сплава ВЖЛ2 (ВЖЛ2М)

Однако следует отметить, что интенсивность увеличения привеса на ремонтных дефлекторах по сравнению с новыми при нанесении покрытия на однотипные ребра (только спинки или только корыта) существенно меньше. Это можно объяснить тем, что покрытие на ремонтных дефлекторах формируется не сразу: вначале происходит возгонка и разрушение оксидной пленки сформированной на покрытии Т15К6, а затем

на подготовленную таким образом поверхность наносится покрытие. Привесы при обработке ребер спинки и корыта различны. Это объясняется тем, что длина ребра спинки больше, чем корыта.

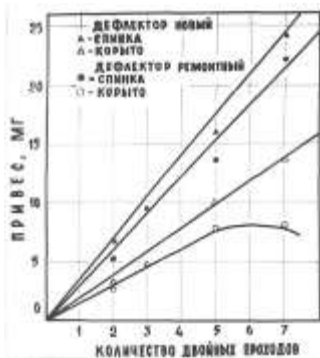


Рис.3. Зависимости привеса дефлектора из сплава ЭП693-ВД от количества двойных проходов по ребру электродом из сплава ВЖЛ2М

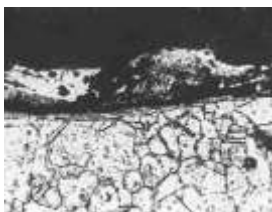
**Толщина слоя покрытия в зависимости от длительности обработки**

Количество двойных проходов		Толщина слоя покрытия, мкм		
		На спинке	На корыте	
Дефлектор	Новый	2	30 - 70	—
		3	30 - 80	20 - 70
		5	60 - 110	20 - 80
		7	110 - 200	60 - 110
	Ремонтный	2	20 - 60	—
		3	60 - 80	30 - 50
		5	60 - 140	30 - 120
	7	110 - 190	60 - 170	

В табл. приведены толщины слоев покрытия, как на новых, так и на ремонтных дефлекторах в зависимости от количества двойных проходов.



×400 (×0,33) - а



×400 (×0,33) - б

Рис. 4. Микроструктуры покрытия из сплава ВЖЛ2М на ребрах дефлекторов из сплава ЭП693-ВД: а – 3 прохода; б - 6 проходов

Анализ микроструктур (рис. 4), полученных при различном количестве двойных проходов показал, что структуры покрытий гетерофазны и соответствуют структурам литых сплавов ВЖЛ2 (ВЖЛ2М). В микроструктурах покрытий пропусков и трещин не обнаружено. Микротвердость покрытий составляет 7170 – 11000 МПа.

Микротвердость покрытий составляет 7170 – 11000 МПа.

**Литература**

1. Чатынян Л.А., Соловьева Т.А., Беляков А.В., Задябина Т.Б. А.с. СССР №747164 «Жаропрочный сплав на основе никеля» с приоритетом от 29.01.979.
2. Баенко И.И., Куранин С.П., Лазаренко Н.И., Разумов В.П. А.с. СССР № 539733 «Устройство для электроискрового легирования» с приоритетом от 30.12.1974.



Ю.С. БОРИСОВ, д.т.н., проф, Л.П. ОЛЕВСКАЯ, инж.  
(Институт электросварки им. Е.О. Патона, Украина)

## **Современные тенденции в развитии газотермического напыления покрытий**

Защита деталей машин и металлоконструкций от коррозии и износа, повышение долговечности машин и механизмов относятся к числу важнейших интернациональных проблем. Около 30% ежегодной выплавки металла либо теряются безвозвратно в виде продуктов коррозии и износа, либо обращаются в металлолом. Потери рабочего времени из-за поломок оборудования составляют около 80% общего времени простоев. Эксплуатационные расходы приближаются к стоимости самого оборудования.

В связи с вышесказанным технически и экономически целесообразно реализовать новый подход к выбору материалов. Механическая прочность детали гарантируется за счет применения одного материала, а сопротивление воздействию внешних факторов (коррозии, износу и др.) обеспечивается локальным формированием на ее поверхности тонких слоев со специальными функциональными свойствами.

В результате обеспечивается повышенная долговечность детали. При этом возможно создание изделий с уникальным сочетанием свойств, недостижимым при использовании традиционных конструкционных материалов, например, жаропрочность и жаростойкость, аморфное состояние поверхности деталей различной конфигурации и размеров и др.

Задачей разработки методов управления свойствами поверхности занимается инженерия поверхности. Эти методы могут быть разделены на две основные группы – модифицирование поверхности и нанесение покрытий. В первом случае изменение свойств поверхности осуществляется за счет изменения структурного состояния поверхностных слоев материала детали (аморфизация, создание метастабильных структур и др.) или его легирования. Во втором – на поверхности формируется слой с иным, отличным от основного материала, составом.

Среди разнообразных технологий нанесения защитных покрытий за последнее время интенсивное развитие получила группа газотермических методов, к которой относят плазменное, газопламенное и детонационное напыление, электродуговую металлизацию, а также в определенной мере и лазерное напыление. В их основе лежит единый принцип формирования защитного слоя из дискретных частиц материала, нагретых и ускоренных струей высокотемпературного газа.

### **1. Развитие рынка технологии газотермического напыления (ГТН)**

Период 1970-1990 гг. характеризуется бурным развитием рынка газотермического напыления. Его ежегодный прирост достигал  $10^{*}15$  %. В

1990 г. объем этого рынка в Северной Америке составил 640 млн долларов, в том числе продажа оборудования – 95 млн долларов, материала для напыления – 165 млн долларов и сервисное обслуживание – 380 млн долларов. В Японии рынок ГТН в 1990 г. достиг 912 млн долларов, в том числе 154 млн долларов – от продажи оборудования и расходных материалов и 758 млн долларов – от реализации технологии на более чем 160 японских компаниях (в т.ч. 406 млн долларов на Ниппон Стил, Хитачи, Тошиба, Мицубиси). В последние годы темпы развития несколько снизились и прогнозируются на уровне 8-10 % что, тем не менее, характеризует ГТН как молодую динамически развивающуюся отрасль промышленности.

## **2. Развитие теории ГТН**

Необходимость обеспечения потребностей развивающейся отрасли в новых технических решениях вызывает повышение интенсивности научных разработок, затраты на которые из бюджета стран и средств фирм-заказчиков оцениваются в настоящее время в мире на уровне 30-40 млн долларов ежегодно.

Анализ теоретических аспектов ГТН в части образования сил сцепления частиц напыляемого материала с поверхностью основы и между собой позволяет прогнозировать ряд направлений повышения качества газотермических покрытий, к которым относятся:

I. Увеличение импульсного давления при ударе частиц о поверхность основы, например, за счет применения сверхзвуковых газовых струй.

II. Снижение энергии активации образования сил связи, например, за счет введения дополнительной энергии в зону взаимодействия наложением ультразвуковой обработки.

III. Повышение температуры в контакте частиц с основой путем повышения температуры основы с предотвращением окисления (напыление в вакууме или инертной среде, применение защитных насадок), либо увеличением концентрации частиц в единице объема струи.

IV. Увеличение степени деформации напыляемых частиц за счет возрастания их скорости при применении сверхзвуковых струй.

V. Применение порошков с малым размером частиц (10-15 мкм и менее). Снижение интенсивности остывания частиц за счет тех же приемов, что указаны в поз. III.

Увеличение коэффициента сосредоточенности материала в пятне напыления за счет создания новых конструкций горелок, плазмотронов (например, с аксиальной подачей порошка) и т.п. Реализация этих направлений позволяет к настоящему времени достичь уровня прочности сцепления с основой при газоплазменном и плазменном напылении 100 МПа и выше, снизить пористость покрытий до 0,5-1,5 %.

Из отдельных направлений теоретических разработок в области ГТН, где отмечается наиболее интенсивное развитие исследований, следует выделить математическое моделирование сверх звуковых газопла-

менных струй, условий нагрева и движения частиц в этих условиях, а также анализ процесса деформации частиц при ударе об основу. Анализ условий затвердевания материала частиц покрытия позволяет прогнозировать его структурное состояние.

### 3. Материалы для ГТН

Условия сверхбыстрого охлаждения частиц дисперсного материала при газотермическом напылении создают принципиальные предпосылки для образования в покрытиях аморфных, нанокристаллических и метастабильных фаз. Это обстоятельство определило тенденцию в разработке новых материалов для ГТН, обеспечивающих формирование покрытий с нетрадиционной структурой, обладающей повышенными эксплуатационными свойствами. К ним относятся порошки и порошковые проволоки серий «АМОТЕК» (ИЭС им. Е.О. Патона, Украина) и «АРМАКОР» (АТИ, США) для получения покрытий с аморфизированной структурой. Следует отметить все возрастающую роль порошковых проволок как материала для газотермического напыления.

Возможность сохранения в газотермических покрытиях тонкодисперсных включений твердой фазы (TiC, CrB<sub>2</sub> и т.п.) размером 10-200 нм, имеющихся в исходных порошках, стимулирует в последнее время развитие работ в области ГТН покрытий с нанокристаллической структурой.

Еще одним классом покрытий с нетрадиционной структурой являются покрытия с квазикристаллической структурой, например, системы Al-Cu-Fe, обладающие рядом уникальных триботехнических, теплофизических и антиадгезионных свойств.

Все большее внимание в последнее время уделяется полимерам и металлополимерным системам для ГТН.

Из других новых видов материалов для ГТН, получающих все большее применение, необходимо отметить порошки для покрытий медицинского назначения, в частности, гидроксиапатит, фторапатит, биоактивные стекла и т.п.

### 4. Новые процессы ГТН

Одной из основных тенденций в развитии новых процессов ГТН в последнее время является использование высокоскоростных, в том числе сверхзвуковых струй при газопламенном и плазменном напылении. Другая состоит в разработке их на базе электродуговой металлизации как высокопроизводительного и экономичного процесса ГТН. С целью усовершенствования этого процесса, улучшения качества получаемых покрытий создаются его варианты с напылением в вакуумируемой камере, камере с инертной средой, комбинации электродуговой металлизации с газопламенным, плазменным, детонационным и высокоскоростным газопламенным напылением. В целом идея создания комбинированных технологий является достаточно популярной. Резуль-

татом ее развития служат плазменно-детонационный и плазменно-лазерный способы ГТН. Другим направлением создания новых процессов ГТН является реактивное газотермическое напыление, позволяющее синтезировать в процессе напыления новые фазы, например, нитриды, алмазы и алмазоподобные материалы.

К числу новых вариантов ГТН относятся созданные в последние годы ВЧ-плазменное и лазерное напыление. Продолжает оставаться в поле внимания развитие методов последующей обработки напыленных слоев путем ХТО и применения лазера.

## **5. Оборудование для ГТН**

Новые виды оборудования для ГТН и тенденции в их разработке обусловлены вышеуказанным направлением в создании новых процессов ГТН. Таким являются, например, многочисленные варианты установок высокоскоростного газопламенного напыления и оборудования для сверхзвукового плазменного напыления.

Новым типом установки для плазменного напыления являются установки микроплазменного напыления, обладающие рядом преимуществ, связанных диаметром пятна напыления (1-5мм), низким уровнем шума (30-50 дБ) и малой потребляемой мощностью (1-2 кВт) Они имеют перспективу применения при напылении объектов малых размеров, с тонкими стенками.

Среди новых конструкций плазмотронов традиционной мощности (15-40 кВт) отличается ряд оригинальных решений, обеспечивающих аксиальный ввод порошка в плазменную струю.

Значительные усилия в последнее время затрачиваются на создание систем текущего контроля процесса плазменного напыления.

## **6. Практическое применение ГТН**

При прогнозировании изменения рынка ГТН, объем которого, по мнению специалистов в 2000 г. достиг 4 млрд долларов, большое внимание уделяется оценке областей применения ГТН.

Предполагается, что наиболее значительное повышение степени применения ГТН произойдет в автомобильной промышленности, при производстве стационарных ГТН, в транспорте, химической промышленности, а также электротехнике и электронике. Сохранит ведущее положение применение ГТН в авиационных ГТД, где число деталей с газотермическими покрытиями достигнет 5500, а доля рынка сохранится около 30%. Ожидается массовое применение ГТН в дизелестроении, где половина двигателей будет выпускаться с теплозащитными покрытиями.

Из числа общепромышленного оборудования, где сохраняется тенденция все расширяющегося применения ГТН, можно отметить насосы, компрессоры, клапана и задвижки, штамповую оснастку, различные виды валов и др. К возникшим за последние годы новым объектам ГТН

относятся эндопротезы различного назначения, элементы твердотопливных систем, сохраняется интерес к высокотемпературным сверхпроводящим покрытиям. Все более четко проявляется заинтересованность промышленности в замене газотермическим напылением гальванических процессов, в первую очередь хромирования.

## **7. Стандартизация и обучение**

Превращение газотермического напыления в специализированную отрасль промышленности обострило задачу создания систем стандартизации и сертификации в этой области, а также подготовки квалифицированных кадров различного уровня. В связи с этим в США и Западной Европе ведется широкая разработка стандартов различного назначения, обеспечивающих развитие технологических процессов ГТН, формируется единая система сертификации, как производства, так и обслуживающего персонала, а также менеджмента в этой области. Создается система курсов подготовки, включая различные видеокурсы по ГТН. В конечном счете, предполагается введение обязательной сертификации всех видов деятельности в области ГТН, что должно поднять уровень этой технологии, обеспечить высокое и стабильное качество продукции.

## Индукционные электротехнологические устройства

Индукционные устройства как общепромышленного, так и специального назначения применяются в металлургии при плавке и литье цветных и чёрных металлов [1]. В работе рассматриваются три типа электротехнологических устройств: индукционная тигельная печь (рис. 1, а, б), индукционное устройство для перемешивания расплава в кристаллизаторе скольжения (рис. 2) и устройство электромагнитного перемешивания специальных сплавов в закрытом объёме (в реторте) (рис. 3).

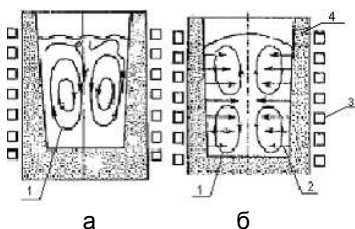


Рис. 1. Индукционная тигельная печь: а – однофазное питание; б – трёхфазное питание; 1 – направление движения расплава; 2 – направление электродинамических сил; 3 – обмотка индуктора; 4 – тигель

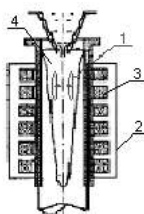


Рис. 2. Схема электромагнитного перемешивателя, совмещенного с кристаллизатором: 1 – направление движения расплава; 2 – магнитопровод; 3 – обмотка индуктора; 4 – жидкая фаза слитка

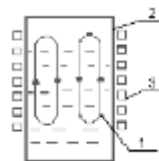


Рис. 3. Схема электромагнитного перемешивания в реторте: 1 – направление движения расплава; 2 – реторта; 3 – обмотка индуктора

Для всех трёх устройств общим является преобразование электрической энергии в тепловую и механическую. По определению индукционная плавильная печь предназначена для плавки металлов, следовательно, электромагнитное перемешивание в тигле является вторичным, а в установках электромагнитного перемешивания основным технологическим эффектом является бесконтактное силовое воздействие на расплав, а вторичным выделение тепловой энергии.

В индукционной тигельной печи электромагнитное перемешивание за счёт электродинамических сил создаёт условия для интенсификации нагрева, а также равномерного распределения легирующих элементов в объёме расплава и более активного взаимодействия шлака с жидким металлом. В индукционной тигельной печи движение расплава может быть организовано

как при однофазном питании – в сечении тигля наблюдается четырёхконтурное движение металла (рис. 1,б), так и при трёхфазном питании – в сечении тигля наблюдается двухконтурное движение металла (рис. 1,а). С металлургической точки зрения более эффективным является четырёхконтурное движение металла, т.е. требуется однофазное питание индукционной тигельной печи. При однофазном питании предполагается преобразование трёхфазной системы питающего напряжения в однофазную, то есть помимо электропечного трансформатора необходимо устройство, преобразующее переменное напряжение в постоянное (выпрямитель), и устройство для преобразования постоянного напряжения в переменное (инвертор).

Электромагнитное перемешивание, в процессе кристаллизации, предназначено для улучшения качества литой структуры слитка, а так же для получения специальных сплавов, когда по технологии требуется достаточно активное перемешивание расплава в реторте (альтернатива механическому перемешиванию). Нежелательные особенности макро- и микроструктуры и дефекты литого металла возникают, главным образом из-за неравномерности распределения температурных полей по объему слитка, а также вследствие постепенного изменения химического состава жидкой ванны в процессе кристаллизации и недостаточной подпитки кристаллизующихся участков расплавом. Применение различных физических воздействий, создающих движение расплава, должно оптимизировать структуру и снизить количество дефектов [3].

В устройствах электромагнитного перемешивания, работающих на промышленной частоте, предпочтение можно отдать трёхфазному питанию, позволяющему создать бегущее магнитное поле и реализовать движение расплава в аксиальном направлении, аналогичное движению, изображённому на рис. 1,б.

Помимо интенсивности воздействия на расплав, определяемой передаваемой мощностью посредством электромагнитного поля, помимо электрофизических и магнитных свойств материала тигля (кристаллизатора, реторты), электрофизических свойств расплава, в значительной степени определяющую роль в технологическом процессе играет схема включения обмоток перечисленных электротехнологических индукционных устройств. Расчёты МДС, нормальной и аксиальной составляющих индукции, усилий, выполненные с использованием методик, разработанных на кафедре ЭЭС УГТУ-УПИ [2], подтверждаются результатами исследований, проводимых кафедрой в промышленных условиях. В качестве иллюстрации на рис. 4,а,б приведены макроструктуры поперечных темплетов сплава Л63, отлитых с применением электромагнитного перемешивания при одной и той же линейной нагрузке на поверхности магнитопровода и при прочих равных условиях (скорость вытягивания слитка, давление охлаждающей жидкости, температура разливаемого металла), но при разных схемах включения обмоток индукционного устройства. При классическом варианте трёхфазного включения между токами, находящимися в рядом лежащих обмотках, как правило, реализуется шестидесятиградусная фазная зона.

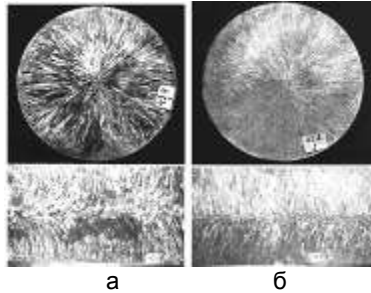


Рис. 4. Поперечный и продольный темплеты слитка Л63:  
а – схема AZBXCXY; б – AAZZBB

При варианте включения обмоток по схеме AZB, реализуется  $60^{\circ}$  -  $60^{\circ}$  -  $240^{\circ}$  фазная зона. В этом случае относительно рабочего объема возможно существование одного полюса для момента времени, когда три полуволны токов имеют одинаковый знак, т.е. возникают условия однофазного режима питания индукционной тигельной печи, рис. 5. При такой схеме реализуется бегущее и пульсирующее магнитные поля.

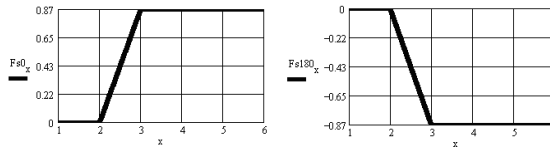


Рис. 5. Распределение МДС по пазам магнитопровода модели электромагнитного перемешивателя: схема соединения обмоток AAZZBB

В случае реализации схемы AZBBZA или BZAAZB при трёхфазном питании также реализуется вариант рис. 1,а. Таким образом, используя трёхфазный источник, можно получить движение расплава в объёме индукционной тигельной печи, кристаллизатора скольжения, реторте, аналогичное движению при однофазном питании.

### Литература

1. **Плавильные** комплексы ИТП и их математическое моделирование / В.И. Лузгин, С.Ф. Сарапулов, Ф.Н. Сарапулов, Б.А. Сокунов, Д.Н. Томашевский, В.Э. Фризен, И.В. Черных, В.В. Шипицин. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ - УПИ, 2006. – 464 с.
2. **Математические** модели линейных индукционных машин на основе схем замещения: Учеб. Пособие / Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, П. Шымчак. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ - УПИ, 2001. – 236 с.
3. **Индукционное** устройство в МГД-технологиях / Б.А. Сокунов, С.Ф. Сарапулов, Ю.С. Прудников и др. // Вопросы совершенствования электротехнологического оборудования и электротехнологий: Сб. статей. – Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2000. – № 8. – С. 4–17.



УДК 621.365.1

С.А. ГАЛУНИН, к.т.н., ассист., М.В. ЗЛОБИНА, к.т.н., ассист.,  
Ю.И. БЛИНОВ, д.т.н., проф., А.С. ВОЛЧКОВ, асп.  
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург)

## **Численное моделирование и оптимизация индукционных систем для нагрева дисков**

Современные технологии термообработки металлов предъявляют требования к нагревательным установкам по обеспечению высокой технологической гибкости процессов при высоких температурах и получению требуемых характеристик готовой продукции. Установки индукционного нагрева обеспечивают высокий технологический КПД благодаря микро-процессорному управлению технологическим процессом, обладают отличными возможностями автоматизации и высокой технологической гибкостью. Помимо этого, все большему применению индукционного нагрева способствуют растущие спрос и производство высококачественных изделий и материалов специального назначения. Без применения метода индукционного нагрева многие из этих специальных материалов, например, определенные сорта инструментальной стали или титан необходимой чистоты, либо вообще невозможно получить, либо нельзя произвести с требуемой рентабельностью. К устройствам прямого индукционного нагрева относится подавляющее большинство нагревателей металлических изделий под термическую обработку. Область применения устройств прямого индукционного нагрева ограничена сложной конфигурацией нагреваемого изделия и низкой электропроводностью его материала. В устройствах косвенного индукционного нагрева теплота выделяется в промежуточном нагревателе, от которого передается нагреваемым телам. При этом методе температуры и удельные мощности ограничены теплоотдачей от промежуточного нагревателя и его жаростойкостью и обычно невелики. Однако с помощью этих устройств можно получить высокую равномерность нагрева, нагревать непроводящие материалы, получать высокие энергетические показатели процесса [1].

Опыт последних лет показал высокую эффективность вычислительного эксперимента при проектировании индукционных нагревателей. Математическое моделирование позволяет значительно снизить расходы по сравнению с физическим моделированием, когда каждый эксперимент от подготовительного периода до обработки результатов требует существенных материальных и энергоресурсов.

Промежуточный нагреватель может быть любой конфигурации, но в случае нагрева металлических дисков промежуточный нагреватель предпочтительно выбрать той же формы, т.к. геометрия тела с осью вращения обеспечивает дополнительную возможность получения равномерного распределения температуры по поверхности диска. Конфигурация индукционной системы для нагрева металлического диска может быть одно- или многовитковой. Обычно используют индуктор в виде плоской

спирали, расположенной под промежуточным нагревателем. Индукционная система схематично изображена на рис. 1. В этом случае вихревые токи в диске формируют замкнутый поток с осью вращения. Благодаря симметричности системы по оси вращения расчет электромагнитных и тепловых полей можно производить в двухмерной постановке.



Рис. 1.

Для исследования и дальнейшей оптимизации индукционной системы в среде коммерческого пакета ANSYS [2] была разработана двухмерная электро-тепловая модель индукционного нагрева диска. Связь электромагнитного поля в системе с температурным полем обусловлена зависимостью удельного сопротивления материала от температуры. Совместное решение двухмерных электромагнитной и тепловой задач осуществлялось методом конечных

элементов. Процесс сходимости зависит от нелинейности системы. Обычно требуемая точность расчета конечного температурного поля достигается через 4-5 итераций.

В качестве примера применения данной модели на рис. 2 и 3 представлены распределения источников теплоты и температурного поля, полученные при расчете диска диаметром 130 мм и толщиной 20 мм при его индукционном нагреве на частоте 65 кГц. Величина тока подбиралась таким образом, чтобы получить температуру нагрева промежуточного нагревателя 1200 °С.

Из рис. 2 видно, что источники теплоты концентрируются в нижней части диска. В центре диска образуется «мертвая зона». Стационарное температурное поле (рис. 3) формируется за счет тепловых потерь с поверхностей диска. Распределение температурного поля неравномерно и имеет минимальное значение на торцевых кромках диска. Таким образом, невозможно получить равномерное распределение температурного поля только за счет внутренних источников теплоты. Выравнивание температуры по поверхности диска можно добиться за счет процесса теплопроводности путем оптимизации конфигурации индуктора. Численная оптимизация может осуществляться с помощью разработанной математической модели.

Процедура оптимизации состоит из нескольких этапов, общих для широкого круга инженерных задач. К ним относятся постановка задачи и математическое описание критерия оптимизации в форме целевой функции, выбранной для решения задачи. Выбор метода оптимизации определяется видом целевой функции, количеством независимых переменных, а также его эффективностью и продолжительностью оптимизационного поиска по времени. Опыт авторов показал, что Генетический алгоритм (ГА) является эффективным инструментом для оптимального проек-

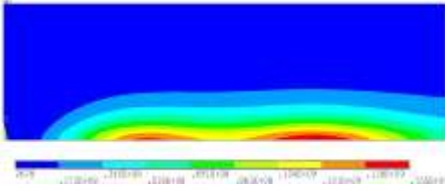


Рис. 2.

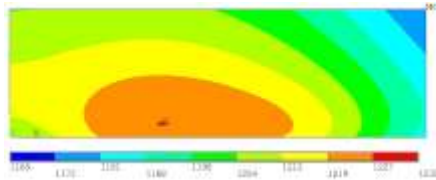


Рис. 3.

тирования сложных технических систем, как, например, индукционные установки [3].

Был разработан модульный способ стыковки программ оптимизационного поиска с программами вычисления целевой функции, при котором алгоритмы оптимизации объединены в специальную библиотеку в виде отдельных программ-модулей. Программы для вычисления целевой функции или наборы этих программ могут быть использованы в процедуре оптимизации без каких-либо изменений.

Разработанная структура позволяет производить стыковку ГА с численными моделями исследуемых электромагнитных и тепловых процессов и другими программами пользователя. Каждый набор независимых переменных, выданный алгоритмом оптимизации, преобразуется в исходные данные для численной модели при помощи специально созданного препроцессора, в то время как специальный постпроцессор вычисляет соответствующую величину целевой функции. Обмен данных организован через промежуточные файлы стандартного формата. Все программы самостоятельны и вызываются на исполнение по очереди под управлением командного файла. В так называемом файле-истории сохраняется информация о каждом шаге поиска.

Разработанный метод автоматической оптимизации был успешно применен для оптимального проектирования промышленной индукционной установки нагрева дисков.

### Литература

1. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. Л.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Release 10.0 Documentation for ANSYS, © 2005 SAS IP, Inc.
3. Electrothermal modelling and numerical optimization of induction system for disk heating / S. Galunin, M. Zlobina, Yu. Blinov, A. Nikanorov, T. Zedler, B. Nacke // Proceedings of the Int. Scien. Coll. Modelling for Material Processing Riga, June 8-9, 2006.

## Исследование и разработка индукционной системы для термопластического упрочнения дисков турбоагрегатов

Для восстановления дисков газотурбинных агрегатов методом термопластического упрочнения используется специальная технология, включающая заделку образовавшихся в процессе эксплуатации трещин с помощью сварки, слесарную доработку поверхности, нагрев до определенной температуры и последующее охлаждение.

Одним из эффективных методов нагрева, наиболее полно отвечающим всем требованиям практики термопластического упрочнения, является индукционный нагрев. Однако на пути реализации преимуществ индукционного нагрева возникает ряд специфических проблем. К числу таких проблем относится проблема моделирования электромагнитных и тепловых полей, расчет режимов нагрева, теоретическое и экспериментальное исследования алгоритмов управления процессами нагрева и реализация на их основе автоматизированных систем, обеспечивающих требуемое температурное распределение.

В общем случае процесс индукционного нагрева рассматриваемого класса объектов описывается нелинейной взаимосвязанной системой уравнений Максвелла [2] и Фурье [3] соответственно для электромагнитного и теплового полей с соответствующими краевыми условиями.

$$\operatorname{rot}\{\mathbf{H}\} = \{\mathbf{J}\} + \left\{ \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right\} = \{\mathbf{J}_s\} + \{\mathbf{J}_e\} + \left\{ \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right\} \quad (1)$$

$$\operatorname{rot}\{\mathbf{E}\} = -\left\{ \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right\}, \operatorname{div}\{\mathbf{B}\} = 0 \quad (2)$$

$$c_1(T_1)\gamma_1(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda_1(T_1)\operatorname{grad}T_1) - \operatorname{div}[\mathbf{E}\mathbf{H}] \quad (3)$$

Здесь  $\{\mathbf{H}\}$ ,  $\{\mathbf{B}\}$ ,  $\{\mathbf{D}\}$  – векторы напряженности магнитного поля, магнитной и электрической индукции,  $\{\mathbf{J}_s\}$  – вектор плотности приложенного тока,  $\{\mathbf{J}_e\}$  – вектор плотности индуцированного тока,  $\rho$  – плотность электрических зарядов,  $t$  – время,  $c_1$ ,  $\gamma_1$  – удельные значения теплоемкости и плотности материала изделия,  $T_1(r, x, t)$  – температурное поле диска,  $V_1$  – вектор скорости перемещения изделия относительно индуктора. Объемная плотность внутренних источников тепла, индуцируемых в тепловыделяющем цилиндре, определяется дивергенцией вектора Пойнтинга  $\Pi = -\operatorname{div}[\mathbf{E}\mathbf{H}]$  [2]. Решение системы (1)–(3) относительно температурного

поля  $T_1$ , описывающего тепловое состояние объекта, в общем случае возможно только численными методами для каждой конкретной технологической ситуации.

Для решения задач моделирования сложных объектов, представляющих собой систему с распределенными параметрами, наиболее эффективным методом является метод конечных элементов. Для расчёта электромагнитных параметров в качестве исходных задаются размеры и профиль диска, размеры и форма индуктора, физические характеристики материалов, взаимное расположение индуктора и диска, напряжение индуктора, настройки численного метода. Результаты расчета электромагнитной задачи в виде функции распределения внутренних источников тепла положены в основу определения в процессе нагрева температурного поля диска.

Решение задачи электромагнитного поля достигается использованием векторного магнитного потенциала  $\{\bar{A}\}$  и скалярного электрического потенциала  $V$  [3], [4], которые выражаются следующим образом:

$$\{\bar{B}\} = \text{rot}\{\bar{A}\}; \quad (4)$$

$$\{\bar{E}\} = -\left\{\frac{\partial \bar{A}}{\partial t}\right\} - \text{div}V. \quad (5)$$

Чтобы функция  $\{\bar{A}\}$  была определена, нужно определить значение ее дивергенции. Для этого добавляется условие, которое называется калибровкой Кулона [4]:

$$\text{div}\{\bar{A}\} = 0 \quad (6)$$

В результате получим следующую систему уравнений:

$$\text{rot}\left(\frac{1}{[\mu]}\text{rot}\{\bar{A}\}\right) + [\sigma]\frac{\partial\{\bar{A}\}}{\partial t} = \{\bar{J}\}; \quad (7)$$

$$\text{rot}\{\bar{A}\} = \{\bar{B}\}; \quad (8)$$

$$\text{div}\{\bar{A}\} = 0 \quad (9)$$

Используя соотношение

$$\text{rot}(\text{rot}\{\bar{A}\}) = \text{grad}(\text{div}\{\bar{A}\}) - \nabla^2\{\bar{A}\}, \quad (10)$$

при  $\mu = \text{const}$  из (7) получим уравнение

$$\nabla^2\{\bar{A}\} - j\omega\sigma\{\bar{A}\} - \{\bar{J}\} = 0 \quad (11)$$

Уравнение Пуассона (11) дополняется граничными условиями Дирихле и Неймана на различных участках границы.

Решение краевой задачи расчета магнитного поля в изотропной среде (11)-(12) эквивалентно минимизации энергетического функционала [4]:

$$F = \int_V \left[ \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \{A\}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \{A\}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \{A\}}{\partial z} \right] dx dy dz + \int_V j \omega \mu |A|^2 dx dy dz + \int_V \{J\} \{A\} dx dy dz \quad (13)$$

Решение данной задачи осуществляется итерационным методом.

Постановка тепловой задачи при разработке конечно-элементной модели имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a(T) \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \frac{1}{C_p(T) \rho(T)} \quad (14)$$

с граничными условиями:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_2} = \alpha(T - T_c); \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_1} = \alpha(T - T_c); \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_2} = \alpha(T - T_c)$$

где  $w(r, x, t)$  – функция распределения мощности внутренних источников тепла,  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $c$  – коэффициент удельной теплоемкости;  $\gamma$  – плотность материала,  $\alpha$  – коэффициент конвективного теплообмена.

Начальные условия имеют вид

$$T(r, x, 0) = T_0(r, x). \quad (15)$$

Коэффициент  $\alpha$  теплоотдачи включает значения коэффициентов конвективного ( $\alpha_{\text{к}}$ ) и радиационного ( $\alpha_{\text{р}}$ ) теплообмена:

$$\alpha_{\text{ос}} = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{р}}. \quad (16)$$

В работе проводится анализ различных конструктивных решений систем индукционного нагрева диска или его части для термопластического упрочнения. Анализ индукционных систем различных конструкций показал, что преимущества по массогабаритным показателям, простоте конструкции, согласованию параметров индуктора и источника питания имеет щелевой индуктор с рабочей частотой 8000 Гц.

## Литература

- 1. Термопластическое** упрочнение – резерв повышения прочности и надежности деталей машин: Монография / Б.А. Кравченко, В.Г. Круцило, Г.Н. Гутман. – Самара: СамГТУ, 2000. – 216 с.
- 2. Вайнберг А.М.** Индукционные плавильные печи. – М.: Энергия, 1967. – 415 с.
- 3. Лыков А.В.** Тепломассообмен (Справочник). – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
- 4. Немков В.С., Демидович В.Б.** Теория и расчет устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.

УДК 621.365.5

Ф.Н. САРАПУЛОВ, д.т.н., В.Э. ФРИЗЕН, к.т.н.  
(УГТУ–УПИ)  
А.Ю. ПЕТРОВ, к.т.н.  
(ЗАО РЭЛТЕК, Екатеринбург)  
В.А. ПРАХТ  
(НТИ(ф) УГТУ-УПИ, Н. Тагил)

## Система регулирования температуры установки индукционного нагрева

В данной работе рассматривается задача синтеза регулятора температуры для установки индукционного нагрева длинномерных заготовок (труб). Для демонстрации предлагаемого подхода, первоначально рассмотрим упрощенную задачу нагрева неподвижной заготовки, а затем, более сложный случай – нагрев движущейся заготовки.

Процесс нагрева двухслойной (по сечению) неподвижной заготовки при учете конвекции и излучения с поверхности описывается системой дифференциальных уравнений (ДУ) [1]

$$\left. \begin{aligned} \frac{dT_1}{dt} &= k_{11} \cdot T_1 + k_{12} \cdot T_2 + k_{13} \cdot T_{cp} + Q_1 \\ \frac{dT_2}{dt} &= k_{21} \cdot T_1 + k_{22} \cdot T_2 + k_{23} \cdot T_{cp} + Q_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $Q_n = \frac{\bar{P}_n}{V_n \cdot c \cdot \rho}$  – усредненное значение удельной мощности источника

теплоты в n-м слое заготовки,  $\bar{P}_n$  – усредненное значение активной мощности, выделяющееся в n-м слое заготовки (определяется из блока расчета электромагнитных процессов, в данной работе из-за ограниченности объема статьи этот блок не рассматривается, т.е. полагаем, что контур регулирования мощности уже настроен),  $c$  – удельная теплоемкость,  $\rho$  – плотность заготовки;  $T_n$  – температура n-го слоя;  $T_{cp}$  – температура окружающей среды. Коэффициенты  $k_{11}, \dots, k_{23}$  системы уравнений (1) зависят от параметров заготовки, граничных условий и определяются в соответствии с [1].

Примем, что вся мощность выделяется во внешнем слое (т.е.  $Q_1 = 0$ ). Требуется построить закон управления  $Q_2$ , переводящий систему (1) из начального состояния  $T_{2,н.у.}$  в конечное состояние  $T_{2,зад}$  (при условии  $T_{2,зад} > T_{2,н.у.}$ ) за время  $\Delta t$ .

При скоростном нагреве (когда  $\Delta t$  мало) можно считать что функции  $T_1(t), T_2(t)$  имеют кусочно-линейный профиль. В этом случае систему ДУ можно свести к дискретному аналогу

$$\left. \begin{aligned} \frac{T_{1,\text{кон}} - T_{1,\text{н.у}}}{\Delta t} &= k_{11} \cdot T_{1,\text{ф}} + k_{12} \cdot T_{2,\text{ф}} + k_{13} \cdot T_{\text{ср}} + 0 \\ \frac{T_{2,\text{кон}} - T_{2,\text{н.у}}}{\Delta t} &= k_{21} \cdot T_{1,\text{ф}} + k_{22} \cdot T_{2,\text{ф}} + k_{23} \cdot T_{\text{ср}} + Q_2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

здесь  $T_{1,\text{ф}} = 0.5 \cdot (T_{1,\text{н.у}} + T_{1,\text{кон}})$ ,  $T_{2,\text{ф}} = 0.5 \cdot (T_{2,\text{н.у}} + T_{2,\text{кон}})$  – усредненное значение температуры внутреннего и внешнего слоя на интервале времени  $\Delta t$ .

При отсутствии ограничений на управляющие воздействия можно считать, что за время  $\Delta t$  температура внешнего слоя достигает заданного значения (т.е.  $T_{2,\text{кон}} = T_{2,\text{зад}}$  и  $T_{2,\text{ф}} = 0.5 \cdot (2 \cdot T_{2,\text{н.у}} + E)$ , здесь  $E = T_{2,\text{зад}} - T_{2,\text{н.у}}$  – сигнал рассогласования). Из первого уравнения системы (2) находим

$$T_{1,\text{кон}} = \frac{T_{1,\text{н.у}}(0.5 \cdot k_{11}\Delta t + 1) + 0.5 \cdot k_{12}(2 \cdot T_{2,\text{н.у}} + E)\Delta t + k_{13} T_{\text{ср}} \Delta t}{1 - 0.5 \cdot k_{11}\Delta t} \quad (3)$$

Из второго уравнения системы (2) получаем выражение, определяющее величину удельной мощности, необходимую для перевода системы из начального состояния  $T_{2,\text{н.у}}$  в конечное состояние  $T_{2,\text{зад}}$  за время  $\Delta t$

$$Q_2 = \frac{E}{\Delta t} - k_{21} \cdot 0.5 \cdot (T_{1,\text{н.у}} + T_{1,\text{кон}}) - k_{22} \cdot 0.5 \cdot (2 \cdot T_{2,\text{н.у}} + E) - k_{23} \cdot T_{\text{ср}} \quad (4)$$

где  $T_{1,\text{кон}}$  определяется из уравнения (3).

Кривые нагрева системы и управляющее воздействие приведены на рис. 1,а и рис. 1,б, соответственно.

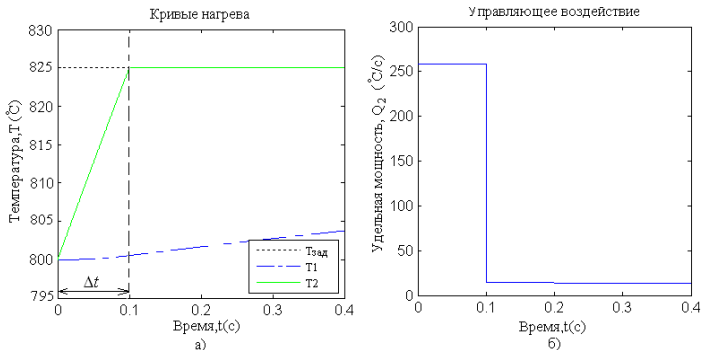


Рис. 1

Разбивая процесс нагрева на малые интервалы времени  $\Delta t$  можно задавать интенсивность нагрева (рис. 2).



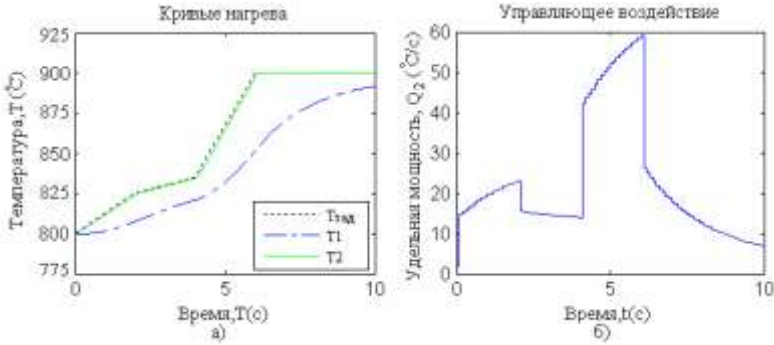


Рис. 2

Стоит отметить, что при малых  $\Delta t$ , задачу можно существенно упростить, приняв в уравнении (2) усредненное значение температуры слоя на интервале  $\Delta t$  равное мгновенному (текущему) значению (т.е.  $T_{1,ф} = T_{1,тек}$  и  $T_{2,ф} = T_{2,тек}$ ). Тогда, выражение, определяющее величину удельной мощности, принимает вид

$$Q_2 = \frac{E}{\Delta t} - (k_{21} \cdot T_{1,тек} + k_{22} \cdot T_{2,тек} + k_{23} \cdot T_{ср}) \quad (5)$$

Кривые нагрева системы (а) и управляющее воздействие (б) при законе управления (5) приведены на рис. 3.

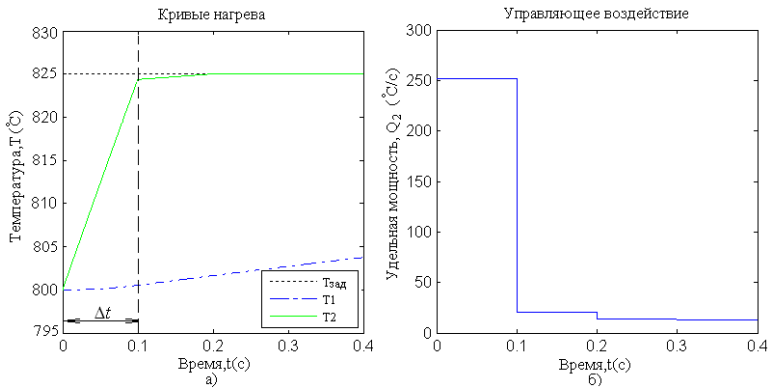


Рис. 3

Такой подход целесообразно применять при разбиении нагреваемой заготовки на участки по длине и сечению (т.е. при большой размерности системы уравнений, описывающей процесс нагрева, и при громоздкости вывода выражения, определяющего величину удельной мощности).

Рассмотрим случай нагрева движущейся осесимметричной заготовки. Нагреваемая заготовка под индуктором делится на  $n$  участков по длине и  $m$  участков по сечению. Схема разбиения и нумерация участков показаны на рис. 4. Картина распределения температуры рассматривается при этом в неподвижной системе координат, связанной с индуктором.



Рис. 4

Процесс нагрева движущейся заготовки, находящейся в индукторе (при разбиении соответствующем рис. 4) описывается системой ДУ [2]

$$\frac{dT_{i,j}}{dt} = k1_{i,j} \cdot T_{i,j} + k2_{i,j} \cdot T_{i-1,j} + k3_{i,j} \cdot T_{i,j-1} + k4_{i,j} \cdot T_{i+1,j} + k5_{i,j} \cdot T_{i,j+1} + Q_{i,j} \quad (6)$$

здесь  $T_{i,j}$  – температура  $i$ -го,  $j$ -го участка ( $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, m}$ ). В качестве граничных условий на внутренней/внешней поверхности используем условие Неймана, а на левой границе задаем температуру участка входящего в индуктор (измеряется датчиком температуры). Примем, что вся удельная мощность выделяется под индуктором и равномерно распределяется по сечению и длине (т.е.  $Q_{i,j} = Q$ ).

Требуется построить закон управления  $Q(t)$ , переводящий систему (6) из текущего состояния  $T_{n,m,тек}$  в конечное состояние  $T_{n,m,зад}$  ( $T_{n,m,зад} > T_{n,m,тек}$ ) за время  $\Delta t$ . Управляющий параметр должен удовлетворять условию  $0 \leq Q \leq Q_{max}$  ( $Q_{max}$  зависит от максимально допустимой плотности тока в проводе индуктора).

По аналогии с подходом, предложенным выше, дифференциальное уравнение для выходного участка системы (6) сведем к дискретному аналогу:

$$\frac{E_{n,m}}{\Delta t} = k1_{n,m} T_{n,m,\phi} + k2_{n,m} T_{n-1,m,\phi} + k3_{n,m} T_{n,m-1,\phi} + k4_{n,m} T_{n+1,m,\phi} + k5_{n,m} T_{cp} + Q \quad (7)$$

здесь  $T_{cp}$  – температура окружающей среды,  $E = T_{n,m,зад} - T_{n,m,тек}$  – сигнал рассогласования. Предположим, что усредненное значение температуры участка на интервале  $\Delta t$  равно текущему значению. Находим выражение, определяющее величину удельной мощности, необходимую для перевода системы из начального состояния  $T_{n,m,тек}$  в конечное состояние  $T_{n,m,зад}$  за время  $\Delta t$

$$Q = \frac{E}{\Delta t} - (k1_{n,m} T_{n,m,тек} + k2_{n,m} T_{n-1,m,тек} + k3_{n,m} T_{n,m-1,тек} + k4_{n,m} T_{n+1,m,тек} + k5_{n,m} T_{ср}) \quad (8)$$

Текущие (мгновенные) значения температуры участков, расположенных под индуктором, вычисляются по модели, т.к. эти величины затруднительно измерить.

Результаты моделирования при управляющем воздействии (8) приведены на рис. 5 ( $T_{n,m}$  – температура участка выходящего из индуктора,  $T_{вх}$  – температура на входе в индуктор (пунктирная линия),  $T_{зад}$  – заданное значение температуры заготовки на выходе из индуктора,  $\Delta t = 0.04$  (с) – дискретность системы. В момент времени  $t = 0$  начальная температура слоев, находящихся под индуктором, была принята равной  $T = 825$  ( $^{\circ}\text{C}$ )).

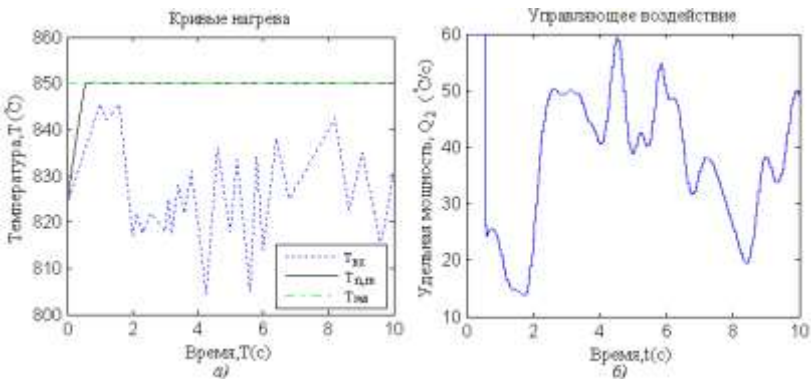


Рис. 5

Как видно из рис. 5, регулятор температуры решает поставленную задачу. По аналогии с предложенным подходом можно настроить систему управления для случая неравномерного выделения мощности по длине и сечению нагреваемой заготовки.

### Литература

1. Лузгин В.И., Сарапулов С.Ф., Сарапулов Ф.Н. и др. Плавильные комплексы на основе индукционных тигельных печей и их математическое моделирование: учеб. пособие. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005.
2. Петров А.Ю., Лузгин В.И., Сарапулов Ф.Н. и др. Математическое моделирование индукционного нагрева стальной трубы // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий: Тр. Всерос. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006.

## Электротепловые процессы в индукционном трубчатом нагревателе жидкости

Исследуемый в настоящей работе индукционный нагреватель жидких сред представляет собой пучок труб, по которым протекает нагреваемая жидкость. Трубы размещаются по образующей внутри катушки цилиндрического индуктора, который создает переменное электромагнитное поле. Ввиду низкой теплопроводности нагреваемой жидкости диаметр труб значительно меньше, чем внутренний диаметр индуктора.

В общем случае процесс непрерывного косвенного индукционного нагрева жидкости, протекающей по трубе теплообменника, описывается нелинейной взаимосвязанной системой уравнений Максвелла и Фурье соответственно для электромагнитного и теплового полей с соответствующими краевыми условиями [1, 2].

$$\operatorname{rot}\{\vec{H}\} = \{J\} = \{J_s\} + \{J_e\} \quad (1)$$

$$\operatorname{rot}\{\vec{E}\} = -\left\{\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right\} \quad (2)$$

$$\operatorname{div}\{\vec{B}\} = 0 \quad (3)$$

$$c_1(T_1)\gamma_1(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda_1(T_1)\operatorname{grad}T_1) - \operatorname{div}[EH] \quad (4)$$

$$c_2(T_2)\gamma_2(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda_2(T_2)\operatorname{grad}T_2) - c_2(T_2)\gamma_2(T_2)V\operatorname{grad}T_2 \quad (5)$$

Здесь  $\{H\}$ ,  $\{B\}$  – векторы напряженности магнитного поля и магнитной индукции,  $\{J_s\}$  – вектор плотности первичного тока,  $\{J_e\}$  – вектор плотности индуцированного тока,  $\{J_s\}$  – вектор плотности приложенного тока,  $t$  – время,  $T_1, T_2$  – соответственно температурные поля в стенке трубы и в потоке жидкости,  $c_1, c_2, \gamma_1, \gamma_2$  – удельные значения теплоемкости и плотности материалов трубы и жидкости,  $V$  – вектор скорости перемещения потока. Объемная плотность внутренних источников тепла, индуцируемых в стенках труб, определяется дивергенцией вектора Пойнтинга  $\Pi = -\operatorname{div}[EH]$ .

Первым этапом в решении поставленной задачи является исследование закономерностей распределения внутренних источников тепла при изменении электро- и теплофизических характеристик объекта.

Принимая во внимание осевую симметрию и квазистационарность исследуемого электромагнитного поля, уравнение Максвелла может быть представлено для комплексной амплитуды векторного потенциала в виде:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{1}{\mu_a(r,z)} \cdot \frac{\partial \dot{A}(r,z)}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{\mu_a(r,z)} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial r \dot{A}(r,z)}{\partial r} \right] - j\omega \dot{A}(r,z) - J_0(r,z) = 0 \quad (6)$$

Здесь  $\dot{A}$  – векторный магнитный потенциал,  $\omega$  – частота.

В качестве ГУ для определенности задачи примем наиболее общие условия – равенство нулю векторного потенциала на границе расчетной области, находящейся в бесконечности. В реальной ситуации граница области должна быть достаточно удалена от источников тока, где магнитная энергия поля действительно спадает до нуля. В плоскостях геометрической симметрии полагается перпендикулярность линий потока этим плоскостям

$$\dot{A} \Big|_{S_1, S_2} = 0; \quad \frac{\partial \dot{A}}{\partial n} \Big|_{S_1, S_2} = 0. \quad (7)$$

Здесь:  $S_1$  – удаленная граница области  $Q$ ;  $S_2$  – граница плоскостной симметрии.

Для учета нелинейной зависимости  $\mu_a(H)$  в ферромагнитных областях разработан итерационный алгоритм многократного решения результирующей системы уравнений. Определение магнитной проницаемости производится с помощью введения в программу расчета полинома, аппроксимирующего кривую намагничивания.

Расчет гидродинамических характеристик ламинарного потока вязкой жидкости проводится с целью получения зависимости температурного распределения в потоке жидкости с учетом неравномерного распределения скорости потока по сечению. Математическое описание движения основывается на уравнениях неразрывности Навье-Стокса, в которые подставляется истинная скорость, зависящая от радиальной координаты. Уравнение непрерывности для случая вязкой несжимаемой жидкости вытекает из закона сохранения массы

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} = \text{div}(\gamma v) \quad (8)$$

где  $\gamma$  – плотность,  $v$  – вектор скорости,  $t$  – время. Скорость изменения плотности заменяется на скорость изменения давления  $P$  и на скорость изменения плотности по давлению:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} = \frac{\partial \gamma}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (9)$$

На основании приведенных зависимостей методом конечных элементов решена гидравлическая задача, которая позволила определить распределение скоростей по сечению потока жидкости. Расчеты показывают, что для исследуемой жидкости имеет место ламинарное течение.

Следующим этапом исследования является разработка математической модели тепловых процессов в сложной физически неоднородной системе сопряженных тел с относительным движением. Принимая во внимание одинаковые условия теплообмена в трубах, будем рассматривать процесс нагрева жидкости в одиночной цилиндрической трубе с внутренними источниками тепла, выделяющимися в стенках трубы под действием вихревых токов. При таких допущениях процесс нагрева потока жидкости можно рассматривать как задачу с внешним теплообменом, описываемую однородным уравнением теплопроводности для движущегося цилиндра с управлением, вводимым в граничные условия на внешней поверхности потока. В качестве основного варианта принимаются краевые условия второго рода, т.е. принимаем, что нагрев осуществляется тепловым потоком, создаваемым вихревыми токами в трубах теплообменника.

Математическая формулировка задачи может быть приведена к линейному дифференциальному уравнению теплопроводности вида

$$\frac{\partial T(r, y, t)}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T(r, y, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, y, t)}{\partial r} \right) - V(r) \frac{\partial T(r, y, t)}{\partial y} \quad (10)$$

с начальными и граничными условиями

$$T(r, 0) = T_{10}(r); \quad \lambda \frac{\partial T(R, y, t)}{\partial r} = q(y, t); \quad \frac{\partial T(R, y, t)}{\partial r} = 0 \quad (11)$$

Здесь  $R$  – внутренний радиус трубы,  $T(r, y, t)$  – температурное поле потока жидкости,  $q(y, t)$  – поток тепла с поверхности трубы, соответствующий источникам внутреннего тепловыделения в стенке трубы,  $r, y$  – соответственно радиальная и осевая координаты,  $V(r)$  – скорость потока жидкости. Для решения задачи тепломассопереноса в указанной постановке разработаны вычислительный алгоритм и программа, которая содержит три взаимосвязанных расчетных блока – электрический, гидродинамический и тепловой. Как показывают расчеты, вследствие низкой теплопроводности нефти при ламинарном течении ее нагрев характеризуется большим перепадом температур по сечению потока, что приводит к необходимости поиска оптимального соотношения между длиной нагревателя и диаметром трубы нагревателя.

#### Литература

1. **Вайнберг А.М.** Индукционные плавильные печи. – М.: Энергия, 1967. – 415с.
2. **Лыков А.В.** Тепломассообмен (Справочник). – М.: Энергия, 1978. – 480 с.

УДК 621.365.5

А.М. ЛЮБОМИРОВ, к.т.н., доц., Т.А. ГАЛУНИНА, асп.  
(Санкт-Петербургский электротехнический университет «ЛЭТИ»)

## **Влияние отложений в системе водяного охлаждения на срок эксплуатации индукционной установки**

Срок эксплуатации индукционной установки во многом зависит от эффективности работы её системы водяного охлаждения. Температура воды на входе в систему охлаждения должна быть 15...20°C, чтобы исключить оседание атмосферной влаги на токоведущих частях установки. На выходе температура воды не должна превышать 50...55°C, так как при более высокой температуре интенсифицируется процесс выпадения растворенных в воде солей, загрязняющих систему охлаждения [1, 2]. Охлаждающая вода должна иметь определенное качество: рН – 5...7,5; взвешенные вещества – до 20 мг/л; минеральные примеси – до 84 мг/л [3].

Если суммарная мощность электротехнологического оборудования велика, то на предприятии создается замкнутая система водоснабжения. Установки индукционной плавки оксидов в холодных тиглях (ИПХТ), могут иметь и аварийную систему водоснабжения для предотвращения аварии и сохранения тигля с оксидным расплавом, например, при резком снижении давления воды в заводской магистрали [4].

Важнейшей областью применения установок ИПХТ являются технологии остекловывания радиоактивных отходов [5]. Из комплекса оборудования, входящего в установку, печь ИПХТ должна обслуживаться дистанционно, работать без аварий и максимально долго.

Если исключить ситуации, связанные с перебоями в электропитании и подаче охлаждающей воды, то остается практически один фактор, влияющий на срок эксплуатации индукционной установки, заключающийся в оседании в системе водяного охлаждения веществ, содержащихся в охлаждающей воде. Применительно к индукционным установкам, включая и ИПХТ, эта проблема до сих пор не исследована.

Следует отметить, что в комплекс контрольно-измерительной аппаратуры современных индукционных установок входят датчики давления, протока и температуры охлаждающей воды. Однако датчики могут выйти из строя или давать ложную информацию из-за загрязнения их веществами, содержащимися в охлаждающей установку воде.

Для практики представляет интерес оценка толщины слоя отложений в системе водяного охлаждения, при котором может произойти авария и время формирования такого слоя. Эту задачу можно решить, если известны скорость роста слоя отложений, их химический состав и теплофизические свойства.

Отложения в системах охлаждения промышленного теплотехнического оборудования называют накипью, которая состоит преимущественно из CaCO<sub>3</sub> [6]. Однако отложения в системах охлаждения индукционных установок могут иметь совершенно другую природу и другой химический

состав. Причина этого заключается в коррозии металла градирен и трубопроводов. Анализ воды, из ванны промышленной градирни показал [7]: рН – 8,3; взвешенные вещества – 101,6 мг/л; сухой остаток – 3943,6 мг/л. Химический состав отложений в системах охлаждения промышленного оборудования был следующий в масс. %: 73,6 –  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; 3,64 –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 1,72 –  $\text{SiO}_2$ ; 0,06 –  $\text{P}_2\text{O}_5$  и др.

Различия в требуемом и реальном качестве охлаждающей воды побудило провести настоящие исследования. Объектом исследований была промышленная индукционная установка мощностью 100 кВт. В процессе исследований периодически измеряли перепад давления воды, расход воды, температуру воды на входе и выходе системы охлаждения. Толщина слоя ( $\Delta$ ) и эффективный коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ ) отложений рассчитывались при обработке экспериментальных данных в предположении, что толщина и скорость роста слоя отложений постоянны по длине системы охлаждения.

На рис. 1 представлены экспериментальные зависимости изменения во времени значений  $\lambda$  и  $\Delta$ .

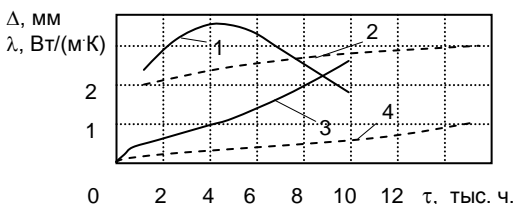


Рис. 1. Изменение во времени  $\lambda$  и  $\Delta$  отложений в системах водяного охлаждения электротехнологических установок: 1,3 –  $\lambda$ ; 2,4 –  $\Delta$  (кривые 1,3 построены по данным [7]).

Анализ результатов показал, что толщина слоя отложений увеличивается во времени почти линейно, а зависимость эффективного коэффициента теплопроводности имеет максимум. Последнее объясняется тем, что в начале увеличения слоя отложений происходит ссыханием и уплотнением.

Вероятно в этих отложениях концентрация оксида железа выше, что и увеличивает эффективный коэффициент теплопроводности. Когда толщина отложений достигает 1,0 мм, то этот процесс прекращается. Следующие слои отложений видимо имеют монотонно возрастающее содержание влаги или гидрооксида железа, что и способствует последующему снижению значений  $\lambda$ .

Микроскопические исследования показали, что отложения имеют слоистую структуру. Химический анализ показал, в наших исследованиях высокое содержание в отложениях  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , составившее 64,2 масс.%, что согласуется с данными работы [7]. Содержание в воде сухого остатка в наших исследованиях составило всего 921,3 мг/л.

Следует отметить, что заметна четкая зависимость в значениях  $\lambda$  от содержания в отложениях  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , (см. рис. 1, кривые 1 и 2). Очевидна и количественная взаимосвязь между скоростью роста слоя отложений и содержанием в воде сухого остатка (см. рис. 1, кривые 3 и 4).



Можно сделать выводы о том, что скорость роста отложений в системах охлаждения электротехнологических установок пропорциональна содержанию в охлаждающей воде сухого остатка, а изменение во времени значений эффективного коэффициента теплопроводности отложений пропорционально содержанию в них оксидов железа.

Опираясь на результаты работы, выполнена оценка срока эксплуатации холодного тигля печи ИПХТ из 14-ти U-образных секций. Внутренний диаметр тигля был 0,1 м. Тигель имел две параллельные ветви охлаждения. Секции выполнены из медной трубки с наружным диаметром 10,0 мм и толщиной стенки 1,5 мм. Мощность тепловых потерь, отводимая водой, принималась 20 кВт, а температура и давление воды на входе в систему охлаждения тигля соответственно 20°C и  $2 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>.

Оказалось, что при толщине слоя отложений равном 1,3 мм, расход воды, из-за уменьшения диаметра канала снизится почти в 3,5 раза. При этом перепад температуры охлаждающей воды достигнет 80°C. Согласно результатам исследований представленным на рис. 1 (см. кривую 4) можно прогнозировать, что это произойдет через 16,2 тыс. ч.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. В электротехнологическом оборудовании, подключенном к системе оборотного водоснабжения предприятия, загрязнение каналов системы охлаждения происходит преимущественно оксидами железа;

2. Толщина слоя отложений в системе охлаждения увеличивается во времени, практически по линейному закону;

3. Скорость увеличения толщины слоя отложений в системе охлаждения и срок эксплуатации установки находятся в прямой зависимости от количества сухого остатка в пробах охлаждающей воды;

### Литература

1. **Вологдин В.В.** Трансформаторы для высокочастотного нагрева. – М.-Л.: Машиностроение, 1965. – 100 с.
2. **Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е.** Индукторы для индукционного нагрева. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
3. **Шамов А.Н., Бодажков В.А.** Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок. – Л.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
4. **Петров Ю.Б., Ратников Д.Г.** Холодные тигли. – М.: Металлургия, 1972. – 112 с.
5. **Применение** индукционной плавки в холодных тиглях при остекловывании жидких радиоактивных отходов / Ю.Б. Петров, Д.Б. Лопух, А.М. Любомиров и др. // Тез. докл. междунар. симпоз. «Научные проблемы электротехнологических процессов, связанных с вопросами сбережения энергоресурсов и экологии», Россия. – СПб., 28-30 июня 1994. – С. 210-211.
6. **Богорош А.Т.** Вопросы накипеобразования. – Киев: Выща школа, 1990. – 178 с.
7. **Загрязнение** водяного тракта маслоохладителя / Е.Ф. Кузнецов, В.С. Масалов, Ю.Н. Куликов и др. // Энергомашиностроение. – 1974. – № 5. – С.36-38.

## Исследование электромагнитных и тепловых полей при нагреве цилиндрической заготовки в бегущем магнитном поле

В большинстве промышленных установок для нагрева крупногабаритных цилиндрических заготовок перед прессованием используются одно или многофазные соленоидальные индукционные нагреватели промышленной частоты. Наряду с относительно простой конструкцией катушки индуктора они обладают рядом существенных недостатков. К ним относятся: наличие краевых эффектов, приводящих к неравномерности нагрева по длине заготовки; низкий коэффициент мощности, который обуславливает необходимость установки автономных компенсирующих устройств; взаимное влияние секций многофазных индукторов, следствием чего является неравномерное распределение мощности по секциям и несимметрия напряжения сети.

В настоящей работе рассматривается процесс нагрева цилиндрической заготовки в бегущем магнитном поле, создаваемом обмоткой трехфазного индуктора, выполненного в виде статора асинхронной машины. Это позволит обеспечить равномерную загрузку трех фаз сети, повысить коэффициент мощности системы и уменьшить влияние краевых эффектов на продольный температурный градиент заготовки.

Реализация такого метода нагрева требует решения ряда задач, связанных с исследованием электромагнитных и тепловых полей системы, разработкой конструкции индуктора, правильным подбором тепловой изоляции, выбором оптимальной схемы трехфазной обмотки.

Общей теоретической моделью для решения электромагнитной и тепловой задач являются уравнения Максвелла [1] и Фурье [2].

$$\operatorname{rot}\{\vec{H}\} = \{J\} + \{J_s\} + \{J_e\} \quad (1)$$

$$\operatorname{rot}\{\vec{E}\} = -\left\{\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right\}, \quad \operatorname{div}\{\vec{B}\} = 0 \quad (2)$$

$$c_1(T_1)\gamma_1(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda_1(T_1)\operatorname{grad}T_1) - \operatorname{div}[EH] \quad (3)$$

Здесь  $\{E\}$ ,  $\{H\}$ ,  $\{B\}$  – векторы напряженности электрического и магнитного полей и магнитной индукции соответственно,  $\{J_s\}$  – вектор плотности приложенного тока,  $\{J_e\}$  – вектор плотности индуцированного тока,  $c_1$ ,  $\gamma_1$  – удельные значения теплоемкости и плотности материала изделия,

$T_1 = T_1(r, x, t)$  – температурное поле диска. Объемная плотность внутренних источников тепла, индуцируемых в диске, определяется дивергенцией вектора Пойнтинга  $\Pi = -\text{div}[\mathbf{EH}]$ .

Численное моделирование процесса осуществлялось с помощью среды технологических расчетов ELCUT. Программа позволяет за счет большого числа элементов решить электромагнитную и тепловую задачи для тел сложной формы с высокой точностью. Использование данного метода позволяет учесть нелинейную зависимость параметров системы от температуры. Для расчета энергетических характеристик индукционной системы и выбора геометрических параметров индуктора производился расчет теплового и электромагнитного полей на базе метода конечных элементов. Анализ магнитного поля переменных токов состоит в расчете электрического и магнитного поля, возбужденного приложенными переменными (синусоидально изменяющимися во времени) токами или внешним переменным полем.

Все компоненты поля и электрические токи изменяются по закону:

$$z = z_0 \cos(\omega t + \varphi_z),$$

где  $z_0$  – амплитудное (максимальное) значение  $z$ ,  $\varphi_z$  – фазовый угол, и  $\omega$  – угловая частота.

Представление гармонически изменяющейся величины при помощи комплексного числа существенно облегчает анализ. Действительная и мнимая части комплексного числа

$$z = z_0 \cdot e^{i(\omega t + \varphi_z)} \quad (4)$$

сдвинуты по фазе на 90 град по отношению друг к другу, так что их линейная комбинация может представлять произвольный фазовый угол. В зависимости от фазового сдвига между двумя осциллирующими компонентами вектора последний может вращаться по часовой стрелке или в противоположном направлении, либо колебаться вдоль некоторого направления. В общем случае конец вектора описывает эллипс. Главные полуоси эллипса соответствуют максимальным значениям векторной величины. Отношение длин меньшей и большей полуосей определяет коэффициент поляризации вектора. Последний предполагается положительным при вращении вектора против часовой стрелки и отрицательным в противоположном случае.

Полный ток в проводнике может рассматриваться как сумма стороннего тока, вызванного приложенным извне напряжением, и вихревого тока, индуцированного магнитным полем индуктора.

Задача формулируется как дифференциальное уравнение в частных производных относительно комплексной амплитуды векторного магнитного потенциала  $A$  ( $\mathbf{B} = \text{rot}A$ ,  $\mathbf{B}$  – вектор магнитной индукции). Уравнение для осесимметричного случая будет иметь вид:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r \mu_z} \frac{\partial A}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu_r} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - i \omega \sigma g = -j_{\text{стоп}}, \quad (5)$$

где электропроводность  $g$  и компоненты тензора магнитной проницаемости  $\mu_z$  и  $\mu_r$  постоянны в пределах каждого блока модели. Сторонняя составляющая тока  $j_{\text{стоп}}$  предполагается обратно пропорциональной радиусу. Источники поля могут включать объемную, поверхностную или линейную плотность тока, а также напряжение, приложенное к проводникам.

В осесимметричном случае точечный источник соответствует тонкому кольцевому проводнику, перпендикулярному плоскости модели. Плотность тока, заданная на ребре модели, соответствует поверхностному току в трехмерном пространстве. Она определяется заданием граничного условия Неймана на ребре модели.

При решении тепловой задачи в осесимметричном случае используется уравнение теплопроводности в виде:  
для линейных задач:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_{rT} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_{zT} \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q - c\rho \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (5)$$

для нелинейных задач:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda(T)r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q(T) - c(T)\rho \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (6)$$

где:  $T$  – температура;  $t$  – время;  $\lambda(T)$  – теплопроводность как функция температуры, представленная кубическим сплайном;  $q(T)$  – удельная мощность тепловыделения; в линейной постановке – константа, в нелинейной постановке – задаваемая кубическим сплайном функция температуры;  $c(T)$  – удельная теплоемкость, в нелинейном случае это функция температуры, аппроксимированная кубическими сплайнами;  $\rho$  – плотность. Все параметры уравнений в линейной постановке постоянны в пределах каждого блока модели.

### Литература

1. Вайнберг А.М. Индукционные плавильные печи. – М.: Энергия, 1967. – 415 с.
2. Лыков А.В. Теплообмен (Справочник). – М.: Энергия, 1978. – 480 с.

УДК 622.311.22.019

А.В. БЕЛЯКОВ, к.т.н., проф., В.И. ШАПИН, к.т.н., проф., А.Н. ГОРБАЧЕВ, инж.  
(ОАО «ВТИ», ИГЭУ)

## Сравнительные параметры электромагнитных и электромеханических вибровозбудителей для процесса электроискрового легирования

Выпускаемые установки для нанесения электроискровых покрытий типа «ЭФИ» и «Элитрон» укомплектовываются электромагнитными вибраторами [1, 2]. На рис. 1 приведена схема конструкции такого штатного вибратора. В процессе эксплуатации в условиях ремонтов на ГРЭС и АЭС были выявлены следующие конструктивные недостатки вибраторов такого типа:

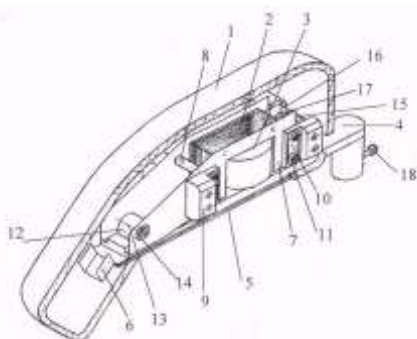


Рис. 1. Конструкция штатного вибратора: 1 – корпус, 2 – сердечник, 3 – катушка, 4 – электрододержатель, 5 – якорь электрододержателя, 6 – клемма, 7 – каркасная пластина, 8 – втулка, демпфер, 10 – пластина, 11 – винт М3, 12 – втулка, 13 – ось, 14 – гайка М6, 15 – корпус регулятора зазора, 16 – ось регулятора, 17 – гайка М5, 18 – винт прижимной

- жесткое консольное закрепление якоря электрододержателя, приводящее к образованию трещин с многоцикловым накоплением повреждений при изгибе пластин (время эксплуатации до 1-го отказа составляло от 1 до 150 часов непрерывной работы);

- недостаточная толщина каркасных пластин катушки электромагнита – 0,5 мм (7), приводящая к образованию трещин в местах клепочных соединений пластин и сердечника электромагнитной катушки (2);

- «разлохмачивание» торцевой поверхности пластин Ш-образного железа в результате соударения с якорем электрододержателя в процессе работы, что в свою очередь, приводит к изменению зазора между якорем электрододержателя и торцевой поверхности пластин Ш-образного железа, т.е. изменению амплитуды вибрации электрода;

- изменение упругих свойств пружины, отжимающей якорь электрододержателя.

Указанные недостатки вибраторов такого типа приводят к быстрому выходу их из строя, частому периодическому контролю, ремонту и отладке. В процессе производства работ требуется большое количество запасных вибраторов. В последние 10–15 лет качество вибраторов, вы-

пускаемых Опытным заводом института прикладной физики АН Молдовы, резко ухудшилось.

Исходя из изложенного выше ОАО «ВТИ» совместно с кафедрой теоретической и прикладной механики ИГЭУ разработали принципиально новую конструкцию вибраторов [3], отличающуюся тем, что механические колебания в вибраторе возбуждаются электродвигателем постоянного тока (1) (напряжение – 27 В, номинальное число оборотов 6000 об/мин). На рис. 2 представлена конструктивная схема электромеханического вибратора. Электрододержатель совершает механические колебания с фиксированной амплитудой, равной заданному эксцентриситету (для чего используются сменные эксцентрики с эксцентриситетом 0,1; 0,15; 0,2; 0,3; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2), и частотой до 100 Гц. Для одновременного охлаждения двигателя, электрододержателя и рабочей зоны в конструкции предусмотрены штуцеры и отверстия, в которые подается сжатый воздух.

Возможность регулирования частоты колебаний от 20 до 100 Гц изменением напряжения питания электродвигателя.

Использование капролактама для изготовления корпуса и дуралюминия для крышек и съемной ручки позволили получить следующие конструктивные и технологические параметры вибратора:

- вес от 600 г до 750 г с ручкой;
- длина, соответственно: 155 и 235 мм;

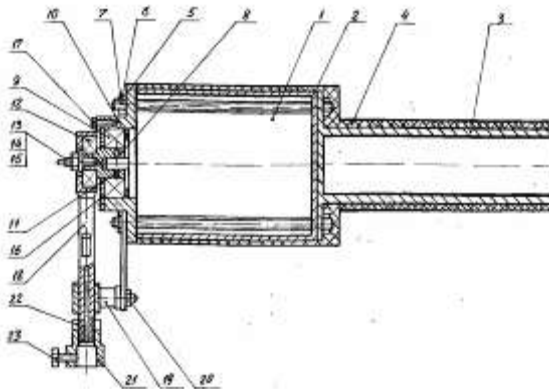


Рис. 2. Электромеханический вибратор на базе электродвигателя постоянного тока: 1 – электродвигатель постоянного тока, 2 – корпус из капролактама, 3 – рукоятка, 4 – изоляционный материал, 5 – крышка, 6, 7 – шпильки и гайки, 8 – эксцентрик, 9 – подшипник, 10 – шайба, 11 – штифт, соединяющий эксцентрик с валом, 12 – шарикоподшипник, 13, 14, 15 – шпилька, винт и гайка, 16 – крышка подшипника, 17 – винт, 18 – шатун-электрододержатель, 19 – направляющая втулка, 20 – кронштейн, 21 – головка электрододержателя, 22 – контргайка, 23 – зажимной винт для электрода

- виброактивность (таблица) снижена на порядок за счет качественного исполнения узлов и снижения веса виброударного инструмента.

Проведенные испытания электромеханического вибратора определили его существенные преимущества по сравнению с электромагнитным вариантом:

- устойчивая работа с фиксированной амплитудой при формировании защитно-упрочняющих покрытий;
- увеличение производительности в 1,5–2,0 раза;
- отсутствие эффекта «залипания» при нанесении никелевых сплавов;
- формирование слоя защитно-упрочняющего покрытия из кобальтового стеллита ВЗК до 300 мкм, что почти в 2 раза превышает толщину слоя покрытия в штатном варианте;
- вариабельность частоты вибрации электрода в диапазоне 20–200 Гц.

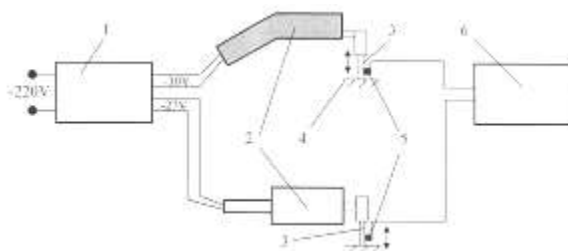


Рис. 3. Схема функционирования вибраторов и виброизмерения

### Результаты виброизмерения вибраторов

Место измерения виброактивности	Ускорение вибрации, м/с <sup>2</sup>	
	Тип вибратора	
	Электромагнитный	Электромеханический
Электрододержатель (холостой ход)	150,0	46,0
Электрододержатель (работа)	130,0	38,0
Рукоятка	80,0	10,0
Запястье	3,2	2,0
Локоть	2,0	0,2

Изменение конструкции вибратора потребовало проведения исследований виброактивности на руку металлатора. На рис. 3 приведена схема вибрационного обследования электромеханического и электромагнитного вибраторов. Схема состоит из источника питания (1), вибратора (2), электрододержателя (3) и стальной плиты (4). Измерение вибрационного ускорения производилось датчиком акселерометром (5) с помощью измерителя вибрации (6) на холостом ходу и во время работы в нескольких точках. Результаты измерений представлены в таблице.

Испытания электромеханического вибратора в непрерывном режиме позволили получить наработку до первого отказа после 2400 часов работы.

#### Литература

1. **Источники** питания для электроискрового легирования / С.П. Фурсов, А.М. Парамонов, И.В. Добында, А.В. Семенчук; 2-е изд., исправл. и доп. – Кишинев: Штиинца, 1983.
2. **Электроэрозионные** процессы на электродах и микроструктурно-фазовый состав легированного слоя / И.И. Сафронов, И.В. Цуркан, В.В. Фатеев, А.В. Семенчук; Под ред. Акад. АН Беларуси, проф., д.т.н. Н.Н. Дорошкина. – Chisinau, Stiinta.
3. **Беляков А.В., Горбачев А.Н., Шапин В.И., Вихрев С.В.** Патент РФ на полезную модель № 38661 «Устройство для электроискрового легирования с приводом от вращающегося ротора» с приоритетом от 25.02.2004.

УДК 622.311.22.019

А.В. БЕЛЯКОВ, к.т.н., проф., О.Ю. ГУРЫЛЕВ, к.т.н.,  
В.И. ШАПИН, к.т.н., проф., А.Н. ГОРБАЧЕВ, инж.  
(ОАО «ВТИ», ОАО «Рязанская ГРЭС», ИГЭУ)

### **Опыт применения электроискровых технологических процессов при упрочнении и восстановлении деталей основного и вспомогательного оборудования тепловых электрических станций и перспективы дальнейшего развития электроискрового легирования в энергетике**

Поиск и освоение методов и средств восстановления и ремонта ответственных элементов основного и вспомогательного оборудования в теплоэнергетической отрасли в последние 10–15 лет резко возросли. Этому способствовал ряд технико-экономических причин, среди которых основными были:

- высокие значения износа оборудования (свыше 70 %);
- высокая стоимость ремкомплектов;
- использование оборудования на пониженных по сравнению с оптимальными мощностных режимах эксплуатации;
- воздействие стояночной коррозии при вынужденном простое энергетического оборудования;
- отсутствие необходимого финансирования и государственной долгосрочной политики по развитию теплоэнергетической отрасли [1].

Большое количество теплоэнергетических объектов (ГРЭС, АЭС и ТЭЦ) к концу XX-го столетия исчерпало свой парковый ресурс.

Разработано большое количество различных технологических процессов на основе наплавки и напыления, которые используются в



ремонтном производстве на теплоэнергетических объектах [2]. К ним относятся:

- электродуговая наплавка;
- газопламенное напыление;
- высокоскоростное плазменное напыление;
- электроискровое нанесение покрытий;
- нанесение материала посредством сварки.

Среди используемых методов упрочнения и восстановления деталей теплотехнического оборудования перспективным является развитие технологических процессов на основе электроискрового легирования (ЭИЛ). Впервые метод ЭИЛ был применен в конце 50-х годов прошлого столетия при формировании эрозионно-стойких защитных покрытий из металлокерамического твердого сплава Т15К6 на входных кромках рабочих лопаток (РЛ) паровых турбин, выпускаемых Харьковским заводом «Турбоатом» (Украина) [3]. Указанный технологический процесс и оборудование (установки ИАС), разработанные ЦНИИТМАШ, используется и в настоящее время. Следует отметить, что за период более 50 лет технологический процесс не претерпел никаких изменений, хотя появились новые технические и технологические возможности по применению новых материалов в качестве покрытий созданию компактного, мобильного и универсального оборудования. Следует отметить, что использование оборудования (установки «ЭФИ» и «ЭЛИТРОН»), выпускаемого Опытным заводом Института прикладной физики АН Молдовы практически не пригодно для использования для ремонтных работ, проводимых непосредственно на станционном оборудовании [4, 5].

Начиная с 1999 г. в условиях ОАО «Рязанская ГРЭС» проводились опытные и научно-исследовательские работы по совершенствованию процесса ЭИЛ, включающего поиск новых материалов для формирования защитных покрытий на деталях основного и вспомогательного оборудования, разработку и изготовление оборудования, оптимизацию технологических параметров формирования защитных покрытий и организацию проводимых работ. Основными участниками разработки были ОАО «Всероссийский теплотехнический институт», ОАО «Рязанская ГРЭС», Ивановский государственный энергетический университет. Впоследствии к освоению результатов работы с различной степенью участия присоединялись другие организации, в частности: ОАО «Березовская ГРЭС», ОАО «Костромская ГРЭС», ОАО «Ставропольская ГРЭС», ГРОЭС-24 ОАО «Мосэнерго», Энергокорпорация «Теплоэнергосервис-ЭК» и др.

Проанализировав недостатки и достоинства метода ЭИЛ, было определено, что с учетом новой элементной базы, есть возможность создания мобильных, мощных и надежных установок для формирования защитных покрытий универсального применения. Во-первых, были определены основные объекты для восстановления. Это были РЛ последних ступеней турбин и направляющие лопатки диафрагм и сопловых аппаратов. При этом технологический процесс при работе на РЛ должен был осуществляться:

- на облопаченном роторе непосредственно на турбоагрегате при вскрытой крышке цилиндра;
- на облопаченном роторе, находящемся на опорах ремонтной площадки;
- на облопаченном роторе непосредственно на турбоагрегате без вскрытия крышки цилиндра через конденсатор;
- на новых или демонтированных лопатках в условиях цеха или мастерской.

Во-вторых, использование станционной сварочной сети постоянно-го тока с напряжением 60–80 В практически неограниченной мощности, позволило в разрабатываемых установках отказаться от тяжелых трансформаторов, что обеспечило минимизацию установок по габаритам и весу. В результате такой разработки появились тиристорные установки ГБФ-2 и ГБФ-2М (для работы через конденсатор турбины) многоканальные установки. Емкостная батарея каждого канала составляла 150 мкФ. Максимальная величина емкостной батареи составляет 1050 мкФ, что соответствует включению 7 каналов установки. Вес установок ГБФ-2 и ГБФ-2М составляет 14 кг.

С другой стороны параллельно шло создание установок с использованием установок, работающих как от сварочной сети постоянного тока, так и установок, использующих понижающие трансформаторы от сети переменного тока с напряжением 220 В. В результате таких разработок появились установки серии КГБ (КГБ-1 – КГБ-5) с большими емкостными батареями до 40000 мкФ, что считалось принципиально невозможным. Вес установок типа КГБ составляет от 5 до 10 кг.

В-третьих, большое внимание было уделено возможности создания электромеханического вибратора, отличающегося более высокой надежностью, чем надежность электромагнитные вибраторы производства Молдовы, которые имели наработки на отказ от 1 до 100 часов их эксплуатации. В результате были созданы электромеханические вибраторы для установок типа ГБФ и КГБ, позволившие работать безотказно в пределах 5000 часов [6].

Электрододержатель электромеханического вибратора совершает механические колебания с фиксированной амплитудой, равной заданному эксцентриситету (для чего используются съемные эксцентрики с эксцентриситетом 0,1; 0,15; 0,2; 0,3; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2 мм), и частотой до 100 Гц. Для одновременного охлаждения двигателя, электрододержателя и рабочей зоны в конструкции предусмотрены штуцеры и отверстия, в которые подается сжатый воздух.

Разработанный процесс регламентирован стандартом ОАО «ВТИ»: СО ВТИ 30.003-2004 «Методические указания о порядке формирования эрозийностойких защитно-упрочняющих покрытий на рабочих лопатках паровых турбин в процессе изготовления, эксплуатации и ремонта методом электроискрового легирования» [8].

Основными достоинствами разработанного технологического процесса являются:

- высокая производительность нанесения защитно-упрочняющего покрытия (10–15 рабочих лопаток в смену – 8 часов, что соответствует 0,5–1,5 мин/см<sup>2</sup>);

- мобильность оборудования (небольшие габариты) и вес:

- для установок ГБФ-2М (габариты 500×200×400 мм и вес до 15 кг);

- для установок КГБ-1 и КГБ-2 (габариты 300×200×200 и вес до 7 кг);

- время разворачивания оборудования на ремонтной площадке 20-25 мин.;

- исключение термического влияния на материал лопатки (в процессе формирования защитно-упрочняющего покрытия материал лопатки остается холодным);

- возможность локального нанесения покрытия толщиной до 0,3 мм, а в отдельных случаях до 1,0 мм;

- возможность использования большой номенклатуры токопроводящих электродных материалов (чистые металлы и полупроводники, стали, бронзы, металлокерамические сплавы, сплавы со специальными свойствами и пр.);

- применимость технологического процесса в условиях любого производства;

- высокие показатели по обучаемости персонала;

Технологический процесс внедрен при ремонте РЛ турбин К-300-240 ЛМЗ и ХТГЗ, К-800-240 ЛМЗ, К-220-40 ХТГЗ, Т-250/130 ТМЗ, ПТ-80/130 ЛМЗ, Т-250/300 УТМЗ, Т-100-130/15 УТМЗ, К-145-130 ЛМЗ в условиях ОАО «Рязанская ГРЭС»; ОАО «Ставропольская ГРЭС»; ОАО «Березовская ГРЭС-1»; ОАО «Костромская ГРЭС»; ГРЭС-24 ОАО «МОСЭНЕРГО»; Ириклинская ГРЭС ОАО «ОРЕНБУРГЭНЕРГО»; Кольская АЭС концерна «РОСЭНЕРГОАТОМ»; АО «Кишиневская ТЭЦ-2»; ТЭЦ-25 ОАО «МОСЭНЕРГО», ОАО «Невинномысская ГРЭС», ОАО «Нижекамская ТЭЦ».

В результате использования технологического процесса появилась возможность представить новое техническое решение по конструкции рабочей лопатки влажнопаровой ступени паровой турбины [7].

Всего упрочнено или восстановлено более 18000 РЛ из сталей 20Х13-Ш, 15Х11МФ-Ш, 13Х11Н2В2МФ-Ш и титанового сплава ВТ-5.

Разработанный технологический процесс позволил проводить упрочняющую обработку и восстановление входных и выходных кромок лопаток диафрагм и направляющих аппаратов турбин всех ступеней.

Учитывая технологические характеристики используемого оборудования, его универсальность, перспективными направлениями в развитии технологического процесса могут быть следующие технологические процессы:

- формирование покрытий для защиты от абразивного износа РЛ дымососов;

- восстановление посадочных мест подшипников качения в корпусных деталях и на валах осей;

- восстановление серебряных слоев на деталях электрических устройств без разборки.

## Литература

1. **Беляков А.В., Горбачев А.Н., Федотов А.О.** Применение установки ГБФ-2М для упрочнения и восстановления ответственных деталей теплоэнергетики // Научные проблемы и перспективы развития, ремонта, обслуживания машин и восстановления деталей: Тез. докл. междунар. науч. конф. 4 – 5 декабря 2003 г. – М., 2003. – С. 96-97.
2. **Новиков Ю.Н.** Наплавочные работы при ремонте оборудования тепловых электростанций. – М.: Энергия, 1984. – 112 с.
3. **Иванов Г.П.** Технология электроискрового упрочнения инструментов и деталей машин. – 2-е изд., исправл. и доп. – М.: МашГИЗ, 1961. – 303 с.
4. **Электроискровое** легирование металлических поверхностей / А.Е. Гитлевич, В.В. Михайлов, Н.Я. Парканский, В.М. Ревуцкий; Под ред. Ю.Н. Петрова. – Кишинев: Штиинца, 1985. – 196 с.
5. **Беляков А.В., Воронин В.П., Израилев Ю.Л., Шапин В.И.** и др. Нормативный технологический процесс восстановления живучести лопаток паровых турбин методом электроискрового легирования // Вестник ИГЭУ. – 2002. – Вып. 1. – С. 38-41.
6. **Беляков А.В., Горбачев А.Н., Шапин В.И., Вихрев С.В.** Патент Российской Федерации №38661 на полезную модель «Устройство для электроискрового легирования с приводом от вращающегося ротора». Бюллетень №19. 2004.
7. **Резинских В.Ф., Гурылев О.Ю., Горбачев А.Н., Сергеев Ф.Ф., Шепталова Н.Г.** Патент Российской Федерации №52104 на полезную модель «Рабочая лопатка с защитным покрытием для влажно-паровой ступени паровой турбины».
8. **Резинских В.Ф., Гринь Е.А., Беляков А.В., Гурылев О.Ю., Шапин В.И., Горбачев А.Н.** и др. СО ВТИ 30.003-2004 «Методические указания о порядке формирования эрозионностойких защитно-упрочняющих покрытий на рабочих лопатках паровых турбин в процессе изготовления, эксплуатации и ремонта методом электроискрового легирования». – М.: Изд. ОАО «ВТИ», 2004. – 30 с.

УДК 622.311.22.019

А.В. БЕЛЯКОВ, к.т.н., проф., В.Н. КУЛИКОВ, инж., А.Н. ГОРБАЧЕВ, инж.  
(ОАО «ВТИ», ОАО «Рязанская ГРЭС», ИГЭУ)

### **Устройство для выборки микрообразцов металла при оценке состояния металла теплотехнического оборудования тепловых и атомных электростанций на основе электроэрозии**

Получение достоверной информации при проведении диагностики состояния металла тепломеханического оборудования является одной из важнейших задач в области контроля.

Существующие методы отбора образцов для проведения металлографических исследований в виде сколов, опиловок не всегда удобны, а, зачастую, просто невозможны. Получение сколов, как показывают многолетние исследования, создает заведомо дефектные структуры металла при отборе, что, в свою очередь, сильно затрудняет проведе-

ние металлографического анализа структурного состояния исследуемого объекта. Получение образцов опилением не всегда возможно просто технически.

Учитывая перечисленные выше недостатки существующих методов отбора образцов, экспериментальные работы с применением установки электроискрового легирования УЭЛ-ВБ-1М, был разработан электроэрозионный метод выборки микрообразцов металла и устройство для его осуществления – УВО-1.

Устройство УВО-1 состоит из 2-х частей: блока питания, имеющего в своем составе трансформатор 220/24 В и вибратор с устройствами крепления самого вибратора на объекте и поворотного механизма на вибраторе. Общий вес устройства составляет 10 кг. Потребляемая мощность из сети с напряжением 220 В не превышает 120 ВА. Габаритные размеры транспортной тары – 200 × 200 × 250. В связи с тем, что процесс выборки микрообразцов осуществляется не в воздушной среде, а в жидкой электрической среде, то к устройству прикрепляется система капельной подачи раствора жидкого стекла или другой диэлектрической жидкости, которая осуществляет дискретную подачу среды в место отбора микрообразца. Крепление узла поворотного устройства и станины к объекту обработки осуществляется при помощи постоянных магнитов, прикрепляемых к станине или с помощью гибкого тросика, которого также могут быть прикреплены к станине.

Устройство позволяет осуществлять выборку микрообразцов, практически, из любого токопроводящего материала, и предназначено для выборки микрообразцов из тепловых канавок, придисковых галтелей роторов паровых турбин, корпусных деталей, с приповерхностных зон прямых участков и гибов паропроводов, трубопроводов.

По форме микрообразцы представляют собой сегментноподобные темплеты, внутренняя поверхность которых соответствует форме и размерам электрода-инструмента. Размеры микрообразцов зависят от задач исследователей, конструкции объекта. Как правило, номинальные размеры микрообразцов (длина, ширина, высота (глубина врезки электрода-инструмента) составляет 16×2×3 мм (тепловая канавка), 8×3×1,5 (гибы и придисковые галтели). Размеры выбираемых микрообразцов могут регулироваться.

Продолжительность выборок составляет 40–70 мин. (тепловая канавка), 15–30 мин. (гибы и прямые участки паропроводов), 30–50 мин. (придисковая галтель). Продолжительность выборок зависит, в основном, от электрофизических свойств материала (электросопротивления, электроэрозионных свойств и пр.).

Общий вид устройства для выборки микрообразцов представлен на рис. 1.

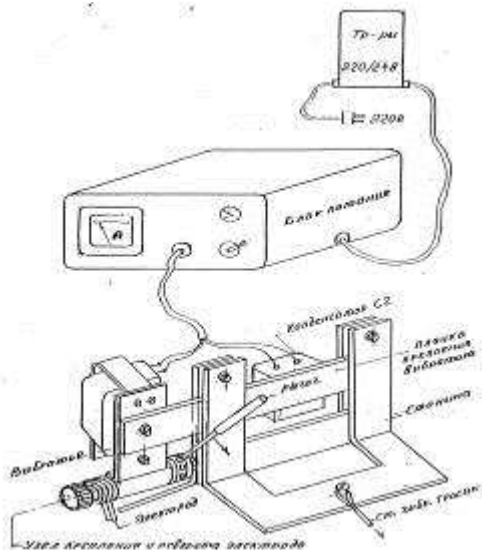


Рис. 1. Общий вид устройства для выборки микрообразцов

ось рычагом, можно отвернуть гайку на оси и заменить электрод. Питание катушки вибратора – от отдельного трансформатора Т2.

Устройство работает следующим образом. После установки устройства на объекте подается диэлектрическая жидкость в зону соприкосновения электрода с деталью. Питание 24 В от трансформатора ТР1 подается на блок питания. Блок питания заряжает конденсатор С2. При достижении на конденсаторе напряжения определенной величины и в зависимости от расстояния между электродами, которое зависит от устройства перемещения электрода и вибратора, возникает искровой разряд между электродом и элементом оборудования, расположенными в среде раствора воды с жидким стеклом. После разряда конденсатор С2 заряжается вновь, цикл повторяется. При разряде с поверхности ротора удаляется частичка металла. В процессе работы электрод как бы входит в металл и вырезает образец.

Электрическая схема устройства для выборки микрообразцов представлена на рис. 2.

Блок питания включает в себя силовой трансформатор Т1, диодный мост ДМ, сглаживающий конденсатор С1, резистор, сигнальную лампочку и выключатель. Разрядный конденсатор С2 вынесен и закреплен на вибраторе. Последний выполнен из электромагнитного реле. Роль якоря выполняет планка, к которой закреплен узел поворота электрода. Поворот электрода осуществляется рычагом в виде шпильки диаметром 4 мм с изолятором. Придерживая

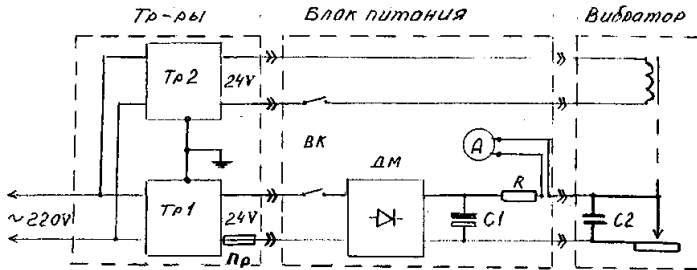


Рис. 2. Электрическая схема устройства для выборки микрообразцов УВО-1: Тр1 – трансформатор 220/24 В; Тр2 – трансформатор 220/24 В; ВК – выключатель; ДМ – диодный мост; С1 – конденсатор; С2 – рабочая емкость; R – балластный резистор; А – амперметр; Пр – предохранитель.

На рис. 3 представлен пример получения микрообразца из тепловой канавки ротора высокого давления паровой турбины Л-300-240 ХТГЗ.

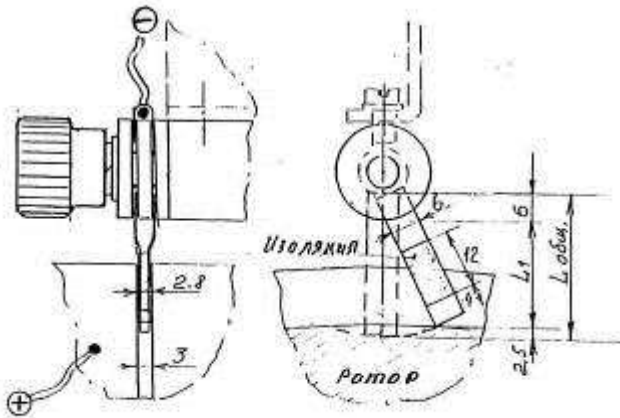


Рис. 3. Пример получения микрообразца из тепловой канавки ротора высокого давления паровой турбины К-300-240 ХТГЗ

Создание такого устройства, как УВО-1 позволило расширить возможности контроля за состоянием металла паросилового оборудования тепловых и атомных электростанций.

## Двухчастотный параллельный инвертор тока

Для повышения эффективности индукционного нагрева при плавке металлов и сплавов целесообразно применять двухчастотное электромагнитное поле, которое позволяет высокочастотной составляющей этого поля плавить металл, а низкочастотной составляющей – перемешивать его, что позволяет сокращать удельный расход электроэнергии и повышать качество металла [1, 2]. При плавке больших масс металла оптимальная частота перемешивания может быть заметно меньше 50 Гц, а оптимальная частота индукционного нагрева может составлять 250÷1000 Гц. В указанном диапазоне частот одним из наиболее эффективных является параллельный инвертор тока. Поэтому разработана новая схема двухчастотного параллельного инвертора тока [3], компьютерное исследование электромагнитных процессов которой приведено ниже. На рис. 1 показана упомянутая схема, которая состоит из 4-х двухоперационных тиристоров, VS1, VS2, VS3 и VS4, образующих вентильный мост, к диагонали переменного тока которого подсоединен индуктор И, зашунтированный компенсирующим конденсатором  $C_k$ , а к диагонали постоянного тока подводится через фильтровые дроссели  $L_{\phi 1}$  и  $L_{\phi 2}$  постоянное напряжение от питающего источника.

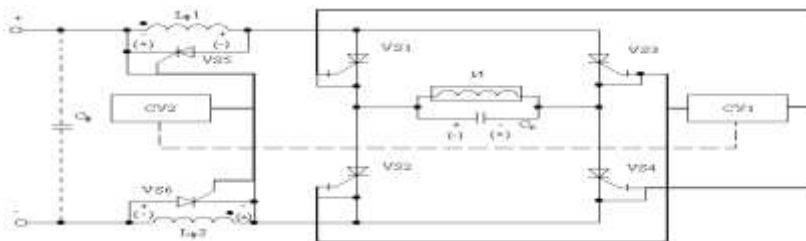


Рис. 1

Отличие новой схемы параллельного инвертора от классической схемы заключается в том, что параллельно фильтровым дросселям  $L_{\phi 1}$  и  $L_{\phi 2}$  и встречно по отношению к полярности напряжения источника питания подсоединены однооперационные тиристоры VS5 и VS6. Управление тиристорами VS1÷VS4 обеспечивается системой управления СУ1, а управление тиристорами VS5 и VS6 – системой управления СУ2, которые синхронизированы между собой. Схема работает следующим образом. Вначале несколько раз отпираются и запираются тиристоры одной фазы, например VS1 и VS4, таким образом в индукторе И формируется не-



сколько высокочастотных периодов тока и первый полупериод низкочастотного тока, затем столько же раз отпираются и запираются тиристоры VS2 и VS3, таким образом в индукторе И формируется столько же высокочастотных периодов тока и второй полупериод низкочастотного тока. При запираии как первой группы тиристоров VS1, VS4, так и второй группы тиристоров VS2, VS3, отпираются тиристоры VS5, VS6, которые предотвращают появление перенапряжений на тиристорах VS1+VS4 при их запираии, т.к. при отпирании тиристоров VS5, VS6 ток фильтровых дросселей не прекращается, а протекает через эти тиристоры. Таким образом, в нагрузке-индукторе формируется ток высокой частоты, определяемой частотой переключений тиристоров одной фазы, например VS1, VS4, и ток низкой частоты, определяемой частотой переключения тиристоров разных фаз VS1, VS4 и VS2, VS3. В предложенной схеме выполнено компьютерное исследование электромагнитных процессов с помощью пакета Simulink [4] с использованием библиотеки электротехнических блоков Sim Power System (SPS). После наладки модели получены стилизованные временные диаграммы, поясняющие процесс формирования двухчастотных тока  $i_{\text{и}}$  и напряжения  $U_{\text{и}}$  индуктора И, а также форму входного тока  $i_{\text{вх}}$ , которые приведены на рис. 2.

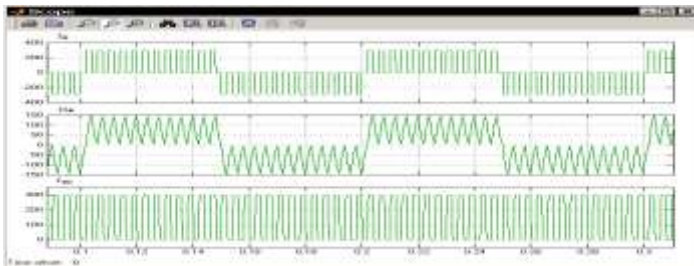


Рис. 2

Исследование рассматриваемой схемы выполнено при следующих параметрах: напряжение питающего источника постоянного тока  $U_{\text{д}} = 1000$  В, частота низкочастотной составляющей тока индуктора  $f_{\text{нч}} = 50,0$  Гц, частота высокочастотной составляющей тока индуктора  $f_{\text{в.ч.}} = 1000$  Гц, мощность инвертора  $P_{\text{и}} = 1,0$  МВт.

На рис. 3 в качестве примера для мощности инвертора  $P_{\text{и}} = 1$  МВт приведены зависимости, поясняющие поиск уточненных значений активного сопротивления расчетной схемы индуктора  $R_{\text{и}}$  и емкости компенсирующего конденсатора  $C_{\text{к}}$ , которые показали, что для заданных условий:  $R_{\text{и}} = 0,022$  Ом,  $C_{\text{к}} = 680$  мкФ.

На компьютерной модели в режиме, соответствующем примерно мощности  $P_{\text{и}} \approx 1,1$  МВт, были уточнены следующие величины и параметры: действующее значение напряжения компенсирующего конденсатора  $U_{\text{сх}} = 1500$  В; среднее значение тока двухоперационного тиристора

$I_{T\text{cp}} = 275\text{A}$ ; максимальное значение тока двухоперационного тиристора  $I_{T\text{м}} = 1100\text{A}$ ; максимальное значение напряжения на двухоперационном тиристоре  $U_{T\text{м}} = 2400\text{В}$ .

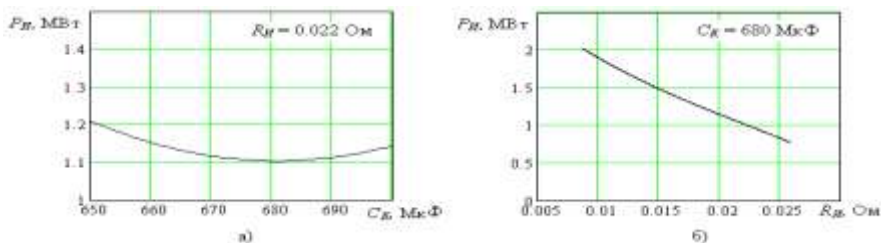


Рис. 3

Выводы. 1. Разработана схема двухчастотного преобразователя частоты на базе параллельного инвертора тока, в котором частота низкочастотной и высокочастотной составляющих тока индуктора может регулироваться независимо для обеспечения эффективного нагрева и эффективного электромагнитного перемешивания расплавленного металла

2. Разработана компьютерная модель преобразователя и на частном примере, а именно при заданных мощности, питающем напряжении, а также частотах низкочастотной и высокочастотной составляющих тока индуктора (все эти величины выбираются на основании экспертных оценок и опыта проектирования) показан характер зависимостей, позволяющих выбрать основные параметры оборудования преобразователя.

### Литература

1. Вайнберг А.М. Индукционные плавильные печи. – М.: Энергия, 1967.
2. Лузгин В.И., Петров А.Ю., Черных И.В., Шипицын В.В., Якушев К.В. Лопатин И.Е. Новая серия усовершенствованных индукционных нагревателей, построенных на базе автономных полупроводниковых двухчастотных преобразователей: Тр. Всерос. науч.-техн. конф. с международным участием. – Екатеринбург, 2006. – С. 91-98.
3. Заявка на патент № 2005 136169/20 (040396).
4. Черных И.В. Simulink среда создания инженерных приложений. – М.: Диалог-МИФИ, 2004. – 496 с.

УДК 621.372.632

А.А. АРТЕМЬЕВ, к.т.н., доц., А.Е. ЕФРЕМОВ  
(Ивановская государственная текстильная академия)

## Рабочие характеристики преобразователей пониженной частоты

Внешние характеристики феррорезонансных преобразователей 50/16,67 Гц (ФПЧ) достаточно жесткие даже для малых мощностей. На рис. 1 показаны графики  $U_2 = \varphi(I_2)$  и  $I_1 = \varphi(I_2)$  для трехфазного ФПЧ мощностью 8000 ВА. Относительное падение напряжения в диапазоне мощностей 0,5 ÷ 8 кВА удовлетворяет условию

$$\Delta U_2 = \frac{U_{20} - U_{2\text{НОМ}}}{U_{2\text{НОМ}}} \leq 3 \div 6\%,$$

причем при активной и активно-индуктивной нагрузках  $\Delta U_2 > 0$ , а при активно-емкостной нагрузке  $\Delta U_2 < 0$ . Таким образом, при активно-емкостной нагрузке напряжение на выходе с ростом тока возрастает по сравнению с  $U_{20}$ .

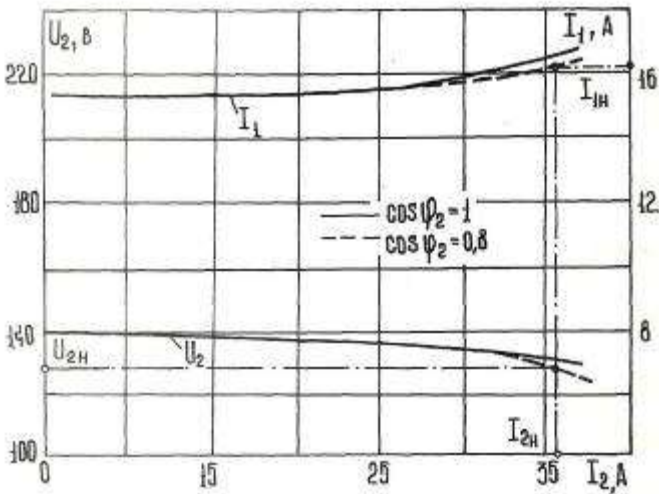


Рис. 1. Внешние и нагрузочные характеристики ФПЧ мощностью 8000ВА

С увеличением тока нагрузки выше номинального на 30% происходит срыв субгармонических колебаний в силовой цепи преобразователя, и вторичное напряжение уменьшается до малой величины сетевой частоты.

Отклонение емкости от номинальных значений на  $\pm 10\%$  снижает жесткость внешних характеристик преобразователя. Такое же действие оказывает и снижение напряжения на входе ФПЧ.

На рис. 2 показано влияние величины входного напряжения и емкости на внешние характеристики преобразователей  $U_2 = \varphi(I_2)$ . Опыты подтвердили теоретические выводы, что для поддержания устойчивой работы ФПЧ всякие изменения емкости должны сопровождаться пропорциональным изменением входного напряжения. Из кривых (рис. 2) видно, что при снижении входного напряжения уменьшается величина максимального тока нагрузки  $I_{2 \text{ пред.}}$

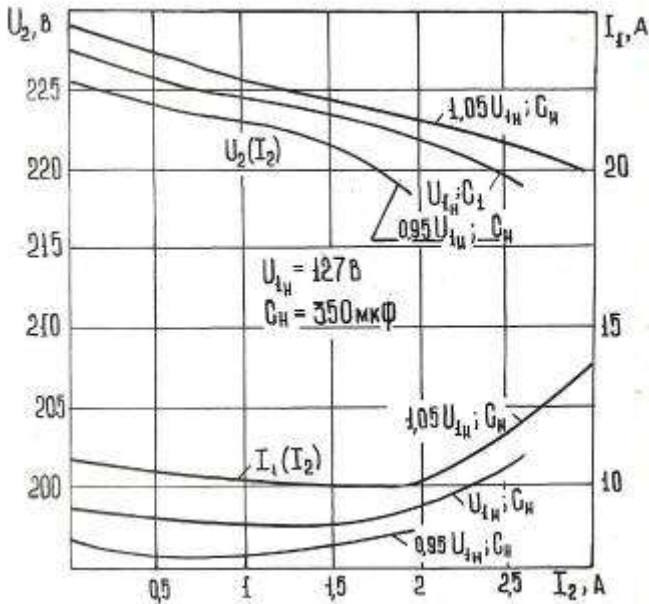


Рис. 2. Внешние и нагрузочные характеристики ФПЧ при различных значениях входного напряжения

Нагрузочные характеристики  $I_1 = \varphi(I_2)$  показывают, что при малом токе  $I_2$  первичный ток меняется мало, а при увеличении  $I_2$  от  $0,5 I_{2 \text{ ном}}$  до  $I_{2 \text{ ном}}$  первичный ток также возрастает. Отметим некоторую особенность нагрузочных кривых  $I_1 = \varphi(I_2)$  преобразователя: с ростом тока нагрузки  $I_2$  возможно некоторое уменьшение первичного тока  $I_1$  по сравнению с током режима холостого хода. Этот факт объясняется компенсирующим действием цепи нагрузки  $Z_n$ .

Исследовалось влияние некоторых факторов на форму кривых напряжений, токов и потокосцепления силового элемента преобразователей. Формы кривых напряжения и тока силового элемента ФПЧ отлич-

ны от синусоиды и искажены высшими гармониками. Коэффициент гармоник выходного напряжения выражается формулой

$$k_F = \frac{\sqrt{\sum U_{2(K)}^2}}{U_{2(1)}},$$

где  $U_{2(K)}$  – эффективное значение К-й гармоники выходного напряжения;  $U_{2(1)}$  – эффективное значение 1-й гармоники (частоты 16,67 Гц).

На рис. 3 изображены кривые зависимости  $\eta$ ;  $\cos\varphi_1$  и  $U_2^*$ ;  $I_1^*$  от тока нагрузки для преобразователей мощностью 500; 1000 и 8000 ВА. Из графиков видно, что наибольший КПД соответствует номинальной нагрузке. Потери в стали силового элемента преобразователя значительно меньше потерь в стали трансформатора той же мощности на напряжение промышленной частоты. Потери же в обмотках при одинаковом значении эффективного тока примерно идентичны.

Отсюда следует, что отношение потерь в обмотках к потерям в стали силового элемента ФПЧ равно

$$p_M/p_C = 4 \div 5.$$

Это соотношение и определяет факт максимального коэффициента полезного действия при номинальном токе нагрузки. Для повышения КПД преобразователей целесообразно идти на несколько повышенный расход меди с выбором плотности тока не выше 3 А/мм<sup>2</sup> для изоляции класса А в сухом исполнении.

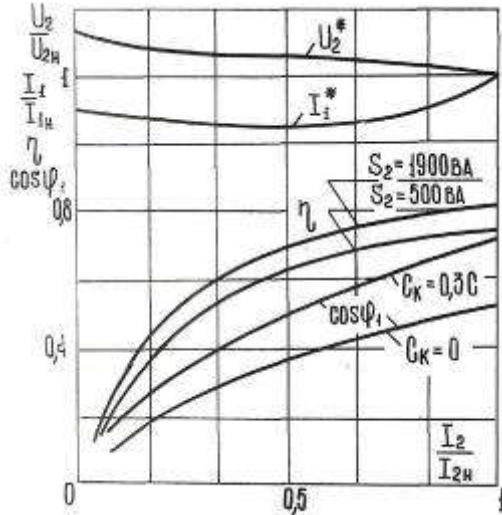


Рис. 3. Рабочие характеристики ФПЧ различной мощности

## Многофазный асинхронный электропривод с векторным управлением

Перспективным направлением в разработке электропривода (ЭП) для сварочного производства, позволяющим оптимизировать целый спектр характеристик электромеханической системы, является его построение на базе асинхронного двигателя (АД) с увеличенным числом фаз статорной обмотки. В [1] обоснован модульно-фазовый принцип управления  $m$ -фазным АД, инвариантный к числу фаз исполнительного двигателя и учитывающий его специфику как объекта управления, а также предложен вариант его реализации по двухконтурной структуре (рис. 1) с выбором в качестве непосредственно управляемых переменных потокосцепления ротора и электромагнитного момента, связанных с основной пространственной гармонической [2].

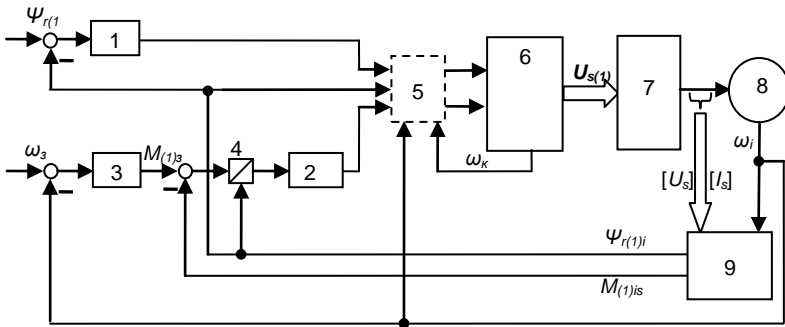


Рис. 1. Функциональная схема САУ  $m$ -фазным асинхронным ЭП:

1,2,3 – регуляторы потокосцепления ротора, момента и скорости соответственно,  
4 – блок деления, 5 – блок компенсации, 6 – формирователь вектора напряжения,  
7 – преобразователь частоты, 8 – АД, 9 – датчик обратных связей

Наличие в структуре САУ блока компенсации (БК) усложняет ее практическую реализацию и делает ее чувствительной к девиации параметров АД, приводя, в конечном итоге, к ухудшению регулировочных характеристик ЭП. С другой стороны, устранение из структуры САУ БК без принятия других специальных мер не позволяет осуществить автономное регулирование переменных состояния АД. Последнее приводит, в первую очередь, к невозможности стабилизации на заданном уровне потокосцепления ротора, величина которого может изменяться, как показывают исследования, в пределах 50 % и более. Таким образом, отказ от примене-

ния БК, упрощающий реализацию САУ, должен быть скомпенсирован альтернативными мерами.

Данная задача может быть решена, как и при синтезе токовых контуров, предложенном в [3], на основе введения в прямые тракты контуров регулирования потокосцепления ротора и момента фильтров с передаточной функцией

$$H_{\phi}(s) = (T_{\mu}s + 1)^{-1}, \quad (1)$$

где  $T_{\mu}$  – малая некомпенсируемая постоянная времени.

Передаточные функции объектов управления в этих контурах соответственно имеют вид [2]:

$$H_{OYI}(s) = L_{m(1)} \cdot [R_{\vartheta(1)} (T_{\vartheta(1)} T_{r(1)} s^2 + (T_{\vartheta(1)} + T_{r(1)}) s + 1)]^{-1}; \quad (2)$$

$$H_{OYM}(s) = mZ_p K_{r(1)} \cdot [2R_{\vartheta(1)} (T_{\vartheta(1)} s + 1)]^{-1}. \quad (3)$$

При пренебрежении вторым порядком в выражении (2) с учетом линеаризации, осуществляемой блоком деления, канала регулирования момента эти контуры управления сводятся к одинаковому виду, при этом первоначально передаточная функция обобщенного регулятора, настраиваемого на модульный оптимум, имеет вид:

$$H'_{PI}(s) = (T_i s + 1) \cdot (k_{ПЧ} k_{Д} k_i \cdot 2T_{\mu} s)^{-1}. \quad (4)$$

После соответствующих структурных преобразований контуров введенные в них фильтры переносятся с удвоенной постоянной времени  $T_{\mu}$  на их входы, а передаточная функция обобщенного регулятора окончательно принимает вид

$$H_{PI}(s) = (T_i s + 1) (2T_{\mu} s + 1) (k_{Д} k_i k_{ПЧ} \cdot 2T_{\mu}^2 s^2)^{-1}. \quad (5)$$

В соответствии с (5) передаточные функции регулятора потокосцепления ротора  $H_{PI}(s)$  и электромагнитного момента  $H_{PM}(s)$  при устранении из структуры САУ БК определяются следующими соотношениями:

$$H_{PI}(s) = ((T_{\vartheta(1)} + T_{r(1)}) s + 1) (2T_{\mu} s + 1) (mk_{\psi} L_{m(1)} R_{\vartheta(1)}^{-1} k_{ПЧ} T_{\mu}^2 s^2)^{-1}; \quad (6)$$

$$H_{PM}(s) = (T_{\vartheta(1)} s + 1) (2T_{\mu} s + 1) (mk_M Z_p L_{m(1)} K_{r(1)} R_{\vartheta(1)}^{-1} k_{ПЧ} T_{\mu}^2 s^2)^{-1}. \quad (7)$$

На рис. 2 приведены полученные на основе численного эксперимента кривые переходных процессов при пуске АД (номинальные мощность  $P_H=2,5$  кВт, напряжение  $U_H=10$  В, скорость  $\omega_H=554$  с<sup>-1</sup> и частота  $f_H=200$  Гц) на скорость  $\omega_H$  с последующим сбросом-набросом момента нагрузки на валу  $M_C=M_H$  и реверсом на  $-\omega_H$ . Как показывает анализ представленных кривых, синтезированные регуляторы потокосцепления и момента обеспечивают достаточно хорошее развязывание каналов в САУ на рис. 1 при отсутствии в ее структуре БК. В частности динамическое отклонение потокосцепления ротора не превышает 6...7 %, имея при этом вид относительно коротких по длительности импульсов.

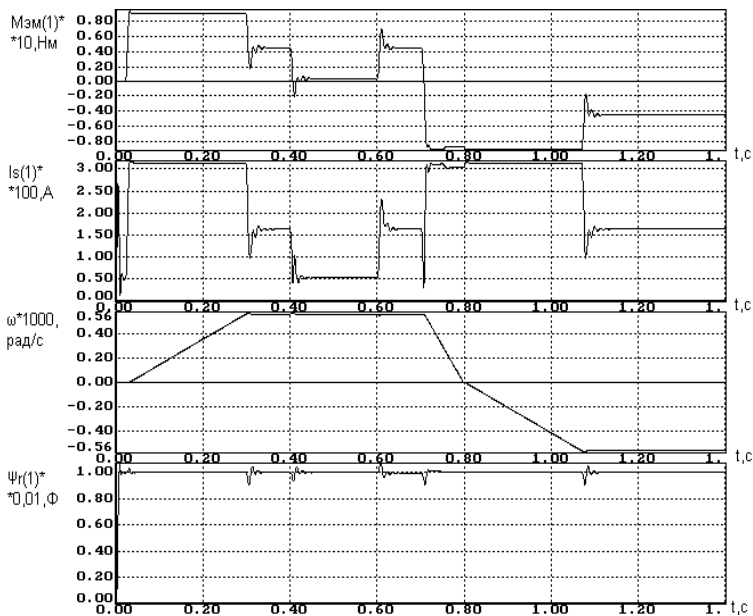


Рис. 2. Кривые переходных процессов при пуске АД на  $\omega_n$ , сбросе-набросе момента нагрузки и реверсе

### Литература

1. Голубев А.Н., Королев А.Н., Куликов К.В. Построение систем векторного управления многофазным асинхронным двигателем // Микропроцессоры и устройства автоматики в системах управления технологическими процессами / ИВГУ. – Иваново, 1986. – С. 78-85.
2. Голубев А.Н., Зыков В.В. Математическая модель асинхронного двигателя с многофазными обмотками статора и ротора // Электротехника. – 2003, № 7. – С. 35-40.
3. Шрейнер Р.Т., Дмитриенко Ю.А. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 224 с.



## Ограничение уровня электромагнитного излучения в регулируемом асинхронном электроприводе

В процессе работы асинхронного электропривода на выходе преобразователя возникают высокочастотные импульсы напряжения с амплитудой порядка 500 В. Эти импульсы напряжения распространяются вдоль двигательного кабеля, вызывая мощное электромагнитное излучение в окружающую среду. Если не принять специальных мер по ограничению излучения, то такой электропривод не будет удовлетворять современным требованиям электромагнитной совместимости (ЭМС).

ЭМС – это способность технических средств удовлетворительно работать в реальной электромагнитной обстановке, не создавая недопустимых помех другим потребителям электрической энергии. Ввиду особой значимости проблемы ЭМС в России введен ряд новых стандартов, опирающихся на стандарты МЭК по ЭМС, принятые в Европе [1–26].

В данной работе предложено решение одной из задач электромагнитной совместимости применительно к системе «Преобразователь частоты – электрический кабель – асинхронный двигатель». Предлагаемое решение позволяет ограничить скорость нарастания напряжения на выходе преобразователя частоты на заданном уровне. Чтобы удовлетворить действующим стандартам, рекомендуемое значение скорости нарастания напряжения не должно превышать 500 В/мкс. В этом случае частота электромагнитного излучения не превышает 150 кГц, то есть спектр частот лежит за пределами радиодиапазона. Кроме того, ограничение скорости нарастания напряжения удовлетворительно сказывается на работе двигателя.

Известные решения указанной задачи используют электрические фильтры пассивного типа (содержащие катушки индуктивности, конденсаторы и резисторы). Отличие предложенного решения от известных заключается в том, что параметры фильтров определяют по следующим формулам в зависимости от длины кабеля:

$$L_{\Phi} = L_0 l_{\text{каб}}, \quad (1)$$

$$C_{\Phi} = 4C_0 l_{\text{каб}}, \quad (2)$$

$$R_{\Phi} = 2 \cdot \sqrt{\frac{L_{\Phi}}{C_{\Phi}}}, \quad (3)$$

где  $L_{\Phi}$  – индуктивность фильтра, Гн,  $L_0$  – приведенная индуктивность кабеля, Гн/м,  $C_{\Phi}$  – емкость конденсатора фильтра, Ф,  $C_0$  – приведенная емкость кабеля, Ф/м,  $l_{\text{каб}}$  – длина кабеля, м,  $R_{\Phi}$  – активное сопротивление фильтра, Ом.

## Литература

1. **ГОСТ Р 51317.4.2-99** (МЭК 61000-4-2-95) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний». Взамен ГОСТ 29191-91.
2. **ГОСТ Р 51317.4.4-99** (МЭК 61000-4-4-95) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к наносекундным импульсным помехам. Требования и методы испытаний». Взамен ГОСТ 29156-91.
3. **ГОСТ Р 51317.4.5-99** (МЭК 61000-4-5-95) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии. Требования и методы испытаний». Взамен ГОСТ 30374-95 / ГОСТ Р 50007-92.
4. **ГОСТ Р 51317.4.11-99** (МЭК 61000-4-11-94) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к динамическим изменениям напряжения электропитания. Требования и методы испытаний». Взамен ГОСТ 30376-95 / ГОСТ Р 50627-93.
5. **ГОСТ Р 51317.4.12-99** (МЭК 61000-4-12-97) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к колебательным затухающим помехам. Требования и методы испытаний». Вводится впервые.
6. **ГОСТ Р 51317.4.15-99** (МЭК 61000-4-15-97) «Совместимость технических средств электромагнитная. Фликерметр. Технические требования и методы испытаний». Вводится впервые.
7. **ГОСТ Р 51318.14.1-99** (СИСПР 14-1-93) «Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные от бытовых приборов, электрических инструментов и аналогичных устройств. Нормы и методы испытаний». Взамен ГОСТ 23511-79 и ГОСТ 30320-99 / ГОСТ Р 50033-92.
8. **ГОСТ Р 51318.15-99** (СИСПР 15-96) «Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные от электрического светового и аналогичного оборудования. Нормы и методы испытаний». Взамен ГОСТ 21177-82.
9. **ГОСТ Р 51516-99** (МЭК 60255-22-4-92) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость измерительных реле и устройств защиты к наносекундным импульсным помехам. Требования и методы испытаний». Вводится впервые.
10. **ГОСТ Р 51525-99** (МЭК 60255-22-2-96) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость измерительных реле и устройств защиты к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний». Вводится впервые.
11. **ГОСТ Р 51527-99** (МЭК 60478-3-89) «Совместимость технических средств электромагнитная. Стабилизированные источники питания постоянного тока. Кондуктивные электромагнитные помехи. Нормы и методы испытаний». Вводится впервые.
12. **ГОСТ Р 51329-99** (МЭК 61543-95) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устройства защитного отключения, управляемые дифференциальным током (УЗО-Д), бытового и аналогичного назначения. Требования и методы испытаний». Вводится впервые.  
Вводятся с 01.07.2001:
13. **ГОСТ Р 50745-99** «Совместимость технических средств электромагнитная. Системы бесперебойного питания. Устройства подавления сетевых импульсных помех. Требования и методы испытаний». Взамен ГОСТ Р 50745-95.
14. **ГОСТ Р 51318.14.2-99** (СИСПР 14-2-97) «Совместимость технических средств электромагнитная. Помехоустойчивость бытовых приборов, электрических инструментов и аналогичных устройств. Требования и методы испытаний». Вводится впервые.

- 15. ГОСТ Р 51522-99** (МЭК 61326-1-97) «Совместимость технических средств электромагнитная. Электрическое оборудование для измерения, управления и лабораторного применения. Требования и методы испытаний». Вводится впервые. Вводятся с 01.01.2002:
- 16. ГОСТ Р 51317.3.2-99** (МЭК 61000-3-2-95) «Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний». Вводится впервые.
- 17. ГОСТ Р 51317.3.3-99** (МЭК 61000-3-3-94) «Совместимость технических средств электромагнитная. Колебания напряжения и фликер, вызываемые техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе), подключаемыми к низковольтным системам электроснабжения. Нормы и методы испытаний». Вводится впервые.
- 18. ГОСТ Р 51317.3.8-99** (МЭК 61000-3-8-97) «Совместимость технических средств электромагнитная. Передача сигналов по низковольтным электрическим сетям. Уровни сигналов, полосы частот и нормы электромагнитных помех». Вводится впервые.
- 19. ГОСТ Р 51317.4.3-99** (МЭК 61000-4-3-95) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю. Требования и методы испытаний». Взамен ГОСТ 30375-95 / ГОСТ Р 50008-92.
- 20. ГОСТ Р 51317.4.6-99** (МЭК 61000-4-6-96) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к кондуктивным помехам, наведенным радиочастотными электромагнитными полями. Требования и методы испытаний». Вводится впервые.
- 21. ГОСТ Р 51317.6.1-99** (МЭК 61000-6-1-97) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых в жилых, коммерческих зонах и производственных зонах с малым энергопотреблением. Требования и методы испытаний». Вводится впервые.
- 22. ГОСТ Р 51317.6.2-99** (МЭК 61000-6-2-99) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых в промышленных зонах. Требования и методы испытаний». Вводится впервые.
- 23. ГОСТ Р 51317.6.3-99** (МЭК 61000-6-3-96) «Совместимость технических средств электромагнитная. Помехоэмиссия от технических средств, применяемых в жилых, коммерческих зонах и производственных зонах с малым энергопотреблением. Нормы и методы испытаний». Вводится впервые.
- 24. ГОСТ Р 51317.6.4-99** (МЭК/СИСПр 61000-6-4-97) «Совместимость технических средств электромагнитная. Помехоэмиссия от технических средств, применяемых в промышленных зонах. Нормы и методы испытаний». Вводится впервые.
- 25. ГОСТ Р 51524-99** «Совместимость технических средств электромагнитная. Системы электрического привода с регулируемой скоростью вращения. Требования и методы испытаний». Вводится впервые.
- 26. ГОСТ Р 51526-99** «Совместимость технических средств электромагнитная. Оборудование для дуговой сварки. Требования и методы испытаний». Вводится впервые.

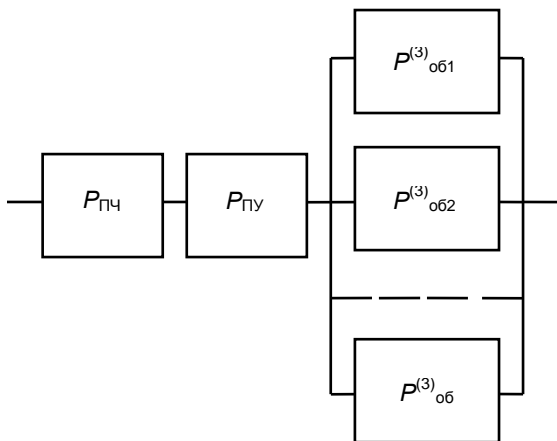
## Вероятность безотказной работы многофазных асинхронных двигателей

Вопросы надёжности механизмов в специализированных областях, где работоспособность системы является залогом безопасного осуществления заданных функций, всегда требовали повышенного внимания. Современные электроприводы повышенной надёжности могут содержать в своём составе многофазные асинхронные двигатели.

Целью работы является анализ изменения вероятности безотказной работы многофазных асинхронных двигателей в зависимости от числа фаз.

При анализе систем электроприводов следует учитывать надёжность всех их составных частей: преобразователя частоты и асинхронного двигателя. Под надёжностью понимаем вероятность безотказной работы (ВБР) узла.

Одним из путей повышения надёжности асинхронных двигателей (АД) является повышение надёжности его статорной обмотки путём увеличения числа фаз  $m$  [1]. Структурная схема надёжности многофазного электропривода выглядит, как представлено ниже.



В этой схеме:  $P_{ПЧ}$  – ВБР преобразователя частоты;  $P_{ПУ}$  – ВБР подшинников двигателя;  $P^{(3)}_{обN}$  – ВБР трёхфазной группы обмоток многофазного асинхронного двигателя.

Из доступных литературных источников, ВБР преобразователя – не ниже 0,98. Результаты многолетней совместной работы кафедры

«Электрические машины и аппараты» Томского политехнического университета и ОАО СКБ «Сибэлектромотор» (г. Томск) по обеспечению надёжности асинхронных двигателей показывают, что надёжность изготавливаемых асинхронных двигателей соответствует требованиям стандартов. Установленные стандартом показатели надёжности (вероятность безотказной работы асинхронного двигателя  $P_{АД}=0,90$  за 20000 часов) в ГОСТ Р 51689-2000 принимаются за базовые. МАД имеют идентичную технологию изготовления по сравнению с трёхфазными асинхронными двигателями. Её особенность заключается в том, что обмотка статора состоит из группы трёхфазных обмоток. Можно воспользоваться теорией надёжности и, составив структурную схему надёжности электропривода, получим последовательное соединение элементов системы, когда для определения ВБР системы необходимо перемножить значения ВБР каждого элемента.

Для расчёта показателей безотказности выбран метод структурных схем. При использовании этого метода реальная ЭМ отображается в виде структурной схемы событий безотказной работы составных частей. Для количественного определения значений вероятности безотказной работы применили метод аналогов. В этом случае значения показателей определяются исходя из достигнутых значений по аналогам, с применением соответствующей их корректировки, учитывающей степень аналога и нового образца. В нашем случае МАД изготавливается из тех же материалов по технологии серийных АД на том же оборудовании.

Вероятность безотказной работы подшипниковых узлов всегда оценивается в комплексе для двух подшипников. Расчёт надёжности подшипникового узла проводится по наиболее нагруженному подшипнику.

ВБР электропривода можно представить в виде:

$$P_{ЭП} = P_{ГЧ} * P_{МАД}^{(m)}$$

Математическая модель надёжности многофазных двигателей в общем виде:

$$\begin{aligned} P_{МАД}^{(m)} &= P_{ПУ} * P_{об}^{(m/3)} = \\ &= P_{ПУ} * \left(1 - \left(1 - P_{об}^3\right)^N\right), \end{aligned}$$

где  $P_{МАД}^{(m)}$  – ВБР многофазного асинхронного двигателя при числе трёхфазных групп равно  $N$ ,  $N$  – число расщепленных обмоток,  $P_{об}^{(m/3)}$  – ВБР обмотки статора трёхфазного АД.

По статистическим данным и по результатам ускоренных испытаний, полученных в ОАО СКБ «Сибэлектромотор» (г. Томск), доля отказов подшипниковых узлов составляет 10-20% для АД общепромышленного производства и определить в настоящее время эту долю для конкретного применения двигателей практически невозможно. Поэтому рассматриваем два варианта: 1 вариант – доля отказов подшипниковых узлов при эксплуатации АД составляет 10% и 2 вариант – доля отказов подшипниковых узлов при эксплуатации АД – 20%. Считаем, что эти варианты

определяют пределы варьирования ВБР подшипниковых узлов при общем значении ВБР АД.

В таблице приведены результаты моделирования вероятности безотказной работы многофазных асинхронных двигателей с расщеплёнными обмотками статора в нормальном режиме работы и в случае обрыва какой-либо фазы обмотки статора, когда система управления отключает всю трёхфазную группу, в которой произошёл обрыв. В этой таблице  $P_{доп}, \%$  – мощность, при которой многофазный асинхронный двигатель может работать неограниченное время при обрыве одной фазы от номинальной мощности  $P_{2н}$ .

№ вар.	$m$	$P^{(m)}_{МАД}$	$P_{ПУ}$	$P^{(m-1)}_{МАД}$	$P_{доп}, \%$	$P_{ЭП}$
1	3	0,9009	0,9900	отказ	отказ	отказ
	6	0,9820	0,9900	0,9009	50	0,8829
	9	0,9893	0,9900	0,9820	66,7	0,9624
	12	0,9899	0,9900	0,9893	75	0,9695
2	3	0,9016	0,9800	отказ	отказ	отказ
	6	0,9737	0,9800	0,9016	50	0,8836
	9	0,9795	0,9800	0,9737	66,7	0,9542
	12	0,9799	0,9800	0,9795	75	0,9599

На основании сказанного можно сделать следующие выводы:

1. Разработана математическая модель вероятности безотказной работы многофазных асинхронных двигателей. Результаты моделирования используются для прогнозирования и оптимизации вероятности безотказной работы многофазных асинхронных машин специального назначения.
2. Вероятность безотказной работы многофазных асинхронных двигателей с расщеплёнными обмотками статора возрастает с увеличением числа фаз статорной обмотки по сравнению с трёхфазными асинхронными двигателями. Оптимальным числом фаз по уровню вероятности безотказной работы следует считать  $m=9$ .
3. При отказе одной из совмещённых фаз многофазные асинхронные двигатели надёжно работают при снижении мощности на валу, которое зависит от числа фаз двигателя.

#### Литература

1. Глухов Д.М., Муравлёва О.О. Моделирование работы многофазных асинхронных двигателей в аварийных режимах эксплуатации // В материалах Известия ТПУ. – Томск: Изд-во Том. политех. ун-та, 2005. – Т. 308, №7. – С.139-142.

УДК 621.313

Ю.Б. КАЗАКОВ, д.т.н., проф., А.А. ЛАЗАРЕВ, асп., С.К. ГНУТОВ, инж.  
(ИГЭУ)

## **Сравнительный анализ стартерных электродвигателей с электромагнитным возбуждением и возбуждением от постоянных магнитов**

В качестве стартерных электродвигателей системы пуска двигателей внутреннего сгорания автомобилей обычно используются двигатели постоянного тока последовательного электромагнитного возбуждения с мягкой механической характеристикой. Режим работы стартеров кратковременный. Электродвигатели выполняются высокоиспользуемыми, компактными. Линейная нагрузка якоря, плотность тока в обмотках, плотность тока под щетками могут в 4-5 раз превышать значения, используемые в двигателях для продолжительного режима работы. Индукция в элементах магнитной системы предельная.

Стартерные электродвигатели выпускаются массовыми сериями, общий объем выпуска достигает более миллиона штук в год. Поэтому разработка и совершенствование конструкции и методик расчета стартерных электродвигателей является актуальной задачей.

Температурные условия работы стартеров составляют от  $-40$  до  $+80$  °С. Стартерные электродвигатели работают от источника питания ограниченной мощности – аккумуляторной батареи. Напряжение на их зажимах изменяется с изменением нагрузки из-за наличия внутреннего сопротивления батареи. Сопротивление батареи возрастает с понижением температуры электролита и степени заряженности батареи. Наиболее ответственным является пуск при низкой температуре и при достаточно разряженной батарее, когда пусковой ток невелик. Повышение пусковых свойств стартеров с электромагнитным возбуждением практически исчерпаны.

В последнее время начали выпускаться стартеры магнитоэлектрического возбуждения. Применяются достаточно дешевые, но с не очень высокими магнитными свойствами ферритовые магниты 22БА220. Появление высокоэнергетических магнитов NdFeB, обладающих предельными значениями остаточной индукции и коэрцитивной силы, делает актуальной задачу их применения в стартерных электродвигателях. Особенностью магнитов NdFeB является наличие сильной температурной зависимости магнитных свойств, например для коэрцитивной силы – до  $-0,6 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ . То есть с понижением температуры у таких магнитов возрастают магнитные свойства. При низкой температуре эти магниты обладают повышенным магнитным потоком и могут обеспечить необходимый пусковой момент при низком пусковом токе. С ростом температуры свойства магнитов падают, но снижается и сопротивление батареи, что повышает пусковой ток и обеспечивает сохранение пускового момента. Мягкость механической характеристики при пуске обеспечивается, в том числе, противополож-

ными температурными зависимостями сопротивления батареи и магнитных свойств магнита. Отсутствие в такой конструкции обмотки возбуждения с ее внутренним сопротивлением повышает пусковой ток и снижает требуемую емкость аккумулятора батареи.

Были рассмотрены несколько вариантов стартерных электродвигателей: с электромагнитным последовательным возбуждением, с возбуждением от постоянных магнитов (ПМ) 22БА220 и Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B. Результаты расчетов приведены в табл. 1. Так как магниты Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B обладают более высокими, чем магниты 22БА220, магнитными свойствами, то применение такой же высоты магнитов Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B, как и для магнитов 22БА220, приводит к значительному повышению магнитного потока и электромагнитного момента, но одновременно снижает частоту вращения якоря, что затрудняет запуск двигателей внутреннего сгорания. Для запуска двигателей внутреннего сгорания необходима частота вращения не менее определенной. На основе нескольких предварительно рассчитанных конструкций было выявлено, что возможно снизить высоту магнитов Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B h<sub>М</sub> с 9 до 0,6 мм и уменьшить наружный диаметр стартера с 79 мм до 62,2 мм, сохранив при температуре T = +20°C электромеханические показатели стартера как для магнитов 22БА220 с высотой магнитов 9 мм. Возможно применение магнитов NdFeB в виде сегментов тонкого кольца.

В наиболее тяжелых условиях пуска при температуре T = -30 °C, несмотря на принятую степень разрядки на 25 % аккумуляторной батареи, сниженный из-за повышения сопротивления батареи на 20 % ток, учета сопротивления подводящих проводов, но вследствие повышения магнитных свойств магнита NdFeB электромагнитный момент в точке максимальной мощности для последнего варианта стартерного электродвигателя возрос на 37 %, по сравнению с электромагнитным моментом стартера при T = +20 °C.

**Таблица 1. Расчетные показатели вариантов стартеров**

№ варианта	1	2	3	4	5	6
Возбуждение	Электромагнитное	Постоянный магнит (ПМ) Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B				
		h <sub>М</sub> =9 мм	h <sub>М</sub> =9 мм	h <sub>М</sub> =0,6 мм		
Диаметр, м	0,082	0,079	0,079		0,0662	
Длина, м	0,274	0,254	0,254		0,254	
Цена, руб	2140	2266	3365		2228	
T, °C	+20°C	+20°C	+20°C	-30°C	+20°C	-30°C
Mн, Нм	2,16	1,99	4,73	5,04	1,38	1,92
nн, об/мин	7306	7757	3349	3147	10944	8020
Pэм. макс, Вт	1653	1667	1642	1644	1585	1606

Электромеханические характеристики вариантов стартерных электродвигателей представлены на рис. 1. Номера характеристик соответствуют номерам вариантов стартерных электродвигателей таблицы 1. Расчетная точка максимальной мощности стартерного электродвигателя и оптимальной его работы соответствует току I<sub>н</sub> = 340 А. Очевидно, что значения электромеханических характеристик его работы для вариантов 1, 2 и 5



совпадают. Для случая работы системы пуска с использованием в стартерном электродвигателе ПМ NdFeB с толщиной магнита  $h_M$  0,6 мм при температуре  $T = -30^\circ\text{C}$  сохраняется запас по величине магнитного потока и, соответственно, электромагнитного момента.

Стартерный электродвигатель с электромагнитным возбуждением имеет наибольшие габариты, но и наименьшую стоимость, благодаря отсутствию в нем дорогостоящих постоянных магнитов. Если сравнивать стартерные электродвигатели с постоянными магнитами, то хотя магниты Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B и дороже магнитов 22БА220, но требуемая их меньшая масса, из-за уменьшенной толщины магнитов, приводит к общему снижению стоимости. В целом цена разных вариантов стартерных электродвигателей отличается несущественно.

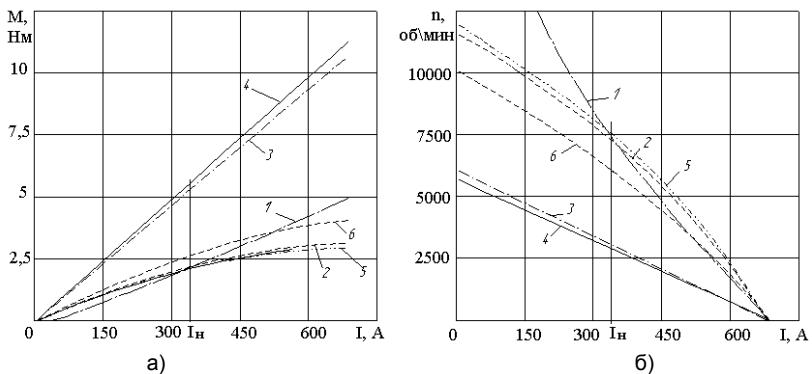


Рис. 1. Электромеханические характеристики вариантов стартерных электродвигателей: моментная (а), скоростная (б)

Особенности конструкции и работы стартерных электродвигателей требуют использования при расчетах их магнитного и теплового состояний полевых моделей. Магнитные свойства магнита определяют потери в стали двигателя, что определяет тепловое поле в нем, которое в свою очередь определяет магнитные свойства магнита. Поэтому магнитные и тепловые поля в магнитоэлектрических стартерных электродвигателях с магнитами NdFeB должны рассчитываться взаимосвязано.

## **Распределение электрического поля вблизи поверхности клетки при попадании её во внешнее электрическое поле**

В нашей повседневной жизни мы постоянно сталкиваемся с микроорганизмами, и зачастую присутствие в окружающей нас среде тех или иных микроорганизмов нежелательно или даже опасно.

Всё возрастающий интерес к установкам, способным эффективно очищать окружающую среду от микроорганизмов, заставил исследователей и производителей искать новые способы стерилизации воздуха. Весьма интересным направлением стало воздействие электрического поля на микроорганизмы.

Рассмотрим вопрос о распределении электрического поля вблизи поверхности клеток при их попадании во внешнее поле, этот аспект весьма важен для ответа на вопрос о возможности инактивации микроорганизмов электрическим полем, выбора параметров установок стерилизации, оценки эффективности воздействия поля на микроорганизмы.

Клетка представляет из себя весьма сложное образование, наиболее интересными с электрической точки зрения частями клетки являются мембрана, окружающая клетку и выполняющая ряд жизненно важных функций, и цитоплазма – внутренняя полужидкая среда клетки, в которой расположены ядро и органоиды клетки, занимающие незначительный объём клетки [1].

Совокупность результатов, полученных физическими и химическими методами исследования, дала возможность создать модель строения биологических мембран [2]. Эта модель представляет из себя бимолекулярный слой фосфолипидов, инкрустированный белками.

Биологическую мембрану можно рассматривать как электрический конденсатор. Проводниковые пластины конденсатора образуют электролиты наружного и внутреннего растворов (внеклеточного и цитоплазмы). Проводники разделены липидным бислоем. Липиды – диэлектрики с диэлектрической проницаемостью порядка 3 [1]. Электрическое сопротивление мембраны составляет около  $10^7 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$ , ёмкость составляет порядка  $0,5 \cdot 10^{-2} \text{ Ф/м}^2$ , толщина липидного бислоя составляет от 3 нм до 10 нм.

По сравнению с мембраной цитоплазму можно считать проводящей жидкостью, электрическое сопротивление цитоплазмы составляет около  $10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$ , диэлектрическая проницаемость цитоплазмы составляет порядка 70–80.

В процессе жизнедеятельности клетки и её взаимодействия с окружающей средой мембрана получает повреждения в результате механических, тепловых, химических и электрических воздействий. В большинстве случаев повреждения мембраны имеют вид сквозных гидрофильных пор

[1], которые могут закрыться после снятия внешнего воздействия или увеличиваться вплоть до критических размеров, приводя к нарушению целостности мембраны и гибели клетки, такой вариант событий имеет место при сохранении и интенсификации внешнего воздействия.

Под электрическим пробоем мембраны будем понимать резкое увеличение силы тока через мембрану, приводящее к нарушению механической целостности мембраны. Электрическому пробое способствует образование и рост пор, на развитие которых оказывает существенное влияние электрическое поле. По первоначальным оценкам напряжённость электрического поля вблизи поверхности клетки в 10 кВ/см и более оказывает существенное влияние на жизнеспособность клетки.

Перейдем к решению задачи определения напряжённости электрического поля вблизи поверхности клетки.

Задача расчёта электрического поля в некоторой области, заполненной объёмным зарядом, сводится к решению уравнения Пуассона, которое дополняется граничными условиями [3]:

$$\nabla^2 \varphi = -\rho_v / (\epsilon \epsilon_0) = \text{div}(\text{grad} \varphi) \quad (1)$$

где  $\varphi$  – потенциал в некоторой точке;  $\rho_v$  – плотность объёмного заряда;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная.

Среди численных методов решения уравнения Пуассона можно выделить три группы: конечно-разностные методы (прямые и итерационные); вариационные и вариационно-разностные методы (метод конечных элементов); интегральные методы (методы эквивалентных зарядов и интегральных уравнений).

Для решения поставленной задачи используем программу BETA-Fields, основанную на решении уравнения Пуассона методом конечных элементов. Программа предназначена для расчёта электрических полей в плоскопараллельной и аксиально-симметричной постановке.

Для расчётов поля вблизи клетки будем использовать сферическую модель клетки, имеющую сквозную пору, клетка не заряжена. Радиус клетки примем равным 0,3 мкм. Размер поры составляет порядка нескольких нм (примем радиус поры равным 1 нм), сама пора заполнена цитоплазмой, то есть мы имеем гидрофильную пору. Края кромки поры принимаем скруглёнными (примем радиус закругления равным 0,1 нм). Толщину мембраны примем равной 8 нм.

Так как размеры клетки намного меньше расстояния между электродами любой установки инактивации микроорганизмов, то поле вблизи поверхности клетки считаем однородным. Межэлектродное пространство заполнено воздухом. Задача решается в аксиально-симметричной постановке. Во всей расчётной области создаётся сетка конечных элементов в виде треугольников. Рассматривается нормальная составляющая вектора напряжённости электрического поля.

Рассчитаем распределение поля на границе цитоплазма – мембрана, имея в виду боковую поверхность поры. Начало отсчёта принимаем от угла поры (мнимого угла, так как реально имеет место закругление), далее

двигаемся по боковой поверхности поры по направлению к ядру клетки. Результаты расчёта представим в виде отношения расчётной напряжённости к средней напряжённости поля в межэлектродном промежутке (рис. 1).

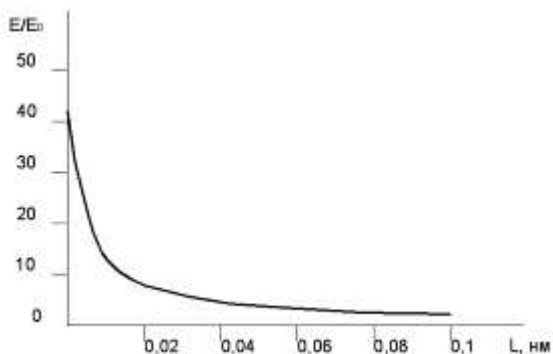


Рис. 1. Распределение напряжённости поля по поверхности мембраны, отнесённой к средней напряжённости в межэлектродном промежутке, в зависимости от глубины погружения внутрь мембраны по боковой поверхности поры

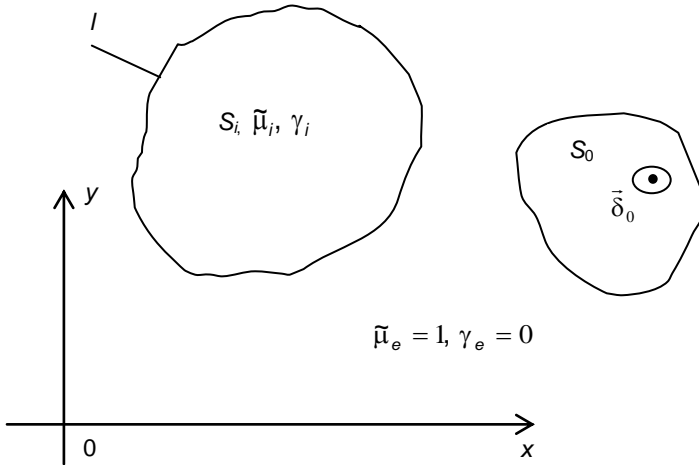
Итак, мы видим, что напряжённость на боковой поверхности поры может превышать среднюю напряжённость в промежутке в 42 раза. Если учитывать тот факт, что пора заполняется цитоплазмой не полностью, то максимальное превышение составит около 20. Тем не менее, становится ясно, что наличие пор в мембране клеток приводит к существенному росту напряжённости электрического поля вблизи мембраны в районе поры. Если учесть обозначенное ранее значение напряжённости поля вблизи поверхности клетки, существенно влияющее на жизнеспособность клетки – 10 кВ/см, то можно сделать вывод о том, что внешнее поле в 0,5–1 кВ/см может приводить к гибели клеток.

### Литература

1. Антонов В.Ф. Биофизика мембран// Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 6.
2. Руководство по цитологии. Том 1. – М.-Л., 1965. Гл. 2.
3. Теоретические основы электротехники. Учебник для вузов/ К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – С.-Пб.: Питер, 2003.

## Сингулярные интегральные уравнения для расчета электромагнитного поля в анизотропной среде

При проектировании электромагнитных аппаратов слоистая среда шихтованных сердечников обычно заменяется сплошной анизотропной средой. С помощью такой замены можно получить удобные математические модели для расчета электромагнитного поля с использованием интегральных уравнений. В данной статье рассматривается методика построения такого рода моделей для расчета квазистационарного электромагнитного поля в анизотропной среде. Расчетная область изображена на рисунке.



Сечение обмотки  $S_0$ , по которому протекают заданные токи с плотностью  $\delta_0$ , и сечение магнитопровода  $S_i$  с анизотропной проводимостью  $\tilde{\gamma}$  и магнитной проницаемостью  $\mu_a$  образуют сечение электромагнитной системы, моделирующей среднюю часть магнитопровода трансформатора, в которой влияние остальных частей магнитопровода относительно мало и поле имеет плоскопараллельную структуру. Особенностью данной модели является постоянство внешнего магнитного поля  $B_0$  по сечению сердечника  $S_i$ .

Расчёт поля сводится к решению следующей краевой задачи

$$\operatorname{rot} \vec{H}_i = \gamma_i \vec{E}_i \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E}_i = -j\omega\mu_0 \tilde{\mu}_i \vec{H}_i \quad (2)$$

$$\operatorname{rot} \vec{H}_e = 0 \quad (3)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E}_e = -j\omega\mu_0 \vec{H}_e \quad (4)$$

$$\left[ \vec{n}, \vec{H}_e - \vec{H}_i \right] = - \left[ \vec{n}, \vec{H}_{0i} - \vec{H}_{0e} \right] \quad (5)$$

$$\left( \vec{n}, \vec{\mu}_i \vec{H}_i - \vec{H}_e \right) = \left( \vec{n}, \vec{H}_{0e} - \vec{\mu}_i \vec{H}_{0i} \right) \quad (6)$$

Граничные условия написаны только для магнитного поля, поскольку электрическое поле магнетика будет исключено из (1), (2), (3), (4), где  $\vec{H}_i, \vec{E}_i$  – векторы напряженности вторичного поля (поля вторичных источников) в области  $S_i$ ,  $\vec{H}_e, \vec{E}_e$  – в области  $S_e$ .

Для решения краевой задачи (1) – (6) путём ее сведения к системе граничных интегральных уравнений (ГИУ) используются векторный и скалярный потенциалы. Учитывая, что в области  $S_i$ , т.е. в магнетике, искома индукция  $\vec{B}_i = \operatorname{rot} \vec{A}_i$ , напряженность  $\vec{H}_i = (\mu_0 \vec{\mu}_i)^{-1} \operatorname{rot} \vec{A}_i$  можно найти, что  $\vec{E}_i = -j\omega \vec{A}_i - \nabla\varphi_i$ . Электростатическая составляющая  $\nabla\varphi_i$  может быть принята равной нулю и поэтому  $\vec{E}_i = -j\omega \vec{A}_i$ . Можно получить соотношения:

$$\operatorname{rot}(\vec{\mu}_i \operatorname{rot} \vec{A}_i) = -j\omega\mu_0\gamma_i \vec{A}_i. \quad (7)$$

После выполнения векторных операций и с помощью замен  $x_1 = x/\sqrt{\mu_{ix}}$ ,  $y_1 = y/\sqrt{\mu_{iy}}$  (7) может быть приведено к обычному виду уравнения Гельмгольца:

$$\frac{\partial^2 A_i}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 A_i}{\partial y_1^2} - k^2 A_i = 0 \quad (8)$$

Известное фундаментальное решение [1] позволяет получить интегральное представление для векторного потенциала  $\vec{A}_i$  (точнее говоря, для одной его компоненты) следующего вида:

$$A_{iq} = \frac{\mu_0 m}{2\pi} \int_l i_p K_0(k r_a) dl_p, \quad (9)$$

где  $i_p$  – плотность простого слоя поверхностных токов, распределённых по контуру  $l$ , направленных вдоль оси  $z$ ,

$$r_a = \sqrt{\frac{(x_q - x_p)^2}{\mu_{ix}} + \frac{(y_q - y_p)^2}{\mu_{iy}}}, \quad (10)$$

$m = \sqrt{\mu_{ix}\mu_{iy}}$ . Из выражения (10) получаем представление для  $\vec{H}_i$ :

$$\vec{H}_{iq} = \frac{m}{2\pi} \oint_I \tilde{\mu}_i^{-1} \left[ \nabla_q K_0(kr_a), \vec{i}_p \right] dl_p \quad (11)$$

В области  $S_e$  (внешняя область), для построения ГИУ используется скалярный потенциал простого слоя зарядов:

$$\varphi_{eq} = \frac{1}{2\pi} \oint_I \sigma_p \ln \frac{1}{r} dl_p, \quad (12)$$

где

$$r = \sqrt{(x_q - x_p)^2 + (y_q - y_p)^2}. \quad (13)$$

Полагая, что  $\vec{H}_e = -\nabla \varphi_e$ , можно получить представление для  $\vec{H}_e$ :

$$\vec{H}_{eq} = \frac{1}{2\pi} \oint_I \sigma_p \frac{\vec{r}}{r^2} dl_p. \quad (14)$$

Первое интегральное уравнение

$$\begin{aligned} i_q + \frac{1}{\pi m} \oint_I j_p (\tilde{n}_q \tilde{\mu}_i, \nabla_q K_0(kr_a)) dl_p - \frac{1}{\pi} \oint_I \sigma_p \frac{(\vec{\tau}_q, \vec{r})}{r^2} dl_p = \\ = -2 \left( \vec{\tau}_q, \vec{H}_{0iq} - \vec{H}_{0eq} \right). \end{aligned} \quad (15)$$

получено из краевого условия (5), путем вычисления предельных значений на  $l$  выражений  $[\vec{n}, \vec{H}_i]$ ,  $[\vec{n}, \vec{H}_e]$ , используя представления (11) и (14).

Для получения второго интегрального уравнения

$$\begin{aligned} \sigma_q + \frac{1}{\pi} \oint_I \sigma_p \frac{(\vec{n}_q, \vec{r})}{r^2} dl_p + \frac{m}{\pi} \oint_I j_p (\vec{\tau}_p, \nabla_q K_0(kr_a)) dl_p = \\ = 2 \left( \vec{n}_q, \vec{H}_{0eq} - \tilde{\mu}_i \vec{H}_{0iq} \right). \end{aligned} \quad (16)$$

использовано предельное значение на  $l$  проекции  $\vec{H}_e$ , определённой формулой (14), на нормаль  $\kappa l$  согласно краевому условию (6), а также произведение  $(\vec{n}, \tilde{\mu}_i \vec{H}_i)$ , где  $\vec{H}_i$  определено выражением (11). В данном уравнении сингулярным является второй интеграл слева. Таким образом, ГИУ (15), (16) являются системой сингулярных интегральных уравнений, которая может быть использована для построения математических моделей электротехнических устройств с учетом анизотропии.

### Литература

1. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. – М.: Высшая шк., 1970. – 710 с.

## **Высоковольтные испытания цифрового трансформатора тока 220 кВ**

Высоковольтные трансформаторы тока (ТТ) и напряжения (ТН) 110–750 кВ являются самым массовым оборудованием на подстанции. Информация о первичных токах и напряжениях, получаемая от ТТ и ТН используется в системах управления, АСКУЭ, РЗА, измерений и т.д.

Статистика технологических нарушений с высоковольтными ТТ и ТН в энергетике России, результатом которых были взрывы ТТ и, реже ТН, неблагоприятна и тревожна.

Причины выхода из строя ТТ разные, но ход развития аварии всегда приводит к пробое главной изоляции на бушинг в месте прохода первичного проводника через магнитопровод с вторичной обмоткой, где самое напряженное использование главной изоляции. Следует отметить, что это «узкое» место расшить нельзя по принципу действия электромагнитного трансформатора тока.

Цифровой трансформатор тока (ЦТТ) 220 кВ по рис. 1. разделяет функцию обеспечения высоковольтной изоляции, возложив её на оптоволокно, проходящее внутри высоковольтного изолятора и функцию измерения первичного тока, используя закон электромагнитной индукции в канале измерений, АСКУЭ и закон полного тока к каналу для РЗА.

Очевидно, что ТТ без высоковольтной изоляции в составе ЦТТ можно выполнить на магнитопроводе меньшего сечения, с существенно меньшей длиной магнитной силовой линии и с лучшей, чем 0.2s точностью. Сигнал со вторичной обмотки ТТ (нагруженной на шунт) оцифровывается и доставляется по оптоволокну с высокого потенциала на низкий (на щит управления) в цифре и в аналоге в стандарте 1А (5А).

Для систем РЗА важно получать информацию о первичном токе с минимальной погрешностью в аварийных режимах, часто сопровождающихся аperiodической составляющей тока КЗ. ТТ в этих условиях работает плохо, его магнитопровод насыщается, и погрешности сильно растут (до 90%).

Магнитотранзисторное (МТ) кольцо работает по закону полного тока, трансформирует весь спектр тока КЗ, включая аperiodическую составляющую, его сигнал также оцифровывается и доставляется в цифре и в аналоге на щит управления станцией или подстанцией.

ЦТТ содержит также каналы диагностики, встроенного режимного и тестового контроля; эта информация передается по тому же оптоволокну.

Результаты токовых испытаний приведены в [1].



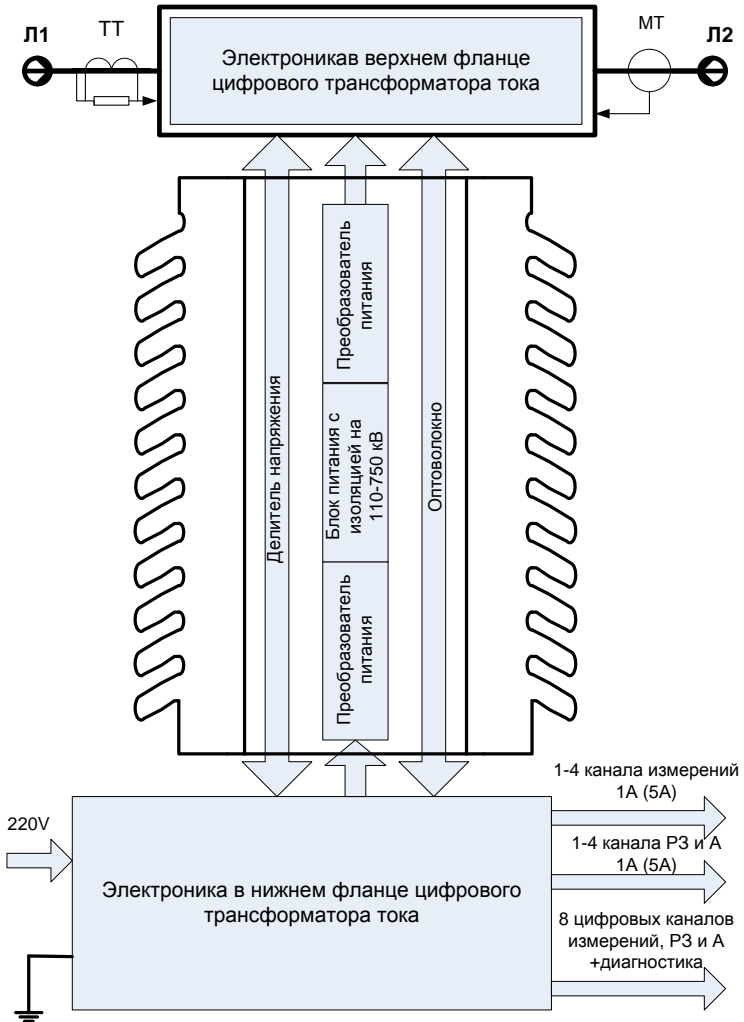


Рис. 1. Блок – схема цифрового трансформатора тока 220 кВ

Для электроники, расположенной на высоком потенциале нужно питание. Оно обеспечивается высоковольтным блоком питания, содержащим по рис. 1 преобразователи питания с изоляцией на 220 кВ.

Для обеспечения равномерного распределения высокого напряжения по элементам высоковольтного блока питания используется активно-ёмкостный делитель напряжения, состоящий из большого числа секций, каждая из которых выполнена параллельным соединением резистора и конденсатора. Рабочее напряжение этих элементов в исследуемой конструкции трансформатора тока составляет 180 В (допустимое напряжение – 500 В). Методика испытаний включала в себя:

1. Измерение сопротивления активно – ёмкостного делителя напряжения.
2. Испытание изоляции приложением повышенного напряжения промышленной частоты в течение 1 минуты и длительно.
3. Измерение тока проводимости делителя напряжения.

Испытания проводились в высоковольтной лаборатории Ивановского государственного энергетического университета (ИГЭУ). Значение одноминутного испытательного высокого напряжения промышленной частоты для внутренней изоляции выбиралось в соответствии с Гост 1516.1–76 для трансформаторов с нормальной изоляцией. Для класса напряжения 220 кВ испытательное напряжение составляет 440 кВ. Вследствие ограниченных технических возможностей испытание в лаборатории ИГЭУ проводилось при напряжении 100 кВ.

Измеренное сопротивление активно-ёмкостного делителя напряжения составило  $120 \cdot 10^6$  Ом.

Испытание повышенным напряжением промышленной частоты  $U_{исп.} = 100$  кВ показало отсутствие электрических разрядов в изоляции высоковольтного блока питания нагрузки ЦТТ-220 и в активно-ёмкостном делителе напряжения. Ток проводимости делителя составил при этом  $I_d = 2,5 \cdot 10^{-3}$  А.

Выводы

1. Измеренное активное сопротивление активно – ёмкостного делителя напряжения составило  $120 \cdot 10^6$  Ом.
2. Испытание повышенным напряжением  $U = 100$  кВ промышленной частоты показало отсутствие электрических разрядов в высоковольтной части ЦТТ – 220.
3. Величина действующего значения тока проводимости активно – ёмкостного делителя напряжения составила  $2,5 \cdot 10^{-3}$  А.

### Литература

**1. Гречухин В.Н.** Анализ результатов испытаний цифрового трансформатора тока. – Электро. – №3. – 2001. – С. 42-45.

## Математическое описание петли гистерезиса

Многие кристаллические материалы, такие как ферромагнетики, сегнетоэлектрики и сегнетоэластики характеризуются гистерезисом, т.е. неоднозначной зависимостью между входными и выходными магнитными, электрическими и механическими величинами соответственно.

Природа магнитного гистерезиса анализируется во множестве статей, посвященных этому вопросу, так как магнитные материалы наиболее распространены в технике. В [1] отмечаются, что три фундаментальные особенности, три основные причины возникновения магнитного гистерезиса связаны, во-первых, с необратимым смещением доменных границ, во-вторых, с необратимым вращением спонтанной намагниченности, в-третьих, с задержкой образования и роста зародышей перемагничивания.

В [2] отмечено, «что, несмотря на декларируемую сложность физических процессов, происходящих при динамическом перемагничивании магнитопроводов, можно получить весьма хорошее согласование расчетных и экспериментальных динамических петель гистерезиса, опираясь лишь на учет магнитной вязкости с малым временем релаксации».

В технике, в электронике известны компараторы, обладающие гистерезисом, они могут быть получены из операционных усилителей, путем охвата последней положительной обратной связью. Для компараторов характерна петля гистерезиса с напряжением срабатывания и напряжением возврата, что аналогично коэрцитивной силе для петли гистерезиса магнитных материалов.

В [3] проведен анализ гистерезиса компараторов, предложена аппроксимация гиперболическим тангенсом и даны формулы для расчета напряжений срабатывания, возврата, коэффициента возврата и других параметров петли гистерезиса.

Математическое описание петли гистерезиса ферромагнетика базируется на аналитических, гармонических, комплексных функциях времени, таких как  $\tanh$  [3] и на учете магнитной вязкости, введенным автором, оператором запаздывания намагниченности по отношению к напряженности магнитного поля  $h(t)$ :

$$\Theta := e^{i\alpha} \quad (1)$$

где:  $i$  – мнимая единица;  $\alpha$  – угол запаздывания (отставания) намагниченности от напряженности магнитного поля, причем в этом угле учитывается и временное  $\tau$  и фазовое  $\varphi$  запаздывание намагниченности по отношению к напряженности магнитного поля  $h(t)$ , т.е.  $\Theta$  зависит от частоты.

При расчете на рис. 1 напряженность магнитного поля  $h(t)$  задавалась комплексной функцией времени:

$$h(t) = H_m \cdot e^{i\omega \cdot t} \quad (2)$$

где:  $H_m$  – комплексная амплитуда напряженности магнитного поля, состоящая из модуля и фазы.

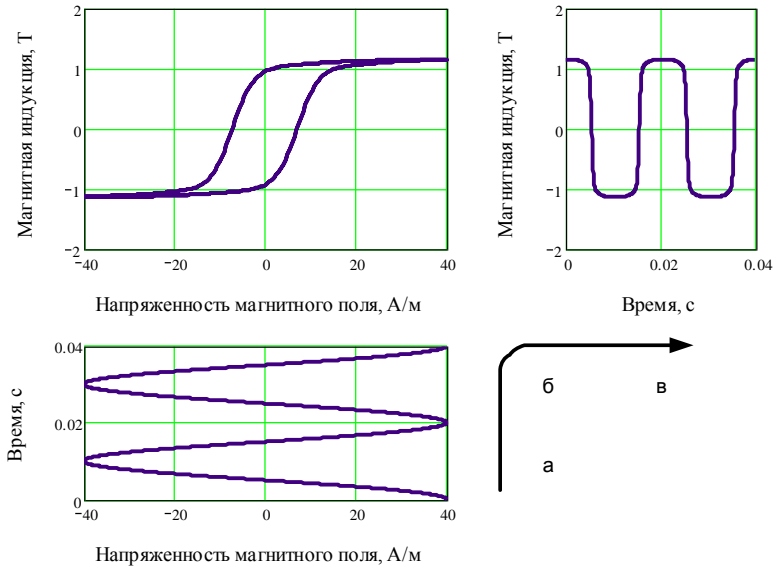


Рис. 1. Расчетные зависимости: а) напряженности магнитного поля от времени; б) магнитной индукции от напряженности магнитного поля по петле гистерезиса; в) магнитной индукции от времени.

На рис. 1, а, б, в приведены реальные части соответствующих комплексных функций времени, т.е. проекции на действительную ось, при воздействии на магнитопровод трансформатора тока заданной напряженности магнитного поля (а), графики петли гистерезиса (б) и магнитной индукции (в). Автор утверждает, что функции комплексного переменного, отвечающие условиям аналитичности и гармоничности могут использоваться для описания нелинейных явлений (см. график магнитной индукции на рис. 1, в).

Угол запаздывания  $\alpha$  не следует отождествлять с углом  $\delta$  отставания магнитной индукции от напряженности магнитного поля.

На рис. 2 приведена уточненная векторная диаграмма напряженности магнитного поля  $H$ ,  $h(t)$ , магнитной индукции  $B$ ,  $b(t)$  и намагниченности  $J$   $j(t)$  как функции комплексного переменного, разделяя магнитную индукцию на два слагаемых в соответствии с Максвелловскими представлениями:

$$b(t) = b_s(t) + b_j(t) \quad (3)$$

где:  $b_s(t)$  магнитная индукция в воздухе (рассеяния) линейно связанная с напряженностью магнитного поля  $h(t)$ ,  $b_s(t) = \mu_0 \cdot h(t)$ ;  $b_j(t)$  магнитная индукция в ферромагнетике, нелинейно связанная с напряженностью магнитного поля  $h(t)$ ,  $b_j(t) = \xi(h(t))$ .

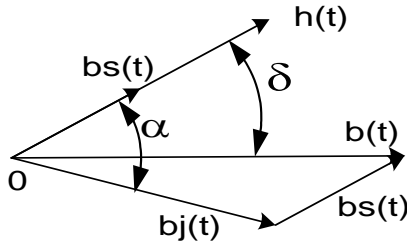


Рис. 2. Отставание магнитной индукции на угол  $\delta$ , а намагниченности на угол  $\alpha$  от напряженности магнитного поля

К сожалению, расчетные формулы, занимающие несколько страниц каждая, не могли быть приведены в этой статье.

### Литература

1. **Кандаурова Г.С.** Природа магнитного гистерезиса. – Статьи Соросовского образовательного журнала в текстовом формате.
2. **Кадочников А.Н., Стародубцев Ю.Н., Малюк В.П.** Динамические кривые перемagnичивания тороидального магнитопровода из аморфного сплава  $Co_{68}Fe_{4}Cr_4Si_{13}B_{11}$  в диапазоне частот 50-10000 Гц. – Электричество. – 2005. – № 1.
3. **Гречухин В.Н., Таршис А.С.** Анализ характеристик измерительного релейного органа на операционном усилителе в интегральном исполнении. – Электричество. – 1977. – № 8.
4. **Ионов И.П.** Магнитные элементы дискретного действия. – Высш. шк., 1968. – 284 с.

## Исследование электромагнитных полей и режимов работы индуктора магнитного стимулятора

Магнитный стимулятор используется в медицине (рис. 1). В магнитном стимуляторе генерируются кратковременные импульсы магнитного поля, свободно проникающие сквозь одежду, кости черепа и мягкие ткани и воздействующие на глубокие периферические нервы, головной и спинной мозг, недоступные для других способов стимуляции.



Рис. 1. Магнитный стимулятор

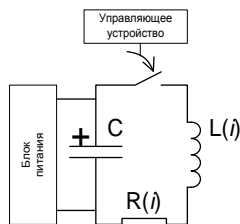


Рис. 2. Принципиальная схема питания индуктора

Источником магнитного поля в магнитном стимуляторе является индуктор. В данной работе исследуются электромагнитные поля индуктора с последующей целью изменения конструкции индуктора для достижения максимальной интенсивности импульса магнитного поля и оптимальной его формы.

Индуктор представляет собой плоскую катушку  $L$ , подключаемую к заряженной батарее конденсаторов  $C$  (рис. 2). Сопротивление  $R$  моделирует активные потери в проводах, подходящих к индуктору, коммутирующей электронике и в наибольшей степени в самой катушке.

Исходя из соотношения параметров схемы (блока питания и RLC-контура) электрические процессы, происходящие в данной схеме, можно представить классическим уравнением:

$$R \cdot i + L \frac{di}{dt} + U_C = 0, \quad (1)$$

решением которого при параметрах, характерных для данной схемы, является уравнение для тока:

$$i = I_m \cdot e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \pi), \quad (2)$$

где  $\omega = \sqrt{1/LC - R^2/4L^2}$ , что соответствует колебательному режиму переходного процесса.

Следует отметить, что активное сопротивление катушки  $R$  и индуктивность  $L$  являются функцией частоты  $\omega$ .

Таким образом, чтобы определить картину магнитного поля в индукторе, кроме его геометрических параметров катушки и силы тока, необходимо знать частоту, которая в свою очередь, определяется исходя из функции (2), параметры которой –  $R$  и  $L$  являются функцией  $\omega$ .

Одним из основных этапов расчета является создание полевой модели индуктора. Использование численных методов позволяет получить картину распределения магнитного поля и распределение плотности токов по сечению проводников индуктора. Картина магнитного поля представляет непосредственный интерес, а распределение токов необходимо для уточнения картины магнитного поля и проведения итерационных расчетов. Применение метода конечных элементов позволяет с наибольшей точностью моделировать границы раздела сред с различными электрическими свойствами. В связи с достижениями в области разработки интегрированных математических сред, представляют интерес совместного использования программы Matlab и Femlab. Программа Femlab позволяет осуществлять расчет электромагнитного поля, а в среде Matlab формируются исходные данные, и решается уравнение (2).

На рис. 3 представлена картина магнитного поля индуктора полученная в программе Femlab.

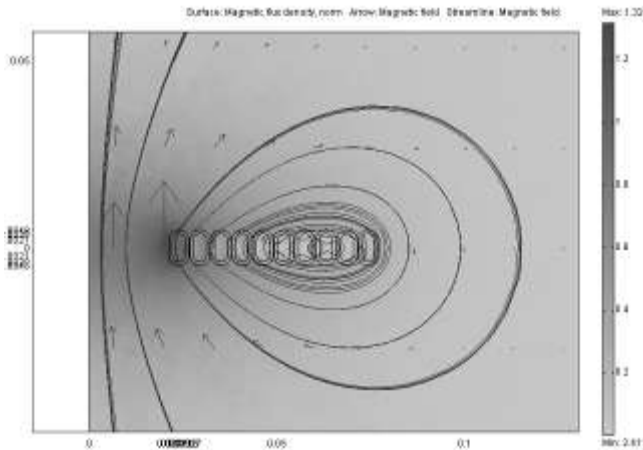


Рис. 3. Магнитное поле индуктора

## **Программный комплекс для обучения, разработки и проведения компьютерного тестирования по электротехнологическим циклам дисциплин**

В настоящий момент много времени и сил уделяют решению вопросов «качества образования». Создают множество программ, которые позволяют помочь преподавателям в обучении студентов. В большинстве своем это программы – учебники, которые представляют для студентов материал в удобном для них виде с поиском информации и закладками. Меньше программ, которые способны на тестирование студентов и оценку результатов их работы. Еще меньше программ, которые способны проводить лабораторные занятия (компьютерные стенды), практические занятия и самостоятельную работу. Программы, которые умеют всё это делать – единицы.

В стенах ИГЭУ разработана система EILabWork, которая является универсальным инструментом и для представления теоретической информации, и для проведения лабораторных, практических, самостоятельных работ, и для оценки знаний студентов.

EILabWork позволяет формировать среду для обучения студентов электротехнических специальностей и может служить мощным инструментом для преподавателя. Данный программный комплекс позволяет создавать обучающие модули по самым различным электротехническим и электротехнологическим дисциплинам. Создание новых тем для обучения возможно с помощью «Мастера создания вопросов». Вопросы в теме могут различные: ввод ответа (будь то формула, значение или выражение), выбор из нескольких вариантов (в том числе и в графическом представлении информации), составление уравнений, описывающих состояние цепи, построение топографической диаграммы, построение векторной диаграммы. В вопросе могут использоваться картинки, текст, схемы замещения электротехнических устройств, формулы, выражения (значения в них подсчитываются в зависимости от контекста). В структуре вопроса широко используются формулы с комплексными числами, математическими операциями, округлениями, случайными числами. С помощью строителя вопросов задаются целые математические модели, по которым исследуются режимы работы схем, различных устройств и сравниваются с правильным ответом. Задаются подсказки, причем подсказок в одном вопросе может быть несколько (вначале можно задать наводящие подсказки, а затем явно указывающие на решение). Задается контекстная помощь для темы (в виде гипертекстовых страниц). В вопросах возможно ограничивать время ответа, указывать баллы за правильный ответ, задавать возможность перехода к другому вопросу, не ответив на этот.



Кроме того, для создания схем к вопросам используется «Редактор схем», в котором строится схема, задаются значения элементов, задаются формулы для расчета некоторых не явно указанных значений элементов.

Для создания учебно-методического комплекса используется «Мастер создания учебников». С его помощью задается наполнение и структура учебника. Создание и редактирование содержания происходит интерактивно и достаточно просто.

Главное меню при использовании EILabWork для обучения представлено на рис. 1.

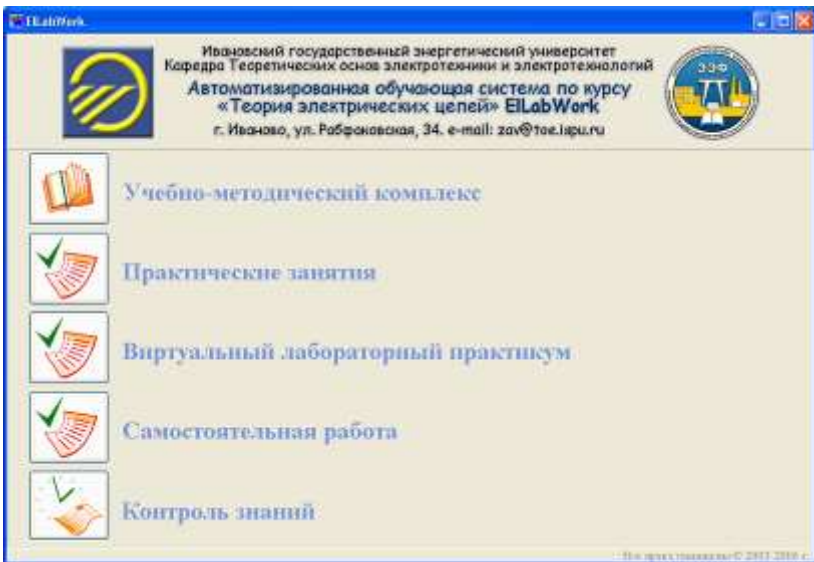


Рис. 1. Главное окно программы

Теоретическую информацию студенты смогут найти в разделе «учебно-методический комплекс». Этот раздел имеет иерархическую структуру содержания с одной стороны, а с другой стороны, набор гиперссылок с электронными версиями учебно-методических материалов. Наполнение раздела задается с помощью гипертекстовых страниц.

Получить знания на практике студенты смогут в разделах: «практические занятия», «виртуальный лабораторный практикум» и «самостоятельная работа». Эти разделы предназначены для практического изучения материала под руководством преподавателя и для самостоятельного изучения. В этих разделах есть возможность использовать подсказки и пользоваться контекстной помощью (теоретический материал по текущей теме).

Раздел «контроль знаний» предназначен для проверки знаний студентов (текущие, промежуточные контроли и др.). В данном разделе нельзя пользоваться контекстной помощью, подсказками, время ответа на вопрос ограничено.

В настоящее время на базе EILabWork разработан контрольно-обучающий комплекс по теоретическим основам электротехники. В качестве примера на рис. 2 представлено одно из окон при самостоятельной работе по разделу трехфазные цепи, где предлагается произвести анализ аварийного режима и построить топографическую диаграмму напряжений.

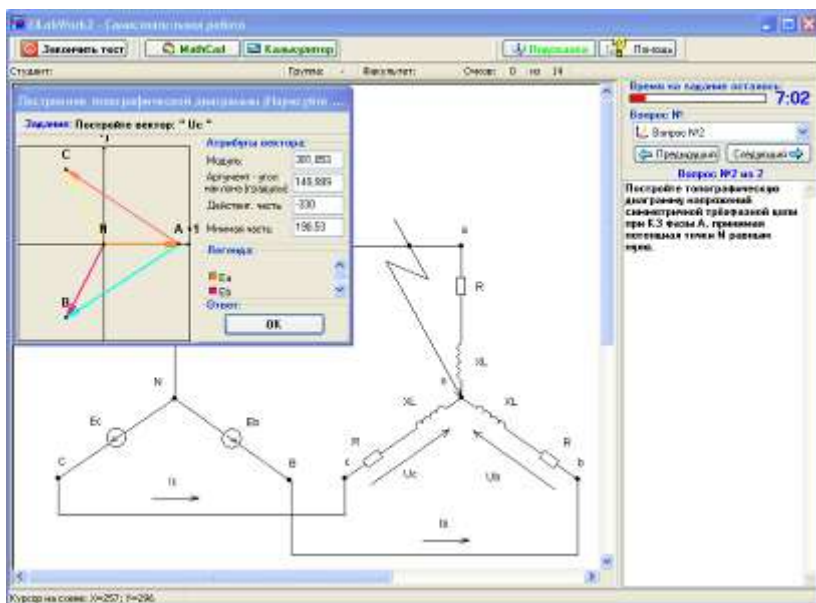


Рис. 2. Пример работы программы

EILabWork является не только контрольно-обучающей системой, но еще и инструментом для создания комплекса обучения. Главным достоинством EILabWork является то, что преподаватель, не прибегая к помощи разработчиков, имеет возможность создать свой комплекс для обучения студентов, причем не только технической направленности, но и для любого предмета любой тематики.

## Схема преобразования постоянного напряжения в уровень и фазу переменного напряжения

Подобная схема предназначена для управления двухфазным асинхронным двигателем следящей системы. Сигнал рассогласования получается от датчика, выдающего постоянное напряжение, например мостовой измерительной схемы. Ранее для этой цели использовался преобразователь [Л1], который имел существенные недостатки: низкую чувствительность и малое входное сопротивление, благодаря чему измерительная часть устройства получалась громоздкой. Преобразователь может применяться для управления двухфазным двигателем, осуществляющим подачу сварочной проволоки в сварочных полуавтоматах.

Предлагаемая схема приведена на рис. 1. Она симметрична относительно горизонтали средней части. Верхняя часть предназначена для управления двигателем при движении в одном направлении, нижняя – в другом. На входе схемы поставлены операционные усилители D1, D2, каждый из которых управляет транзисторами VT1 и VT2. При наличии постоянного напряжения на входе схемы открывается только один в зависимости от полярности входного сигнала Uвх, или VT1 или VT2. При открытии транзистора – VT1 средняя точка обмотки 2 трансформатора Тр.1 подключается к земле через резистор R5, благодаря чему получают открытыми в один полупериод транзистор VT3, а в другой – VT4. Транзисторы VT3 и VT4 образуют двухконтактный каскад, работающий на выходной трансформатор Тр.2. Степень открытия транзисторов VT1 и VT2 определяет ток раскочки VT3 и VT4. Обмотка 3 трансформатора Тр.1 подключается к транзисторам VT3 и VT4 с фазой повернутой относительно обмотки 2 на 180 градусов, чем обеспечивается реверсирование двигателя.

На рис. 2 приведена зависимость напряжения на коллекторах транзисторов VT3 и VT4 от входного. Она нелинейна. Для сервопривода это допустимо, так как при подходе к точке равновесия получается широкая зона низких скоростей у двигателя и эффективное демпфирование системы. Напряжение на выходе схемы меняется плавно и без зоны нечувствительности. Порог чувствительности схемы достигает одного милливольт. Начальный уровень выходного напряжения легко подбегается смещением операционных усилителей. Естественно, что на вид этой зависимости существенное влияние оказывает уровень напряжений полуобмоток 2 и 3 Тр.1 и сопротивления резисторов R5 и R6. Поэтому показаны две кривые при напряжениях полуобмоток трансформатора Тр.1, 4 и 7 вольт при R5=R6. Первая кривая соответствует напряжению 4 В, а вторая – 7 В.

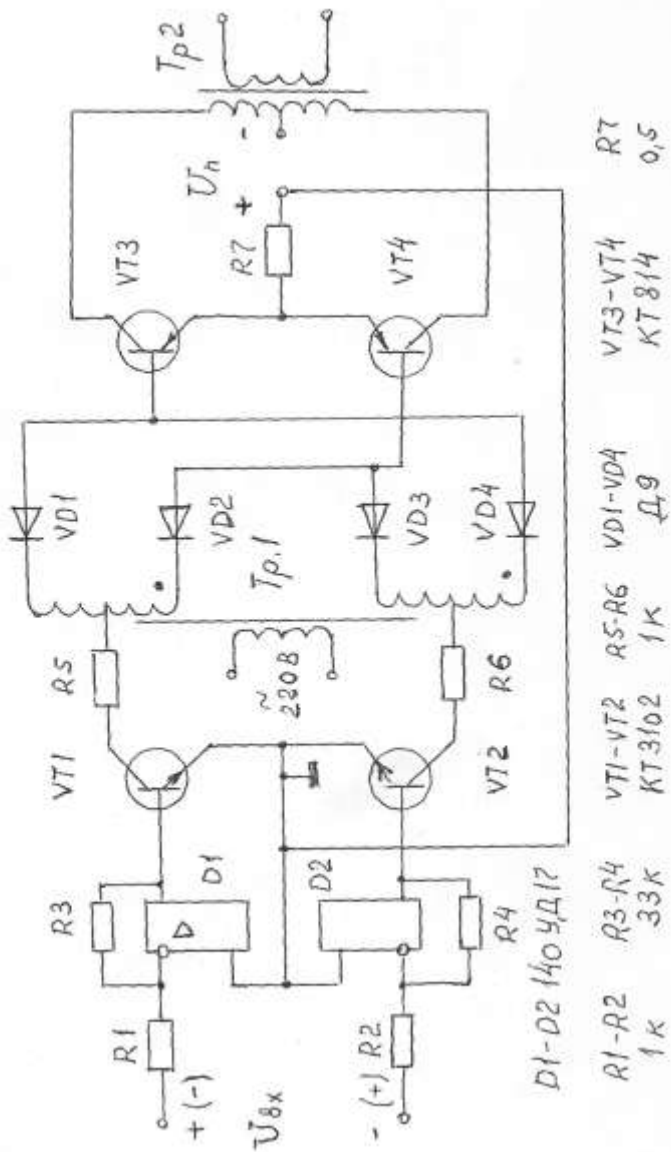


Рис. 1

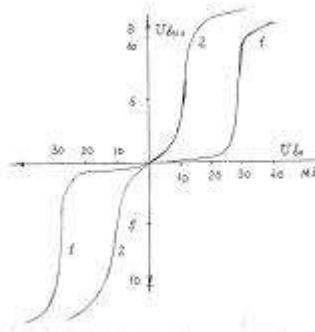


Рис. 2

Напряжение на обмотках трансформатора Тр.2 строго говоря, не-синусоидально. Несинусоидальность сигнала резко проявляется при средних уровнях входного сигнала, тогда форма напряжения на Тр.2 напоминает форму тока в катушке с железом или видеосигнал, у которого меняется скважность. Если при малом уровне сигнала считать эту форму напряжения видеосигналом, то скважность его достигает 12. При большом уровне входного сигнала выходной сигнал по форме приближается к синусоиде. Таким образом, рост выходного напряжения преобразователя обеспечивается за счет изменения скважности. Такая форма выходного напряжения вполне допустима для управления последующими каскадами, например мостовой схемой инвертора. Транзисторы такого инвертора будут работать в режиме близкого к ключевому. Если применить вместо обычных VT3 и VT4 включение транзисторов по схеме Дарлингтона, то с трансформатора Тр.2 можно питать двигатель небольшой мощности.

Важное значение для схемы преобразования имеет входное сопротивление. Операционные усилители работают в инвертирующем режиме, поэтому  $[A2]$  входное сопротивление схемы приблизительно равно  $2R1=2$  кОм. Включение операционных усилителей в неинвертирующем режиме приводит к грубому искажению выходного сигнала при малом уровне входного и невозможности его использования. При больших входных сигналах выходной сигнал по форме приближается к синусоиде.

### Литература

1. Розенкранц А.С., Федоров А.В. Схема управления реверсивным асинхронным двигателем при входном сигнале постоянного напряжения. – Электротехника. – №8. – 1965.
2. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Т.1. – М.: Мир, 1984.

## **О математическом моделировании устройств межсистемной связи на основе ферромагнитных управляемых элементов**

В настоящее время развитие энергетики России и зарубежных государств характеризуется дерегулированием производства и потребления электрической энергии, то есть выделением в качестве независимых экономических субъектов ее производителей и потребителей [1,2]. Это приводит к увеличению обмена мощностью как внутри энергосистем, так и между энергосистемами по межсистемным связям. Одним из путей повышения эффективности работы межсистемных связей в условиях либерализации рынка электрической энергии является использование управляемых межсистемных связей.

В качестве управляемых межсистемных связей перспективными представляются устройства на основе ферромагнитных управляемых элементов. Достоинством устройств этой группы является простота, надежность, низкая стоимость, высокая маневренность. Из большого числа технических решений следует выделить устройства на основе фазоинвертирующих трансформаторов (ФИТ МС) [3,4]. Исследования, проведенные методами математического моделирования, на физических моделях и опытных образцах позволяют сделать вывод о возможности создания простой и надежной управляемой межсистемной связи с достаточно высокими технико-экономическими показателями [4-6].

Экономически целесообразным представляется использование установок межсистемной связи на основе трехфазных фазоинвертирующих трансформаторов. При их использовании улучшаются энергетические характеристики установки, уменьшается суммарная масса магнитопроводов, снижается мощность источников подмагничивания, что приводит к улучшению технико-экономических показателей установки. Проектирование промышленного образца требуемой мощности невозможно без наличия точной математической модели установки. Характеристики установки в значительной степени зависят от выбранных алгоритмов управления. Оптимальный синтез их невозможен без знания статических и динамических характеристик объекта. Задачей данного этапа исследований является создание математической модели межсистемной связи на основе трехфазных фазоинвертирующих трансформаторов, позволяющей проводить математические эксперименты на установке в установившихся и переходных режимах.

Установка состоит из четырех трехфазных фазоинвертирующих трансформаторов, двух источников напряжения подмагничивания (управляемых выпрямителей) и системы управления.

Для схемы замещения установки составлена система нелинейных дифференциальных уравнений по второму закону Кирхгофа.

Для получения явных зависимостей индуктивностей от токов при расчетах была использована кусочно-линейная аппроксимация кривой намагничивания. После преобразований получена система уравнений, описывающая межсистемную связь на основе трехфазных фазоинвертирующих трансформаторов. Аналитическое решение системы затруднено, поэтому система была решена с помощью ЭВМ числовыми методами в среде MathCAD с использованием метода Эйлера.

На основании разработанной математической модели получены угловые характеристики передаваемой активной и потребляемой реактивной мощности установки. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности создания межсистемной связи на основе трехфазных фазоинвертирующих трансформаторов с высокими технико-экономическими показателями.

Разработанная математическая модель дает возможность исследования процессов в установившихся и переходных режимах. Возможность проведения исследований в переходных режимах, позволяет использовать модель для синтеза алгоритмов и структуры системы управления объектом.

#### Литература

1. **Реформирование** компании РАО ЕЭС России. <http://www.rao-ees.ru/ru/reforming/reason/show.cgi?suppositions.htm>
2. **Макаров А.А.** Мировая энергетика и Евразийское энергетическое пространство. – М.: «Атомэнергоиздат», 1998.
3. **А.С.** № 1417749 (СССР) Устройство для объединения энергосистем // Г.М. Павлов, В.М. Баранов, С.Г. Зайцев, А.В. Макаров, С.А. Казаров, Ю.А. Лысов.
4. **Патент** на полезную модель № 44891. Устройство для объединения трехфазных энергосистем на основе подмагничиваемых трансформаторов // А.В. Макаров, О.В. Таламанов.
5. **Макаров А.В.** Разработка и исследование системы управления межсистемной несинхронной связи на основе ферромагнитных элементов // Дис. ... канд. техн. наук. – Л.: ЛПИ, 1985.
6. **Макаров А.В., Комин В.Г., Таламанов О.В.** Оптимизационная модель управляемой межсистемной связи на основе фазоинвертирующих трансформаторов // Вестник ИГЭУ. – 2003. – №5. – С. 45-53.

## **Фазовые превращения в бесконтактном электрическом поле**

Электрическая энергия обычно реализуется в токовой полевой и смешанной формах. Первая всегда имеет джоулевы потери, вторая характеризуется ограниченностью применения.

Применению электромагнитных полей в технологических процессах и биологии посвящено множество публикаций и зачастую противоречивых, хотя перспективы весьма обнадеживают и подтверждаются соответствующими патентами. При принятии конкретных задач требуется выбор частоты поля, напряженности электрической и магнитной составляющих.

Нами предложено «упрощение задачи» путем применения статического поля ВН в жидких веществах, наиболее чувствительных к нему. В отличие от газообразных и твердых сред в них одновременно имеются токи и происходят поляризационные явления разного характера.

Жидкости сами по себе представляют сложные с точки зрения электрических свойств системы. Условно они делятся на полярные и неполярные, здесь исключаются мезофазы. В неполярных – пренебрежимо малое количество носителей заряда (ионов) и соответственно малая диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon \approx 2$ ) в полярных все наоборот: высокая степень диссоциации молекул ведет к высокой электропроводности ( $\epsilon > 2$ ).

Электрически заряженные микрообъекты (ионы, коллоиды) проявляют активность в ближайшем окружении, а также реагируют на сторонние воздействия через электрическую составляющую.

Наряду с деформационной и ориентационной поляризацией, происходящих практически мгновенно, происходит объемно-зарядовая поляризация (по Поливанову), носящая отчетливо выраженный релаксационный характер в пределах до единиц минут.

Как и в предыдущих работах, представленных нами ранее, электрическое поле задавалось парой электродов, причем один электрод находился под днищем диэлектрической ячейки с жидкостью, другой с воздушной прослойкой над жидкостью. Электрическое поле в жидкости измерялось системой стержневых электродов одинаковой формы и размеров. С электродов снималось значение разности потенциалов ( $\Delta u$ ) в течение нескольких минут. Установлен релаксационный характер  $\Delta u$  как при включении, так и при отключении поля.

Интересно, что поле в дистиллированной воде имеет место даже тогда, когда оба электрода, задающих поле, присоединялись к одной клемме источника ВН. Имеется асимметрия процесса в зависимости от знака питающей клеммы. Последнее подтверждает фундаментальное



представление физической химии об избирательной ориентации молекул граничного слоя (эффект Фумкина).

Большой интерес представляют фазовые превращения, стимулируемые полями ВН с формированием ион-молекулярных ассоциатов, изменяющих вязкость жидкости. Нами рассматривались коллоидно-дисперсные системы, такие как цементно-песчаные растворы и бетоны. При обработке твердеющего бетона электрическим полем напряженностью  $E=15\text{кВ}$  установлен ярко выраженный релаксационный характер изменения напряженности внутри бетонной смеси при включении поля. Значения разности потенциалов ( $\Delta\varphi$ ) снимаемой с электродов в течение 30 минут представлены в таблице.

Таблица

<b>t, мин</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b><math>\Delta\varphi</math>, В</b>	2.7	3.0	3.5	3.1	2.8	2.6	2.4	2.2	2.0	1.8	1.7	1.6
13	14	15	16	17	18	19	20	22	24	26	28	30
1.5	1.4	1.3	1.3	1.2	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9

В результате выше указанной электро-полевой обработки наблюдалось некоторое ускорение набора прочности бетоном. В связи с тем, что напряженность поля в теле твердеющего бетона сильно падало, за счет конструкции установки, величина ускорения и увеличение прочности имели небольшие значения ( $\approx 2\%$ ). При усовершенствовании установки и увеличении напряженности внешнего поля можно добиться быстрого набора прочности бетоном без применения химических добавок.

## СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1. ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ..... **ОШИБКА!**  
**ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.**

ПОДСЕКЦИЯ. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ПРОЦЕССАХ  
ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И В ЭНЕРГЕТИКЕ.....47

СЕКЦИЯ 2. ПРОБЛЕМЫ СВАРКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ ..... 103

**Ивановский государственный энергетический университет  
имени В.И.Ленина  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**КАФЕДРА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ  
И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЙ  
ПРОВОДИТ ПОДГОТОВКУ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ  
140605 – Электротехнологические установки и системы  
со специализацией Электросварочные установки и системы**

***Общие сведения о специальности***

**Электротехнология** – это область науки и техники, связанная с использованием электрической энергии в различных технологических процессах. В электротехнологических установках происходит превращение электрической энергии в другие виды с одновременным осуществлением технологических процессов.

Сфера электротехнологии постоянно расширяется и используется практически во всех отраслях промышленности и включает плавку, литьё, индукционный нагрев, получение и обработку полупроводниковых и редкоземельных материалов, термообработку продуктов в СВЧ-печах.

Особенно интенсивно развивается область электротехнологии, связанная с разработкой и эксплуатацией сварочного оборудования. Без внедрения новейших типов сварочного оборудования и современных технологий с их использованием, невозможно разработать новую технику, отвечающую современным техническим требованиям.

Объектами профессиональной деятельности инженера данной специальности являются электротехнологические и электросварочные установки широкого и специального назначения, роботизированные сварочные комплексы, как промышленных предприятий, так и предприятий и организаций электроэнергетики (электростанций, электрических сетей и систем).

**Будущий инженер получит знания** в области общих математических и естественнонаучных дисциплин, теоретической электротехники, электроники, электрических машин, электропривода, микропроцессорной техники, теории сварочных процессов и технологии сварки, методов и средств контроля качества сварки, проектирования, эксплуатации и ремонта сварочного оборудования.

**В соответствии с фундаментальной и специальной подготовкой** выпускник может выполнять проектно-конструкторскую, производственно-управленческую, экспериментально-исследовательскую, эксплуатационно-технологическую деятельность, организовать технологический процесс, будет иметь навык ремонта, наладки и эксплуатации сварочного оборудования различного назначения, выбирать технологические режимы сварки, моделировать сварочные процессы с использованием современной микропроцессорной техники и компьютерных технологий.

**Выпускник будет знать** методы и способы проведения работ по техническому обслуживанию, электротехническому оборудованию, систем внутривзаводского электроснабжения, электротехнологических и электро-сварочных установок различного назначения.

*Имея квалификацию инженера по специальности 140605, Вы можете приложить свои знания на предприятиях энергетики, нефтяной, газовой и химической промышленности, станкостроения, автомобилестроения, авиастроения, судостроения, приборостроения*

Кафедру возглавляет д.т.н., профессор Мартынов Владимир Александрович. На кафедре трудятся более 30 сотрудников, в том числе 14 преподавателей. Все преподаватели имеют научную степень, в том числе 3 доктора технических наук и 4 звание профессора.

На кафедре имеются учебные лаборатории по теоретическим основам электротехники, общей электротехнике, электрическим измерениям, электрическим машинам, электроприводу, источникам питания, электротехнологическим и сварочным установкам.

Кафедра имеет свой компьютерный класс для проведения работ по моделированию, методам расчёта электрических цепей, электромагнитных полей и спецкурсам.

*Реквизиты для контактов:*

**Декан ЭЭФ,**

**к.т.н., профессор Сорокин Александр Фёдорович,**

**тел.: (0932) 41-60-10**

**Заведующий кафедрой ТОЭЭ,**

**д.т.н., профессор Мартынов Владимир Александрович**

**тел.: (0932) 38 -57-90; E-mail: zav @ toe. ispu. ru**

**153000, Иваново, ул. Рабфаковская, 34**

**Формы обучения:**

*Дневная* (бюджетная и контрактная)

Срок обучения – 5 лет;

*Заочная* (по контракту)

Срок обучения – 6 лет;

*Получение второго высшего образования* (по контракту)

Срок обучения – 2,5-4 года.

**Приглашаем выпускников средних образовательных учреждений поступать на специальность**

**140605 – Электротехнологические установки и системы со специализацией Электросварочные установки и системы**

## **МАТЕРИАЛЫ**

Международной научно-технической конференции  
**«СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ  
ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ»**  
(XIII Бенардосовские чтения)

***18-20 октября***

Лицензия ИД № 05285 от 4 июля 2001 г.

Подписано в печать 28.09.2006. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Усл. печ. л. 14,01. Уч.-изд. л. 15,1. Тираж 170 экз. Заказ .

Ивановский государственный энергетический университет  
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.