

Министерство общего и профессионального образования
Уральский государственный технический университет

Ф.Н. Сарапулов

ВВЕДЕНИЕ В СПЕЦИАЛЬНОСТЬ
«ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И СИСТЕМЫ»

Научный редактор д-р техн. наук проф. В.В. Шипицын

Екатеринбург
1997

УДК 621.313.333,621.3.031

Автор: Ф.Н.Сарапулов

Введение в специальность "Электротехнологические установки и системы": Учебное пособие / Ф.Н.Сарапулов. Екатеринбург: УГТУ, 1997 . 81 с.

Даются краткое описание учебного плана и основных дисциплин специальности 18.05.00 "Электротехнологические установки и системы", а также историческая справка о кафедре "Электротехника и электротехнологические системы" Уральского государственного технического университета, готовящей специалистов по данной специальности. Приводятся классификация основных типов электротехнологических установок, описание их принципов действия и конструкций. Изложены математические основы специальности, особенности и направления научных исследований кафедры в данной области техники. Дано краткое описание ознакомительного учебно-лабораторного практикума по специальности, приведены некоторые простые задачи по расчету электротехнологических устройств.

Пособие предназначено для студентов всех видов обучения специальности 18.05.00 "Электротехнологические установки и системы". Оно может быть полезно студентам других электротехнологических специальностей, изучающим дисциплину "Основы электротехнологии".

Библиогр. 24 назв. Табл.3. Рис.55. Прил.2.

Рецензенты: кафедра общей электротехники Уральской государственной горно-геологической академии (зав. кафедрой проф. д-р техн. наук Г.С. Хронусов); проф. д-р техн. наук Н.В. Шулаков

ISBN 5-230-17212-6 (C) Уральский государственный технический университет,

1997

Предисловие

Предлагаемое учебное пособие построено в значительной степени нетипично для такого рода литературы. В нем нет ожидаемого захватывающего рекламного материала об уникальных электротехнологиях (связанных, например, с изготовлением полупроводниковой и оптоэлектронной техники), многочисленных цифр, поражающих воображение читателя значимостью и революционными достижениями технологий, нет философских и концептуальных определений технологии как формы человеческой деятельности и тому подобных сведений.

Это сделано сознательно и с единственной целью - на ограниченном количестве страниц дать первое, возможно, упрощенное, но максимально насыщенное представление о специальности с точки зрения ОБЪЕКТОВ изучения, ВЗАИМОСВЯЗЕЙ основных ДИСЦИПЛИН учебного плана, ФОРМ учебной работы, места выпускающей КАФЕДРЫ в вузе и в структуре НАУЧНЫХ направлений электротехники. На наш взгляд, это тем более важно, что в безбрежном море литературы с самыми подробными и глубокими сведениями о различных технологиях и технологических установках очень мало публикаций, которые могли бы играть роль краткого ПУТЕВОДИТЕЛЯ в данной области техники и образования. В этой связи вполне естественно, что пособие содержит большое количество материалов, заимствованных из других литературных источников.

Большую помочь автору в комплектовании и оформлении материалов пособия оказали инженеры кафедры ЭЭТС УГТУ Л.С. Гробова и Т.Н. Пегушина.

ВВЕДЕНИЕ

Специальность 18.05.00 "Электротехнологические установки и системы" (0170) отличается от других электротехнических специальностей чрезвычайно широким кругом рассматриваемых устройств, их конструкций, применений и режимов работы. Это объясняется тем фактом, что электротехнологии применяются в самых различных областях практической деятельности человека, на их нужды расходуется более 30% потребляемой промышленностью электроэнергии.

Электротехнологические установки (ЭТУ) используют непосредственное воздействие электромагнитного поля на рабочую среду. При этом электрическая энергия преобразуется в другие виды энергии, в частности тепловую или механическую, используемые для нагрева, плавления, перемещения, деформации, разделения или смешивания материалов. Особенностью такого преобразователя, который можно назвать **электротехнологическим преобразователем энергии**, является то, что его составной частью является сама рабочая среда в твердом, жидком, газообразном или плазменном состояниях. Технологические параметры обработки этой среды могут быть легко изменены путем регулирования электрических параметров питания установки.

За время обучения по данной специальности студент осваивает теоретические и практические разделы общего и специального курсов "Электротехнологические установки и системы", выполняя лабораторный практикум, курсовые проекты и работы, связанные с различными типами ЭТУС.

Теоретические основы электротехники дают ему инструмент для анализа электромагнитных процессов в ЭТУ. Они служат базой для **математического моделирования** ЭТУС с помощью средств вычислительной техники.

Выполнение установками заданных технологических операций обеспечивается выбором необходимого **электрооборудования** ЭТУС, в которое входят различные **электромеханические системы, электрические машины и аппараты**, а также систем **электроснабжения**, в том числе электромагнитных, электромеханических и полупроводниковых **источников питания**.

Специалист-электротехнолог в своей практике сталкивается с **эксплуатацией** сложных автоматизированных ЭТУ, созданных на основе современных средств **электроники и микропроцессорной техники**, соответствующих методов и положений **теории автоуправления**.

Для освоения курса "Введение в специальность" желательна углубленная довузовская подготовка студента в области **электродинамики**, например, в рамках классов углубленного изучения электротехники и основ вычислительной техники при электротехническом факультете Уральского государственного технического университета.

Краткое содержание специальных дисциплин, предусмотренных учебным планом, приведено в разделе 2. В разделе 3 дается обзор основных типов и схем ЭТУС с рекомендациями по использованию дополнительной литературы и контрольными вопросами. Раздел 4 дает студенту первое представление о сути математических основ специальности. В разделе 5 излагаются краткие сведения о специальных ЭТУ и формах участия студентов в творческом процессе их разработки и исследований. В разделе 6 представлено основное содержание лабораторного и учебного практикумов по дисциплине.

При работе над данным методическим пособием следует иметь в виду, что

- не все** так просто и однозначно в реальных ЭТУС, как изложено ниже;
- ниже изложено далеко **не все**, что относится к данной области науки и техники;
- изложенного **все-таки** достаточно для первого знакомства со специальностью 18.05.00 "Электротехнологические установки и системы".

I. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КАФЕДРЫ "ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ" (ЭЭТС)¹

В состав Уральского государственного технического университета входят филиал в Нижнем Тагиле и 12 факультетов: металлургический, химико-технологический, технологии силикатов, механико-машиностроительный, теплоэнергетический, строительный, физико-технический, радиотехнический, экономики и управления, гуманитарного образования, физиологии питания, а также электротехнический.

На первых шести факультетах кафедра ЭЭТС ведет занятия по электротехнике, электронике и электрооборудованию. С первыми четырьмя из них кафедра тесно связано своей специальностью ЭТУС, поскольку они представляют собой в значительной степени технологические факультеты с большим удельным весом электротехнологий в своих научных и учебных специализациях. Для обучения студентов специальности 18.05.00 в определенной степени используются лабораторная база и научно-педагогические кадры этих факультетов.

Электротехнический факультет выделился из энергетического в 1964 году и включает в себя 7 кафедр: автоматизированных электрических систем (АЭС), техники высоких напряжений (ТВН), электропривода и автоматизации

¹ Материал подготовлен совместно с А.В. Карочкиным

промышленных установок (ЭАПУ), электрических машин (ЭМ), безопасности жизнедеятельности (БЖД), электротехники и электротехнологических систем - ЭЭТС (бывшая кафедра общей электротехники), а также теоретической электротехники (ТЭ). Первые 6 кафедр являются выпускающими. Они готовят инженеров по 9 специальностям, в том числе восьми электротехническим - электрическим станциям, электрическим системам, автоуправлению электрических систем (кафедра АЭС), электроприводу (ЭАПУ), электромеханике (ЭМ), электрическим и электронным аппаратам, а также технике и электрофизике высоких напряжений (ТВН), электротехнологическим установкам и системам (ЭЭТС). Кафедры факультета тесно связаны в своей учебной и научной работе, например, кафедра ТЭ обеспечивает подготовку студентов-электриков по базовой дисциплине - теоретическим основам электротехники, кафедры ТВН, ЭМ, ЭАПУ - соответственно по электрическим аппаратам, электрическим машинам, электрооборудованию и электроприводу, теории автоуправления.

Основным учебным планом предусматривается подготовка инженеров-электротехнологов по специальности 18.05.00 в течение 4 лет и 10 месяцев. Модификация этого плана, а также параллельный план предполагают двухступенчатую форму обучения, согласно которой на первой ступени осуществляется подготовка бакалавров в течение 3 лет 10 месяцев, а на второй - магистров и инженеров с углубленной подготовкой в течение пяти или пяти и половины лет. Бакалавр характеризуется в основном общетехнической подготовкой по направлениям "электроэнергетика" или "электротехника, электромеханика, электротехнологии". Учебу на второй ступени продолжает лишь часть студентов. Они более глубоко специализируются в выбранной профессии для работы на производстве (инженер) или для научно-исследовательской деятельности (магистр). Магистр или инженер могут также продолжить свое обучение в аспирантуре, работая по какому-либо научному направлению над подготовкой диссертации.

На факультете действует аспирантура по указанным выше специальностям, работают специализированные советы по защитам кандидатских и докторских диссертаций.

Впервые электротехнические дисциплины в Екатеринбурге начали преподаваться в 1921 г. в Уральском университете. Организаторами электротехнической подготовки были главный инженер горно-металлургического треста И.Н. Силонов, профессор И.В. Стецулла и препаратор Н.С. Сиунов (впоследствии профессор, доктор технических наук, ректор Уральского политехнического института). Электроснабжение скромных лабораторий осуществлялось постоянным током (110 В) от городской сети. Из восьми лабораторных стендов четыре были по электрическим машинам, два - по измерительным приборам (амперметр и вольтметр), один - по зарядке аккумуляторов и один - по измере-

нию силы света угольной лампы накаливания. Переменный ток (220/127 В) появился в городе в 1924 году.

В 1930 г. Уральский университет разделился на ряд самостоятельных отраслевых вузов. Лаборатории и преподаватели электротехники оказались в составе машиностроительного института, а в дальнейшем перешли в энергетический институт. Они обслуживали все специальности энергетического института и других вузов.

Кафедра общей электротехники была создана в 1934 году после объединения ряда отраслевых институтов в Уральский индустриальный институт. Заведующим ее был назначен инженер К.А. Амосов. Коллектив кафедры состоял из трех штатных работников. В 1935 году на кафедру был направлен доцент московского автомеханического института (МАМИ) Л.В. Бурде. При нем была создана лаборатория светотехники. Развернулась научная работа по светотехнике, были выполнены проекты освещения некоторых цехов предприятий, актового зала и фойе УПИ.

С 1938 г. кафедрой заведует Л.В. Бурде. Ее штат пополнили Я.И. Дробинин, В.Н. Шилов и др. В годы войны кафедра проводила исследования по оборонной тематике, оказывала практическую помощь промышленности.

В послевоенные годы на кафедру пришли выпускники энергофака Р.Н. Милайкина, В.П. Пенязькова, В.С. Мухлынина и др.

С 1953 по 1971 г. кафедрой заведовал доцент Г.П. Кропачев. Появилось новое научное направление - электромагнитное перемешивание расплавов черных металлов, защищено 4 кандидатских диссертации. К началу 1971 года на кафедре работало 10 преподавателей, из них 3 доцента.

В 1971 г. заведующим кафедрой был избран профессор М.Г. Резин. Увеличился объем научной работы по электромагнитному воздействию на жидкие металлы, начались исследования в области линейных асинхронных двигателей. По результатам исследований защищено 8 кандидатских диссертаций.

В это время была полностью переоборудована учебная лаборатория с фронтальным методом проведения занятий. Были созданы унифицированные стенды по I части электротехники, электронике, а также цифровым и импульсным устройствам электронной техники.

К началу 1985 г. на кафедре работало 17 преподавателей, из них 1 профессор, 6 доцентов.

С 1985 г. кафедрой заведует автор данного пособия. Научная тематика расширилась. Начали проводиться исследования по созданию специальных электрических машин и электромагнитных устройств для транспортных и электротехнологических установок. По результатам исследований защищено с 1985 г. II кандидатских и одна докторская диссертация (Г.К. Смолин).

Научные связи кафедры: ВНИИпроектасбест; ОКБ ЛЭД (г.Киев); Каменск-Уральский завод ОЦМ; ВОСТИО (г.Екатеринбург); НПО гидротрубопровод (г.Москва); ИГД им.Скочинского (г.Москва); Кольчугинский завод ОЦМ; Пышминский завод химреактивов; Ревдинский завод ОЦМ; Донецкое

НПО "Взрывозащищенное электрооборудование". На кафедре создается дисплейный класс "Корвет", приобретаются ЭВМ ДВК-ЗМ, IBM, оборудуется различными установками исследовательская лаборатория, открываются классы углубленного изучения электротехники для школьников под руководством старшего преподавателя А.А. Кленова. С 1994 г. кафедра переименована в кафедру "Электротехника и электротехнологические системы", начата подготовка инженеров по специальности 180500 "Электротехнологические установки и системы" (ЭТУС). К началу 1994 г. на кафедре работали 17 преподавателей, из них 2 профессора и 13 доцентов, один член Академии электротехнических наук РФ.

2. ДИСЦИПЛИНЫ, ФОРМИРУЮЩИЕ СПЕЦИАЛЬНОСТЬ "ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И СИСТЕМЫ" (ЭТУС)

В таблице показано распределение объема работы в часах по основным блокам дисциплин, формирующих специальность 18.05.00 "Электротехнологические установки и системы".

Дисциплины в таблице поделены на 6 основных блоков:

- теоретических основ и математического моделирования электротехнологических систем;
- автоматического управления электротехнологическими системами и процессами;
- полупроводниковых устройств управляющей и силовой электроники;
- электроснабжения и электрооборудования электротехнологических установок и систем и их элементов, эксплуатации и ремонта;
- общих и специальных вопросов в ЭТУС (общий и специальные курсы ЭТУС);
- экономической подготовки.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИН

1. Информатика 1 (140 час.)

Сведения об ЭВМ. Современная технология программирования. Внешние спецификации. Алгоритмы. Язык программирования. Тестирование и отладка программы. Программирование с использованием процедур. Персональные компьютеры.

Анализ линейных и нелинейных алгебраических моделей. Моделирование функциональных зависимостей. Исследование математических моделей, описываемых обыкновенными дифференциальными уравнениями. Исследование математических моделей методами оптимизации.

2. Теоретические основы электротехники, теория электромагнитного поля (357 час.)

Цепи постоянного тока. Однофазные и трехфазные цепи. Четырехполюсники. Цепи несинусоидального тока. Классический и операторный методы расчета переходных процессов в линейных цепях. Нелинейные электрические и магнитные цепи. Переходные процессы в нелинейных цепях. Цепи с распределенными параметрами. Электрическое поле. Магнитное поле.

3. Теории электронагрева и электроразряда (135 час.)

Общие сведения об электротермических установках. Энергетический баланс, источники тепловой энергии в ЭТУ. Элементы термодинамики. Теплообмен. Теплопроводность. Теплоотдача. Лучистый теплообмен. Свойства материалов, используемых в ЭТУ. Сбережение тепловой энергии в ЭТУ.

4. Информатика 2, моделирование ЭТУ, методы расчета электрических и магнитных полей (188+90+127 час.)

Численные методы расчета цепей одномерных и двумерных электрических и тепловых полей. Методы расчета гидродинамических явлений ЭТУС. Стандартные пакеты программ для компьютерного исследования полей и цепей в ЭТУС. Методы схем замещения. Учет нелинейностей. Методы оптимизации при исследовании ЭТУС. Исследование динамики электротехнических систем.

5. Теория автоматического управления (105 час.)

Принципы построения САУ. Математическое описание линейных САУ. Устойчивость линейных САУ. Анализ качества процессов в линейных САУ. Синтез линейных систем. Исследование линейных САУ в пространстве состояний. Импульсные САУ. Анализ качества процессов в нелинейных САУ.

6. Системы автоуправления электротехнологическими объектами (181 час.)

Принципы и задачи автоматизации ЭТУ. Датчики систем автоматики ЭТУ. Исполнительные устройства систем автоматики ЭТУ. Элементы САУ ЭТУ на основе микропроцессорной техники. Инженерные методы проектирования и наладки устройств автоуправления ЭТУ. Автоуправление электрическими печами сопротивления, дуговыми ЭТУ. Теория и расчет динамических систем с дугой. Автоуправление дуговыми сталеплавильными и рудовосстановительными печами, переплавными электропечами, индукционными ЭТУ, плазменными, лучевыми ЭТУ. Автоуправление установками электродуговой сварки и наплавки металлов. Особенности автоуправления другими ЭТУ.

7. Информационная и силовая электроника (172 час.)

Параметры и свойства полупроводниковых приборов. Усилители переменного и постоянного токов. Операционный усилитель. Выпрямители. Реверсивные преобразователи постоянного тока. Непосредственный преобразователь частоты. Регуляторы переменного напряжения. Автономные инверторы. Системы управления вентильными преобразователями.

8. Компьютерная и микропроцессорная техника (120 час.)

Импульсная техника. Цифровые электронные устройства. Архитектура микроЭВМ. Аппаратные и программные устройства микроЭВМ. Микропроцессорные системы управления ЭТУ. использование микропроцессорной техники в режиме контроллера.

9. Источники питания ЭТУ (188 час.)

Специальные электромашинные источники питания (трансформаторы для питания полупроводниковых преобразователей, для питания дуговых установок, электромашинные генераторы сварочные, высокочастотные, ударные). Специальные полупроводниковые источники питания для ЭТУС.

10. Электрические машины (257 час.)

Общие вопросы электрических машин. Машины постоянного тока (МПТ). Обмотки якоря. Характеристики магнитной цепи. Реакция якоря и коммутация в МПТ. Характеристики МПТ. Специальные МПТ. Конструкции трансформаторов, работа при холостом ходе и нагрузке, параллельная работа. Физические процессы в асинхронной машине (АМ). Пусковые и рабочие свойства АМ. Переходные процессы в АМ. Специальные АМ. Синхронные генераторы и двигатели.

11. Электрические и электронные аппараты (153 час.)

Общие понятия об электрических аппаратах. Контакторы и пускатели. Устройство и выбор. Электромагнитные и герконовые реле. Предохранители и автоматы. высоковольтные выключатели, разъединители, отключатели и короткозамыкатели. Измерительные трансформаторы тока и напряжения переменного и постоянного тока. Реакторы.

12. Электрический привод (150 час.)

Общие вопросы электрооборудования механизмов. Характеристики электроприводов. регулирование скорости приводов. Переходные процессы в при-

водах. Выбор мощности двигателей приводов. Релейно-контакторное управление приводами. Замкнутые системы приводов. Типовые приводы.

13. Механизмы и приводы ЭТУ (134 час.)

Электромеханические системы электротермических установок: печей со-противления, дуговых, индукционных; установок электродуговой сварки и наплавки металлов. Специальные электромеханические системы. Гидроэлектропривод.

14. Электроснабжение и электрооборудование ЭТУ (176 час.)

Особенности тепло- и газоснабжения предприятий с ЭТУС. Определение электрических нагрузок. распределение электрической энергии на высоком напряжении. Электрооборудование подстанций промышленных предприятий. распределение электрической энергии на низком напряжении. Электрооборудование ЭТУ. Коэффициент мощности предприятий и установок. Вопросы качества энергии. особенности электроснабжения типовых ЭТУ.

15. Энергоаудит и энергосбережение (55 час.)

Проблема эффективного использования энергетических и топливных ресурсов. Концепция энергосбережения на промышленных предприятиях. Энергоаудит. Тарифообразование на электрическую и тепловую энергию. Организационные аспекты энергосбережения в электротехнологии. Энергосбережение при эксплуатации и техническом обслуживании энергетического и технологического оборудования. Энергосбережение при модернизации. Новая электросберегающая техника в электротехнологии. Экономическая эффективность энергосбережения в электротехнологии.

16. Эксплуатация и ремонт ЭТУ (100 час.)

Особенности поставки, монтажа и наладки электрооборудования ЭТУ. Организация эксплуатации и ремонта электрооборудования. Требования к обслуживающему персоналу. основная эксплуатационная документация. Организация дежурств и ремонта. рациональное использование электроэнергии. Показатели эффективности использования электроэнергии. Электробаланс предприятия. Энергетические характеристики. Пути экономии электроэнергии. экономия электроэнергии в конкретных ЭТУ и электротехнических установках. Нормирование и стоимость электроэнергии. Вопросы надежности ЭТУ.

17. Электротехнологические установки и системы (200 час.)

Часть 1. Теория и применение электрических разрядов

Электрические разряды в газах, воздухе, вакууме. Вольт-амперная характеристика разрядов в воздухе и газах. Разряды в равномерном поле, закон Па-

шена. Разряды в неоднородном поле. разряды в атмосфере. Искровые разряды, их применение в электротехнологиях. Коронный разряд. Электродуговой разряд и плазма. Характеристики и свойства дуги на постоянном и переменном напряжении. Дуговой разряд в электротехнологических процессах.

Часть 2. Электротехнологические установки

Классификация ЭТУ. Конструкции и расчет печей сопротивления. Установки индукционного и диэлектрического нагрева. Индукционные тигельные и канальные печи. дуговые сталеплавильные печи. Рудовосстановительные, вакуумные дугостаторные, электрошлаковые печи. Электродуговая сварка и наплавка металлов. Плазменные, электронно-лучевые и лазерные установки. Установки электроэррозионной, электрохимической, ультразвуковой обработки, магнитоимпульсные установки.

18. Теория электромагнитного поля (в приложениях) (150 час.)

Аналитические методы расчета электромагнитных полей в ЭТУ. Определение параметров ЭТУ, их элементов и схем питания. математические модели ЭТУ, сочетающие положения теории цепей и теории поля. Двумерная и одномерная модели индукционной машины (ИМ). Краевые эффекты в линейной ИМ. Численные методы решения уравнения Максвелла. Описание гидродинамических и тепломассообменных процессов в ЭТУ. Основы магнитной гидродинамики. Теория подобия и физическое моделирование. Электродинамика электродных (резистивных, дуговых, смешанного действия) установок. основы теории электрических цепей электродных установок постоянного и переменного тока. Электрические и регулировочные характеристики электрических печей переменного тока.

19. Специальные ЭТУ (160 час.)

Магнитогидродинамические генераторы и насосы. Индукционные канальные печи. Установки электромагнитного перемешивания металла. Линейные электродвигатели. Установки обогащения минерального сырья и переработки отходов. Магнитоимпульсные установки. Установки индукционного и диэлектрического нагрева. Установки комплексного электротермомеханического действия.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УЧЕБНОЙ НАГРУЗКИ ПО СПЕЦДИСЦИПЛИНАМ СПЕЦИАЛЬНОСТИ 180500 “ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И СИСТЕМЫ”

3. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ОСНОВНЫХ ТИПОВ ЭТУ

ЭТУ условно группируют по результирующему действию электрического и магнитного полей [2]:

- установки, основанные на тепловом действии тока (нагревательные приборы, установки электрошлакового переплава металлов, контактной сварки, индукционного и диэлектрического нагрева, нагрева и сварки электрической дугой, электроэрозионной обработки разрядом в жидкости, электронно-лучевые и лазерные);
- установки, основанные на электрохимическом действии тока (электролизные ванны, установки для нанесения защитных и декоративных покрытий, электрохимикомеханической обработки изделий в электролитах);
- электромеханические установки, в которых протекание импульсного тока вызывает возникновение механических усилий в обрабатываемом материале, а также установки ультразвукового воздействия, осуществляющие технологический процесс путем создания в веществе механических колебаний высокой частоты;
- электроинергетические установки, принцип действия которых основан на преобразовании энергии электрического поля в энергию движущихся частиц (электрофильтры, установки по разделению сыпучих материалов и эмульсий, очистке сточных вод, электроокраске).

Краткое описание электротехнологических установок, приведенное далее, составлено преимущественно на базе [2, 5].

3.1. Принцип действия и устройство ЭТУ

3.1.1. Установки, основанные на тепловом действии тока

В [2] предложена следующая классификация способов преобразования электрической энергии в тепловую.

Нагрев сопротивлением за счет выделения тепла в проводящем материале при протекании по нему тока I . Количество тепла определяется законом Джоуля-Ленца ($P = I^2 f t$ в единицу времени на сопротивлении R). В установках прямого действия тепло выделяется в самом изделии,ключенном в электрическую цепь. В установках косвенного действия тепло передается нагреваемому объекту от специальных нагревательных элементов.

Индукционный нагрев с помощью вихревых токов, наведенных в нагреваемом объекте переменным электромагнитным полем, которое создается специальным индуктором.

Диэлектрический нагрев непроводящих материалов и полупроводников за счет сквозных токов проводимости и смещения при поляризации их в высокочастотном электрическом поле.

Дуговой нагрев, при котором материал нагревается за счет теплоты, поступающей от электрической дуги и электродов.

Электронно- и ионно-лучевой нагрев за счет выделения теплоты при столкновении быстров движущихся электронов или ионов в электрическом поле с поверхностью нагреваемого объекта.

Плазменный нагрев при использовании низкотемпературной плазмы, получающейся при пропускании газа через дуговой разряд или высокочастотное электромагнитное или электрическое поле.

Лазерный нагрев поверхности объектов при поглощении ими высококонцентрированных потоков световой энергии, полученных в лазерах - оптических квантовых генераторах.

Ниже приводится краткое описание некоторых типов электротермических установок.

Схема прямого **нагрева сопротивлением** показана на рис. 3.1, в ней изделие 2 нагревается протекающим по нему током.

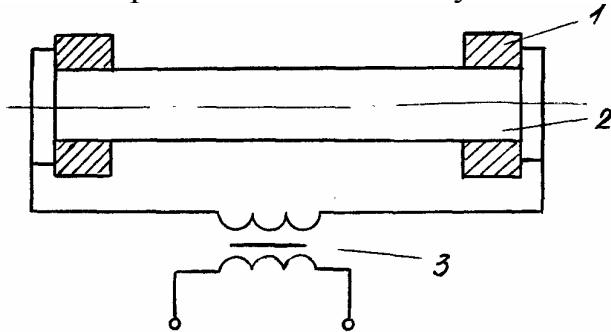


Рис.3.1. Схема прямого нагрева:

1- водоохлаждаемые зажимы; 2 - нагреваемое изделие; 3 - печной трансформатор

Нагревательные элементы установок косвенного действия подразделяют на три группы [2] :

низкотемпературные - нагрев до 500 - 700 К и преимущественно конвективный способ теплообмена;

среднетемпературные - нагрев до 900 - 1300 К с теплообменом конвекцией, теплопроводностью и излучением;

высокотемпературные - нагрев до 2500 - 3300 К с теплообменом преимущественно излучением.

На рис.3.2 показан трубчатый электронагреватель - ТЭН, представляющий собой металлическую трубку 1, заполненную теплопроводным электроизоляционным материалом 2, в котором находится электронагревательная спираль 3. В качестве наполнителя применяется плавленный периклаз. Мощность ТЭНов составляет от 100 Вт до 15 кВт, рабочее напряжение 36-380 В, рабочая температура 400-1000 К.

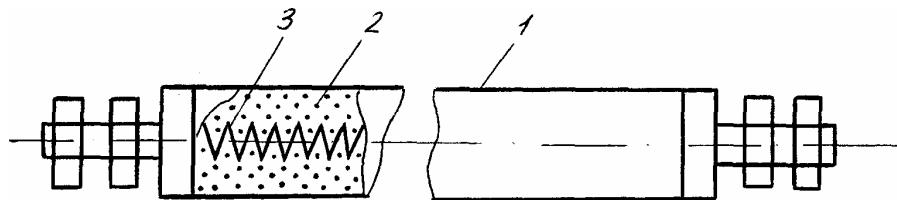


Рис.3.2. Схема трубчатого электронагревателя (ТЭНа):
1 - металлическая трубка; 2 - теплопроводный электроизоляционный материал; 3 - электронагревательная спираль

На рис.3.3 показаны электропечи сопротивления периодического действия с различными способами загрузки (выгрузки) нагреваемой печи (садки) в камеру - снизу (б), горизонтально через дверцу (в), сверху под крышку (г), а также на стенд I с последующей установкой сверху жаро-прочного 3 и основного (металлического с огнеупорной футеровкой) 2 колпаков камеры печи (а).

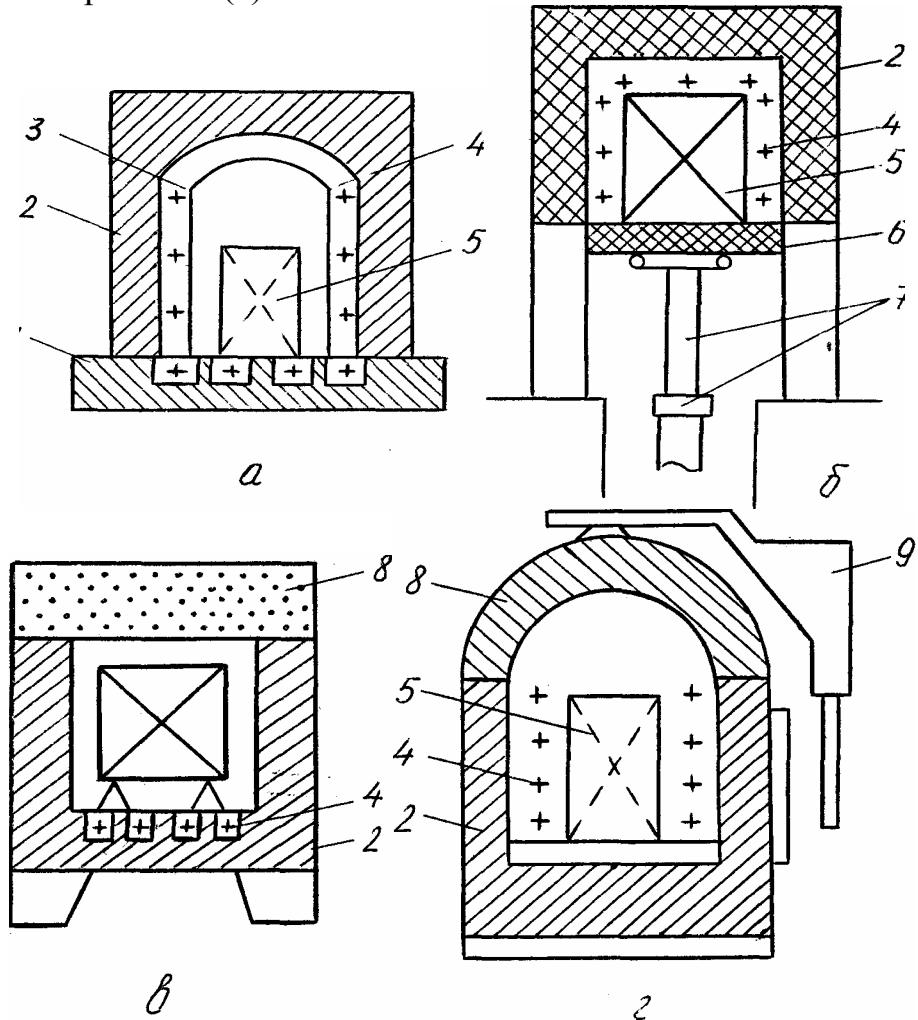


Рис.3.3. Печи сопротивления периодического действия:
а - колпаковая; б - элеваторная; в - камерная; г - шахтная;
I - стенд; 2 - камера печи; 3 - жаропрочный муфель; 4 - нагревательные элементы;
5 - нагреваемое изделие (садка); 6 - опускающийся под; 7 - подъемное устройство; 8 - свод; 9 - механизм подъема свода

На рис. 3.4 показана печь непрерывного действия с перемещением садки на горизонтальном конвейере.

Широко применяются электропечи сопротивления для плавки металлов (олова, свинца, цинка, других металлов и сплавов с температурой плавления 600-800) К; выделяют тигельные печи (тигель с металлом внутри корпуса с нагревателями) с коэффициентом полезного действия - 50-55% и камерные (ванные) с КПД 60-65%. Последние используются для переплавки алюминия на слитки.

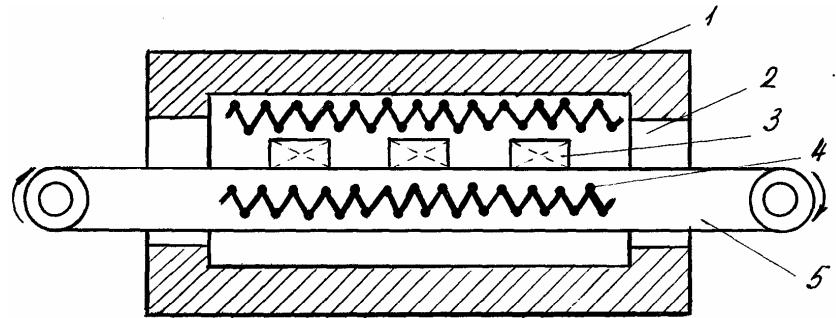


Рис. 3.4. Схема конвейерной электропечи:

- 1 - теплоизолированный корпус; 2 - загрузочное окно; 3 - нагреваемое изделие; 4 - нагревательные элементы; 5 - конвейер

К установкам прямого нагрева относятся электрические котлы для подогрева воды, а также жидкостные электропечи для нагрева металлических предметов. Тепло в них выделяется при пропускании (с помощью электродов) тока через воду или расплав соли (стекломассы).

Для производства слитков из высококачественных сталей применяют установки **электрошлакового переплава** (рис.3.5), в основу

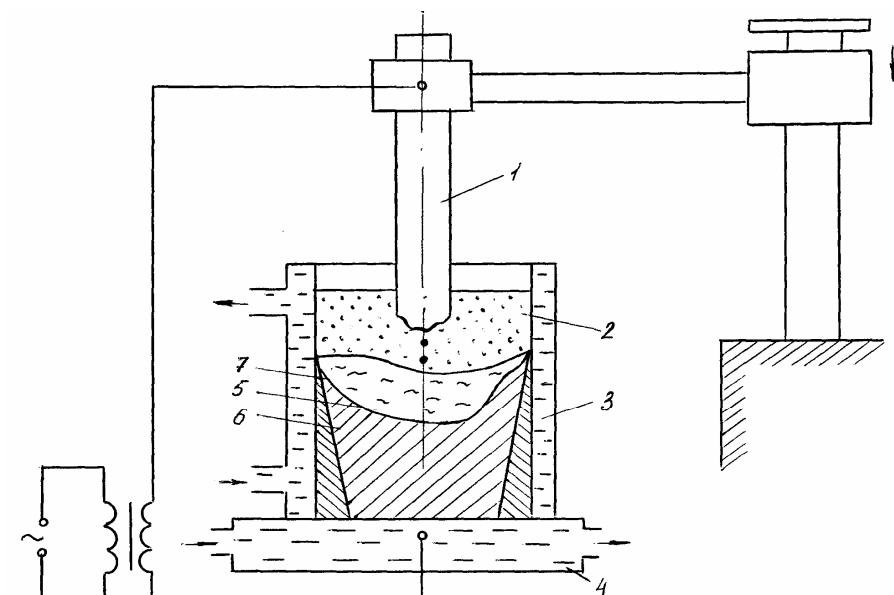


Рис. 3.5. Схема установки электрошлакового переплава:

- 1 - переплавляемый металл; 2 - электропроводный шлак;
3 - во до охлаждаемый кристаллизатор; 4 - водоохлаждаемый поддон; 5 - ванна расплавленного металла; 6 - слиток; 7 - слой гарнисажа

которых положено явление разогрева расплава соединений шлака до 2000-2300 К проходящим по нему током [2]. Электрический ток протекает между электродом и поддоном через шлак, который имеет большое электрическое сопротивление и разогревается. Находящийся в расплаве шлака торец электрода расплавляется, и капли металла стекают с электрода, проходят через шлак, где дополнительно нагреваются, очищаются и собираются на дне охлаждаемого кристаллизатора в виде слитка. По мере оплавления электрод подается вниз. На таком же принципе основано действие установок электрошлаковой сварки, которые используются для соединения металлов большой толщины.

В установках **контактной сварки** (рис.3.6) нагревание металла

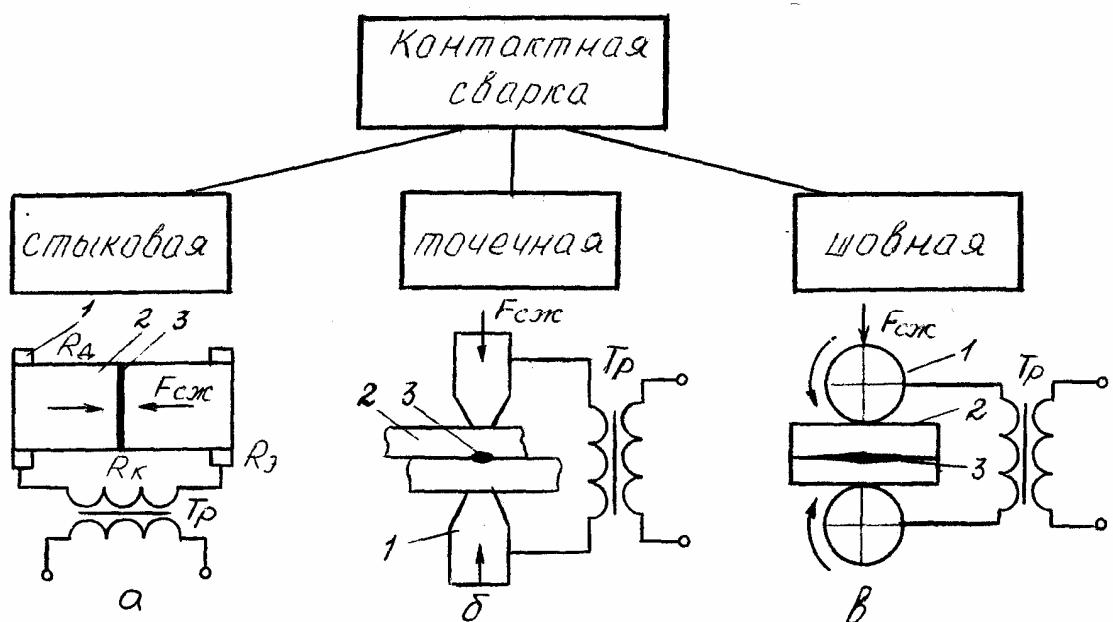


Рис. 3.6. Виды контактной сварки:

а -стыковая, б - точечная, в - шовная; 1 - водоохлаждаемые электроды; 2 - свариваемые детали; 3 - место сварки;

T_p - сварочный трансформатор; R_k - контактное сопротивление между деталями; R_d - сопротивление детали от электрода до места сварки; $R_\varnothing \sim$ сопротивление электрода

происходит в месте контакта свариваемых деталей по плоскости их соприкосновения. В данном месте сопротивление R_k намного превышает R_d и R_\varnothing , следовательно, и выделяется наибольшая мощность I^2R_k . Из-за неровностей на поверхностях свариваемые детали при их сжатии (усилие $F_{сж}$ показано стрелкой) соприкасаются лишь в отдельных точках, через которые проходит ток I . В них возникает большая плотность тока, что вызывает сильный локальный нагрев металла. Когда металл нагреется до пластического или оплавленного состояния, при сжатии деталей произойдет их сваривание, после чего ток отключается. Процесс сварки происходит за короткий промежуток времени (единицы секунд).

Принцип действия установок **индукционного нагрева** основан на поглощении проводящей средой энергии переменного электромагнитного

поля. При этом индуктор, являющийся первичной обмоткой трансформатора, создает переменное магнитное поле, которое индуцирует токи в нагреваемом теле, являющемуся короткозамкнутой вторичной обмоткой трансформатора. Глубина Δ проникновения тока вглубь нагреваемого тела определяется частотой питающего напряжения $\omega = 2\pi f$, удельным электросопротивлением ρ и магнитной проницаемостью μ материала $\Delta = \sqrt{2 \cdot \rho / \omega \cdot \mu}$. Индукционный способ нагрева применяется при следующих технологических процессах: плавка, поверхностная закалка, нагрев заготовок, сварка и пайка, получение монокристаллов из тугоплавких оксидов, получение плазмы. **Индукционные плавильные печи** подразделяются на канальные и тигельные.

На рис. 3.7, а показана индукционная **тигельная** печь. Магнитный поток, созданный катушкой индуктора 1, замыкается через металлическую загрузку (шихту) 2 и индуцирует в ней ток, который расплавляет металл. Токи в металле взаимодействуют с током в индукторе, создавая электродинамические силы, которые перемешивают расплав. На рис. 3.7, б приведены схема питания и элементы оборудования печи, более подробное обсуждение которых изложено в 3.2.

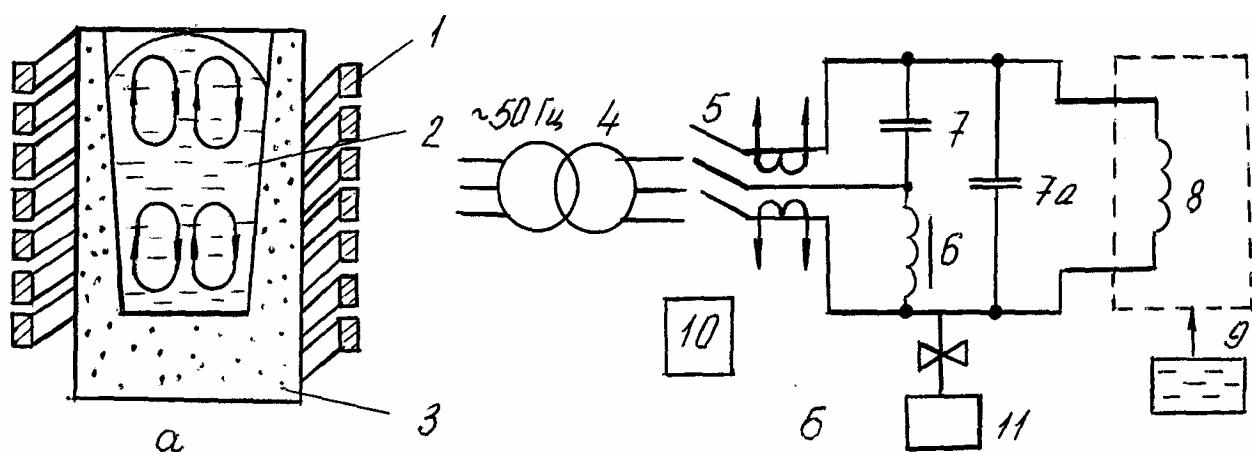


Рис.3.7. Индукционная тигельная печь без сердечника:

а ~ устройство индукционной тигельной печи без сердечника; б - принципиальная электрическая схема включения индукционной печи промышленной частоты; 1 - индуктор; 2 - расплавленный металл; 3 - тигель; 4 - трансформатор; 5 - контактор; 6 - дроссель; 7 - конденсаторная батарея; 7a - конденсаторная батарея; 8 - однофазная печь; 9 - электропривод механизма наклона печи; 10 ~ шкаф управления; II - охладительная установка

Схема индукционной **канальной** печи приведена на рис.3.8. Катушка индуктора с числом витков W_1 является первичной обмоткой трансформатора, а канал с расплавленным металлом - коротко замкнутым витком его вторичной обмотки $W_2= I$. Основной поток Φ_1 проходит по ма-

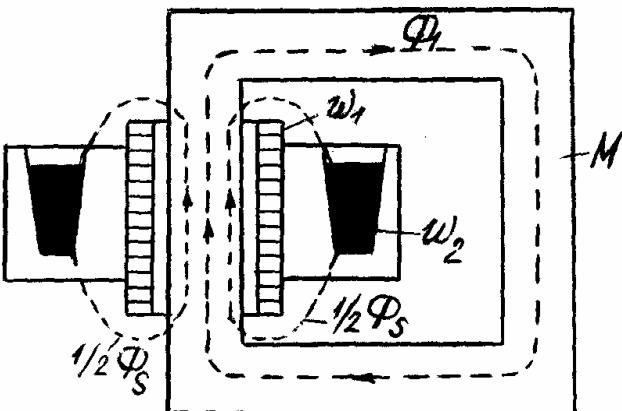


Рис.3.8. Схема индукционной канальной печи

гнитопроводу M , охватывая канал с металлом. При его изменении в короткозамкнутом витке-канале наводится ток и выделяется тепло. Особенностью такого трансформатора является повышенный поток рассеяния Φ_s , лишь частично охватывающий канал. В ряде случаев он может быть полезно использован для перемешивания или вращения металла в канале, что предотвращает "зарастание" канала [14].

Находят применение также **электромиксеры** и **копильники** жидкого металла - устройства для подогрева и выравнивания его температуры перед разливкой, когда объем отливающей детали больше емкости плавильной печи. В них также перемешиваются добавки и примеси. Работают они всегда в комплексе с плавильными печами.

Индукционные нагревательные установки делятся на установки **сквозного** и **поверхностного** нагрева. Первые применяются для нагрева заготовок под последующую пластическую деформацию (ковку, штамповку, прессовку, прокатку). Выбор частоты производится таким образом, чтобы глубина проникновения тока в металл была лишь в 2-3 раза меньше его толщины и вся заготовка хорошо прогревалась. На рис. 3.9 приведены схемы установок **непрерывного** действия, в которых одновременно находится несколько заготовок. Индуктор создает продольное (а) либо попечерчное (б) магнитное поле. **Поверхностный** нагрев сопровождается проявлением поверхности эффекта, когда глубина проникновения тока в металл невелика и интенсивно прогревается лишь поверхностный слой (например, закалка - нагрев поверхности с последующим быстрым охлаждением). Изучение особенностей индукционного нагрева вынесено в учебно-лабораторный практикум (раздел 6).

Для нагрева материалов с плохой электропроводностью (диэлектриков) применяется **высокочастотный диэлектрический нагрев**. При этом диэлектрик помещается между металлическими обкладками, к которым прикладывается переменное напряжение. Протекающие по диэлектрику токи смещения и малые токи проводимости нагревают материал. В зависимости от частоты f напряжения различают установки средневолнового

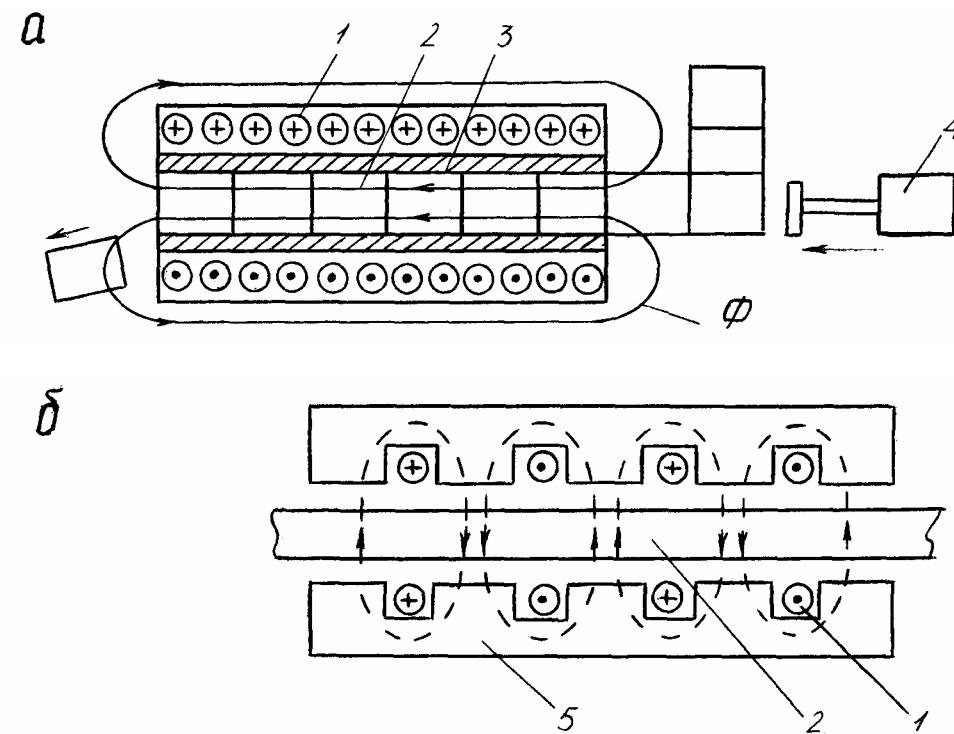


Рис. 3.9. Схемы индукционных нагревательных установок непрерывного действия:
а - в продольном, б - в поперечном магнитных полях;

1 - индуктор; 2 - нагреваемое изделие; 3 - теплоизоляция;
4 - механизм перемещения заготовки; 5 - магнитопровод

($f = 0,3 - 3$ МГц), коротковолнового ($f = 3 - 30$ МГц) и ультраволнового ($f = 30 - 300$ МГц) диапазонов, создающие удельные потери мощности в диэлектрике от долей ватта до нескольких киловатт на кубический сантиметр. Одна из схем такого нагрева приведена на рис. 3.27 (раздел 3.2).

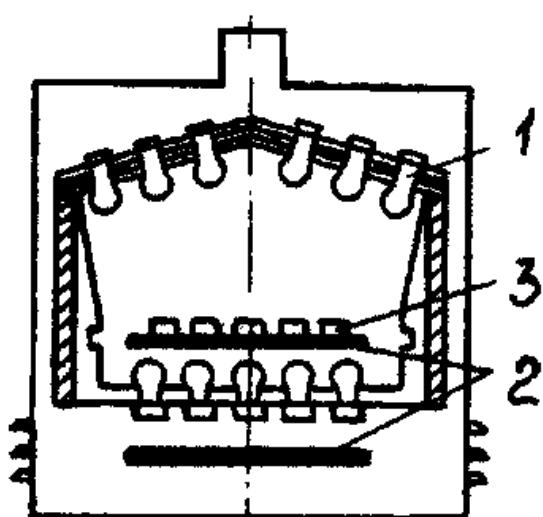


Рис. 3.10. Поперечный разрез печи для выпечки плоских изделий малой толщины:

1 - терморадиационные лампы; 2 - конвейер; 3 - нагреваемые изделия

На рис. 3.10 показана установка **инфракрасного излучения**, в которой нагрев осуществляется инфракрасными лучами - электромагнитными колебаниями с длиной волны $10^{-6} - 10^{-4}$ м. Глубина проникновения их в изделие зависит от свойств материала, характера поверхности и составляет от десятых долей до нескольких миллиметров. Основными источниками инфракрасных лучей являются кварцевые трубчатые, неметаллические стержневые нагреватели с рефлектором и т.п. В пищевой промышленности такой нагрев применяется при обжаривании, копчении, варке мясных и рыбных изделий, выпечке печенья (см. рис. 3.10) и т.д.

Установки **дугового нагрева** используют явление электродугового разряда между электродами, к которым прикладывается напряжение. При этом на электродах возникает термоэлектронная (под действием разогрева) или автоэлектронная (под действием высокого напряжения) эмиссия (выход электронов из металла), происходит ионизация межэлектродного промежутка - образование **плазмы**. Выделяющееся тепло используется для сварки, плавки или нагрева.

Электродуговые печи классифицируются следующим образом:

- дуговые печи косвенного действия, когда электрода и дуга между ними расположены над нагреваемым за счет излучения материалом;
- дуговые печи **прямого** действия, когда дуга горит между концами электродов и нагреваемым металлом;
- дуговые печи **сопротивления**, когда дуга горит под слоем электропроводной шихты, а теплота выделяется в дуговом разряде и преимущественно при прохождении тока через шихту в расплавленных материалах.

В настоящее время широко применяются также **плазменные** печи и **плазменно - дуговые** плавильные установки, в которых нагрев металла осуществляется электрической дугой, совмещенной с плазменной струёй инертного газа.

На рис. 3.11 в качестве примера приведена схема **дуговой сталеплавильной печи**. Загрузка печи производится через рабочее окно или сверху, слив готового металла - путем наклона печи. Для зажигания дуги и в процессе плавки электроды перемещаются с помощью привода 5.

В **рудно-термических** печах нагрев материалов осуществляется за счет теплоты от тока, протекающего через электроды, шихту, электрическую дугу и расплав. Они применяются для получения ферросплавов, фосфора, огнеупоров и т.д.

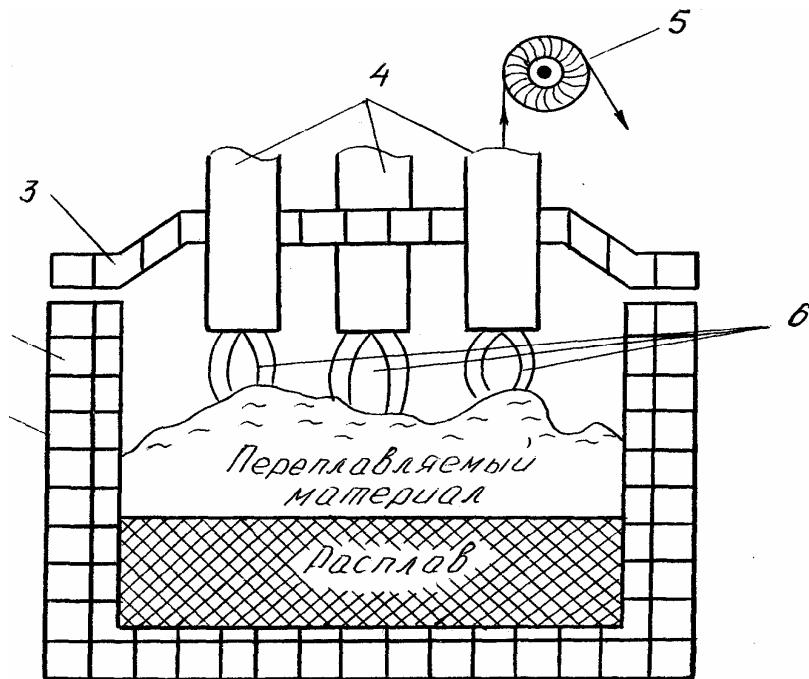


Рис.3.11. Схема дуговой сталеплавильной печи:
1 - стальной кожух; 2 - футеровка; 3 - свод печи; 4 -электроды; 5 - механизм подъема
электродов; 6 – дуга

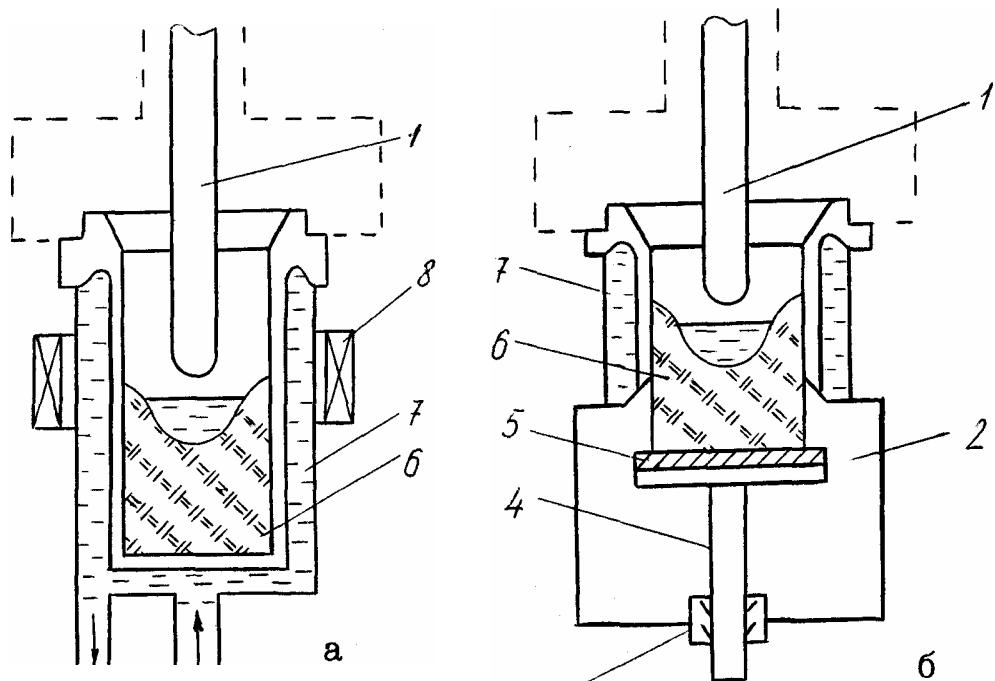


Рис.3.12. Схема вакуумной дуговой печи с глухим кристаллизатором (а) и с вытягиванием
литка (б):
1 - электрод; 2 - холодильник; 3 - вакуумное уплотнение штока; 4 - тянущий шток; 5 - под-
дон; 6 - слиток; 7 - кристаллизатор; 8 – соленоид

Для повышения качества металла его переплавляют при низком давлении в **вакуумных дуговых** печах (рис.3.12), в результате чего в нем уменьшается содержание вредных примесей и растворенных газов. Такие печи применяют для выплавки слитков титана, вольфрама, высококачественных сталей и т.п. К электроду I подается отрицательный, к кристаллизатору 7 - положительный полюсы источника питания. Соленоид 8 питается выпрямленным током и создает магнитное поле аксиального направления. В результате взаимодействия поля с токами в дуге и расплаве дуга стабилизируется, а металл в ванне печи вращается, что улучшает структуру металла при его кристаллизации.

Плазменные установки используются в различных технологических операциях - плазменной резки и сварки металлов, получения особо чистых слоев материалов, нанесения покрытий, упрочнения поверхности и наплавки металлов, проведения плазмохимических процессов. В основе работы таких установок лежит получение и использование потока плазмы - четвертого состояния вещества - электропроводящей ионизированной среды, позволяющей проводить обменные реакции и транспортные процессы на ионном уровне [2]. В качестве плазмообразующих газов используют аргон, азот, гелий, водород. В плазменном состоянии они имеют высокую **энталпию**, т.е. количество теплоты в единице объема или массы. Плазму получают путем взрыва проводника в электрической цепи с помощью электрической искры, высокочастотного фажельного, коронирующего или дугового разрядов.

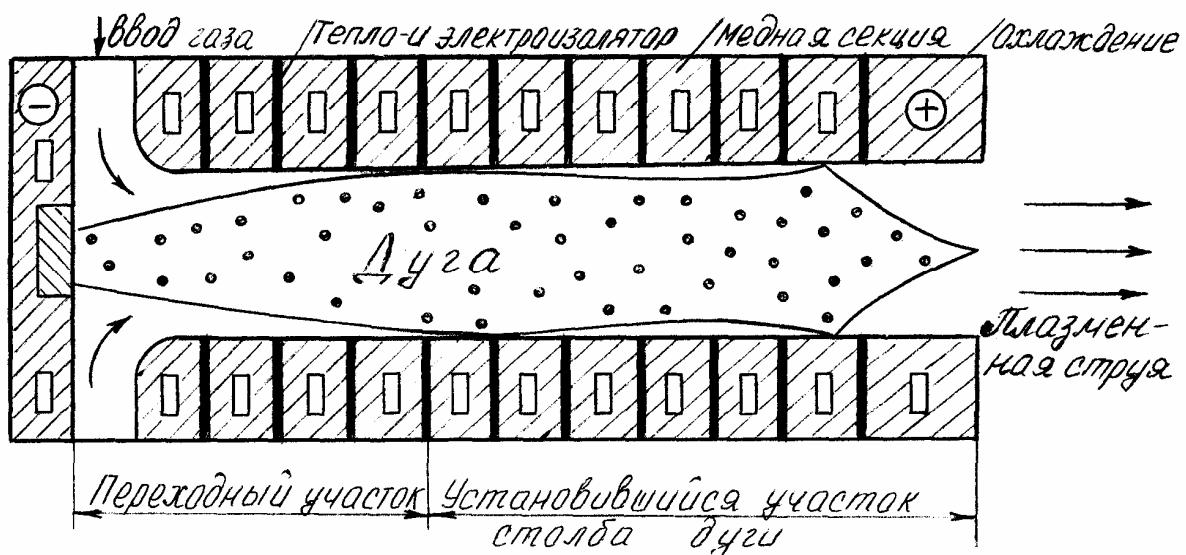


Рис.3.13. Схема плазмотрона со стабилизацией дуги стенкой

На рис. 3.13 показана схема **плазмотрона** (генератора низкотемпературной плазмы), в котором происходит нагрев плазмообразующей среды электрическим разрядом, дуговой разряд горит между электродами (-) и (+), разделенными водоохлаждаемой стенкой, состоящей из полых медных секций. Благодаря охлаждению этих секций около стенки образуется слой холодного газа, поэтому дуга занимает лишь центральную часть сечения канала. Применяются и другие способы стабилизации дуги - газовыххревая, магнитная.

На рис. 3.14 в качестве примера плазменной технологии показана схема печи для плавки в кристаллизаторе. Переплавляемый металл 6 подается с постоянной скоростью и оплавляется плазменными дугами. Анодом является поверхность ванны жидкого металла.

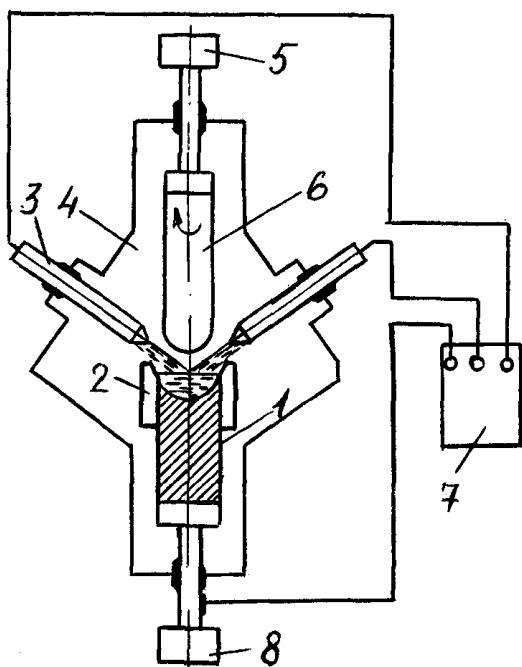


Рис.3.14. Схема печи для плавки в кристаллизаторе:

1 - слиток; 2 - кристаллизатор; 3 - плазмотрон; 4 - корпус печи, 5 - механизм подачи и вращения заготовки; 6 - переплавляемая заготовка; 7 - источник питания; 8 - механизм вытягивания слитка

Трудно представить себе современное производство без установок **дуговой электрической сварки**, в которых тепловая энергия дуги расплавляет кромки свариваемых деталей и торец плавящегося электрода. При затвердевании металла образуется сварное соединение. Различают ручную, полуавтоматическую и автоматическую (под флюсом) сварку. Следует отметить сварку в камерах с контролируемой атмосферой, в углекислом газе. В силу малости и нелинейности сопротивления дуги предъявляются особые требования к электрической цепи и источникам питания сварочных установок. В частности, на рис. 3.15 показана схема сварочного аппарата, в которой напряжение сети понижается с помощью трансформатора А (обмотки I и II имеют различное число витков), а регулирование тока осуществляется с помощью регулируемой индуктивности (дросселя) Б за счет изменения зазора в магнитопроводе.

Электронно-лучевые установки (ЭЛУ) относятся к установкам высокointенсивного нагрева и применяются для обработки тугоплавких металлов, сварки, испарения металлов и оксидов, напыления и т.д. В таких устройствах создается направленный поток электронов (электронный луч), переносящий энергию от излучателя электронов к изделию. В состав ЭЛУ входят **энергетический комплекс** (электронная пушка с блоками питания и управления лучом) и **электромеханический комплекс** (рабочая камера, вакуумная система,

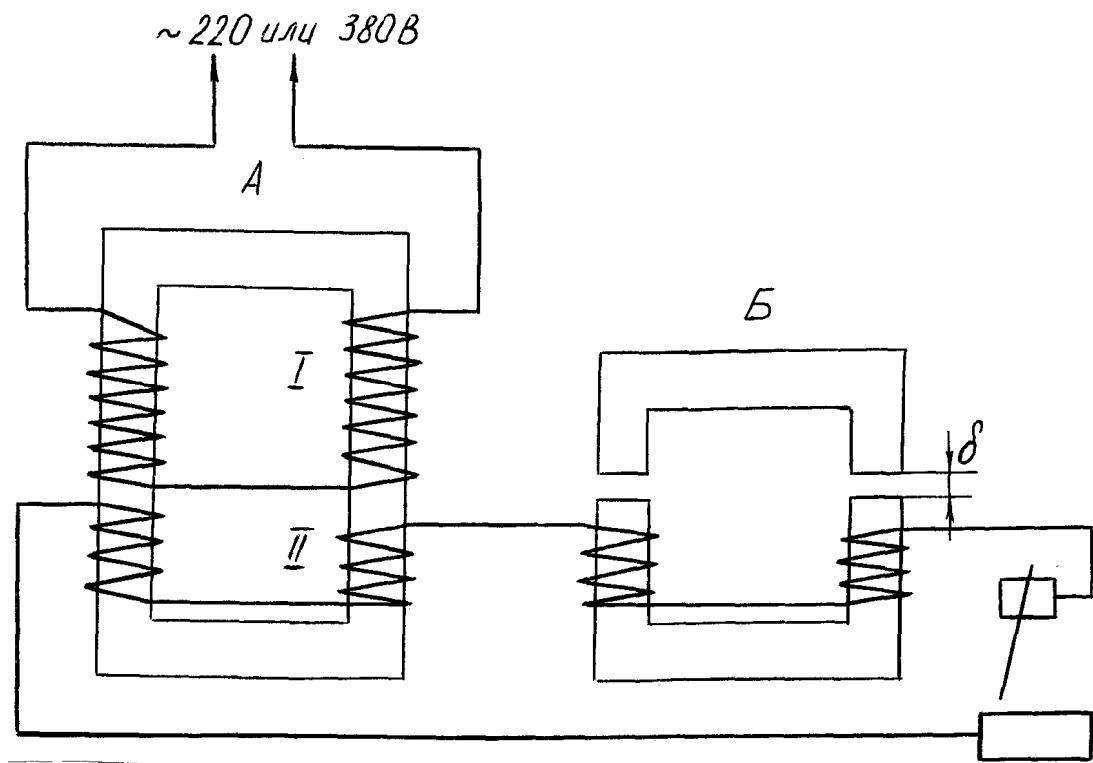


Рис.3.15. Схема сварочного аппарата с отдельным регулятором:
А - сердечник с двумя обмотками: первичной I и вторичной - II; Б – дроссель

системы позиционирования и перемещения заготовки, система наблюдения за ходом процесса, система защиты оператора от рентгеновского излучения, а также ряд вспомогательных устройств и механизмов). На рис. 3.16 показана схема ЭЛУ с кольцевым катодом K (нагретой до 2500 К протекающим через нее током вольфрамовой спиралью) и анодом A , которым являются расплавляемый электрод и ванна жидкого металла в верхней части образующегося в охлаждающем кристаллизаторе слитка. Молибденовый экран \mathcal{E} , имеющий одинаковый с катодом потенциал, отталкивает электроны, формируя их в направленный пучок. Конец электрода расплавляется под действием бомбардирующих его электронов. Жидкий металл стекает в ванну.

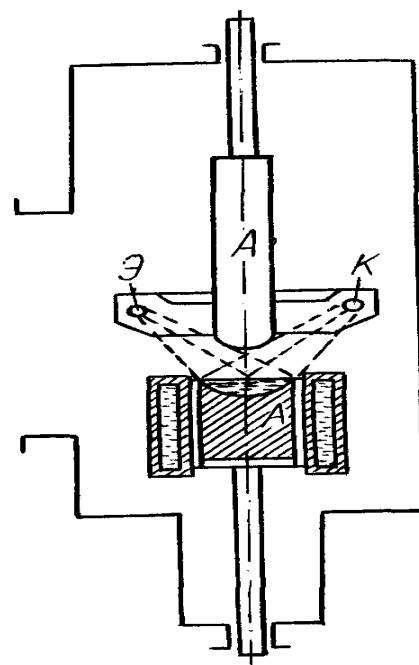


Рис.3.16. Схема электронно-лучевой установки с кольцевым катодом

На рис.3.17 приведена схема ЭЛУ для переплавки металлолома, который подвергается воздействию нескольких электронных пушек.

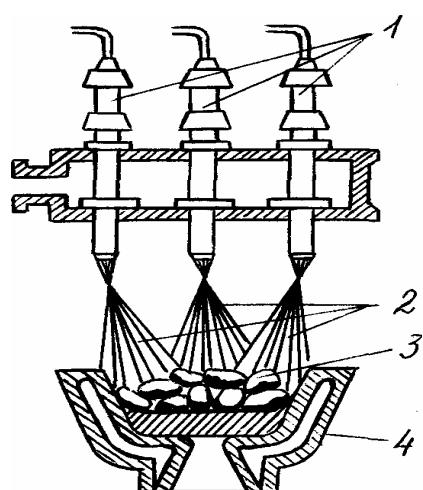


Рис. 3.17. Схема электронно-лучевой установки для переплавки металлолома:

1 – электронные пушки; 2 – электронные лучи; 3 - переплавляемый металлолом; 4 - водоохлаждаемая форма

Лазерные установки высокointенсивного нагрева имеют в своей основе оптические квантовые генераторы (лазеры). На рис. 3.18 показан лазер с рубиновым стержнем в качестве рабочего тела. Стержень 2, изготовленный из рабочего вещества, помещен между двумя зеркалами 1, 3. Зеркало 1 полностью отражает все падающие на него лучи, а зеркало 3 является полупрозрачным, для накачки энергии используется газоразрядная лампа-вспышка 6, которая помещена вместе со стержнем внутрь отражающего кожуха, с поперечным сечением в форме эллипса (показано слева). На рис. 3.19 приведена схема промышленной лазерной установки.

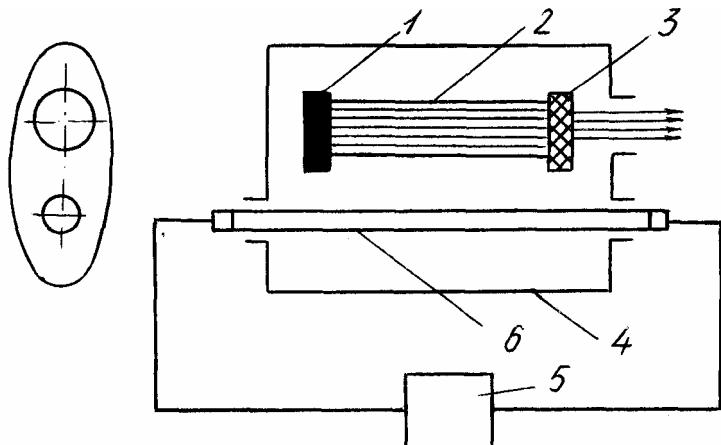


Рис.3.18. Принципиальная схема твердотельного лазера с рубиновым стержнем:
1,3 - зеркала; 2 - стержень; 4 - отражающий кожух; 5 - источник питания; 6 - газоразрядная лампа-вспышка

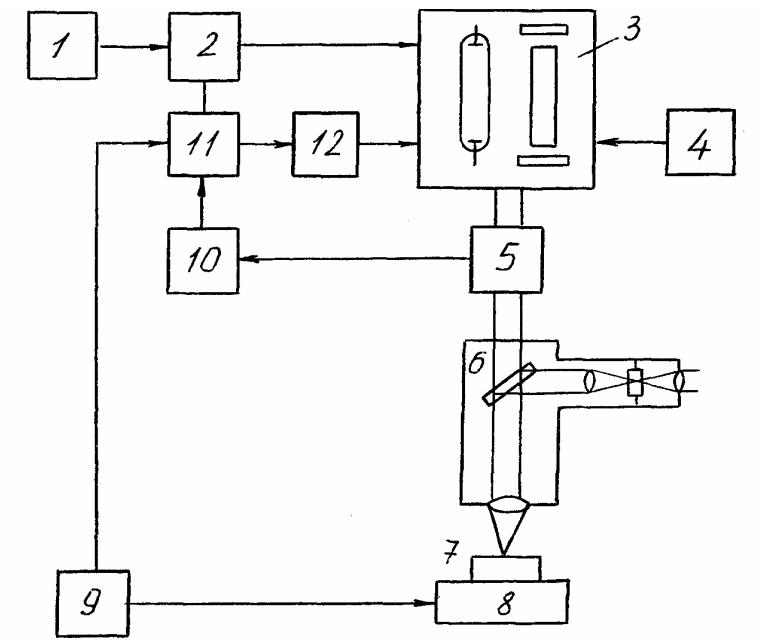


Рис.3.19. Структурная схема промышленной лазерной установки:

I - зарядное устройство; 2 - емкостный накопитель; 3 - лазерная головка; 4 - система охлаждения; 5 - датчик энергии излучения; 6 - оптическая система; 7 - изделие; 8 - предметный столик; 9 - система программного управления; 10 - система стабилизации энергии излучения; II - система управления; 12 - блок поджига

3.1.2. Установки электрохимического, электромеханического, электрохимического действия

В **электролизных установках** используется явление электролитической диссоциации - распада вещества (электролита) на ионы при его растворении или расплавлении. При пропускании через электролит тока на электродах выделяется вещество. Этот процесс называют **электролизом**. Электролизная ванна называется **электролизером**. В промышленности широко применяется электролиз меди, цинка, алюминия.

На рис. 3.20 показана схема электролитического шлифования, или полирования, в стационарном электролите. При прохождении тока через электролит 2 и электроды 4 и 1 происходит растворение поверхности анода в электролите. Поскольку плотность тока на выступах больше, они растворяются быстрее - происходит полирование поверхности изделия.

Схема **магнитоимпульсной установки** показана на рис. 3.21. При протекании импульса тока по виткам индуктора (когда разрядник 7 пробивается и емкость 3 разряжается на индуктор 1) создается магнитный поток Φ , который индуцирует в заготовке 2 импульс "вихревого" тока. Его взаимодействие с магнитным полем обуславливает возникновение электромагнитных сил (показаны стрелками), которые могут достигать десятков тонн на квадратный сантиметр и деформируют заготовку. На рис. 3.22 в качестве примера приведены варианты обработки изделий указанным способом. Схемы релаксационных (импульсных) генераторов для питания индуктора показаны в разделе 3.2.

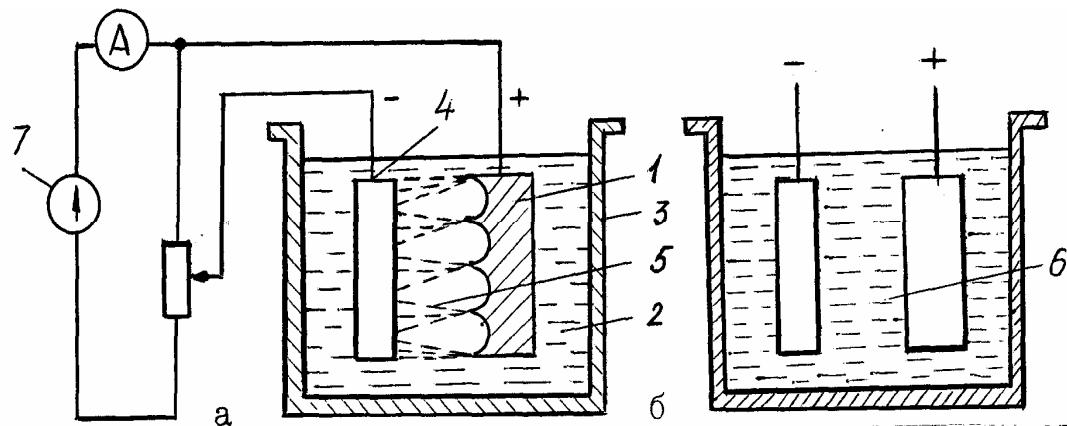


Рис.3.20. Схема электрохимического шлифования-полирования в стационарном электролите:

а - микрорельеф поверхности детали и линии тока в начале обработки; б - то же в конце обработки; 1 - обрабатываемая деталь; 2 - электролит; 3 - ванна; 4 - катод; 5,6 - линии тока в начале и конце обработки; 7 - источник питания

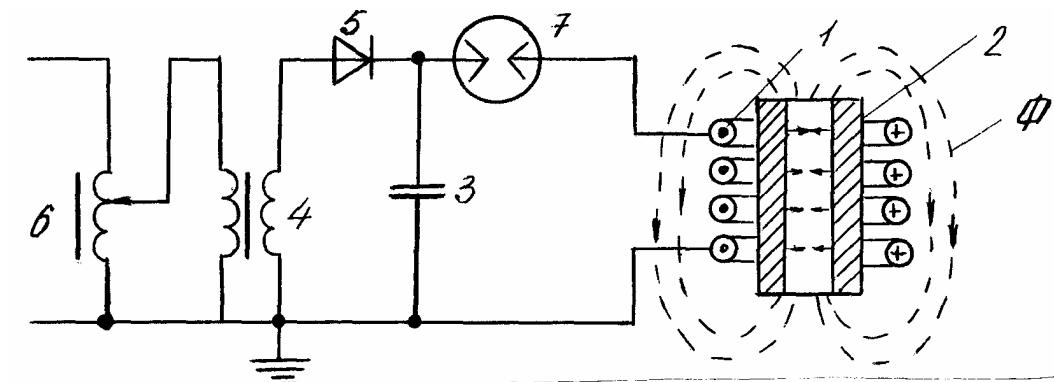


Рис.3.21. Принципиальная схема установки для магнитоимпульсной обработки:
1 - индуктор; 2 - заготовка; 3 - емкостный накопитель (конденсаторная батарея); 4 - повышающий трансформатор; 5 - выпрямитель; 6 - автотрансформатор; 7 – разрядник

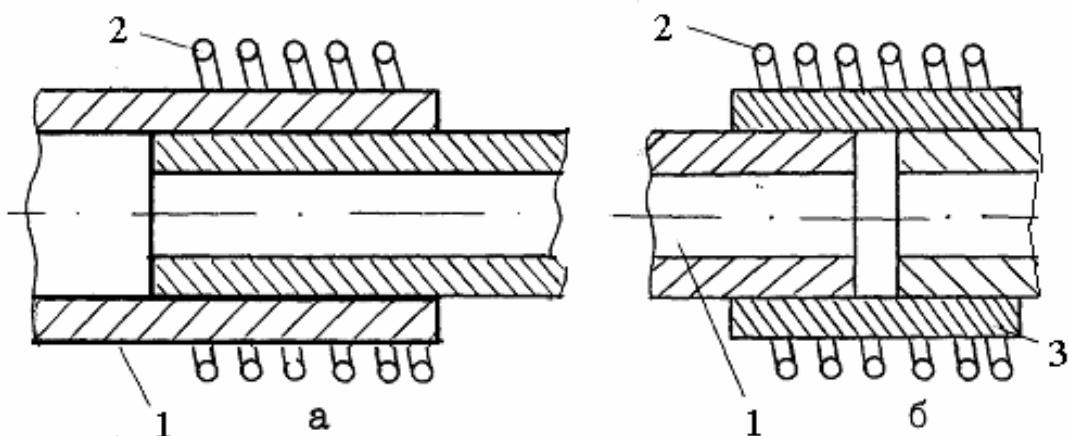


Рис. 3.22. Схема магнитоимпульсной обработки:
а -- соединение концов труб; б - соединение труб муфтой;
1 - заготовки; 2 - соленоид; 3 - муфта

Ультразвуковые установки используют метод механического воздействия на материал с частотой от 16 до 15 кГц. Они применяются для размерной обработки деталей, очистки поверхности изделий, смешивания веществ. Широко известны ультразвуковые методы контроля. Источники ультразвуковых колебаний могут быть двух типов [2] - **механические** (свистки, сирены) и **электрические** (электродинамические, магнитострикционные, пьезоэлектрические), преобразующие электрическую энергию в механические упругие колебания. На рис. 3.23 показана схема магнитострикционного преобразователя. При создании электромагнитами 3,6 постоянного магнитного поля в сердечнике 4 (выполнен из никеля или пермандюра) последний изменяет свою длину. При наложении дополнительного переменного магнитного поля, создаваемого катушкой 5, сердечник будет периодически (с частотой пульсаций тока) дополнительно изменять свою длину, возбуждая колебания концентратора 7 (акустического преобразователя скорости) и преобразователя 8, воздействующего на обрабатываемую деталь 10.

В качестве примера на рис.3.24 приведена схема ультразвуковой установки для очистки деталей (частота колебаний от 25 до 1600 кГц).

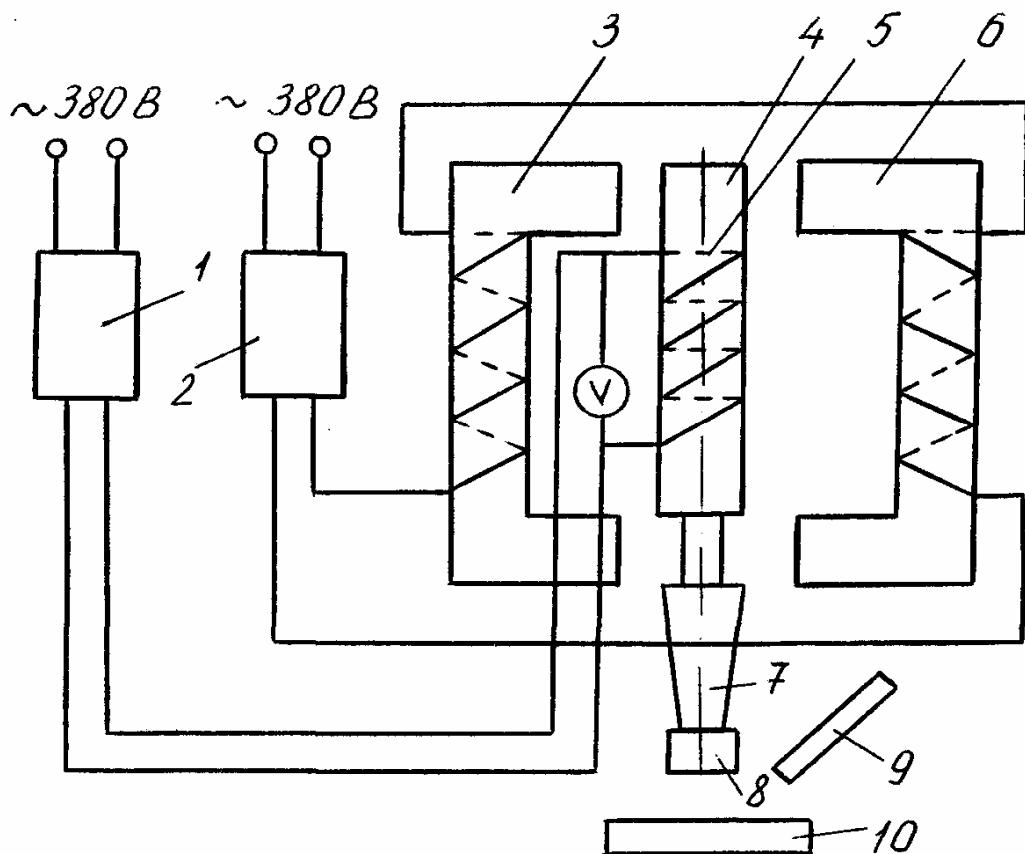


Рис. 3.23. Схема магнитострикционного преобразователя. 1 - генератор тока высокой частоты; 2 - источник постоянного тока; 3,6 - электромагниты; 4 - преобразователь; 5 - обмотка сердечника преобразователя; 7 - концентратор; 8 - преобразователь; 9 - шланг подачи рабочей жидкости; 10 - обрабатываемая деталь

Изделия подаются в ванну цепным транспортером 5. Моющая жидкость подается насосом 1 через фильтр 2. Ультразвуковые преобразователи 4, питающиеся от генератора 3, создают в ванне ультразвуковые колебания.

Рис. 3.25 демонстрирует схему электрофильтра, который является одним из видов **электростатических** промышленных установок. Заряжающиеся в коронирующем разряде частицы вещества осаждаются на стенках 7 за счет кулоновских сил взаимодействия их зарядов с электрическим полем.

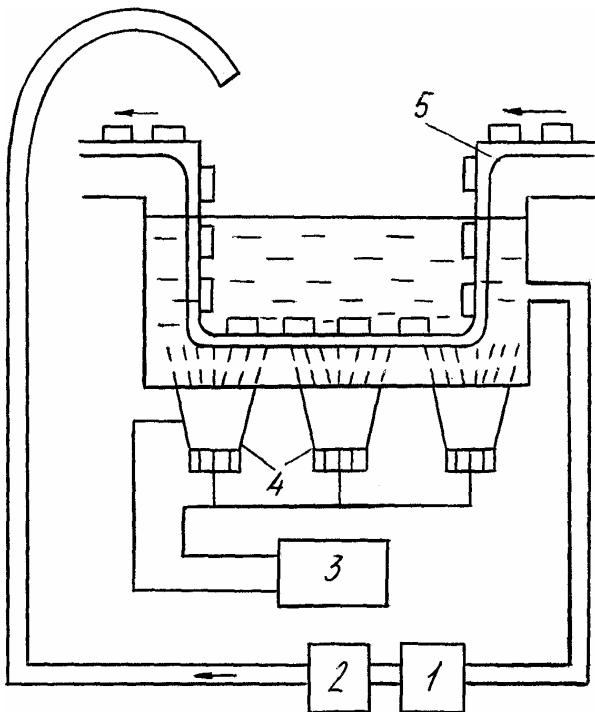


Рис. 3.24. Схема ультразвуковой установки для очистки деталей:

I - насос; 2 -фильтр; 3 - генератор высокой частоты; 4 - ультразвуковые преобразователи; 5 -транспортер

Аналогичный принцип используется в установках окраски изделий в электростатическом поле, рис. 3.26. Коронирующий разряд между сетками и конвейером приводит к зарядке частиц краски, вдуваемой через сопло 8. Эти частицы равномерно оседают на изделия (анод), окрашивая их.

3.2. Особенности электроснабжения, электрооборудования и управления ЭТУ

Современная электротехнологическая установка представляет собой сложный промышленный комплекс, включающий в себя собственно электротехнологический преобразователь энергии, электро- и электрогидромеханические системы, системы питания, управления и др.[6]. Электротехнологический преобразователь энергии относят к **главному** оборудованию, все прочее оборудование является **вспомогательным**, хотя такое деление, конечно, весьма условно.

Электромеханическое оборудование ЭТУ имеет ряд особенностей, которые нужно учитывать при проектировании, монтаже и эксплуатации [6] . Большинство рабочих органов приводов ЭТУ имеет низкие скорости движения, что требует применения редукторов с большим передаточным числом. Например, общее передаточное число электромеханического привода вращения ванны ферросплавной печи мощностью 16,5 мВА, составляет 1975000, а

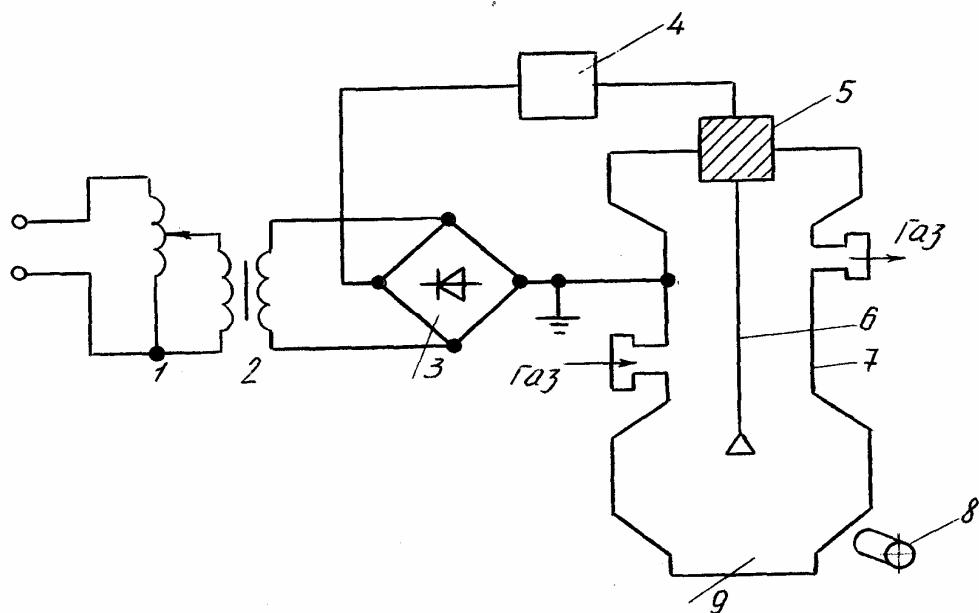


Рис. 3.25. Принципиальная схема электрофильтра:

1 - регулирующий автотрансформатор; 2 - повышающий трансформатор; 3 - высоковольтный выпрямитель; 4 - кабель с ограничительным сопротивлением; 5 - изолирующий ввод; 6 - коронирующий электрод; 7 - осадительный электрод; 8 - механизм встряхивания; 9 - бункер

поворот ванны на один оборот длится 33-132 часа с плавным регулированием скорости в зависимости от хода технологического процесса.

Во многих случаях на рабочих органах приводов ЭТУ возникают большие усилия, что предъявляет повышенные требования к построению кинематических схем, выбору типа двигателя и схемы управления, широкое применение в таких установках находит электрогидропривод (например, привод наклона индукционной печи).

Ряд приводов ЭТУ требует высокого быстродействия. Например, приводы перемещения электродов дуговых сталеплавильных печей и печей переплава работают в тяжелых динамических режимах с частыми пусками и реверсами.

Многие элементы и узлы приводов ЭТУ работают в тяжелых условиях повышенных температур, большой запыленности и агрессивности окружающей среды, при высоких давлениях. В ряде технологий требуется передать момент и усилие через стенку (в вакуум или экологически опасную атмосферу).

Большое значение при выборе типа привода ЭТУ имеют вопросы надежности, когда отказ в работе некоторых механизмов может привести к выходу из строя всей установки.

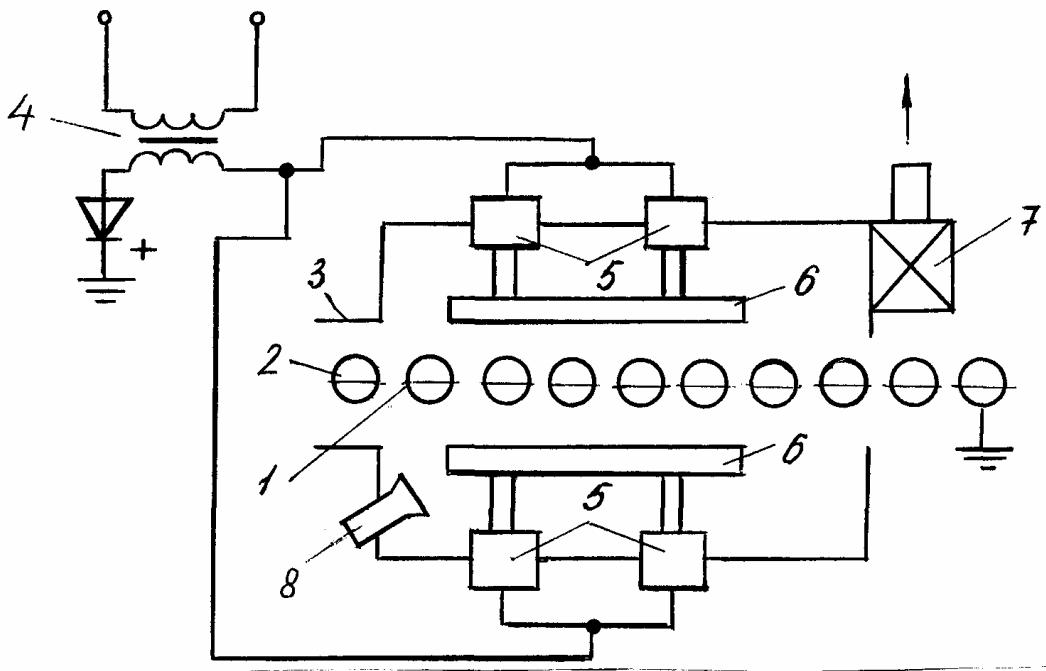


Рис. 3.26. Схема установки для окраски изделий в электростатическом поле:
1 - заземленный конвейер; 2 - изделия; 3 - выход из камеры; 4 - высоковольтный выпрямитель; 5 - изоляторы; 6 - рамы с металлическими сетками; 7 - вытяжной вентилятор

Определенные особенности имеют и системы **электроснабжения** (питания) ЭТУ. Следует прежде всего иметь в виду, что многие электротехнологические установки являются весьма энергоемкими. Например, при электролизе алюминия через ванну протекает ток 100 кА, а расход энергии составляет 14000-16000 кВтч/т. Кроме этого в ряде случаев для электроснабжения ЭТУ требуются специальные источники питания, обеспечивающие выпрямление тока или изменение частоты напряжения. Чаще всего для регулирования параметров технологического процесса применяются замкнутые системы управления с автоматическим изменением или стабилизацией параметров питающего напряжения. Применение полупроводниковых источников питания требует согласования их с сетью по уровню высших гармонических напряжений. В качестве примеров далее приведем схемы электропитания некоторых ЭТУ с кратким описанием их работы [2].

На рис. 3.27 показана принципиальная схема высокочастотного генератора на триоде и его эквивалентная схема узла нагрузки. Технологический узел - конденсатор C_h с нагреваемым материалом - включен в колебательный контур. Посредством магнитной связи между L и L_k осуществляется обратная связь в ламповом генераторе, обеспечивающая незатухающие колебания в контуре $L_k - C_h$.

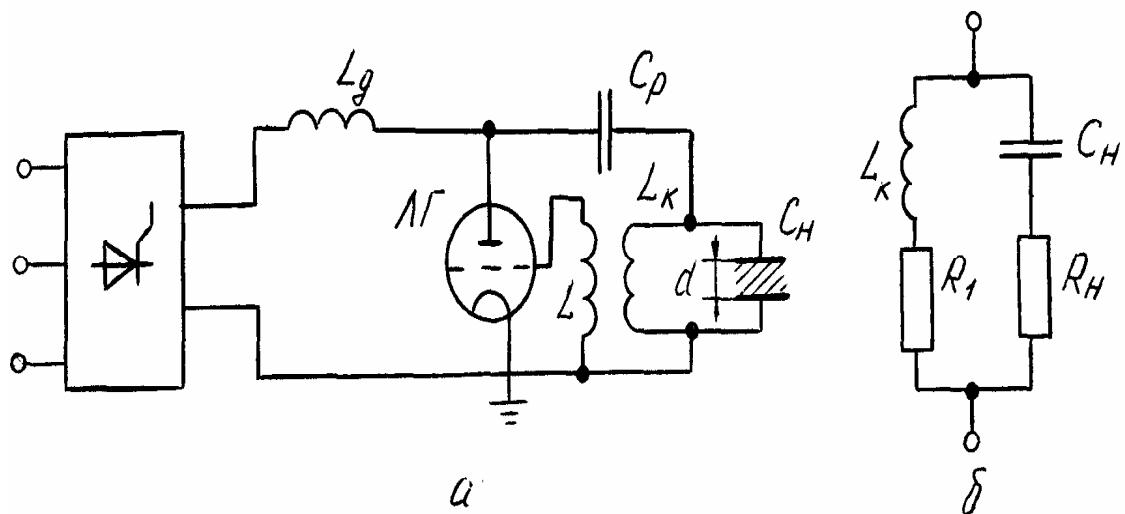


Рис.3.27. Схема высокочастотного генератора для диэлектрического нагрева (а) и эквивалентная схема нагрузки (б):

L_d - индуктивность дросселя, защищающего выпрямитель от высокой частоты; ЛГ - ламповый генератор; C_p - разделительный конденсатор; C_h - емкость нагревательного конденсатора; L_k - индуктивность колебательного контура; R_h - активное сопротивление нагрузки; R_1 - активное сопротивление индуктивной катушки и соединительных проводов

Подключение мощных трехфазных индукционных нагревательных установок промышленной частоты к трехфазной сети вызывает искажение токов и напряжений, что неблагоприятно сказывается на работе других потребителей. На рис.3.28 показаны схемы подключения однофазной нагрузки H (индуктора печи I) к трехфазной сети с помощью симметрирующего устройства (L и C_c в других фазах). Векторная диаграмма токов в фазах и линейных проводах (в) поясняет принцип симметрирования линейных токов I_A , I_B , I_C . На схеме показаны конденсаторы C - C_l для компенсации реактивной мощности печи (уменьшения питающего индуктор тока) [17], а также автоматический регулятор режима АРИР, который регулирует напряжение трансформатора на основании сравнения задания с измеренными при помощи трансформаторов тока TT_2 и напряжения TH значениями напряжения и тока печи. На рис. 3.7,б показана схема включения однофазной тигельной печи 8 в трехфазную сеть с конденсатором 7 и дросселем 6 в других фазах. Там же изображены электроприводы вспомогательных механизмов 9 и 11.

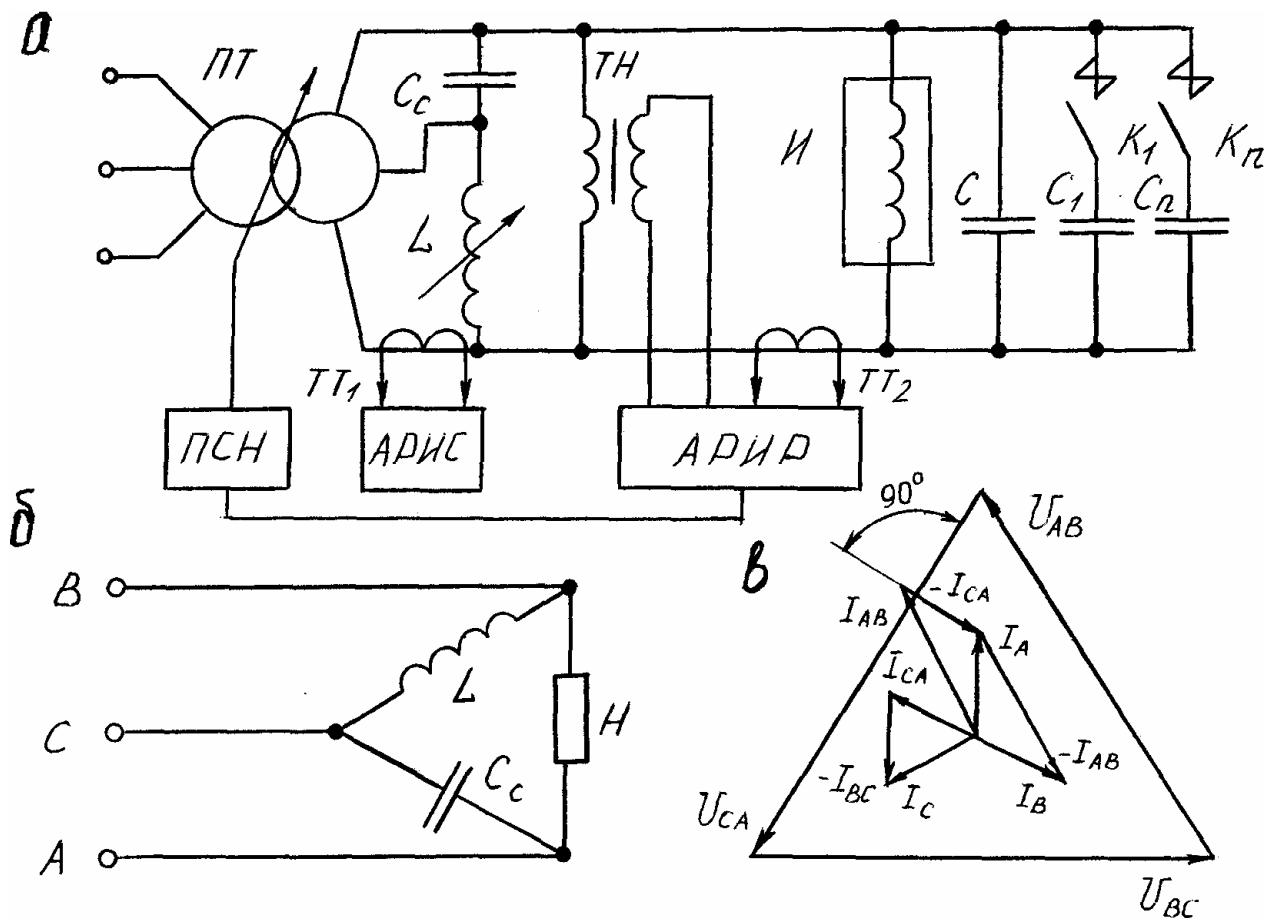


Рис.3.28. Схема включения индукционной печи через симметрирующее устройство (а), схема включения однофазной нагрузки в трехфазную сеть (б) и векторная диаграмма токов и напряжений (в):

ПСН - переключатель ступеней напряжений; C_c - симметрирующая емкость; L - реактор симметрирующего устройства; $C - C_n$ - компенсирующая конденсаторная батарея; H - индуктор печи; АРИС - регулятор симметрирующего устройства; АРИР - регулятор режима; $K_1 - K_n$ - контакторы управления конденсаторной батареи $C_1 - C_n$; TT_1, TT_2 трансформаторы тока

Силовая цепь вакуумной дуговой печи (см. рис. 3.12) включает в себя источник питания, токопровод до печи, токоведущие участки конструкции, токоведущий шток, электрододержатель, расходуемый электрод, слиток, кристаллизатор и вакуумную камеру. В качестве источника питания используется тиристорный выпрямитель (рис. 3.29). Его питание осуществляется на напряжении 6 или 10 кВ, первичная обмотка трансформатора имеет устройство регулирования под нагрузкой. Вторичная обмотка состоит из групп двух обратных звезд с уравнительными реакторами УР. Каждая группа рассчитана на ток 12,5 кА (для агрегата ТВУ - 12500/75 Т). Сглаживающие реакторы L_1 и L_2 предохраняют источник от резких бросков тока, возникающих при капельных коротких замыканиях. Шунты $ШН_1$ и $ШН_2$ и датчики тока $ДТ_1$ и $ДТ_2$ служат для измерения тока.

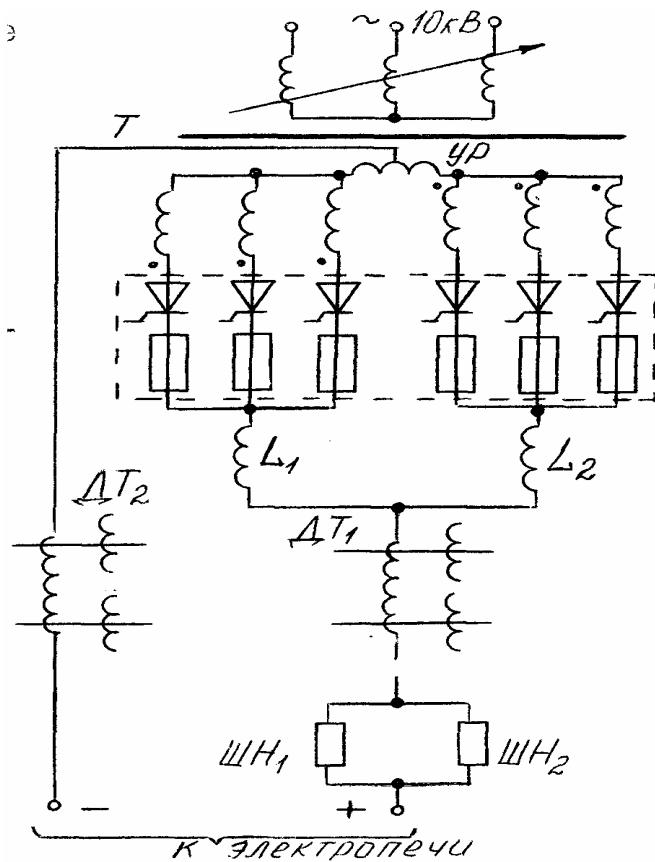


Рис. 3.29. Схема главных цепей тиристорного преобразовательного агрегата ТВ

На рис.3.30 показана схема параметрического источника питания, обеспечивающего постоянство тока нагрузки при изменяющемся ее сопротивлении. Это достигается за счет равенства регулируемых сопротивлений блока конденсаторов в фазе C и дросселя в фазе B .

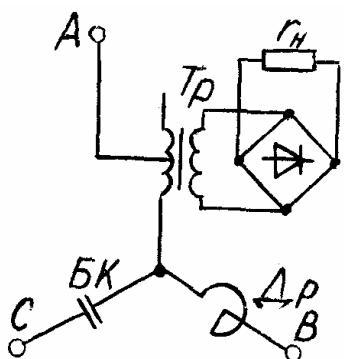


Рис. 3.30. Принципиальная электрическая схема силовых цепей параметрического источника тока

Для питания **индукционной** печи напряжением повышенной частоты используется тиристорный преобразователь (рис.3.31) с явно выраженным звеном постоянного тока, в котором одна группа тиристоров работает в режиме выпрямления по мостовой схеме, а другая - в режиме инвертирования.

При открывании пары вентилей B_1B_4 ток через нагрузку течет в направлении 1, а при открытии B_3B_2 - в направлении 2. Блок пуска обеспечивает запуск преобразователя.

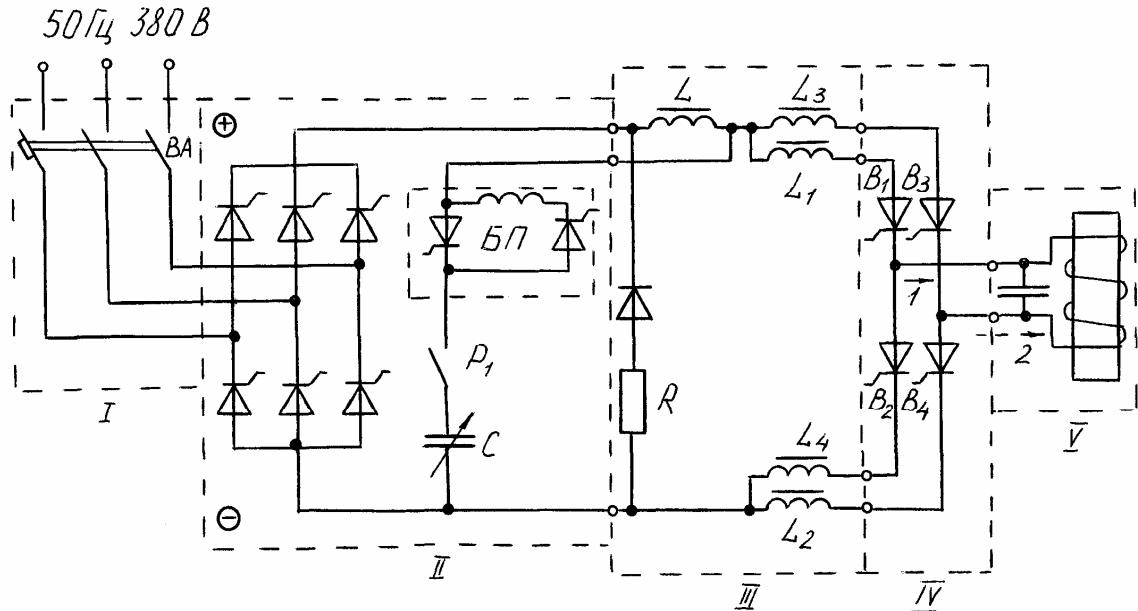


Рис 3.31. Схема силовой цепи тиристорного преобразователя частоты:
 I - шкаф ввода питания; II - выпрямитель; III - блок реакторов; IV - инвертор; У - нагрузка; L - сглаживающий реактор; БП - блок пуска; ВА - выключатель автоматический; C - емкость; R - резистор; P₁ - контактор

Основное электрооборудование дуговых печных установок (рис.3.32) включает в себя: печь с электродами и ванной; отдельный для каждой печи понизительный трансформатор 5, вместе с которым часто размещен реактор 4; короткую сеть 7, соединяющую вторичные выводы трансформатора с электродами печи; коммутационную (2,3), измерительную (6,9) и защитную аппаратуру. Трансформатор имеет высокий коэффициент трансформации (с 6-110 кВ до нескольких сотен вольт), большой вторичный ток (десятки и сотни килоампер), большое количество ступеней регулирования напряжения (40 и более).

Реактор служит для ограничения тока при эксплуатационных коротких замыканиях. В короткую сеть входят: шинные пакеты (от выходов низкого напряжения трансформатора до неподвижных башмаков), гибкая часть (кабель), трубоины (от подвижных башмаков до головок электрододержателя), электроды. Защиту от перегрузок обычно обеспечивают на стороне низкого напряжения с помощью максимальных реле с зависимой выдержкой времени (5-10 с). Защита от токов аварийного короткого замыкания осуществляется с помощью максимальных реле мгновенного действия на стороне высокого напряжения.

Для поддержания постоянства мощности в дуге $P_\delta = U_\delta I_\delta$ требуется обеспечить постоянство сопротивления дугового промежутка R_δ , т.е. построить **регулятор мощности**, обеспечивающий условие $(U_\delta/I_\delta) = R_\delta = \text{const}$, [6].

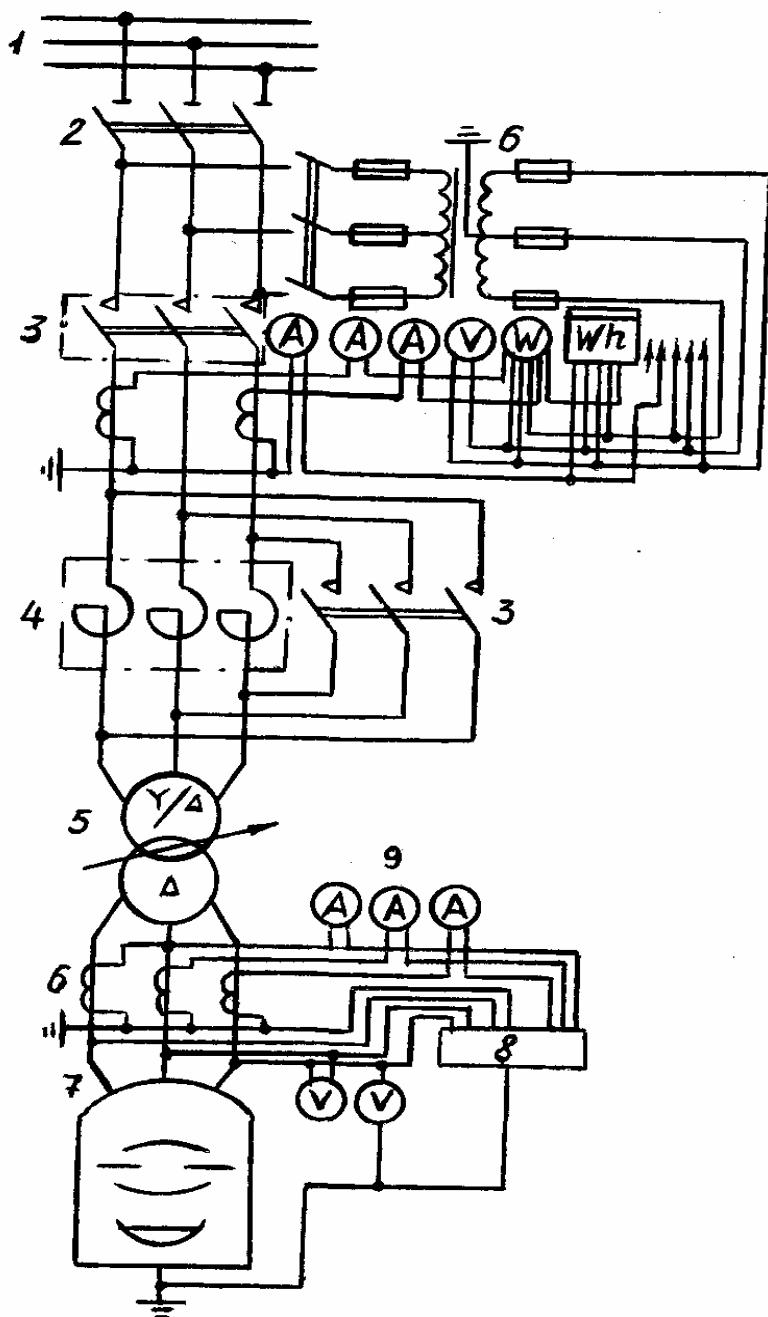


Рис.3.32. Схема электрических соединений дуговой печной установки:

I – высоковольтные шины; 2 - разъединитель; 3 - выключатели; 4 - реактор; 5 - печной трансформатор; 6 - измерительные трансформаторы; 7 - короткая сеть; 8 - автоматический регулятор мощности; 9 - приборы контроля

На рис. 3.33 показана структура регулятора мощности дуговой сталеплавильной печи. Сигналы, пропорциональные току в дуге I_d и напряжению на ней U_d , подаются на блок сравнения БС. При выполнении указанного выше условия рассогласование на выходе узла сравнения $\Delta = 0$. Отклонения от него приводят к тому, что $\Delta \neq 0$. Поступая на вход преобразователя U , который выполняется электрическим или гидравлическим, рассогласование Δ усиливается и отрабатывается электрическим или гидравлическим двигателем M в сторону ликвидации рассогласования. Контроль за правильностью отработки возмущения исполнительным двигателем осуществляется главной обратной связью, представляющей собой кинематическую цепь от вала двигателя до электрода.

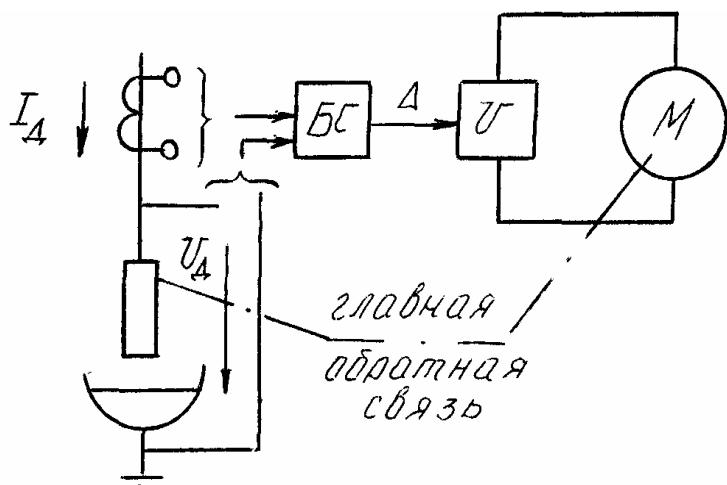


Рис. 3.33. Структура регулятора мощности дуговой печи

Для аргонно-дуговой сварки металлов малых толщин постоянным и импульсным токами применяются **транзисторные** преобразователи (рис. 3.34). Напряжение с трансформатора T_p подается на неуправляемый выпрямитель B , собранный по мостовой схеме, транзисторный регулятор напряжения T и сварочную установку D . Блок поджига БП содержит осциллятор, зажигающий дугу без касания электродов. Ток плавно регулируется с помощью транзисторов, обеспечивающих крутопадающие внешние характеристики источника питания I (рис. 3.34,б), наиболее соответствующие вольтамперной характеристике дуги 2 с точки зрения ее устойчивой работы. Режим импульсной дуги формируется с помощью генератора импульсов ГИ и блока управления транзисторами БУ.

Преобразовательная подстанция **электролизного** производства состоит из распределительного устройства переменного тока, силовых трансформаторов с устройством регулирования напряжения, полупроводниковых агрегатов, распределительного устройства постоянного тока и устройств собственных нужд.

На рис. 3.35 показана схема выпрямительного агрегата с управляемыми вентилями (тиристорами) [2]. Тиристорные ключи в цепях первичных обмоток,

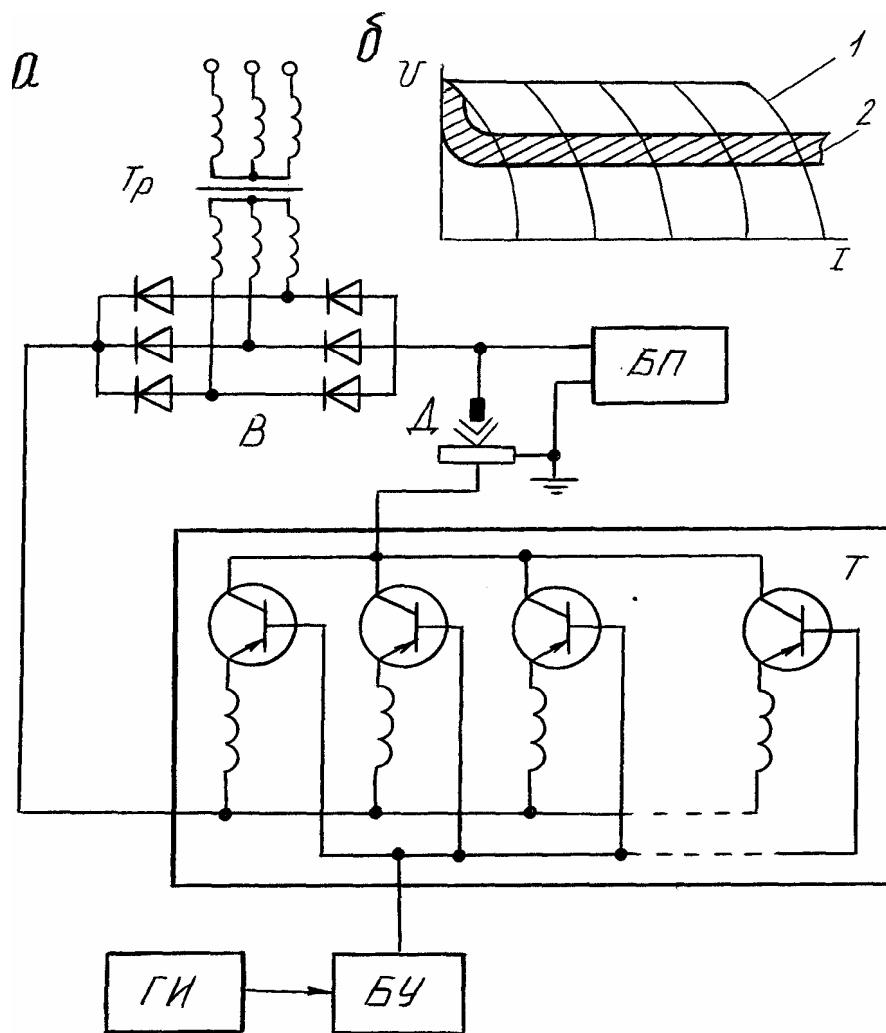


Рис.3.34. Принципиальная схема и внешние характеристики аппаратов типа АП:

B - выпрямительный блок; T_p - силовой трехфазный трансформатор; T - блок транзисторов; $БУ$ - блок управления; $ГИ$ - генератор импульсов; $БП$ - блок поджига дуги

однофазных трансформаторов T_{p1} - T_{p3} обеспечивают плавное регулирование переменного тока. Неуправляемый выпрямитель B питается от вторичных обмоток трансформаторов, соединенных по схеме двойной трехфазной звезды. В агрегате применена двухконтурная система регулирования с внутренним токовым контуром и внешним - контуром напряжения. Регулятор тока усиливает сигнал рассогласования между заданным и текущим (с датчика тока $ДТ$) значениями тока ванн. Он подключен к входу системы импульсно-фазового управления тиристорами (СИФУ), которая обеспечивает соответствующее изменение угла открытия тиристоров и, следовательно, первичных токов трансформаторов. В нормальном режиме регулятор напряжения РН находится в насыщенном состоянии, а при увеличении напряжения на нагрузке выше заданного корректирует суммарное значение выпрямленного тока.

На рис.3.36 в качестве примера импульсного регулирования температуры приведена схема включения нагревательной печи [2]. Температура в рабочем пространстве печи контролируется термопарами, термометрами сопротивления, фотоэлементами. Включение печи осуществляется регулятором температуры PT путем подачи питания на катушку выключателя KV . При достижении измеряемыми значениями температуры величины ($t_{3\delta} + \Delta t$) PT отключает печь от сети. При снижении температуры до значения ($t_{3\delta} - \Delta t$) PT

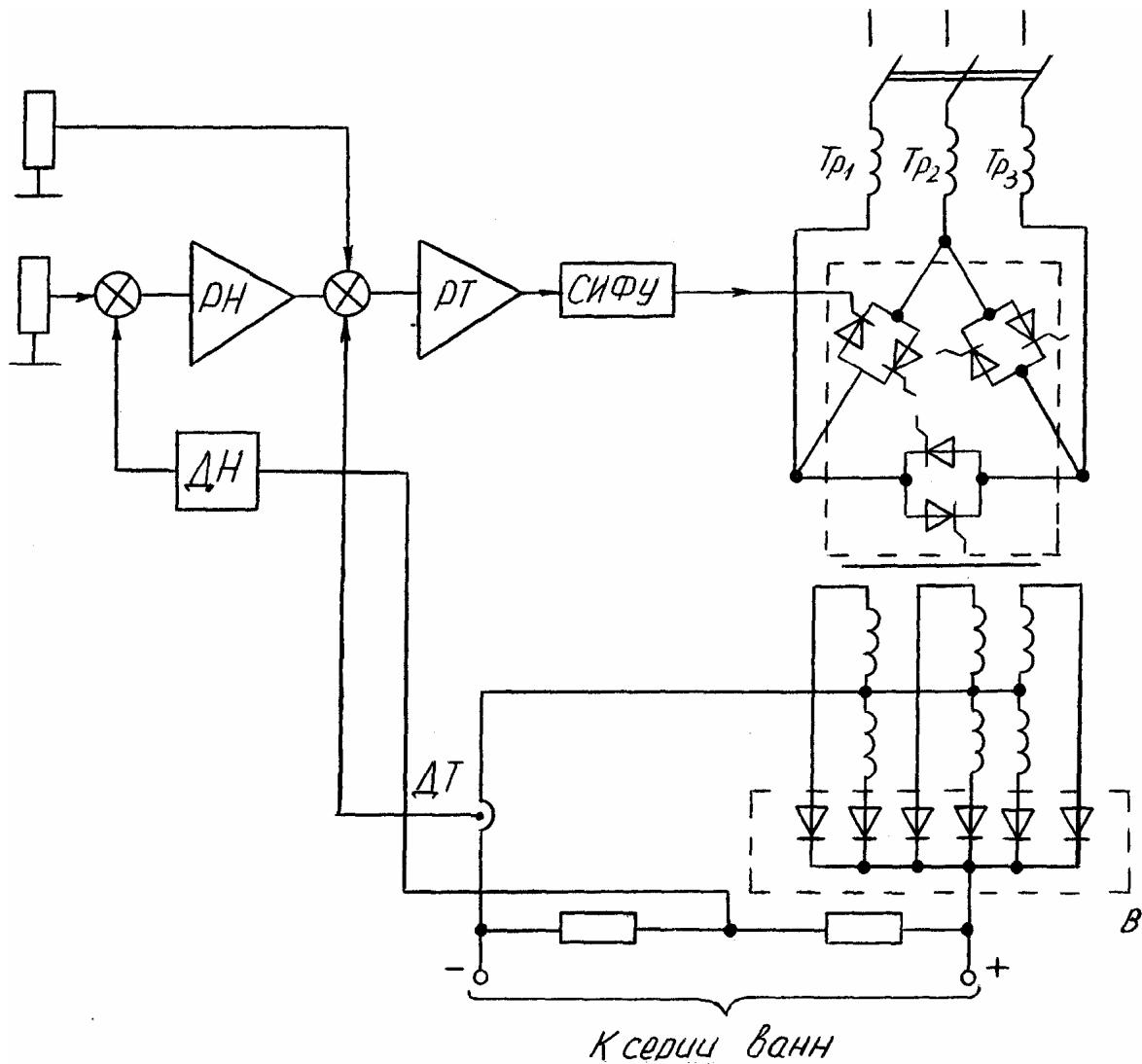


Рис.3.35. Схема выпрямительного тиристорного агрегата

снова включает печь. Глубина пульсации температуры зависит от чувствительности регулятора температуры, инерционности печи и чувствительности датчика температуры. Более подробно данный способ регулирования температуры печи рассматривается в рамках учебно-лабораторного практикума (раздел 6).

Достаточно интересны схемы импульсных релаксационных генераторов для питания установок **электрохимической обработки** (рис. 3.37). В схемах "а", "б" происходит периодический заряд конденсатора C_1 или C и его разряд на межэлектродный промежуток МЭП при определенном напряжении. В схеме "б" при большом токе зарядки якорь $Я$ притягивается к сердечнику вибратора L и увеличивает МЭП, поднимая электрод-инструмент. К концу зарядки C ток спадает, сила притяжения $Я$ уменьшается, электроды МЭП сближаются, и он пробивается. В схеме "г" конденсатор C_1 используется как токоограничивающий элемент.

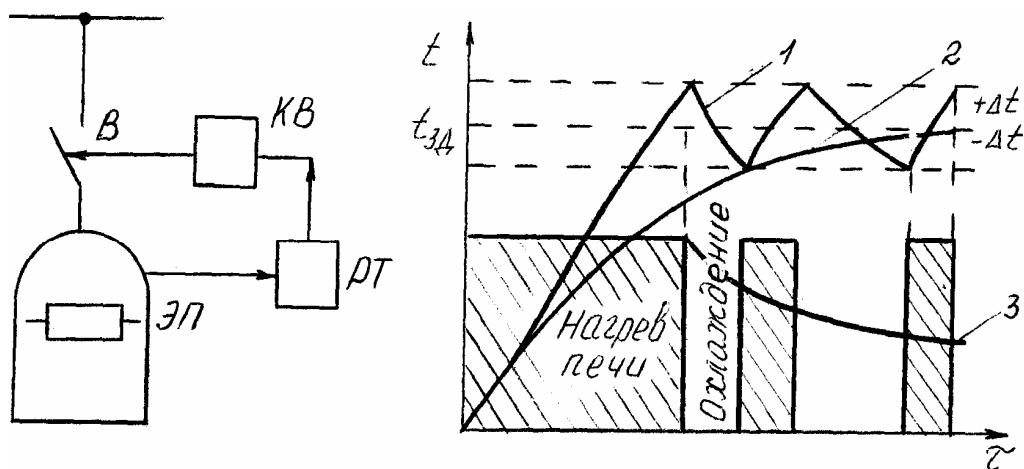


Рис.3.36. Функциональная схема включения печи, изменения температуры и мощности при двухпозиционном регулировании:

B - выключатель; $ЭП$ - электропечь; PT - регулятор температуры; KB - катушка выключателя; 1 - температура печи; 2 - температура нагреваемого тела; 3 - средняя потребляемая печью мощность

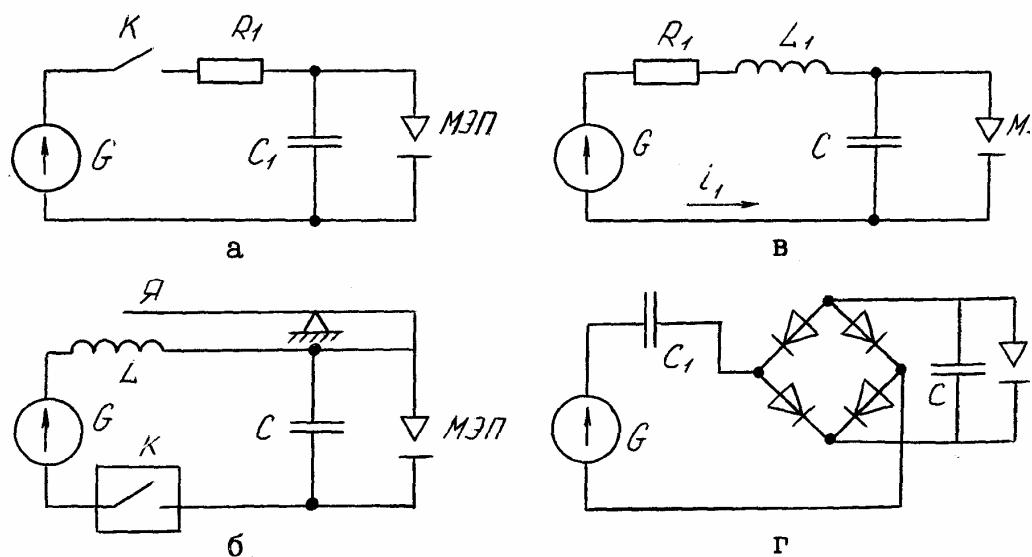


Рис.3.37. Схемы импульсных релаксационных генераторов

4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СПЕЦИАЛЬНОСТИ

В основе теоретического описания ЭТУС лежат математические модели отдельных элементов и установки в целом (табл.4.1). Они описывают электромагнитные, тепловые и гидро(газо)динамические процессы в этих элементах и сводятся в общем случае к уравнениям в частных производных для основных величин соответствующих трехмерных полей (напряженностей электрического поля, магнитных индукций, температур, скоростей жидкости). Аналитическое решение таких уравнений практически невозможно, а численное труднодостижимо даже при использовании современных компьютеров.

Спасает положение возможность упрощения общей задачи для большинства практических случаев:

- трехмерные задачи возможно свести к набору двумерных при соответствующей увязке последних между собой [14];

- для некоторых двумерных задач при достаточно корректных упрощениях граничных и начальных условий возможно получить удобные аналитические решения [12,17];

- оказывается возможным представить некоторые участки (объемы) ЭТУС идеализированными (резистивными, емкостными, индуктивными, электрическими, магнитными, тепловыми, гидравлическими) элементами в их аналоговых схемах замещения [17,18], сведя задачу расчета поля к задаче расчета цепи.

Весьма мощным методическим приемом при исследовании полей различной физической природы является использование **аналогии** их между собой [19]. Например, перенос тепла в проводящей среде и течение невязкой жидкости аналогичны процессам в электрическом и магнитном полях. В табл.4.2, заимствованной из [19] , показана аналогия, существующая между величинами в различных скалярных потенциальных полях.

Следует отметить еще один важный аспект данной проблемы. В настоящее время в продаже имеется широкий арсенал универсальных программных продуктов для исследования электрических цепей а также полей различной физической природы. Вместе с тем, если даже отбросить вопрос стоимости этих продуктов, нужно сказать, что в большинстве случаев универсальные пакеты программ весьма слабо ориентированы на исследование **конкретного** устройства в динамических режимах его работы, как элемента системы или как объекта управления.

Таблица 4. I

Структура модели типовой электротехнологической установки

50

Схема установки	Элемент схемы	Модель элемента	Математическое описание
	сеть	источник питания (ЭДС)	заданная функция
	трансформатор	электрическая и магнитная цепи	система дифференциальных уравнений
	полупроводнико- вый преобразова- тель энергии	нелинейная элект- рическая цепь	система нелинейных диффе- ренциальных уравнений
	индуктор рабочая среда	электрическая и магнитная цепи электромагнитное, тепловое, гидрав- лическое поля	система дифференциальных уравнений
	электротехноло- гический преобразо- ватель энергии		система дифференциальных уравнений в частных произ- водных

Таблица 4.2

Аналогия между величинами в скалярных потенциальных полях

Вид поля					
Электростатическое	Электрического тока	Магнитостатическое	Тепловое	Поле потока жидкости	Гравитационное
Потенциал	Потенциал	Потенциал	Температура	Потенциал скорости	Потенциал Ньютона
Напряженность электрического поля	Напряженность электрического поля	Напряженность магнитного поля	Градиент температуры	Скорость	Гравитационная сила
Диэлектрическая проницаемость	Электрическая проводимость	Магнитная проницаемость	Теплопроводность	Плотность	Величина, обратная гравитационной постоянной
Электрическое смещение	Плотность тока	Магнитная индукция	Плотность теплового потока	Удельный расход	-
Плотность заряда	Плотность тока	Плотность магнитной массы	Плотность источника тепла	Плотность потока при истечении	Плотность
Емкость	Электрическая проводимость	Магнитная проводимость	Тепловая проводимость	-	-

4.1. Расчет поля

В двумерных задачах электрический потенциал V описывается уравнением Пуассона, например, в декартовых координатах x, y

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = -\frac{\rho_c}{\epsilon_0 \epsilon}, \quad (4.1)$$

где ρ_c - плотность заряда, $\epsilon \epsilon_0$ - диэлектрическая проницаемость среды.

Если заряды отсутствуют ($\rho_c = 0$), то (4.1) превращается в уравнение Лапласа с нулевой правой частью.

Для магнитного потенциала справедливо также уравнение Пуассона

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = -\mu \mu_0 J_z, \quad (4.2)$$

где J_z - плотность тока в направлении оси z , $\mu \mu_0$ - магнитная проницаемость среды.

При $J_z = 0$ также получаем уравнение Лапласа. В качестве примера, демонстрирующего аналогии полей различной физической природы, приведем уравнение Лапласа для температуры T при расчете стационарного теплового поля в плоской фигуре [9]

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0. \quad (4.3)$$

В ряде случаев более удобно записать уравнения поля в цилиндрической системе координат, например для напряженностей электрического или магнитного полей [12].

Аналитическое решение уравнений Пуассона или Лапласа легко получается, если известна зависимость (или независимость) величин поля от одной из координат. Пример такого случая рассмотрен в [12] для сплошного проводящего цилиндра при его индукционном нагреве.

Он имеет важное практическое значение при рассмотрении поверхностной закалки и индукционного нагрева металлических изделий в промышленности и вынесен в лабораторный практикум для проведения вычислительного эксперимента (раздел 6).

Еще более простой является задача расчета зависимости тангенциальной (направленной по касательной к окружности радиуса r) составляющей напряженности H магнитного поля при протекании постоянного тока I по проводнику круглого сечения. В этом случае составляющие H по осевой и радиальной координатным осям отсутствуют и может быть использован закон полного тока [17]

$$2\pi r H = I \left(\frac{r}{r_m} \right)^2, \quad (4.4)$$

где r_m - внешний радиус провода, $r < r_m$.

Легко видеть, что внутри провода H линейно нарастает с увеличением радиуса, а вне его падает обратно пропорционально r .

В более общей постановке уравнение Пуассона (Лапласа) решается численными методами, из которых наиболее часто применяются методы **конечных элементов и конечных разностей** [9,12]. В последнем случае на область поля накладывается прямоугольная сетка с заданными шагами по координатным осям. В каждом узле сетки производные заменяются конечно-разностными отношениями, которые связывают значение V (ϕ или T) в данном узле со значениями этой величины в соседних узлах. Полученные для всех узлов уравнения вместе со значениями функции в граничных узлах (граничными условиями) образуют систему линейных алгебраических уравнений относительно искомых значений во внутренних узлах области. Эта система уравнений обычно имеет достаточно высокий порядок и решается каким-либо из известных приближенных методов – прямым методом Гаусса, косвенным итерационным методом Либмана и т.п. [9].

Погрешности решения складываются при этом из

- погрешности замены дифференциального уравнения разностным;
- погрешности аппроксимации краевых условий;
- погрешности решения системы разностных уравнений приближенным методом.

Во многом выбор метода решения задачи зависит от возможностей имеющейся в распоряжении специалиста ЭВМ, а также от имеющегося у него программного обеспечения.

Более подробно особенности расчета полей рассматриваются в курсах **теоретических основ электротехники, моделирования ЭТУС** и других специальных дисциплинах.

Здесь следует только отметить, что с учетом геометрических размеров клеток сетки и свойств среды сетку можно трансформировать в **детализированную схему замещения** [14,20.]. Ее электрические, магнитные, тепловые или гидравлические сопротивления включаются в четырехугольники аналогично линиям клеток и в общем случае могут быть нелинейными. Тем самым задача расчета поля сводится в данном случае к задаче расчета разветвленной линейной (нелинейной) цепи.

4.2. Расчет цепи

Любая цепь сводится к параллельному или последовательному соединению активных и пассивных элементов в ее схеме замещения. При этом также

можно наблюдать аналогию величин в цепях различной физической природы. Это позволяет описывать их с помощью известных законов Ома и Кирхгофа.

Рассмотрим для примера участок электрической цепи с резистивным элементом R , по которому протекает постоянный ток I . Напряжение на нем (разность электрических потенциалов на зажимах) определяется законом Ома [17]

$$U = RI, \quad (4.5)$$

где $R = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{l_s}{S_s}$, γ - удельная электропроводность, l_s и S_s - длина и сечение электропровода.

При этом линейная зависимость U от I (вольтамперная характеристика) соответствует линейному электрическому сопротивлению R , а нелинейная - нелинейному.

Падение магнитного напряжения U_m на участке магнитной цепи (ферромагнитного сердечника, на котором размещена катушка, обтекаемая током) связано с магнитным потоком через него Φ также законом Ома [17]

$$U_m = R_m \cdot \Phi, \quad (4.6)$$

где $R = \frac{1}{\mu_0 \mu} \cdot \frac{l_m}{S_m}$ - магнитное сопротивление; l_m и S_m - длина и сечение участка магнитопровода (сердечника, зазора и т. п.).

Разность температур ΔT в стационарном тепловом поле между поверхностями теплопроводящего слоя (изоляции, металла) связана с тепловым потоком через него Q законом Ома для тепловой схемы замещения слоя [18]

$$\Delta T = R_t \cdot Q, \quad (4.7)$$

где $R = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{l_t}{S_t}$ - тепловое сопротивление; λ - теплопроводность слоя; l_t , S_t - толщина и площадь поверхности слоя, т.е. длина и площадь сечения "теплопровода".

Следует отметить, что в производственной практике применяются так называемые "тепловые трубы" - специальные устройства с весьма малыми тепловыми сопротивлениями. Они используются для отвода тепла из какого-либо объема устройства.

Потери давления Δp на преодоление какого-либо аэродинамического или гидравлического сопротивления участка канала Z при протекании по нему газа или жидкости связаны с расходом Q выражением [18]

$$\Delta p = ZQ^2. \quad (4.8)$$

В связи с аналогией расхода среды и электрического тока к схемам замещения аэродинамического или гидродинамического тракта также применимы законы Кирхгофа. Очевидно, что зависимость Δp от Q при этом нелинейна, т.е. и схема замещения тракта нелинейна.

Рассмотренные выше элементы цепей соединяются между собой в соответствии с конструкцией устройства, образуя сложную разветвленную электрическую цепь с источниками тока и напряжения или ее аналогов в случае устройств другой физической природы. Эта цепь описывается системой алгебраических уравнений, составленной на основе применения законов Кирхгофа для узлов и контуров схемы. Процедура составления уравнений легко формализуется и становится достаточно универсальной с использованием теории **графов** и **матричной алгебры**, как показано в [10].

Решение систем линейных уравнений относительно неизвестных токов в ветвях или потенциалов узлов наиболее целесообразно производить с помощью компьютерных методов, которые условно делятся на точные, итерационные и вероятностные [10]. Точные методы (например, метод исключения Гаусса) применяются для решения задач с малым числом неизвестных $n < 10^3$, итерационные (например, метод простой итерации, метод Либмана с последующей релаксацией [14]) - для решения задач со средним числом неизвестных, а вероятностные - для решения задач большой размерности с числом неизвестных $n > 10^6$.

Следует отметить, что итерационные методы (например, метод Ньютона) позволяют эффективно решать системы нелинейных алгебраических уравнений, которые описывают цепи с нелинейными элементами.

При анализе нестационарных режимов работы цепь описывается системой дифференциальных уравнений. В этом случае уравнения Кирхгофа записываются для мгновенных значений токов и напряжений с учетом напряжений на емкостных и ЭДС на индуктивных элементах. Решение дифференциальных уравнений или их систем осуществляется обычно методами Эйлера, Рунге-Кutta [9], Адамса [14].

В качестве достаточно простых примеров математического моделирования ЭТУС в рамках лабораторного и учебного практикума (раздел 6) рассматриваются компьютерные программы теплового расчета ЭТУ и разряда конденсатора на электромагнит в составе магнитоимпульсного устройства.

Более подробные сведения о моделировании ЭТУС приводятся в соответствующих дисциплинах учебного плана специальности.

5. НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА

С точки зрения современных тенденций развития электротехнологических систем среди прочих следует выделить такие общепринятые и понятные требования к технологиям и технологическим установкам (очередность и полнота перечисления могут быть дискуссионными):

- **экологические**, как с позиций влияния на окружающую среду, так и по безопасности обслуживания;
- **экономические**, прежде всего с позиций энерго- и ресурсосбережений;

- **эксплуатационные**, прежде всего с позиций **надежности** работы и по-вышения **производительности** оборудования в технологическом процессе;
- **коммерческие**, прежде всего с позиций **качества и стоимости** продукции, что вполне очевидно и не нуждается в пояснениях.

Эти требования обусловливают постоянную актуальность ряда научно-технических задач:

- разработка технологий и оборудования с пониженным выделением вредных отходов производства, прежде всего с широким использованием электроэнергии;
- совершенствование очистного оборудования, в том числе с использованием электромагнитных устройств;
- разработка манипуляторов и транспортных систем с дистанционным управлением для выполнения технологических операций в замкнутых герметичных объемах;
- разработка технологий утилизации отходов и обогащения металлургического сырья, в том числе с применением электромагнитных и индукционных устройств;
- оптимизация режимов работы технологических установок и оборудования, в том числе с использованием электромагнитного воздействия на рабочую среду;
- разработка высокодинамичных безредукторных электроприводов, в том числе на базе линейных электродвигателей.

Для каждого коллектива, занятого в сфере научной деятельности, свойственна вполне определенная специализация - **научная школа**, которая складывается объективно в течение значительного отрезка времени и формируется благодаря конкретным исследованиям и конкретным исследователям.

Научная тематика коллектива кафедры электротехники и электротехнологических систем УГТУ охватывает вопросы исследований и разработки следующих электротехнологических установок и оборудования:

1. Трансформаторные и индукционные магнитогидродинамические (МГД) устройства с жидкостным вторичным элементом (МГД-насосы, индукционные печи, перемешиватели, дозаторы)[14].
2. Линейные индукционные машины с твердо- и дисперсно-металлическим вторичным элементом, а также приводы на их основе (линейный асинхронный электропривод, магнитные и электродинамические сепараторы для утилизации металлических отходов и обогащения сырья, сгустители и циклоны в водоочистном оборудовании металлургических производств).
3. Электромагнитные и линейные индукционные двигатели для химико-металлургических и медицинских технологий (магнито-импульсные установки для очистки бункеров и других емкостей для сыпучих смесей; автоклавы-миксеры для выщелачивания минералов; установки термообработки, смешивания и дозированного разлива бактериологических препаратов).

4. Электронагревательные приборы.

5. Программные средства математического моделирования и проектирования электротехнологических установок п.п.1, 2, 3, 4.

Трансформаторные МГД-устройства

Типичными представителями таких устройств являются МГД-насосы и индукционные канальные печи. На рис. 5.1 показан насос, в котором ток от вторичной обмотки понижающего трансформатора подводится к каналу с жидким металлом с помощью контактов (кондукционно) 5. Канал находится в магнитном поле, созданном обмотками трансформатора. В результате взаимодействия тока в металле с магнитным полем возникает сила Ампера и создается давление, перекачивающее металл по каналу.

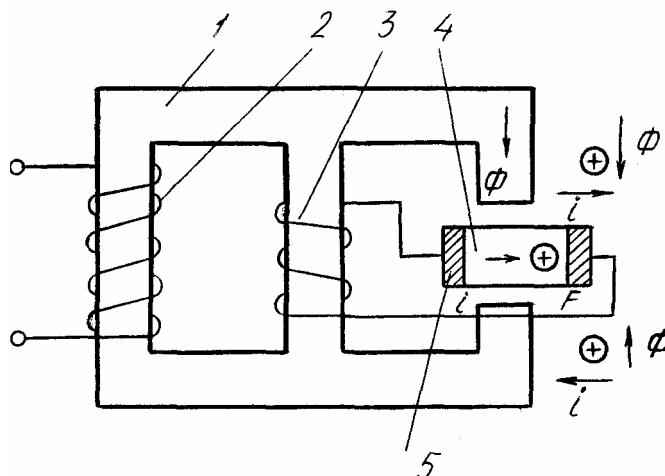


Рис.5.1. Схема насоса-трансформатора:

1 - магнитопровод; 2,3 – обмотки трансформатора; 4 - канал с жидкостью; 5 - токопроводящая шина

Более надежными являются конструкции, в которых ток в металле создается **индукционным** путем, причем канал с металлом является вторичной обмоткой понижающего трансформатора.

Широкое распространение получили магнитодинамические

насосы, созданные под руководством В.П. Полищуком [22]. На рис. 5.2 показан МГД - насос аналогичного типа, разработанный Г.К. Смолиным [23] и отличающийся тем, что в нем понижающий трансформатор для наведения тока в канале совмещен собственно с насосом. Катушки 1 (силовые) включены согласно и создают поток Φ_1 , индуцирующий ЭДС и ток в короткозамкнутом витке-канале. Катушки 2 (возбуждения) создают магнитный поток Φ_2 , пронизывающий канал с током. Возникает сила Ампера и давление в канале, перемещающее металл по специальному металлотракту (показано стрелкой). Это МГД-устройство может также служить для смешивания (**смеситель**) или разделения (**сепаратор**) различных расплавов, если вместо канала взять тигель такой же формы. Изменением направления тока в катушках можно изменять направление силы, производя квазиутяжение или квазиоблегчение расплава или его компонентов. При этом величина силы зависит от электропроводности металла, поскольку последняя определяет величину индуцированного тока в металле.

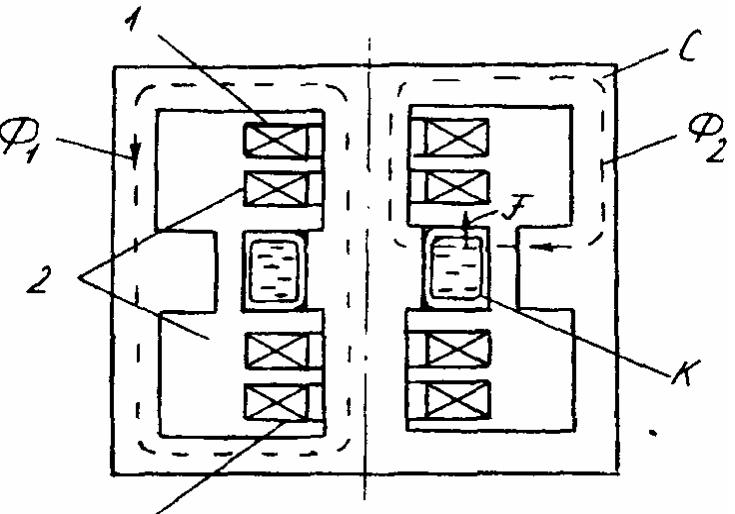


Рис. 5.2. МГД-насос трансформаторного типа:
С - сердечник; К - канал (тигель); I - силовые катушки;
2 - обмотки возбуждения

Линейные индукционные машины (ЛИМ)

Линейная индукционная многофазная машина получается, если статор и ротор вращающегося асинхронного двигателя развернуть в плоскость [21]. При этом обмотка индуктора (статора) питается трехфазной системой токов и создает бегущее магнитное поле (в направлении, показанном стрелкой), в котором находится вторичный элемент ("ротор"). В проводниках или проводящей полосе последнего индуцируются токи. Их взаимодействие с магнитным полем создает силу Ампера, которая приводит вторичный элемент в движение.

При внешней простоте устройства ЛИМ отличаются необычайным разнообразием конструкций и достаточно сложной теорией процессов в зоне энерго преобразования. Вместе с тем они находят весьма широкое применение в различных областях техники, поскольку позволяют:

- создавать транспортные системы без ограничения углов подъема и ускорений, так как усилие передается подвижной части бесконтактно (с помощью магнитного поля, а не колес);
- "передавать" усилие через стенку в герметичные объемы;
- исключить или максимально упростить кинематическую передачу к рабочему органу, а в ряде случаев совместить с ним вторичный элемент ЛИМ;
- использовать в качестве вторичного элемента рабочую проводящую среду в различных состояниях (твердом, жидким, дисперсном).

В качестве примера на рис. 5.3 показан линейный индукционный насос с двусторонним индуктором. Вторичным элементом его является канал с жидким металлом, размещенным в зазоре между сердечником индуктора.

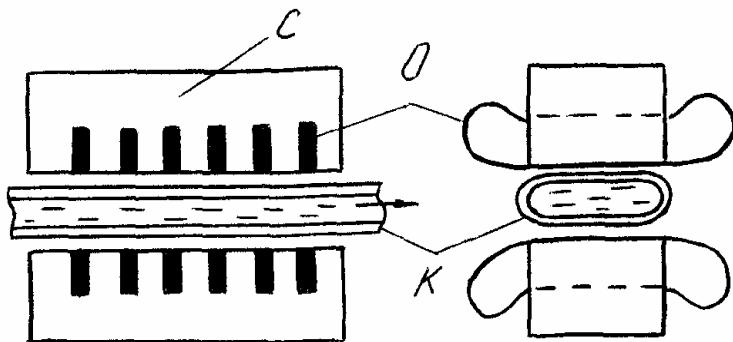


Рис.5.3. Индукционный МГД-насос:
С - сердечник; О - обмотка; К - канал

Вторичным элементом такой ЛИМ может быть немагнитная твердометаллическая или биметаллическая ("сэндвич") полоса. В этом случае насос превращается в **линейный асинхронный двигатель** (ЛАД). Он может быть использован для привода транспортных средств и механизмов возвратно-поступательного движения [21], а также для термообработки проката.

Устранение одного из сердечников индуктора приводит к конструкции односторонней ЛИМ (например, для перемещения прокатных изделий), а свертывание индуктора в цилиндр с осью по направлению движения магнитного поля - к **цилиндрической** (трубчатой) ЛИМ.

Если внутрь такого цилиндрического индуктора поместить кристаллизатор с жидким металлом, то получается устройство для **электромагнитного перемешивания** расплава в процессе его кристаллизации [24.]. Электромагнитное воздействие улучшает качество слитка и в ряде случаев позволяет даже исключить некоторые операции его последующей обработки.

Вторичным элементом могут служить металлические предметы ограниченных размеров, встречающиеся, например, в отходах. Тогда ЛИМ превращается в **электродинамический сепаратор** для их удаления.

Если на поверхность плоского индуктора поместить ферромагнитные частицы, то под действием бегущего над индуктором магнитного поля они начинают вращаться и перемещаются в обратном направлении. Такие индукторы можно применять в горно-металлургическом производстве в качестве самостоятельных устройств или дополнительных узлов в барабанных магнитных сепараторах, гидроциклонах и сгустителях.

Электромагнитные двигатели

В магнито-импульсных установках, предназначенных для очистки бункеров от сыпучих смесей (рис.5.4), используются цилиндрические броневые электромагниты или магниты с Ш-образным сердечником. Они размещаются на стенке бункера и подключаются к заряженному конденсатору. Происходит им-

пульсный разряд конденсатора на катушку магнита, ударная волна распространяется в стенке бункера, очищая ее от налипшей или примерзшей смеси.

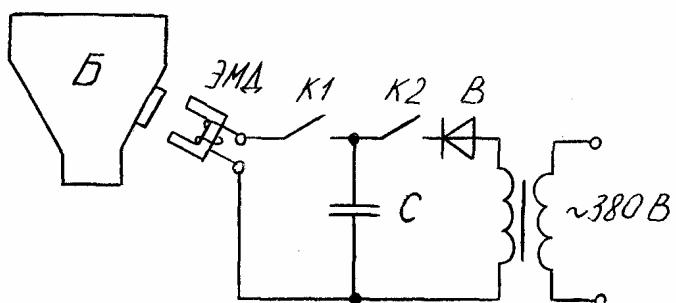


Рис. 5.4. Схема включения магнитоимпульсной установки:

Б – бункер; ЭМД - электромагнитный двигатель; К1, К2 –ключи; С – конденсатор; В - выпрямитель

Для одновременного нагрева и перемешивания жидкостей (например химических или медицинских препаратов) разработан цилиндрический электромагнит, совмещенный с **автоклавом-миксером** (рис.5.5) или встроенный в емкость. В зависимости от того, питается ли он постоянным или переменным током, его якорь-перемешиватель либо только притягивается, либо, в основном, нагревается. Коммутация тока обеспечивает его возвратно-поступательное движение с необходимой частотой, т.е. перемешивает и нагревает жидкость.

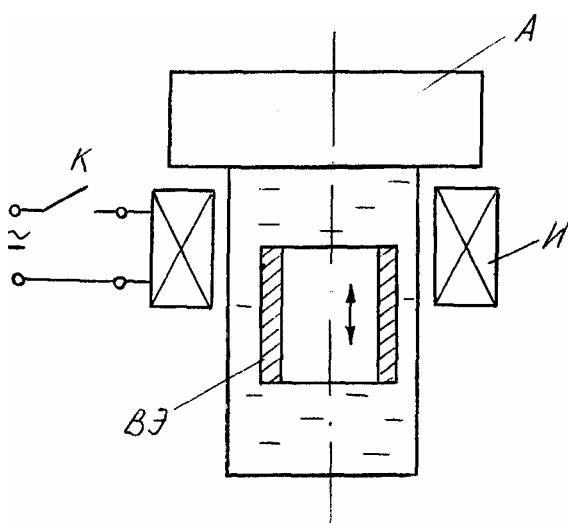


Рис. 5.5. Электромагнитный перемешиватель-нагреватель жидкости: А – автоклав; И – индуктор; ВЭ – вторичный элемент; К - ключ

Начало развития научных исследований электротехнологического направления на энергетическом факультете УПИ относится к 40-50-м годам.

В военное и послевоенное время на факультете работали известные отечественные ученые -электромеханики Г.И.Штурман и П.А.Фридкин, перву которых принадлежат первые теоретические труды о двигателях с разомкнутыми магнитопроводами. Под руководством П.А.Фридкина выполнил дипломную работу по исследованию дугостаторных асинхронных двигателей студент

М.Г.Резин, будущий заведующий кафедрой общей электротехники. С его именем связаны первые значительные публикации, посвященные изучению так называемого продольного краевого эффекта в электрических машинах данного типа.

Научным коллективом, в который входили М.Г. Резин, Я.И. Дробинин, Э.К.Кочнев, а затем Ф.И. Андреев, И.А. Кривонищенко, О.Н. Ермаков, были проведены обширные исследования по электромагнитному перемешиванию жидкого чугуна в ковше и печи. В 60-е годы ведутся интенсивные работы по электромагнитному воздействию на жидкие цветные металлы. Под руководством М.Г.Резина, работавшего доцентом на кафедре электрических машин, выполняются курсовые и дипломные работы по данной тематике, защищаются кандидатские диссертации сотрудниками кафедры общей электротехники Э.К. Кочневым, И.А. Кривонищенко, Б.Н. Васильевым. В 1966 году защищает докторскую диссертацию по этому направлению М.Г.Резин. В 1970 году он возглавляет кафедру общей электротехники, активно продолжая научные исследования. В 70-80-х годах защищают кандидатские диссертации Ю.С.Прудников и Б.А. Сокунов, много сделавшие для промышленного внедрения результатов этих исследований. В настоящее время их усилиями при активном участии А.И. Кривонищенко работы по электромагнитному перемешиванию цветных металлов в кристаллизаторе с помощью короткого цилиндрического индуктора широко внедряются на Кольчугинском, Каменск-Уральском, Ревдинском заводах ОЦМ, в других организациях.

С 1970 года на кафедре общей электротехники и в Нижне-Тагильском филиале УПИ разворачиваются интенсивные работы по исследованию линейных асинхронных двигателей, являющихся второй крупной разновидностью индукционных машин с разомкнутыми магнитопроводами. Главным отличием таких двигателей от обычных вращающихся является наличие краев статора, в результате чего проводники вторичного элемента входят из области, в которой магнитное поле отсутствует (краевая зона), в зону поля (активную) и далее снова выходят из нее. Это порождает в обмотке вторичного элемента дополнительные составляющие токов и потерь мощности, снижает усилие и КПД машины. Совокупность процессов в двигателе, обусловленная наличием краев статора, называют продольным краевым эффектом (ПКЭ). В этой связи исследования проводились по ряду направлений.

Прежде всего, актуальна разработка специальных методов расчета характеристик таких машин, поскольку известные методы не учитывали ПКЭ. Этому вопросу были посвящены диссертационные работы, запущенные в 70-80-х годах сотрудниками и аспирантами кафедры Н.М. Пирумяном (первым аспирантом кафедры по данной тематике), В.С. Проскуряковым, С.В. Иваницким, И.В. Черных. Важной проблемой является задача улучшения характеристик ЛАД, в частности, за счет специальных обмоток индуктора и вторичного элемента. Этой тематике были посвящены диссертационные работы М.Г. Мурджикян,

В.А. Бегалова, С.В. Соболева, Ю.Л. Махорского. Исследования несимметрии магнитной цепи таких двигателей проводились в работах С.В. Иваницкого и Ю.Р. Урманова. Специальные режимы работы двигателя изучались в докторской работе М.В. Юрченко.

Комплекс работ, которые могут быть выделены в самостоятельное направление и освещаются в докторских диссертациях А.Ю. Коняева и затем С.Л. Назарова, связан с исследованием линейных двигателей для перемещения и нагрева металлического проката, а также для электродинамической сепарации металлических предметов из отходов. Применению линейных индукторов с бегущим магнитным полем в обогатительном производстве и утилизации металлургических шламов посвящена докторская диссертация Ю.В. Телешева. Анализ ЛАД как элемента системы электропривода и законов управления им проведен в докторских работах Т.А. Бегаловой, И.В. Черных и А.А. Таланкина.

Перечисленные выше исследования выполнялись кафедрой в рамках работ по созданию промышленного и высокоскоростного наземного транспорта, высокодинамичных электроприводов, эффективных систем обогащения сырья и утилизации отходов по заказам головных организаций по соответствующим проблемам (НПО "Гидротрубопровод", г. Москва; ПО Взрывозащищенного электрооборудования, г.Донецк), а также предприятий и организаций региона (Уралвагонзавод, Ураласбест, Уралэлектротяжлаш, трубопрокатные заводы в Челябинске и Первоуральске и др.).

В последнее время круг разработок кафедры существенно расширился. С начала 80-х годов большие работы выполнялись по МГД-насосам - трансформаторного типа, асинхронным и асинхронно-вихревым. Эти исследования обобщены в докторской диссертации Г.К.Смолина. Разработка методов комплексного анализа электромагнитных, гидро- и термодинамических процессов а также физико-химических свойств расплава в МГД-устройствах (индукционных канальных печах, миксерах-копильниках, насосах и т.п.) посвящены работы О.Ю. Сидорова.

Некоторые интересные применения в практике нашли разработки линейных электродвигателей с совмещением функций нагрева и перемешивания жидкостей (автоклав-миксер для выщелачивания минералов, установки для сенсибилизации и разлива медицинских препаратов), выполненные под руководством Н.М. Пирумяна, а также магнитоимпульсные установки для очистки бункеров и нагревательные приборы на базе продукции Нижне-Тагильского котельно-радиаторного завода, выполняемые А.Н. Кошкиным.

Студенты электротехнических специальностей принимают участие в научных исследованиях кафедры по указанной тематике под руководством ведущих преподавателей.

ФОРМЫ научно-исследовательской работы студентов сводятся преимущественно к следующим:

- знакомство со специальной литературой, в том числе и иностранной, в рамках подготовки РЕФЕРАТОВ;
- составление простых вычислительных программ для расчета характеристик ЭТУ, освоение готовых программных продуктов, доработка и развитие программных средств, созданных на начальных стадиях и другими авторами, в рамках УЧЕБНОЙ ПРАКТИКИ;
- разработка специальных ЭТУ, математическое моделирование различных режимов их работы, разработка средств их математического и физического моделирования в рамках КУРСОВОГО и ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ;
- участие в разработке, изготовлении и наладке конкретных образцов ЭТУ по заказам организаций, в том числе в рамках ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРАКТИКИ;
- подготовка отчетов по теме докладов, публикаций, в том числе в рамках МАГИСТРАТУРЫ.

Перечисленные формы творчества студентов охватывают весь цикл обучения и практически весь спектр дисциплин, обеспечивающих процесс освоения ими специальности 18.05.00. Последовательность перечисления этих форм отражает как тенденцию их содержательного усложнения, так и в значительной степени очередь их использования в процессе обучения.

6. УЧЕБНО-ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

В соответствии со спецификой дисциплины учебно-лабораторный практикум имеет целью ознакомить студентов с принципом действия и устройством ряда электротехнологических установок, а также, в большей степени, с характером задач по их разработке, исследованию и испытаниям, которые им придется решать в практической деятельности.

6.1. Ознакомление с устройством, управлением и испытаниями бытового электронагревательного прибора

На примере электроконвектора "Комфорт Э" производства Нижнетагильского котельно-радиаторного завода предлагается:

- ознакомиться с устройством, принципом действия, методами расчета нагревателя;
- ознакомиться с принципом регулирования температуры прибора и устройством его терморегулятора;
- снять экспериментально зависимость температуры от времени (по заданию преподавателя);
- ознакомиться с программой и методами испытания. По окончании работы оформляется краткий отчет с рисунком прибора, схемами включения, текстовым описанием результатов изучения, расчетов и испытаний.

6.2. Ознакомление с гибкой автоматизированной системой управления технологическим процессом

На примере термической печи с тремя электронагревателями рассматриваются принципы управления технологическим объектом с помощью управляющей микроЭВМ. Программа исследований и методические указания к проведению лабораторной работы приведены в [13].

6.3. Ознакомление с установками индукционного нагрева и плавки металлов

В программу данной работы входит прежде всего знакомство с литературой по индукционному нагреву и плавке металлов [2,3], которое сопровождается составлением краткого реферата по теме с классификацией установок данного типа.

Вторая часть работы сводится к ознакомлению с расчетом электромагнитного поля в сплошном проводящем цилиндре при его индукционном нагреве [12]. Предлагается построить кривые распределения объемной плотности потерь от вихревых токов по глубине цилиндра, а также рассчитать активную мощность потерь от вихревых токов в участке цилиндра длиной l , активное сопротивление и индуктивность индуктора.

6.4. Ознакомление с установками электромагнитного перемешивания и транспортирования металлических расплавов

Предлагается ознакомиться с литературным обзором по МГД-насосам, а также с конструкцией лабораторной установки. Программа испытания насоса предусматривает:

- составление схемы включения насоса и электроизмерительных приборов;
- измерение напора (тягового усилия) при различных токах питания;
- оформление краткого отчета по выполненной работе.

6.5. Ознакомление с устройством линейных асинхронных двигателей

Программа работы включает в себя знакомство с литературой по данному разделу и конструкциями двигателей лабораторной установки. Предлагается дать краткий обзор применениям таких двигателей в различных областях техники. Программа испытаний предусматривает:

- составление схемы включения двигателя;
- запуск двигателя;
- измерение усилия в режиме заторможенного вторичного элемента.

По результатам работы следует оформить краткий отчет.

Помимо указанных выше работ, так или иначе связанных с исследованием физических моделей, предусматривается практикум, связанный с исследованием математических моделей. Он сводится либо к ознакомлению с имеющимися вычислительными программами, либо к составлению достаточно простых соб-

ственных программ. В любом случае предполагается использование этих программ для конкретных расчетов.

Расчет тока в электрической цепи магнитоимпульсной установки

Предлагается составить схему заряда конденсатора с дальнейшим его разрядом на катушку электромагнита, записать дифференциальное уравнение для цепи разряда, вычислить его коэффициенты. На следующем этапе возможно или ознакомиться с вычислительной программой, или составить собственную. На заключительной стадии нужно отладить программу на ЭВМ и просчитать контрольные варианты. Данную работу следует совместить с изучением устройства реальной магнитоимпульсной установки по предложенной литературе.

Расчет на ЭВМ линейных электрических цепей

Предлагается изучить [10] с точки зрения общего формализованного подхода к расчету линейных электрических цепей постоянного тока и построению алгоритмов вычислительной программы. Затем следует освоить приведенную программу, набрать и отладить ее на ЭВМ, просчитать контрольный пример.

Тепловой расчет ЭТУ на основе тепловой схемы замещения

Предлагается изучить предлагаемую литературу по использованию тепловых схем замещения для расчета температур отдельных частей ЭТУ (на примере ЛАД). Для конкретного примера следует вычислить коэффициенты системы "тепловых" уравнений, описывающей тепловые процессы в ЛАД. Далее нужно разобраться с программой решения системы уравнений, вводом данных и порядком расчета температур в функции времени. В заключение следует решить контрольный пример. Следует особо отметить, что работа над вычислительными программами едва ли уложится в рамки отведенного учебным планом времени. Она может выполняться в счет практических заданий по другие дисциплинам (вычислительной техники, теоретических основ электротехники, моделирования ЭТУС и др.) после соответствующего согласования

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите установки прямого и косвенного электрического нагрева.
2. Напишите формулы расчета нагревательных элементов.
3. В чем заключаются особенности устройства для обогрева инфракрасными лучами?
4. Как осуществляется электрошлаковый переплав металла?
5. Как производится контактная сварка металлов?
6. На чем основан индукционный нагрев металла?

7. От каких величин зависит глубина проникновения тока в глубь металла при его индукционном нагреве?
8. Чем отличаются установки сквозного и поверхностного индукционного нагрева металла?
9. Как устроена индукционная тигельная печь?
10. Опишите устройство и принцип действия индукционной канальной печи.
11. Поясните принцип высокочастотного диэлектрического нагрева.
12. Где применяются установки инфракрасного излучения?
13. Опишите устройство дуговой сталеплавильной печи.
14. Для чего применяются и как устроены вакуумные дуговые печи?
15. Поясните принцип действия и устройство плазмотрона.
16. Как регулируется ток в установках дуговой электрической сварки?
17. Поясните принцип действия и устройство электроннолучевой установки.
18. Опишите устройство лазера и лазерной установки.
19. В чем заключается процесс электролиза?
20. Поясните устройство и принцип действия магнито-импульсной установки.
21. Как устроен магнитострикционный преобразователь?
22. Опишите устройство ультразвуковой установки для очистки деталей.
23. Как устроен электростатический фильтр?
24. Поясните принцип действия установки для окраски изделий в электростатическом поле.
25. В чем заключаются особенности электромеханического оборудования ЭТУ?
26. Каковы особенности электроснабжения (электропитания) ЭТУ?
27. Объясните принцип действия симметрирующего устройства при включении однофазной нагрузки в трехфазную сеть.
28. Опишите схему питания вакуумной дуговой печи.
29. Что такое параметрический источник питания?
30. Какие элементы входят в состав короткой сети дуговой печной установки?
31. Поясните назначение и принцип действия регулятора мощности дуговой сталеплавильной печи.
32. Как регулируется ток транзисторного преобразователя в установках аргонно-дуговой сварки?
33. Опишите схему питания электролизных ванн от управляемого тиристорного выпрямителя.
34. Поясните принцип импульсного регулирования температуры нагревательной печи.
35. Поясните работу импульсных релаксационных генераторов для питания установок электрохимической обработки.
36. В чем заключается принцип аналогии различных физических явлений?
37. Какими уравнениями описывается тепловое поле?

38. Что такое математическая модель цепи?
39. Назовите некоторые методы решения систем уравнений.
40. Опишите устройство МГД-насоса трансформаторного типа.
41. Что лежит в основе работы линейного асинхронного двигателя?
42. Как устроен индукционный МГД-насос?

Библиографический список.

1. Учебные программы по специальности "АЭТУС". М.: МЭИ, 1980. 175с.
2. Болотов А.В., Шепель Г.А. Электротехнологические установки: Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1988. 336с.
3. Электротехнологические промышленные установки: Учебное пособие. / Под ред. А.Д.Свенчанского. М.: Энергоатомиздат, 1982. 398с.
4. Древс Г.В., Древс Ю. Г. Электрооборудование предприятий пищевой промышленности: Учебник. М.: Высшая школа, 1979. 272с.
5. Свенчанский А.Д., Соколов М.М. Плавильные и нагревательные печи: Учебное пособие по курсу "Введение в специальность". М.: МЭИ, 1984. 88с.
6. Соколов М.М., Грасевич В.Н. Электрооборудование механизмов электротермических установок. М.: Энергоатомиздат, 1983. 320с.
7. Помещиков А.Г. Установки специального нагрева для электрометаллургии (вакуумные дуговые и электрошлаковые печи): Учебное пособие. Новосибирск: Новосиб. электротехн. ин-т, 1989. 56с.
8. Перфильев Ю. С., Даничев А.М., Овсянников В. И. Математические основы электротехнических дисциплин: Учебное пособие для студентов электротехнических специальностей. Красноярск: КГТК, 1984. 87с.
9. Чередниченко В.С., Герман Р.П., Еременко Г.П. Моделирование электротехнологических установок: Учебное пособие. Новосибирск: Новосиб. электротехн. ин-т, 1990, 70с.
10. Сарапулов Ф.Н., Телешев Ю.В. Топологические методы расчета на ЭВМ линейных электрических цепей: Методические указания по курсу "Вычислительная техника". Свердловск: УПИ, 1987, 44с.
11. Волков Ю. Г., Гладышев С.П., Завьялов В. И. Машиноориентированные методы расчета нелинейных цепей: Учебное пособие. Челябинск: ЧГТУ, 1990. 46с.
12. Валек В.Н., Виницкий А.Л., Янко-Триницкий А.А. Расчет электромагнитных полей в магнитопроводах: Методические указания и расчетно-графические работы по курсу "Теоретические основы электротехники". Свердловск: УПИ, 1986. 40с.
13. Удинцев В.Н., Назаров С.Л., Масленникова А.М. Цифровые и импульсные устройства электронной техники: Методические указания к лабораторным работам по курсу "Электротехника и основы электроники". Свердловск: УПИ, 1986. 43с.
14. Сарапулов Ф.Н., Сидоров О.Ю. Магнитогидродинамические машины с бегущим или пульсирующим магнитным полем: Учебное пособие. Екатеринбург: УПИ, 1984. 205 с.
15. Коняев А.Ю. , Юрченко М.В. Электродинамические сепараторы для извлечения цветных металлов из твердых отходов / Промышленная энергетика, №10, 1992. С.46-48.
16. Веселовский О.Н., Шнейберг Я. А. Очерки по истории электротехники. М.: Изд. МЭИ, 1983. 252с.
17. Электротехника: Учебник для неэлектротехнич. спец. вузов / Х. Э. Зайдель, Б. В. Коган-Далин, В. В. Крылов и др. Под ред. В.Г. Герасимова, 3-е изд.,

перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1985. 480с.

18. Филиппов И. Ф. Теплообмен в электрических машинах: Учебное пособие для вузов. Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1986. 256с.

19. Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей / Пер. с англ. М.: Энергия, 1970. 376с.

20. Туровский Я. Электромагнитные расчеты элементов электрических машин: Пер. с польск. М.: Энергоатомиздат, 1986. 200с.

21. Веселовский О.Н., Коняев А.Ю., Сарапулов Ф.Н. Линейные асинхронные двигатели. М.: Энергоатомиздат, 1991. 256с.

22. Магнитодинамические насосы для жидких металлов / Б. П. Полищук, М. Р. Цин, Р. К. Горн и др. Киев: Наукова думка, 1989. 256с.

23. А. с. П9642 СССР. МГД-сепаратор / Г.К. Смолин // Открытия, изобретения. 1985. №21.

24. Кривонищенко А. И., Прудников С.Ю. , Сокунов Б. А. Исследование устройств для электромагнитного воздействия на металлы // Электрические машины и электромашинные системы. Пермь: ПГТУ, 1993. С.71-81.

Приложение 1.

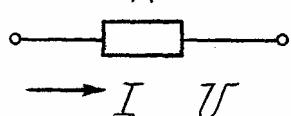
ПРОСТЫЕ ЗАДАЧИ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЙ

Ниже приводятся некоторые упрощенные практические задачи, знакомство с которыми полезно начинающим студентам-электротехнологам.

1. Расчет мощности электронагревательного элемента с заданными размерами спирали 3 (рис. 3.5)
- 2.

Заданы: удельное сопротивление ρ , длина l и сечение s провода, приложенное напряжение U .

Решение:



$$\text{сопротивление элемента } R = \frac{\rho \cdot l}{s}, \quad (\text{П1})$$

$$\text{мощность } P = I^2 \cdot R = \frac{U^2 \cdot s}{R} = \frac{U^2 \cdot s}{\rho \cdot l}. \quad (\text{П2})$$

Например, при $\rho = 1 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$ (нихром)... $l = 2 \text{ м}$, $s = 0.05 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ имеем $R = 40 \Omega$, $P = 1.2 \text{ кВт}$.

2. Расчет размеров электронагревательного элемента заданной мощности

Заданы: мощность P , коэффициент теплоотдачи, например, $P_F = (1 \dots 3) \text{ Вт/см}^2$.

Решение: в установившемся режиме отдаваемая и выделяющаяся в элементе мощности равны (задача I):

$$P = P_F \cdot F, \quad (\text{П3})$$

где F - поверхность теплоотдачи.

Перемножим (П2) и (П3):

$$P^2 = U^2 \cdot s \cdot P_F \cdot \frac{F}{P} \cdot l. \quad (\text{П4})$$

Для прямоугольного провода $F = 2a \cdot l \cdot (1 + \delta)$ и $s = \delta \cdot a^2$, где задаем

$$\delta = \frac{b}{a}. \text{ Тогда из (П4)}$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{P^2 \cdot \rho}{2 \cdot U^2 \cdot P_F \cdot \delta \cdot (1 + \delta)}}. \quad (\text{П5})$$

Для провода с круглым сечением $F = \pi \cdot d \cdot l$ и $s = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$. Тогда из (П4)

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot P^2 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot U^2 \cdot P_F}}. \quad (\text{П6})$$

Из (П2)

$$l = U^2 \cdot \frac{s}{P} \cdot \rho. \quad (\text{П7})$$

Например, при $P = 1.2 \text{ кВт}$, $\rho = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $P_F = 2 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$, $U = 220\text{В}$ имеем $d = 0.84 \text{ мм}$, $l = 22.3 \text{ м}$.

3. Расчет мощности, необходимой для нагрева металла в печи

Заданы: масса металла G , удельная теплоемкость металла C_p , разность температур при нагреве Δt^0 , время нагрева ΔT , тепловой КПД печи η_t .

Решение: потери тепла при нагреве учитываем приближенно, вводя η_t , тогда

$$P = \frac{C_p \cdot G \cdot 10^3}{860 \cdot \eta_t} \cdot \frac{\Delta t^0}{\Delta T}. \quad (\text{П8})$$

Например, для алюминия $C_p = 0.26 \text{ ккал/(кг С)}$. При $G = 4 \text{ т}$, $\Delta t^0 = 10^\circ\text{С}$, $\Delta T = 1 \text{ час}$, $\eta_t = 1$ имеем $P = 120 \text{ кВт}$.

4. Расчет тока в канале индукционной канальной печи (рис. 3.8)

Заданы: размеры канала - ширина a_k , высота h_k , длина l_k , мощность P .

Решение: если не учитывать эффект вытеснения тока к периферии сечения канала, что справедливо при малой частоте питающего напряжения, то сопротивление канала по (П1)

$$R = \frac{\rho \cdot l_k}{a_k \cdot h_k}. \quad (\text{П9})$$

С учетом (П2) и (П9) имеем для тока в канале

$$I_k = \sqrt{\frac{P}{R}}. \quad (\text{П10})$$

Например, для алюминия (задача 3) $\rho = 30 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, при $l_k = 2 \text{ м}$, $a_k = h_k = 0.1 \text{ м}$ имеем $R = 30 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{2}{0.1 \cdot 0.1} = 6 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$ и $I_k = \sqrt{\frac{120 \cdot 10^3}{6 \cdot 10^{-5}}} \approx 45 \text{ кА}$

5. Расчет числа витков индуктора канальной печи (задача 4)

Заданы: ток в канале I_k , ток индуктора (вторичный ток печеного трансформатора, от которого питается индуктор) I_H .

Решение: используем известное приближенное равенство ампер-витков (магнитодвижущих сил) первичной и вторичной обмоток любого трансформатора, т.е. индуктора и канала в нашем случае, причем канал представляет собой один виток

$$I_H \cdot w_H = I_k \cdot 1, \quad (\text{П11})$$

тогда

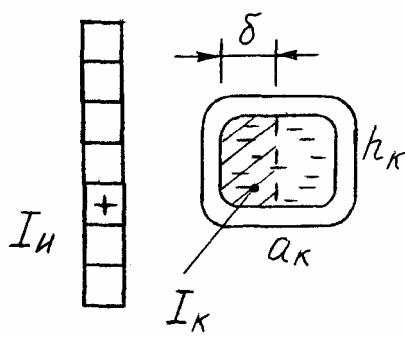
$$w_H = \frac{I_K}{I_H}. \quad (\text{П12})$$

Например, если $I_K = 45$ кА, $I_H = 1.5$ кА, то $W_H = 30$.

б. Расчет мощности, выделяющейся в канале печи, при известном токе (задача 4) и учете его вытеснения к периферии сечения

Заданы: размеры канала, частота питающего напряжения f , относительная магнитная проницаемость металла μ .

Решение: глубина проникновения тока в глубь канала



$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{f \cdot \mu}}. \quad (\text{П13})$$

Сопротивление канала

$$R_b = \frac{l_k}{503h_k} \sqrt{\rho \cdot f \cdot \mu \cdot \mu_0}. \quad (\text{П14})$$

С учетом (П2) и (П14)

$$P_b = R_b \cdot I_k^2 = 2 \cdot 10^{-6} \cdot I_k^2 \sqrt{\rho \cdot f \cdot \mu \cdot \mu_0} \cdot F_{пл.ц} \cdot \frac{l_k}{h_k}, \quad (\text{П15})$$

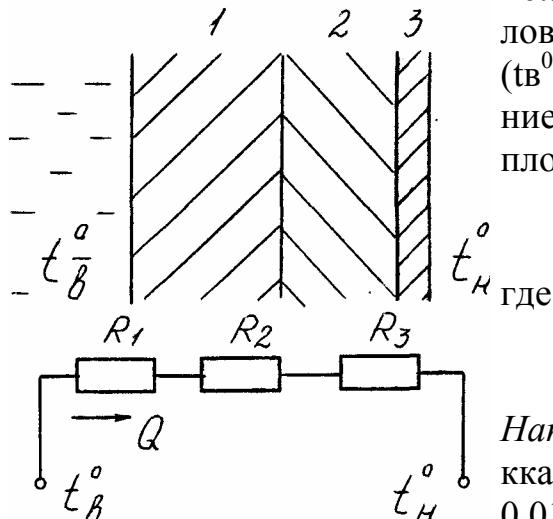
где $F_{пл.ц}$ берется по графикам [5].

Например, если $I_K = 45$ кА, $\rho = 30 \cdot 10^8$ Ом м, $f = 50$ Гц, $\mu = 1$, $l_k = 2$ м, $h_k = 0.1$ м, $F_{пл.ц} = 1$ (из графика [5]), то

$$P_b = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 45^2 \cdot 10^6 \sqrt{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 30 \cdot 10^{-8} \cdot 50} \cdot \frac{2}{0.1} = 313.71 \text{ кВт.}$$

7. Расчет потерь тепла через стенку печи

Заданы: теплопроводности трех слоев стенки - огнеупора λ_1 , теплоизоляции λ_2 , металлического корпуса λ_3 толщины слоев соответственно Δx_1 , Δx_2 , Δx_3 , температура металла в печи t_b^0 , температура наружного воздуха t_n^0 , суммарная площадь стенки s .



Решение: для установившегося режима тепловой поток Q связан с разностью температур ($t_{B}^0 - t_{H}^0$) суммарным тепловым сопротивлением R в соответствии с законом Ома для тепловой цепи

$$Q = \frac{(t_{B}^0 - t_{H}^0)}{R}, \quad (\text{П16})$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = \sum_{i=1}^3 \frac{\Delta x_i}{\lambda_i \cdot s}. \quad (\text{П17})$$

Например, при $\lambda_1 = 0.985$, $\lambda_2 = 0.43$, $\lambda_3 = 200$ ккал/(м·ч·°C); $\Delta x_1 = 0.1$, $\Delta x_2 = 0.04$, $\Delta x_3 = 0.01$ м.; $t_{B}^0 = 720$ °C, $t_{H}^0 = 50$ °C, $s = 12.6$ м².

Тогда

$$R = \frac{1}{12.6} \cdot \left(\frac{0.1}{0.985} + \frac{0.04}{0.34} + \frac{0.01}{200} \right) = 0.017 \frac{\text{ч} \cdot \text{C}}{\text{ккал}},$$

$$Q = 39.4 \cdot 10^3 \frac{\text{ккал}}{\text{ч}}.$$

8. Расчет емкости С компенсирующих конденсаторов индукционной печи

Заданы: активная мощность печи P , $\cos\varphi$, напряжение U , частота питающего тока f .

Решение: поскольку мощность конденсаторов должна полностью компенсировать реактивную мощность Q печи (ИП) находим последнюю как

$$S = U \cdot I = \frac{P}{\cos\varphi}, \quad (\text{П18})$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi = P \cdot \tan\varphi = \frac{U^2}{X_C}, \quad (\text{П19})$$

$$\text{откуда } X_C = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot f \cdot C = \frac{U^2}{Q}$$

$$\text{И } C = \frac{Q}{2\pi \cdot f \cdot U^2}. \quad (\text{П20})$$

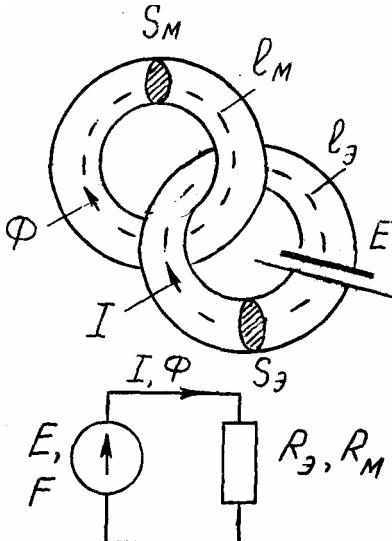
Например, при $P = 270$ кВт, $U = 380$ В, $\cos\varphi = 0.44$, $f = 50$ Гц получаем

$$Q = P \cdot \tan\varphi = 550 \text{ кВАр},$$

$$C = \frac{550 \cdot 10^9}{2 \cdot 50 \cdot 380^2} = 12300 \text{ мкФ}$$

9. Установление аналогий электрической и магнитной цепей

Заданы: размеры токо- и магнитопровода (сечения $S_{\text{э}}$ и $S_{\text{м}}$, длины $l_{\text{э}}$ и $l_{\text{м}}$),



а также удельная электропроводность у электрической и магнитная проницаемость μ магнитной цепи.

Решение: схема замещения цепей имеет простейший вид.

Таблица аналогий

Эл.цепь	$S_\text{э}$	$l_\text{э}$	γ	$R_\text{э}$	I	E
Маг.цепь	S_M	l_M	μ	R_M	Φ	$F=Iw$

$$\text{Электрическое } R_\text{э} = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{l_\text{э}}{S_\text{э}} \text{ и магнитное } R_M = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{l_M}{S_M}$$

сопротивления, ток I и магнитный поток Φ , ЭДС E и МДС (ампервитки) $F = Iw = I$ (при числе витков катушки $w = 1$).

$$\text{Закон Ома } E = IR_\text{э} \text{ и } F = \Phi R_M. \quad (\text{П21})$$

10. Расчет усилия F притяжения якоря и ампервитков электромагнита

Заданы: длина ферромагнитного участка магнитопровода l_c и зазора δ , магнитная проницаемость стали $\mu_0 \mu$ и воздуха $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м, ток I и число витков катушки w, сечение магнитопровода S_M .

Решение: магнитное сопротивление

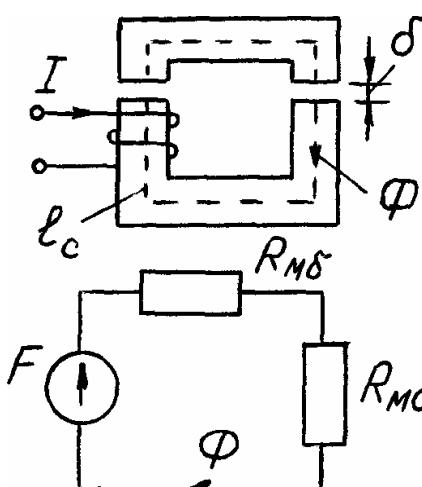
$$R_M = R_{MC} + R_{M\delta} = \frac{l_c}{\mu \mu_0 \cdot S_M} + \frac{2\delta}{\mu_0 \cdot S_M} = \frac{2\delta}{\mu_0 \cdot S_M} \left(1 + \frac{l_c}{2\delta\mu}\right), \quad (\text{П22})$$

магнитный поток и индукция

$$\Phi = \frac{I \cdot w}{R_M}, B = \frac{\Phi}{S_M}. \quad (\text{П23})$$

Усилие притяжения

$$F = 2 \cdot S_M \cdot \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{w^2}{\mu_0 \cdot R_M^2 \cdot S_M} \cdot I^2. \quad (\text{П24})$$



Например, при $\delta = 10^{-3}$ м, $l_c/2\delta = 100$, $\mu = 1000$, $B = 1$ Тл, $S_M = 1 \times 10^{-4}$ м². получаем

$$F = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 80 \text{ Н,}$$

$$Iw = \frac{B \cdot 2\delta}{\mu_0} = \frac{1 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 1.6 \text{ кА.}$$

При $w = 100$ имеем

$$I = 16 \text{ А.}$$

11. Расчет индуктивности L катушки электромагнита

Заданы: размеры и μ сердечника, число витков (задача 10).

Решение: по закону электромагнитной индукции ЭДС в катушке

$$e = -w \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (\text{П25})$$

или через коэффициент самоиндукции L

$$e = -L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (\text{П26})$$

Из сравнения (П25) и (П26) с учетом (П23) имеем

$$L = \frac{w \cdot \Phi}{i} = \frac{w^2 \cdot \Phi}{i \cdot w} = \frac{w^2}{R_M} \quad (\text{П27})$$

Например, для магнита в задаче 10 получаем

$$R_M = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 10^{-4}} \cdot (1 + 0.1) = 0.17 \cdot 10^8 \frac{1}{\text{Гн}},$$

$$L = \frac{10^4}{0.17 \cdot 10^8} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}.$$

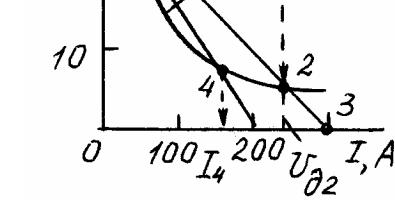
12. Расчет тока в цепи с электрической дугой

Заданы: напряжение источника питания U_H , сопротивление R в цепи, зависимость напряжения на дуге от тока в ней (вольтамперная характеристика - ВАХ) $U_d = f(I)$.

Решение: по второму закону Кирхгофа

$$U_d = U_H - I \cdot R \quad (\text{П28})$$

Правая часть (П28) называется "опрокинутой" вольтамперной характеристикой сопротивления R , она изображается прямой ОХ, т. 1 которой имеет координаты $(0, U_H)$, а т. 3 – $(\frac{U_H}{R}, 0)$. Т. 2 пересечения ВАХ и ОХ дает решение задачи.



ВАХ и ОХ дает решение задачи.

Например, в соответствии с рисунком $U_H = 30 \text{ В}$, $R = 0.1 \Omega$, $I_3 = 30/0.1 = 300 \text{ А}$, $I_2 = 230 \text{ А}$, $U_{d2} = 6 \text{ В}$.

13. Расчет добавочного сопротивления R в цепи с дугой при заданном токе

Заданы: ВАХ дуги, U_H , I_4 (задача 12).

Решение: определяем U_{d4} по графику ВАХ для I_4 .

Находим сопротивление $R = \frac{(U_H - U_{d4})}{I_4}$.

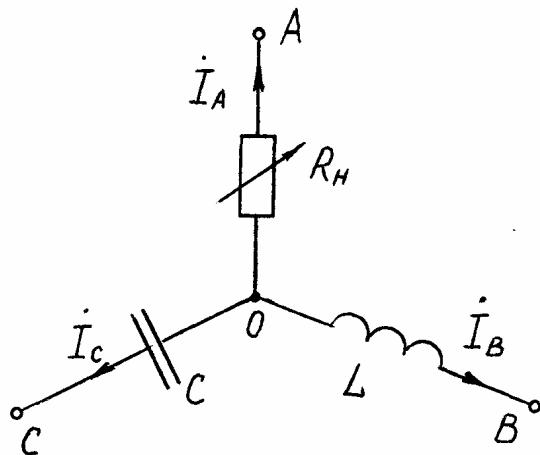
Например, $I_4 = 160 \text{ A}$, тогда $R = (30 - 8)/160 = 0.14 \text{ Ом}$.

14. Расчет тока активной нагрузки (печи) при ее включении на параметрический источник тока

Заданы: $X_L = X_c = X$ в фазах В и С, линейное напряжение $U_{\text{Л}}$.

Решение: номинальный режим иллюстрируется векторной диаграммой I,

$$I_A = 2I_B \cdot \cos 30^\circ = 2 \left(\frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3} \cdot X} \right) \cdot \cos 30^\circ = \frac{U_{\text{Л}}}{X}.$$



При $R_H \rightarrow \infty$ (диаграмма 2)

$$I_A = 2I_B = 2 \cdot \frac{U_{\text{Л}}}{2 \cdot X} = \frac{U_{\text{Л}}}{X}.$$

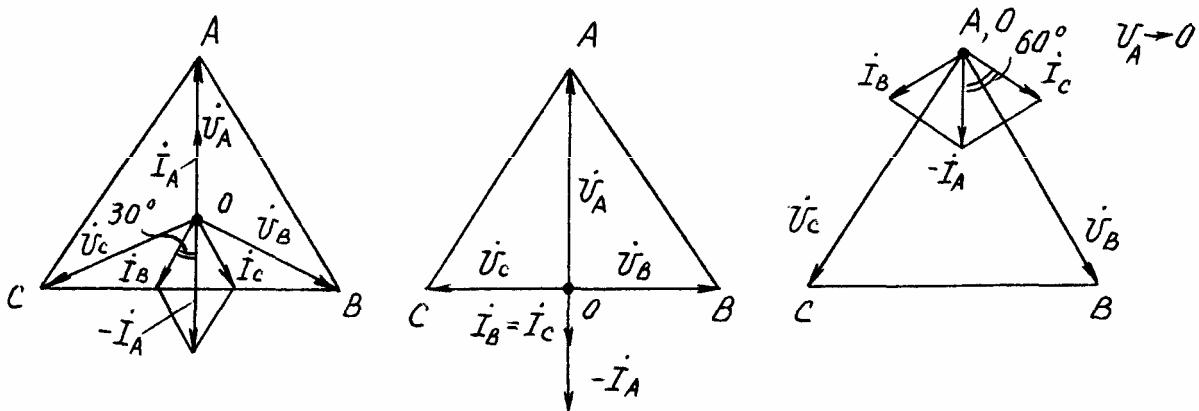
При $R_H \rightarrow 0$ (диаграмма 3)

$$I_A = 2I_B \cdot \cos 60^\circ = 2 \cdot \frac{U_{\text{Л}}}{2 \cdot X} = \frac{U_{\text{Л}}}{X}.$$

1

2

3



15. Расчет температуры металла в печи при заданной мощности (задачи 3, 7)

Заданы: мощность Р, тепловое сопротивление (для потерь тепловой

мощности) R, масса металла G, удельная теплоемкость металла Cp.

Решение: запишем уравнение теплового баланса, в соответствии с которым сумма потерь тепловой мощности через стенки печи, а также поглощаемой металлом при его нагреве, равна выделяющейся в канале мощности от тока в нем

$$860 \cdot P = \frac{\tau^0}{R} + C \cdot \frac{d\tau^0}{dt}. \quad (\text{П29})$$

После преобразований

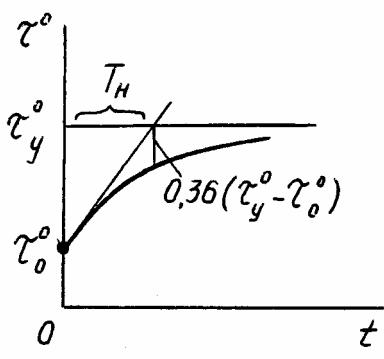
$$\tau^0_{yct} = \tau^0 + T_H \cdot \frac{d\tau^0}{dt}, \quad (\text{П30})$$

где $\tau^0_{yct} = t^0_{yct} - t^0_H = 860 \cdot R \cdot P$ - установившееся превышение температуры металла над температурой снаружи печи (при $t \rightarrow \infty$), $T_H = RC$ - постоянная нагрева, $C = CpG$ - теплоемкость металла.

Решение уравнения

$$\tau^0 = \tau^0_{yct} - (\tau^0_{yct} - \tau^0_0) \cdot e^{-\frac{t}{T_H}}, \quad (\text{П31})$$

где τ^0_0 - начальное превышение температуры металла (при $t = 0$).



Например, при $R = 0.017 \text{ ч } ^\circ\text{C}/\text{ккал}$, $P = 120 \text{ кВт}$. $G = 4 \text{ т}$, $Cp = 0.26 \text{ ккал}/(\text{кг } ^\circ\text{C})$ получаем $\tau^0_{yct} = 8600 \cdot 0.017 \cdot 120 = 1700^\circ\text{C}$, $T_H = R \cdot Cp \cdot G = 0.017 \cdot 0.26 \cdot 4000 = 17 \text{ ч}$.

Примечание: легко видеть, что при установившемся режиме ($\frac{d\tau^0}{dt} = 0$) получаем задачу 7, а при нагреве металла в отсутствие потерь - задачу 3.

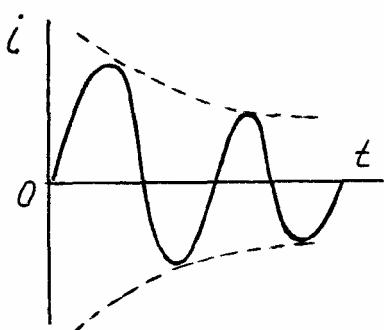
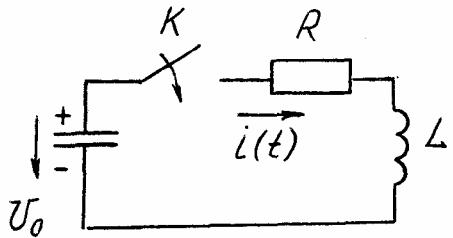
16. Расчет тока разряда конденсатора на электромагнит в магнитоимпульсной установке (задача 10)

Заданы: начальное напряжение на конденсаторе U_0 , сопротивление R , индуктивность L и емкость C .

Решение: по второму закону Кирхгофа

$$U_C + R_i + L \cdot \frac{di}{dt} = 0, \quad (\text{П32})$$

причем $i = C \cdot \frac{dU_C}{dt}$. (П33)



$$\frac{d^2i}{dt^2} + 2\delta \cdot \frac{di}{dt} + \omega_0^2 i = 0, \quad (\text{П34})$$

где $\delta = \frac{R}{2L}$, $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}}$.

Решение (П34)

$$i = A_1 \cdot e^{P_1 t} = A_2 \cdot e^{P_2 t}, \quad (\text{П35})$$

где P_1 и P_2 – корни характеристического уравнения

$$p^2 + 2\delta \cdot p + \omega_0^2 = 0, \quad (\text{П36})$$

откуда $p_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$.

При $\delta < \omega_0$ имеем колебательный зату-

хающий процесс

$$i = \frac{U_0}{\omega_{CB} \cdot L} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin \omega_{CB} t, \quad (\text{П37})$$

где $\omega_{CB} = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$.

Усилие магнита по (П24)

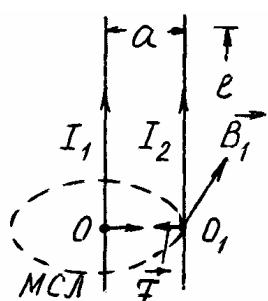
$$F = \frac{w^2}{\mu_0 \cdot R_M^2 \cdot S} \cdot i^2. \quad (\text{П38})$$

17. Расчет сил взаимодействия токов

Заданы: токи в проводах I_1 и I_2 , расстояние между проводами a , длина провода l .

Решение:

а) Индукция в точке O_1 от тока I_1 по закону полного тока для магнитной силовой линии (МСЛ)

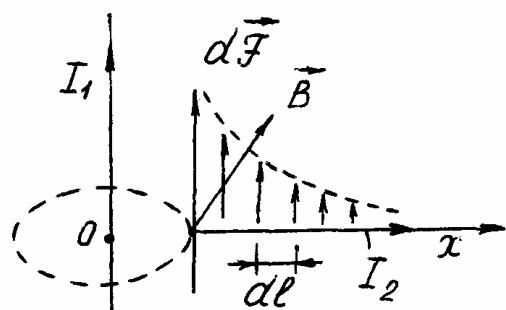


$$B_1 = \frac{\mu \mu_0 \cdot I_1}{2\pi \cdot a}. \quad (\text{П39})$$

Сила Ампера, действующая на параллельный проводник длиной l с током I_2 , равна

$$F = I_2 \cdot B_1 \cdot l_2 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \mu \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l}{2\pi \cdot a}. \quad (\text{П40})$$

Ее направление определяется по правилу левой руки.



б) Провод с I_2 согнут под углом 90° . Тогда сила, действующая на отрезок провода длиной d_1

$$dF = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi \cdot X} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot d_1. \quad (\text{П41})$$

Приложение 2

ВВЕДЕНИЕ В ИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО И СПЕЦИАЛЬНОСТЬ

УЧЕБНЫЙ ПЛАН

часы

5 семестр	
Лекции	14
Разделы для самостоятельного изучения	14
Лабораторные занятия	14
Учебный практикум	12
Реферат	—
Зачет	—
Самостоятельная работа	12

1. ВВЕДЕНИЕ

Целью дисциплины является ознакомление студентов с системой высшего образования в России, с особенностями учебного процесса в УГТУ, с особенностями инженерного дела и специальности в электротехнологической отрасли промышленности, формирование творческого подхода к проблемам инженерного дела, связанным с технологической перестройкой современного промышленного производства, с комплексным техническим, экономическим, социальным и экологическим характером задач, решаемых современным инженером.

В процессе изучения дисциплины студент должен освоить общие физические закономерности, лежащие в основе действия современных автоматизированных электротехнологических установок и систем, примерный круг наиболее актуальных проблем в разработке, проектировании и эксплуатации электротехнологических установок; получить представление об общих связях специальности и задач, решаемых в процессе изучения в вузе общеинженерных и общеобразовательных дисциплин.

В целях стимулирования самостоятельной работы студентов часть учебного материала выносится для самостоятельной проработки под руководством преподавателя.

Контроль текущей работы осуществляется путем защит отчетов по лабораторным работам, защит рефератов, собеседования при приеме зачета по дисциплине.

2. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

2.1. Содержание лекций

2.1.1. Подготовка инженера в вузе (2 часа)

Задачи подготовки инженера в России в современных условиях. Задачи высшей школы.

УГТУ-УПИ - крупнейший технический университет страны. Научные школы и традиции УГТУ-УПИ. Факультеты УГТУ-УПИ - организаторы учебной работы. Научная и учебная работа кафедр. Кафедра электротехники и электротехнологических систем, ее история. Научная и общественная работа студентов на факультете и кафедре. Роль электроэнергетики и электротехнологии в решении задач технологической перестройки промышленного производства в стране.

2.1.2. Технические объекты и физико-математические основы специальности (6 часов)

Обзор физических законов и процессов, лежащих в основе электротехнологии. Электродинамика и принципы индукционного нагрева конструкционных материалов. Электрофизика и проблемы дугового, плазменного, электроннолучевого, ионного и лазерного видов нагрева в современных электротехнологических установках. Математические методы в электротехнологии. Методы решения технических задач в инженерной практике по электротехнологии. Методы математического моделирования объекта. Методы и цели эксперимента при исследовании и наладке электротехнологических установок. Основные этапы разработки и создания нового электротехнологического объекта (установки, узла, системы).

2.1.3. Основные общепромышленные проблемы специальности и задачи специалиста при их решении (2 часа)

Экономические, социальные и экологические задачи специальности в соответствии с постановкой проблемы промышленного производства в государственных документах. Проблемы повышения производительности труда, качества производственного процесса, бережливого использования трудовых, материальных и сырьевых ресурсов страны.

Связь указанных проблем с задачами, решаемыми специалистами в области электротехнологии.

2.1.4. Виды инженерной деятельности и их характеристика (4 часа)

Разработка и проектирование новых видов автоматизированных элек-

протехнологических установок и систем (АЭТУС). Труд инженера-проектировщика, инженера-конструктора, инженера-исследователя. Эксплуатация АЭТУС. Особенности эксплуатации АЭТУС в отраслях народного хозяйства. Труд и задача инженера при эксплуатации современных АЭТУС в промышленности.

Производство АЭТУС. Общая характеристика заводов электротермического и электротехнологического оборудования. Организация производства. Особенности технологии производства АЭТУС.

2.1.5. Библиотековедение (2 часа)

Организация работы научно-технической библиотеки, книжные фонды, их структура. Библиотечные каталоги.

2.2. Самостоятельное изучение разделов программы

На самостоятельное изучение выносятся вопросы по истории развития электротехнологических установок и систем, практического применения электронагрева в промышленности, популярной литературы по научно-техническим проблемам электротехнологии. По каждому из разделов программы (п.2.1) студентам поручается самостоятельная проработка конкретных вопросов [2,3,4,7]. Результаты проработки представляются в виде рефератов, обсуждаются на консультациях, защищаются на аудиторных занятиях.

Кроме того, на консультациях обсуждаются практические вопросы учебного процесса, работа студентов на кафедре, их участие в научных исследованиях и т.д.

2.3. Лабораторные занятия

Параллельно с лекционным курсом в учебных лабораториях кафедры электротехники и электротехнологических систем студенты выполняют лабораторные работы с целью закрепления материала лекций и практического знакомства с принципом действия и устройством электротехнологического оборудования. Примеры лабораторных работ:

- "Общепромышленная печь сопротивления и система автоматического управления электротермической установкой с помощью микрокалькулятора МК-64";
- "Основные закономерности индукционного нагрева";
- "Внешние электрические характеристики дуговой установки";
- "Структура, электрооборудование, режимы работы промышленной плазменной установки".

2.4. Учебный практикум

Направлен на получение твердых навыков работы на персональных ЭВМ, составление несложных программ, связанных с задачами специальности.

2.5. Темы рефератов

1. Машины контактной сварки
2. Основные свойства электрической дуги
3. Сварочные трансформаторы
4. Сварочные генераторы
5. Электрошлаковая сварка
6. Основные принципы контроля температуры
7. Дуговая сталеплавильная печь
8. Электродуговой плазмотрон
9. Электрическая печь сопротивления
10. Установки индукционного нагрева
11. Индукционная тигельная печь
12. Индукционная канальная печь
13. Установка диэлектрического нагрева
14. Магнитоимпульсная установка
15. Ультразвуковая установка
16. Электрофильтр
17. Электролиз алюминия, меди, цинка
18. Электрогидравлические установки
19. Линейный асинхронный двигатель
20. МГД-насос постоянного тока
21. МГД-насос трансформаторного типа
22. Линейный индукционный насос
23. Винтовой индукционный насос
24. Виды теплопередачи в электротермических установках
25. Материалы, применяемые в электропечестроении
26. Электроннолучевые промышленные установки
27. Установки лазерной обработки
28. Установки ионной обработки

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КАФЕДРЫ "ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ" (ЭЭТС).....	5
2. ДИСЦИПЛИНЫ, ФОРМИРУЮЩИЕ СПЕЦИАЛЬНОСТЬ ЭТУС.....	8
3. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ОСНОВНЫХ ТИПОВ ЭТУ.....	15
3.1. Принцип действия и устройство ЭТУ.....	15
3.1.1. Установки, основанные на тепловом действии тока.....	15
3.1.2. Установка электрохимического, электромеханического, электрокинетического действия.....	30
3.2. Особенности электроснабжения, электрооборудования и управления ЭТУ.....	33
4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СПЕЦИАЛЬНОСТИ.....	45
4.1. Расчет поля.....	48
4.2. Расчет цепи.	49
5. НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА.....	51
6. УЧЕБНО-ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ.....	59
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	61
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	64
Приложение 1. ПРОСТЫЕ ЗАДАЧИ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЙ.....	66
Приложение 2. ВВЕДЕНИЕ В ИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО И СПЕЦИАЛЬНОСТЬ.....	76

Федор Никитич Сарапулов

**ВВЕДЕНИЕ В СПЕЦИАЛЬНОСТЬ
«ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И СИСТЕМЫ»**

Редактор издательства В.П.Вовчек

Технический редактор Л.П.Лезина

Корректоры О.С.Смирнова, М.Ю.Петров

ЛР № 020315 от 23.12.96 г.

Подписано в печать 24.10.97

Бумага типогр.

Уч.-изд. л. 5,0

Плоская печать

Тираж 200

Формат 60x84 1/16

Усл.п.л. 5,35

Цена

Заказ

Редакционно-издательский отдел УГТУ 620002, г.Екатеринбург, ул.Мира,
19,

8-й учебный корпус

Каменск-Уральский общетехнический факультет УГТУ 623400,
г.Каменск-Уральский, ул.Ленина, 34