

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)**

Кафедра электротехники и электроэнергетики

Промышленные электротехнологические установки

Методические указания к расчетно-лабораторным работам

Составители:

Г. П. Колесник

С. А. Сбитнев

Владимир 2016

УДК.621.311
ББК 22.332

Рецензент:

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Биотехнические и электронные системы и технологии»,
Владимирского государственного университета
В. С. Грибакин

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Владимирского государственного университета

Промышленные электротехнологические установки (Электронный ресурс): Методические указания к расчетно-лабораторным работам / Сост.: Г. П. Колесник, С. А. Сбитнев. – Владим. гос. ун-т. Владимир, 2016. – 80 с.

Содержат описание четырех расчетно-лабораторных работ, в каждой из которых приведены цель работы, объект и средства исследования, домашнее задание, порядок выполнения работ, методические указания, контрольные вопросы и учебная литература.

Методические указания составлены в соответствии с Федеральным Государственным образовательным стандартом для студентов направления 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения.

Табл. 20 . Ил. 37. Библиогр.: 9 назв.

УДК 621.311
ББК 22.332

ISBN

© Владимирский государственный
университет, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
В.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	4
Лабораторная работа № 1.	
Экспериментальные исследования электрооборудования печей сопротивления.....	7
Лабораторная работа № 2	
Экспериментальные исследования сварочного трансформатора.....	34
Лабораторная работа № 3	
Экспериментальные исследования тиристорного регулятора напряжения ТРН-3 для активной нагрузки.....	52
Лабораторная работа №4	
Исследование энергетических характеристик индукционной нагревательной системы.....	63
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	80

ВВЕДЕНИЕ

Успешное решение вопросов энергоэффективности и энергосбережения связано с внедрением новых технологий в промышленности и современных технических средств генерирования и передачи электроэнергии до потребителя. Эти мероприятия позволяют увеличить коэффициент полезного действия при преобразовании энергии органических энергоносителей, запас которых ограничен, в электромагнитную и другие виды энергии. Кроме того, это позволит уменьшить потери электроэнергии, которые в России составляют примерно 12 – 13 % от выработанной, до уровня потерь промышленно развитых европейских стран (6 – 7 %).

Значительная часть потерь электроэнергии обусловлена несимметричными режимами электрической системы. В промышленности это связано с использованием современных однофазных электротехнологических установок, что в конечном итоге приводит к увеличению количества потребителей электроэнергии с несимметричной и нелинейной нагрузкой. Использование преобразователей частоты и сварочных инверторов, а также различного рода управляемых вентильных преобразователей позволяет повысить электрический КПД потребителей электроэнергии, но ухудшение качества электроэнергии нивелирует эти показатели.

Даже в синусоидальном режиме подключение несимметричных нагрузок без компенсирующих устройств (КУ) и соответствующих мероприятий по симметрированию фазных напряжений приводит к появлению токов обратной последовательности (до 10 и более процентов вместо предельно допустимых четырех по стандарту ГОСТ 13109 – 97), дополнительным потерям, пульсации мгновенной мощности и несимметрии напряжения – ухудшению качества энергии, что снижает показатели энергоэффективности и энергосбережения и приводит к удорожанию продукции.

Дополнительные потери при несимметричной нагрузке, а она составляет около 40 % всей нагрузки предприятия и 80 % для жилищно-бытового комплекса, могут даже превышать потери от реактивной мощности. Поскольку эти дополнительные потери не влияют на количество электроэнергии, зафиксированной счетчиками потребителя, то в проигрыше остается энергоснабжающая организация, которая в свою очередь закладывает эти потери в тарифы на электроэнергию. Однако, дополнительные потери, обу-

словленные несимметричной нагрузкой, приводят к изменению параметров системы и преждевременному старению электротехнологического оборудования, а также ухудшению показателей энергоэффективности и энергосбережения.

В.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Перед выполнением курса лабораторных работ по дисциплине «Промышленные электротехнологические установки» каждый студент обязан изучить правила техники безопасности и расписаться в журнале, который находится в лаборатории.

При выполнении лабораторных работ студенты приобретают навыки подготовки, постановки, проведения и научного обоснования и подтверждения эксперимента, совершенствуют работу с измерительными приборами, учатся читать электрические и собирать соответствующие им электро-монтажные схемы, обрабатывать и анализировать результаты эксперимента.

Лабораторные работы выполняются бригадами, состоящими из 2 – 3 студентов. Во время выполнения работы каждая бригада должна иметь бланк отчета с письменными ответами в соответствии с требованиями раздела 2 к каждой лабораторной работе и со всеми необходимыми расчетами, рисунками, графиками и таблицами.

Перед выполнением лабораторной работы каждый студент должен получить у преподавателя допуск к работе, который включает в себя проверку выполнения домашней подготовки, теоретическое обоснование эксперимента, знание методик проведения эксперимента. Студентам, допущенным к занятиям, дается разрешение на сборку схемы. Студенты, не подготовившиеся к занятиям, к выполнению работы не допускаются. Если студент имеет задолженность по двум незащищенным работам, то к выполнению следующей работы он также не допускается.

После выполнения лабораторной работы бригада студентов подписывает у преподавателя результаты опытов, затем разбирает схему и приводит стенд в порядок. Студенты, выполнившие, оформившие и защитившие работу в день выполнения, предъявляют один отчет на бригаду. При защите в последующие дни отчет оформляется каждым членом бригады.

Отчеты по лабораторным работам должны быть выполнены аккуратно на листах формата А4 писчей бумаги в соответствии со стандартом предприятия СТП 71.4-84. Все электрические схемы, графики и таблицы должны

быть выполнены при помощи чертежных инструментов или на компьютере. Причем, все графики выполняют только на миллиметровой бумаге или с координатной сеткой на белой бумаге. Обозначения в электрических схемах должны соответствовать стандартам ГОСТ 2.105-95, ГОСТ 2.702-75, ГОСТ 2.747-68, СТ СЭВ 1052-78, ГОСТ 1494-77, ГОСТ 19880-74.

Отчет должен содержать:

- титульный лист с указанием кафедры, учебной группы, фамилии, имени и отчества студента, название, номер и дату выполнения лабораторной работы, Ф.И.О. преподавателя, принимающего работу;
- задание; цель работы, принципиальные электрические схемы и схемы соединений (электромонтажные), ;
- письменные ответы на каждый вопрос раздела «Подготовка к работе»; расчетные формулы с необходимыми вычислениями;
- таблицы измеренных и вычисленных величин;
- графики и диаграммы; краткие выводы.

Лабораторная работа № 1.

Экспериментальные исследования электрооборудования печей сопротивления.

Цель работы: В работе ставится цель – изучение конструкции печей косвенного действия, нагревательных элементов, датчиков температуры и экспериментальное исследование электрооборудования печей сопротивления. В результате проведения работы студенты должны знать методы расчета печей сопротивления и основные формулы расчета параметров нагревательного элемента; уметь рассчитывать геометрические параметры печи по рабочей температуре и выбирать материал футеровки, теплоизоляции и нагревательного элемента; приобрести навыки экспериментального исследования тепловых и электрических параметров печей сопротивления.

1. Объект и средства исследования.

Объектом исследования служит электропечь сопротивления камерная **СНО-4.8.2,5/13-И2**, предназначенная для нагрева деталей под закалку, для термообработки высоколегированных и быстрорежущих сталей, отжига стальной проволоки и ленты, керамики. Структура условного обозначения: **С** – нагрев сопротивлением; **Н** – камерная; **О** – окислительная среда в рабочем пространстве; **4** – ширина рабочего пространства, дм; **8** – длина рабочего пространства, дм; **2,5** – высота рабочего пространства, дм; **13** – номинальная температура, сотни °С; **И2** – исполнение. Общий вид исследуемой печи показан на рис. 1.1, а технические данные приведены в табл. 1.1.



Рис. 1.1. Электропечь сопротивления камерная **СНО-4.8.2,5/13-И2**

Таблица 1.1

Технические данные печи сопротивления **СНО-4.8.2,5/13-И2**

Установленная мощность, кВт, не более	50
Номинальная (потребляемая мощность), кВт, не более	40,3
Номинальная температура, °С	1300
Напряжение питающей сети, В	380,400,440
Номинальная частота, Гц	50
Число фаз	3
Масса садки, кг, не более	250
Характер среды в рабочем пространстве	окислительная
Размеры рабочего пространства, мм:	
Длина	800
Ширина	400
Высота	250
Мощность холостого хода, кВт, не более	10,9
Производительность, кг/ч (при нагреве садки от 850 до 1300°С), не менее	240
Масса, т, не более:	
Электропечи	1,87
Футеровки	1,3

Конструктивно электропечь **СНО-4.8.2,5/13-И2** выполнена камерной с электронагревателями из карбида кремния. Открывание, закрывание дверцы и загрузка садки в электропечь производится вручную. **Садка** устанавливается непосредственно на **под** электропечи. Электропечь состоит из следующих составных частей: **кожуха, футеровки, электронагревателей, механизма открывания дверцы**. Сварной кожух электропечи зафутерован теплоизоляционным материалом и огнеупорным кирпичом, образующим рабочую камеру. Нагрев садки осуществляется карбидокремниевыми электронагревателями типа КЭН ВП 25/400/400. Монтаж электронагревателей осуществляется шинами.

Загрузочный проем электропечи закрыт футерованной дверцей, открывание которой осуществляется механизмом. Механизм открывания дверцы состоит из консольно закрепленного рычага, вращающегося в подшипниках качения, дверца шарнирно соединена с рычагом. При открывании дверца поворачивается вокруг оси, при этом разогретая сторона ее все время обращена к электропечи. Электропечь рассчитана на нагрев садки от 20 до 1300°С в окислительной среде. Наиболее предпочтительным является непрерывный режим работы электропечи, при котором загружаемая садка предварительно подогрета до температуры 800 ÷ 850°С. В случае необхо-


димости работы по периодическому режиму рекомендуется в электропечи поддерживать температуру не ниже 600°C. При описании работы электропечи обозначения приборов и аппаратов приведены в соответствии с их позиционными обозначениями на схеме электрической принципиальной ДШБИ 681.111.003ЭЗ или ДШБИ.681111.003-01ЭЗ.

В комплект поставки печи сопротивления СНО-4.8.2,5/13-И2 входят:

- Электропечь - 1 шт.
- Шкаф управления - 1 шт.
- Комплект ЗИП по ведомости ЗИП - 1 шт.
- Комплект эксплуатационных документов по «Ведомости эксплуатационных документов» - 1 шт.

Измерение токов, напряжений и мощности осуществляется амперметрами, ваттметрами и вольтметрами, параметры которых приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2

№ п/п	Тип прибора	Система	Пределы измерений	Кол-во
1	Вольтметр		0÷600 В	1
2	Вольтметр	электромагнитная	0÷250 В	1
3	Амперметр	электромагнитная	0÷300 А	2
4	Киловаттметр	электромагнитная	0÷100 кВт	1
5	Ваттметр	электродинамическая	0 – 3000 Вт	1

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 33 (находятся в лаборатории).

2. Подготовка к работе.

2.1. Ознакомиться с приведёнными ниже методическими указаниями и рекомендованной литературой [1, с. 6 – 44], [2, с. 6 – 22].

2.2. Изучить конструкции ЭПС, нагревательных элементов, датчиков температуры, методы дискретного и непрерывного регулирования температуры, принципиальную электрическую схему установки.

2.3. Ознакомиться с устройством и паспортными данными исследуемой камерной электропечи сопротивления **СНО-4.8.2,5/13-И2**.

2.4. Заполнить бланк отчета по лабораторной работе с изложением заданий раздела 2, изобразить необходимые схемы и таблицы. Привести основные расчетные формулы.

3. Рабочее задание.

3.1. Выполнить расчет нагревателя по заданному варианту (табл. 1.3) при питании печи сопротивления от трехфазной сети с линейным напряжением 380 В. Расчетные характеристики нагревательного элемента и экспериментальные данные печи как потребителя электроэнергии занести в табл. 1.4 и табл. 1.5.

Таблица 1.3

Исходные данные	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Вариант конструкции нагревателя	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)
Коэффициент эффективности	0,4	0,5	0,6	0,5	0,6	0,8	0,3	0,7	0,5	0,8
Нагреваемый металл	1	2	3	4	5	4	2	4	5	1
Электрическая схема соединения нагревательных элементов	Y	Δ	Y	Δ	Y	Δ	Y	Δ	Y	Δ
Мощность печи, кВт	32	36	40	46	50	54	58	66	75	85
Напряжение питающей сети, В	Трехфазная сеть с линейным напряжением 380 В									
Рабочая температура в печи, °С	450	500	650	600	650	700	750	800	850	900

В табл. 1.3 приняты обозначения:

- по конструкции нагревателя:

(1) – спираль; (2) – зигзаг ленточный; (3) - зигзаг проволочный;

- по нагреваемому металлу:

1 – алюминий, $\varepsilon = 0,3$; 2 – медь, $\varepsilon = 0,7$; 3 – сталь, $\varepsilon = 0,8$;

4 – чугун, $\varepsilon = 0,81$; 5 – нихром, $\varepsilon = 0,8$.

Таблица 1.4

Расчетные характеристики нагревательного элемента

Материал, конструкция, удельное сопротивление	Для одной фазы			$W_{\text{исходн.}}$ $W_{\text{уточнен.}}$ 10^4 Вт/м^2	d ($a \times b$) мм	L мм	G кг
	P , кВт	U , В	I , А				

Таблица 1.5

Характеристики камерной печи сопротивления как потребителя электроэнергии

P , кВт	U , В	Электрическая схема соединения нагревательных элементов	Количество фаз	Ток фазы, A	Ток линейный, A

3.2. Собрать схему модели печи сопротивления с приборами для измерения основных параметров (температуры t и приращения температуры Δt °С) в соответствии с принципиальной электрической схемой рис. 1.1,а. Вход прибора теплоконтроля соединить с выходом измерителя температуры. После проверки схемы преподавателем включить питание силовой цепи и цепи автоматики.

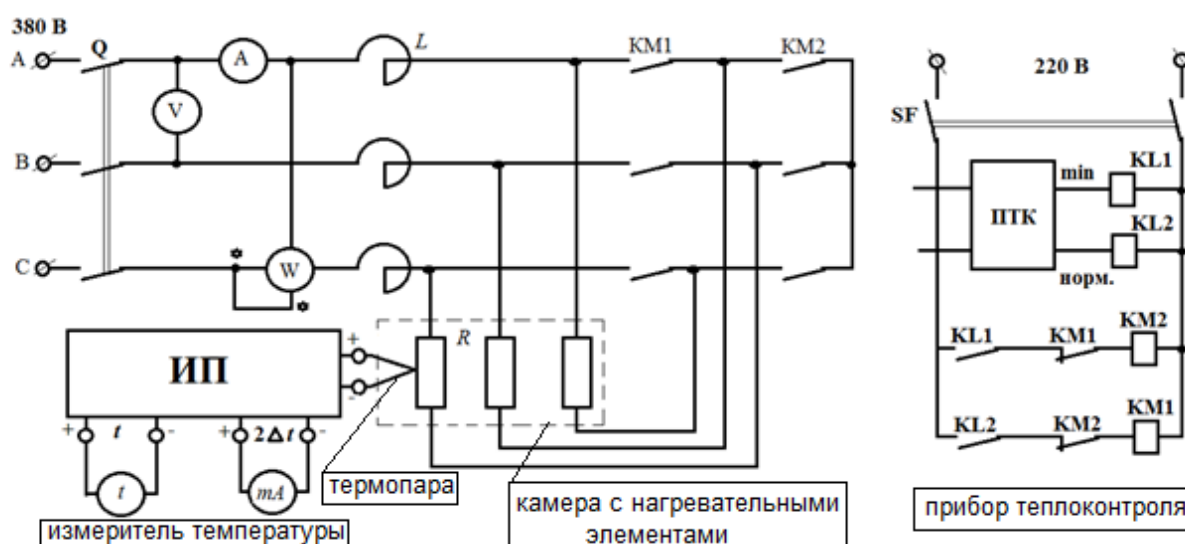


Рис. 1.1,а. Принципиальная электрическая схема лабораторной модели печи сопротивления с устройством теплоконтроля.

3.3. Снять и построить зависимости температуры внутри камеры электрической печи и мощности, потребляемой печью, от времени при трехпозиционном регулировании. Показания приборов снимать с интервалом 3 – 4 минуты в течение 30 – 35 минут.

4. Методические указания.

4.1. Устройство и работа составных частей камерной электропечи сопротивления СНО-4.8.2,5/13-И2

Поддержание заданного режима термообработки изделий осуществляется с помощью системы автоматического непрерывного регулирования температуры, обеспечивающей автоматическую стабилизацию заданного значения температуры в рабочем пространстве электропечи. Система автоматического непрерывного регулирования температуры включает датчик температуры ВК1, терморегулятор Е1, работающий в согласованном режиме с тиристорным преобразователем. При работе электропечи предусмотрена блокировка, которая запрещает подачу напряжения на электронагреватели при открытой дверце электропечи.

Для оперативной информации о работе электропечи предусмотрена световая сигнализация подачи напряжения на силовые цепи с помощью лампы НЛ2 желтого цвета. При отклонении температуры в рабочем пространстве электропечи от заданной величины, выключается автоматический выключатель QF1, который снимает напряжение с тиристоров. При перегорании силовых предохранителей подается питание на звонок громкого боя НА1. Съём аварийного звукового сигнала производится с помощью кнопочного выключателя SB5. При окончании термообработки производят разгрузку садки.

4.2. Система КИП и автоматики.

Электропечь имеет одну электрическую зону, состоящую из 3-х групп, электронагреватели которых представляют собой однофазную нагрузку. Напряжение на электронагреватели подается от сети переменного тока через автоматический выключатель QF1 и три пары силовых тиристоров, включенных по встречно-параллельной схеме. Защита силовых цепей и цепей управления от токов короткого замыкания осуществляется автоматическими выключателями QF1, SF1 и предохранителем FU1. Контроль тока электронагревателей производится в каждой из 3 групп амперметрами PA1-PA3. Подача напряжения на электронагреватели осуществляется с помощью

автоматического выключателя $QF1$, включение которого производит оператор. Съем напряжения с электронагревателей осуществляется с помощью кнопочного выключателя $SB4$. Выбор режима работы электропечи (автоматический или наладочный) осуществляется оператором. Значения напряжения по фазам можно проследить по вольтметру $PV1$ путем переключения $SA1$.

4.3. Измерение температуры. Принципы действия термометров.

Степень нагрева рабочей камеры характеризуется ее температурой. Измерение температуры может производиться косвенными методами путем измерения однозначно зависящих от нее свойств находящихся в камере рабочих тел. Наиболее часто используются линейное или объемное расширение тел (дилатометрические термометры, от 0 до 550°C) изменение электрического сопротивления (термометры сопротивления от -200 до +650°C), измерение термоэдс, развиваемой в паре контактируемых тел (термоэлектрические термометры от -50 до 2500°C). К прямым методам измерения температуры может быть отнесено измерение величины энергии излучения нагретого тела (радиационные пирометры от 100 до 4000°C).

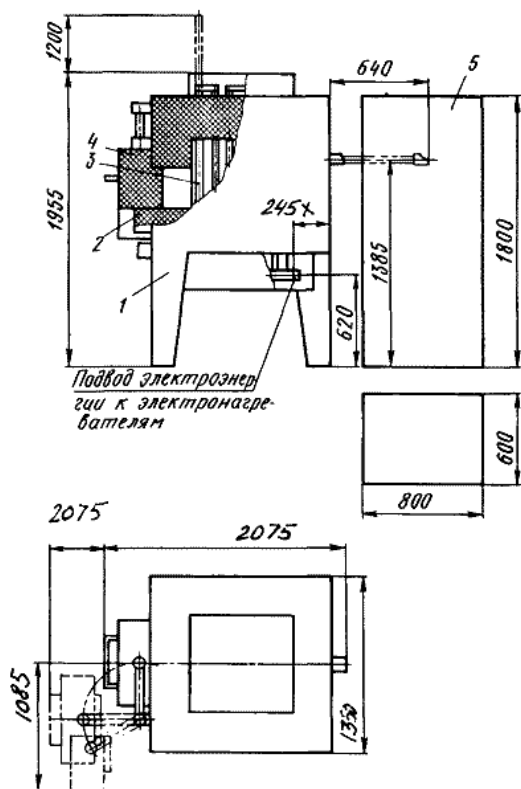


Рис. 1.2. Габаритные размеры электропечей
СНО-4.8.2,5/13-И2

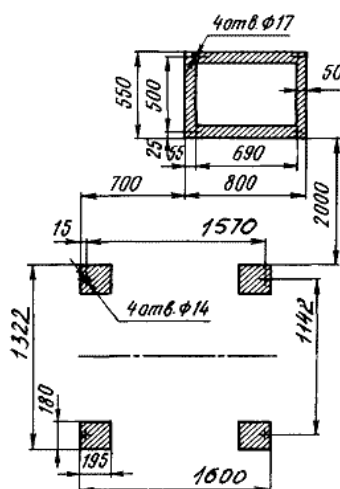


Рис. 1.3. Установочные размеры и рекомендуемое размещение оборудования электропечи

4.3.1. Электрические термометры сопротивления.

Температура рабочей камеры измеряется через электрическое сопротивление установленного в ней датчика, представляющего собой тонкую металлическую проволоку, намотанную на теплостойкий каркас. $R=f(t)$, где R – электрическое сопротивление датчика, t – его температура. Материал датчика: до 150°C – медь, до 200°C – никель, до 550°C – платина. При использовании платины следует иметь в виду, что в восстановительной атмосфере она быстро разрушается из-за науглероживания. Датчик защищается оболочкой. Измерительное устройство – вторичный прибор (электромеханический измерительный прибор – логометр или мостовая измерительная цепь), фиксирующий изменение электрического сопротивления датчика, градуируется непосредственно в градусах с учетом сопротивления соединительных проводов. Приборы просты, надежны в эксплуатации, имеют достаточно высокую точность и могут быть использованы в простейших системах регулирования температуры. Недостатки – большой размер датчика (до 120 мм) и высокая инерционность.

4.3.2. Термоэлектрические термометры.

Температура рабочей камеры измеряется через термоэдс установленного в ней датчика, представляющего собой термопару, защищенную термической защитной оболочкой. $e = f(t)$ где e – термоэдс, t – температура спаев термопары. В табл. 1.6 приводятся характеристики наиболее употребительных термопар. При соответствующих мерах по герметизации термопары, стойкость ее к атмосфере рабочей камеры может быть повышена и область применения расширена. При использовании платиновых термопар следует иметь в виду, что при температуре 1250°C в вакууме платина начинает интенсивно испаряться.

Таблица 1.6.

Материалы термопары	Верхний предел измерения температуры °C	Среда в рабочей камере печи
Графит – карбид титана	2500	Восстановительная, нейтральная, вакуум
Платинородий - платинородий	1600	Окислительная
Платинородий - платина	1300	Окислительная

Продолжение таблицы 1.6

Хромель - алюмель	1000	Окислительная
Хромель - копель	600	Окислительная, восстановительная, вакуум

Составы: хромеля – 89% Cr, 9,8% Ni, 1,0%Fe и 0,2%Al.
 алюмеля – 94% Ni, 0,5% Fe, 2,0% Al, 2,5% Mn, 1,0%Si;
 копеля – 43-44%Ni, 57-56% Cu.

Измерительный прибор – пирометрический милливольтметр или потенциометр градуируется непосредственно в °С с учетом термоэдс, возникающих на спаях соединительных проводов. Недостатки и достоинства – те же что и у термометров сопротивления. Однако инерционность их существенно меньше, и они могут быть использованы в современных системах автоматического регулирования температуры.

4.3.3. Радиационные пирометры.

Температура объекта, находящегося в рабочей камере, может быть измерена через его интегральное излучение, фокусируемое оптической системой пирометра на рабочем спае термопары и нагревающее последнюю. Возникающая термоэдс фиксируется измерительным милливольтметром $e=f(t)$ и $t=f(T)$. e – термоэдс спая, t – его температура, T – температура объекта, находящегося в рабочей камере. Шкала милливольтметра градуируется в °С с учетом термоэдс, возникающих на спаях соединительных проводов. При этом учитываются так же поправки (2,5 – 9 %), возникающие за счет отличия лучеиспускающей способности измеряемого тела от абсолютно черного тела. Применяется так же оптические пирометры с исчезающей нитью, принцип действия которых основан на визуальном сравнении яркости измеряемого тела с яркостью расположенной на его фоне нити электрической лампочки. При равенстве температур нить или ее часть становится неразличимой на фоне нагретого тела. $I_1=f(T)$, $I_2=I_1$; $I_2=f(i)$. T – температура объекта, находящегося в рабочей камере печи, I_1 – его яркость, I_2 – яркость нити электрической лампочки пирометра, i – электрический ток, нагревающий ее нить, измеряется миллиамперметром, шкала в °С.

Применяются так же оптические пирометры, основанные на визуальном сравнении яркости излучения измеряемого тела в двух диапазонах волн (красного и сине-зеленого участков видимой части спектра). Оптические пирометры по принципу действия требуют присутствие наблюдателя.

4.4. Электрические печи сопротивления косвенного нагрева.

В электропечах косвенного нагрева электрическая энергия превращается в тепловую энергию в нагревателях, размещаемых в поду и на стенках рабочей камеры, а затем передается в рабочее пространство посредством теплопроводности, излучения и конвекции нагретой атмосферы. Количество тепла Q (Дж), выделившегося в нагревателях за время τ сек:

$$Q = \sum_1^n I_n^2 R_n \tau = P\tau,$$

I_n – ток n -го нагревателя, А;

R_n – сопротивление n -го нагревателя, Ом.

Мощность печи P , кВт:

$$P = \frac{Q}{\tau}$$

Электропечи косвенного нагрева используются для термической и электрохимической обработки изделий, нагрева их под обработку давлением, а так же в металлургии легкоплавких металлов и их сплавов. Печи косвенного нагрева подразделяются по рабочей температуре на низкотемпературные от 600 до 700°C, среднетемпературные от 700 до 1350°C и высокотемпературные – свыше 1350°C; по группам технологических процессов на термические и плавильные; по режиму работы на периодические и непрерывного действия – методические. В периодических печах садка загружается в рабочую камеру и нагревается в ней, оставаясь неподвижной. Температура садки определяется температурным полем рабочей камеры и переменна во времени изменяясь от температуры загрузки до величины, соответствующей требованиям технологии.

Область применения периодических печей – индивидуальное и мелкосерийное производство. В методических печах садки загружаются в рабочую камеру и передвигаются в ней с одновременным нагревом. Температура рабочей камеры постоянна или изменяется вдоль нее по заданному закону. Температура садок переменна и определяется требованиями технологии. Область применения методических печей – крупносерийное и массовое производство.

По конструкции печи периодического действия делятся на камерные, шахтные и колпаковые. Методические печи по типу механизма, передвигающего садки делятся на конвейерные, толкательные и т.д. Размеры и мощность печей определяется их производительностью (тонн/час) и темпе-

ратурой рабочей камеры. Состав атмосферы рабочей камеры определяется требованиями технологии. При термообработке не ответственных изделий используется воздушная (окислительная) атмосфера. Для защиты деталей от окисления используется инертная (нейтральная) атмосфера – азот, гелий, аргон или вакуум. При восстановлении металлов из окислов и спекании изделий из порошков тугоплавких металлов (вольфрам, молибден, ниобий и т.д.) используется восстановительная атмосфера – водород, азотно-водородные и специальные смеси.

При термохимической обработке поверхности деталей – азотировании, цементации, нитроцементации, проводимых с целью получения износоустойчивого поверхностного слоя, используются специальные газовые смеси (аммиак, углеводородные газы и т.д.). Для нагрева легкоокисляющихся металлов и их дегазации используются вакуумные печи. Среда в рабочей камере и химические процессы в ней протекающие определяют тип огнеупоров, жароупоров и нагревателей, примененных в печи. Промышленность выпускается широкий ассортимент электрических печей косвенного нагрева.

4.5. Нагревательные элементы.

Основные требования к материалам для нагревательных элементов:

- жаропрочность – механическая прочность, достаточная для обеспечения приемлемых деформаций нагревателя при рабочей температуре камеры.
- жаростойкость – химическая устойчивость к атмосфере рабочей камеры.
- высокое удельное электрическое сопротивление.
- небольшой температурный коэффициент сопротивления.
- стабильность электрических свойств и геометрических размеров нагревателя в процессе его эксплуатации.

Этим требованиям в значительной мере удовлетворяют нихромы – сплавы на основе никеля и хрома. Например, нихром, содержащий 17 – 20 % Cr и 75-80 % Ni (X20H80) имеет рабочую температуру до 1230°C. Нихромы весьма дороги и в качестве заменителей применяются фехрали – сплавы на основе алюминия, хрома и железа. Например, фехраль состава 5 % Al, 23 % Cr, остальное Fe (X23Ю5) имеет рабочую температуру до 1200°C. Фехрали весьма хрупки, что ограничивает их применение. До температур 800°C могут быть использованы нагреватели из жароупорной стали X23H18 (22-25 %

Cr, 17-20 % Ni, остальное Fe). Удельное электрическое сопротивление некоторых сплавов при температуре 20°C дано в табл. 1.7.

Таблица 1.7

Марка сплава	X20H80-H	X15H60-H	X23Ю5	X23Ю5Т
ρ , мкОм·м	1,06-1,17	1,07-1,17	1,30-1,40	1,34-1,45

При рабочей температуре нагревателя удельное сопротивление его возрастает против значения табл. 1.7 на 3 – 8 %. Нихромы и фехрали выпускаются в виде проволоки круглого сечения и лент. Из проволоки изготавливаются нагреватели в виде спиралей или зигзагов, из ленты в виде зигзагов. Спиральные нагреватели в рабочей камере могут быть размещены в желобах на стенках и в поду, на крючках из жароупора или в керамических трубках на стенках. Зигзагообразные нагреватели – на стенках на крючках, в поду в фасонных желобах.

Для высокотемпературных печей до 1450°C применяются силитовые (с утолщением на концах) или глобаровые (с выводами пониженного сопротивления) нагреватели из карборунда – карбида кремния и для температур до 1630°C – из дисилицида молибдена. Нагреватели из оксида циркония с добавкой 4 % оксида кальция или 6 % оксида иттрия выдерживают температуру до 2030°C. Для более высоких температур в нейтральной, восстановительной атмосфере или вакууме используются чисто металлические нагреватели из молибдена, тантала и вольфрама.

Расчетная площадь поверхности нагревателей в рабочей камере F_H , м²:

$$F_H = \frac{P_{уст}}{3,8k \left[\left(\frac{t_H + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{II} + 273}{100} \right)^4 \right]}$$

t_H , °C – допустимая температура нагревателя;

k – поправочный коэффициент, учитывающий самооблучение нагревателей.

Таблица 1.8

Конструкция нагревателя	k при $1/d$				
	1	2	3	4	5
Проволочный зигзаг	-	0,58	0,71	0,78	0,83
Ленточный зигзаг	0,42	0,64	0,76	0,81	0,84

Продолжение таблицы 1.8

Проволочная спираль на полочке или трубке	0,16	0,32	0,45	0,54	0,61
Проволочная спираль в пазах футеровки	0,11	0,22	0,31	0,37	0,42

Допустимые температуры нагревателей из нихромов при различных сроках их службы в зависимости от диаметра проволоки d или толщины ленты a , приведены в табл. 1.9.

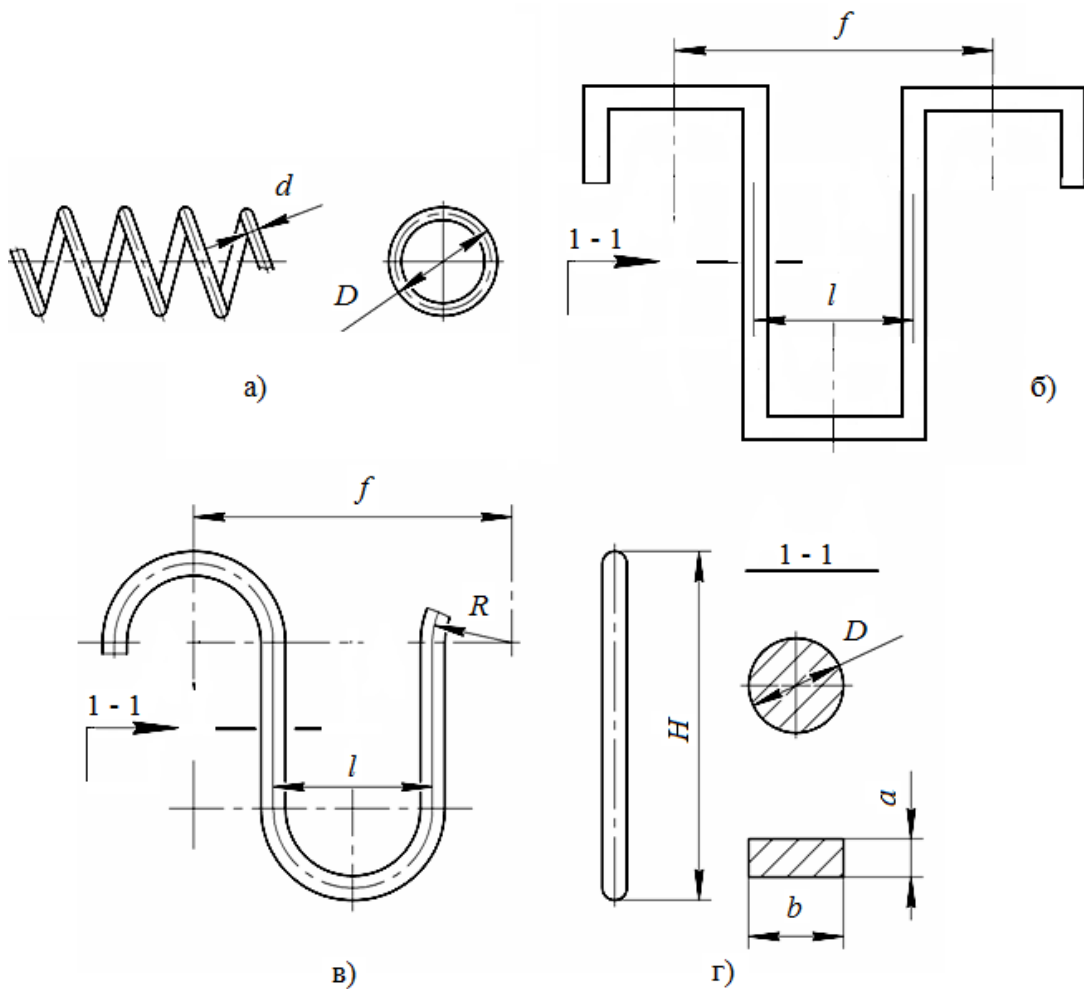


Рис. 1.4. Геометрия нагревателей из металлических сплавов.

На рис.1.4 приняты обозначения:

- l , мм – расстояние по осям между соседними витками проволочной спирали или зигзага;
- d , мм – диаметр проволоки или ширина ленты;
- a , мм – толщина ленты.

Таблица 1.9

Проволока

Материал нагревателя, срок службы (часов)	Диаметр проволоки, мм, допустимая температура нагревателя, °С.				
	2	4	6	8	10
X20H80-H, 10000	1060	1100	1130	1140	1150
X20H80-H, 2000	1180	1200	1210	-	-
X15H60-H, 10000	940	1020	1050	1075	1090
X15H60-H, 2000	1090	1130	1150	1160	1170

Лента, отношение ширины к толщине $d/a=10$

Материал нагревателя, срок службы (часов)	Толщина ленты a , мм, допустимая температура нагревателя, °С.				
	2	4	6	8	10
X20H80-H, 10000	1060	1100	1130	1140	1150
X20H80-H, 2000	1180	1200	1210	-	-
X15H60-H, 10000	940	1020	1050	1075	1090
X15H60-H, 2000	1090	1130	1150	1160	1170

Для фехралей при рекомендуемых температурах нагрева (1200°С для X23Ю5 и 1300°С для X23Ю5Т) срок службы 3000 часов.

Площадь наружной поверхности нагревателя из круглой проволоки $F_n = \pi dL$, м², из ленты: $F_n = (2a + 2d)L$, где L – длина нагревателя, ширина d и толщина a в метрах.

Длина нагревателя:

$$L = \frac{U^2 S_n}{P_{уст} \rho 10^3}$$

где U – напряжение на нагревателе, В;

S_n – площадь поперечного сечения нагревателя, мм²;

ρ – удельное электрическое сопротивление материала нагревателя, мкОм·м;

$P_{уст}$ – установленная мощность нагревателя, кВт. Для трехфазной системы и соединения нагревателей в звезду $U = 220$ В, $P_{уст} = P_{уст}/3$.

Геометрия нагревателей определяется методом последовательных приближений из условий получения расчетного значения площади поверхности нагревателей F_n и возможности размещения их в рабочей камере печи при минимальных ее размерах. При известной длине фазы L проволочного нагревателя диаметр проволоки:

$$d = \sqrt{\frac{4LP_{уст}\rho 10^3}{\pi U^2}}$$

здесь: L , м; $P_{уст}$, кВт; ρ , мкОм; U , В; d , мм.

Значения ρ при $t = 20^\circ\text{C}$ для наиболее распространенных сплавов даны в табл. 1.10. При рабочей температуре нагревателя t_n удельное сопротивление выше, чем при 20°C на 3 – 8%.

Таблица 1.10

Марка сплава	X20H80-H	X15H60-H	X23Ю5Т	X23Ю5Т
ρ , мкОм·м	1,07-1,17	1,07-1,17	1,34-1,45	1,34-1,45

4.6. Печи периодического действия.

Схемы промышленных электрических печей сопротивления показаны на рис. 1.5.

Колпаковая печь состоит из неподвижного футерованного стенда 1, на который устанавливается нагреваемая садка 5. В рабочую камеру печи, образованную футерованным колпаком 2, устанавливается жаропрочный муфель 3. Как колпак, так и муфель съемные и могут обслуживать несколько стендов. Нагрев, выдержка и охлаждение садки под герметическим муфелем могут вестись в контролируемой атмосфере или вакууме. Нагреватели 4 располагаются на стенде и на стенках колпака и подключаются к сети через разъёмные контакты. Колпаковые печи имеют мощность до нескольких сотен киловатт.

Элеваторная печь состоит из неподвижной прямоугольной или цилиндрической футерованной рабочей камеры 2, расположенной на колоннах на уровне 3 - 4 м над полом цеха. Нагреватели 4 расположены на стенках рабочей камеры и на ее своде. Садка 5 с помощью подъемного устройства 7 поднимается в рабочую камеру 2 на подвижном поде 6. По окончании процесса термообработки садка опускается вниз. Элеваторные печи имеют мощность до 600 кВт.

Камерная печь состоит из прямоугольной футерованной камеры 2, в которой располагается садка. Камера перекрыта сводом 8. Нагреватели 4 располагаются в поду и в случае необходимости на стенках рабочей камеры. Под камеры перекрывается плитой из жароупора, садка помещается в рабочую камеру через загрузочное окно, расположенное на ее передней стенке и перекрываемое футерованной дверцей. Камерные печи наиболее распространены, просты по конструкции, универсальны для различных изделий и технологических процессов. Мощность камерных печей достигает сотен киловатт.

Шахтная печь состоит из цилиндрической или прямоугольной футерованной рабочей камеры 2, заглубленной в пол цеха. Нагреватели 4 располагаются в стенках камеры. Под камеры перекрыт плитой из жароупора. Садка 5 опускается в шахту подъемным краном. Свод 8 поднимается и опускается специальным механизмом 9. Печь легко герметизируется и в ней

могут быть использованы контролируемые атмосферы и вакуум. Печи с рабочей температурой до 750°C оборудуются одним или несколькими вентиляторами. Мощность шахтных печей достигает сотен киловатт. Выбор типа печи определяется технологическими и производственными соображениями.

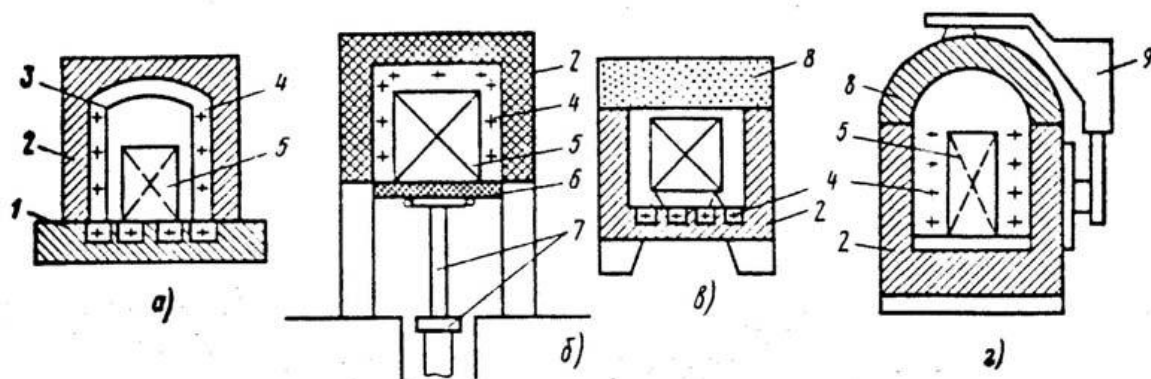


Рис.1.5. Схемы промышленных электрических печей сопротивления: а – колпаковая, б – элеваторная, в – камерная, г – шахтная электрические печи. 1 – стэнд, 2 – рабочая камера, 3 – жаропрочный муфель, 4 - нагревательные элементы, 5 – нагреваемые изделия (садка), 6 – опускающийся под, 7 – подъемное устройство, 8 – свод, 9 – механизм подъема свода.

4.7. Печи непрерывного действия (методические)

Принцип работы электрической печи непрерывного действия можно пояснить на примере конструкции конвейерной и толкательной печей, схемы которых показаны на рис. 1.6 и 1.7.

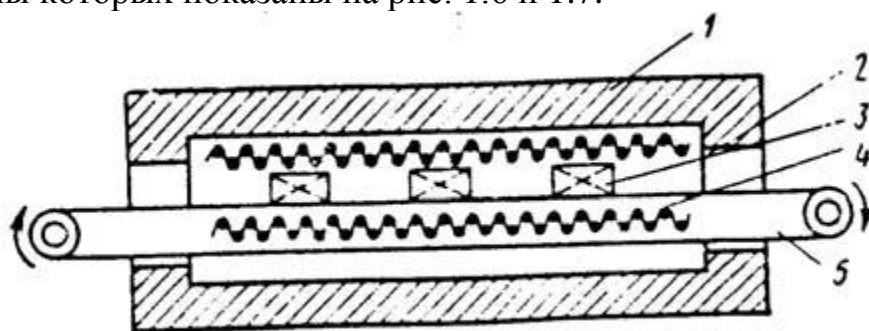


Рис. 1.6. Конвейерная печь. 1-футерованная рабочая камера, 2 - загрузочное окно, 3- садка, 4-нагревательные элементы, 5-конвейер.

Транспортный механизм – конвейер 5, перемещающий садку 2 вдоль рабочей камеры 1, выполняется из жароупоров или плетеной нихромовой сетки. Приводные механизмы вынесены из рабочей зоны и охлаждаются во-

дой. Рабочая температура печи до 1000°C , мощность достигает сотен киловатт.

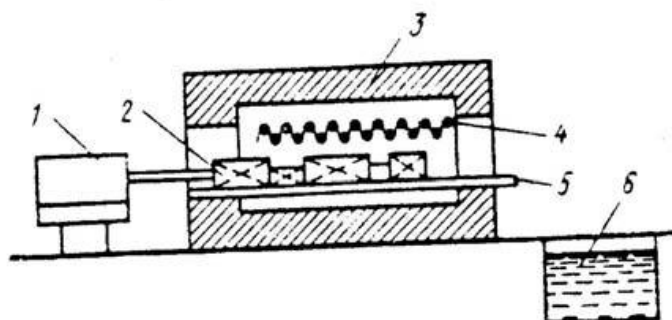


Рис. 1.7. Толкательная электропечь: 1-толкатель с приводным механизмом, 2-садка, 3-футерованная рабочая камера, 4-нагревательные элементы, 5-подина, 6-закалочная ванна.

На полу рабочей камеры 3 размещается подина 5 или рельсовые направляющие по которым вдоль рабочей камеры 3 перемещается садка 2. В печи может быть использована контролируемая атмосфера. Рабочая температура печи может превышать 1000°C , мощность достигать сотен киловатт. Ввиду относительной простоты и надежности конструкции (приводные механизмы находятся вне зоны высоких температур) толкательные печи имеют широкое распространение.

4.8. Печи для плавки металлов.

Печи этого типа используются в металлургии металлов и сплавов, имеющих температуру плавления до 600°C (алюминиевые сплавы, цинк, свинец, олово и т.д.), печи просты по конструкции и легко автоматизируемы.

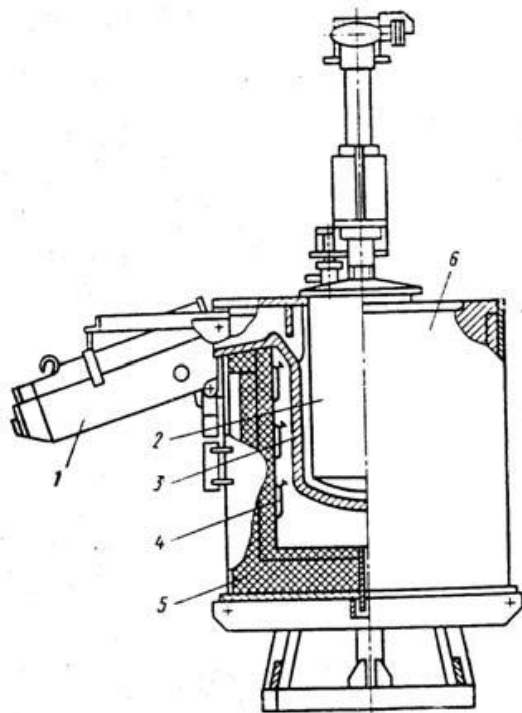


Рис. 1.8. Тигельная электрическая печь сопротивления: 1 – желоб, 2 – механический вытеснитель, 3 – тигель, 4 – нагреватели, 5 – футеровка, 6 – корпус.

Тигельная электропечь содержит чугунный сосуд – тигель, имеющий внутреннюю обмазку из оксидов. Тигель 3 заключен в металлический кожух 6. Расплавленный металл механическим вытеснителем 2 выдавливается из тигля 3 и по желобу 1 подается в литейную машину. На внутренней стенке футеровки 5

расположены нагреватели 4. Используются так же камерные печи, плавильные ванны, которых по объему значительно больше тиглей. Плавильная ванна футерована огнеупором, стойким к расплавленному металлу. Слив расплава может осуществляться наклоном печи или с помощью электромагнитных насосов, основанных на эффекте бегущего магнитного поля. Печи ванного типа используются главным образом для переплавки металлов на слитки.

4.9. Электрические ванны.

Электрическая ванна содержит рабочую камеру 3 футерованную химически стойким огнеупором. Кристаллическая соль или щелочь 1 расплавляется теплом электрического тока, подаваемого в рабочую камеру через электроды 2. Конструктивное выполнение таких ванн показано на рис. 1.9.

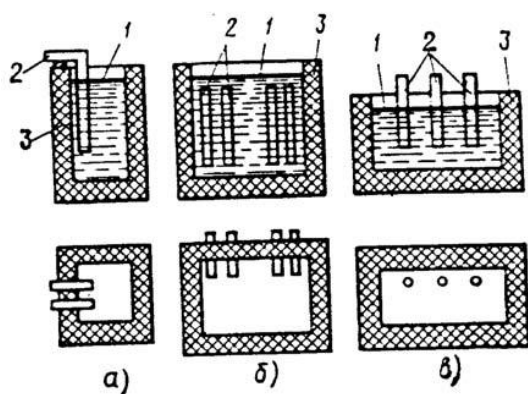


Рис. 1.9. Электрические ванны с внутренним обогревом: а, б – однофазные, в – трехфазная. 1 – уровень расплава соли или щелочи, 2 – электроды, 3 – футеровка.

В электрических ваннах используются азотнокислые хлористые и фтористые соли и щелочи в смесях или чистом виде. Соляные и щелочные ванны применяются для быстрого и безокислительного нагрева до $850 - 1350^{\circ}\text{C}$ изделий из легированных сталей. Электроды подключаются к сети через понижающие трансформаторы с вторичным напряжением $10 - 35$ вольт. При запуске ванны соли или щелочи в районе электродов предварительно расплавляются с помощью открытых нагревательных элементов временно на период запуска устанавливаемых в ванну. Далее ванна разогревается токами, текущими по расплаву между электродами. Термообрабатываемые изделия погружаются в ванну и нагреваются от расплава прямой теплопередачей. Электрические ванны получили широкое распространение в инструментальном производстве.

4.10. Автоматическое регулирование температуры.

Технологические процессы термообработки современных материалов требуют достаточно точного соблюдения температурного режима. Поле допуска составляет $25 - 50^{\circ}\text{C}$ при плавке металлов, $5 - 10^{\circ}\text{C}$ при термообработке и $0,2 - 0,5^{\circ}\text{C}$ при термообработке стекол. Методы автоматического регу-

лирования температуры определяются динамическими свойствами объекта регулирования – электропечи с помещенной в нее садкой.

Объект обладает самовыравниванием – при увеличении напряжения сети растет мощность печи, растет температура в ее рабочей камере и тепловые потери через футеровку, что ведет к достижению теплового равновесия при новом значении температуры. При уменьшении напряжения сети имеет место обратный процесс. Объект и датчик температуры (термопара, термометр сопротивления) обладают большой тепловой инерцией, что делает возможным поддержание только средней температуры. Указанные свойства позволяют в большинстве случаев достичь удовлетворительных результатов с помощью простейшего двухпозиционного релейного регулирования (включено – выключено), представленного на рис. 1.10.

Тип датчика (термопара, термометр сопротивления) определяется заданной температурой рабочей камеры и составом ее атмосферы. В качестве регулятора в составе прибора теплоконтроля (ПТК) используются автоматические электронные потенциометры различных типов (ЭПП, ЭПД, ПСР и т.д.) с основной погрешностью 0,5%. Эти потенциометры могут работать с несколькими датчиками и регулировать температуры в многозонных печах. Регулятор температуры (РТ в составе ПТК) подает команды включено – выключено на катушку КВ исполнительного выключателя В. Исполнительные выключатели могут быть установлены, как на электропечь в целом, так и на отдельные ее зоны.

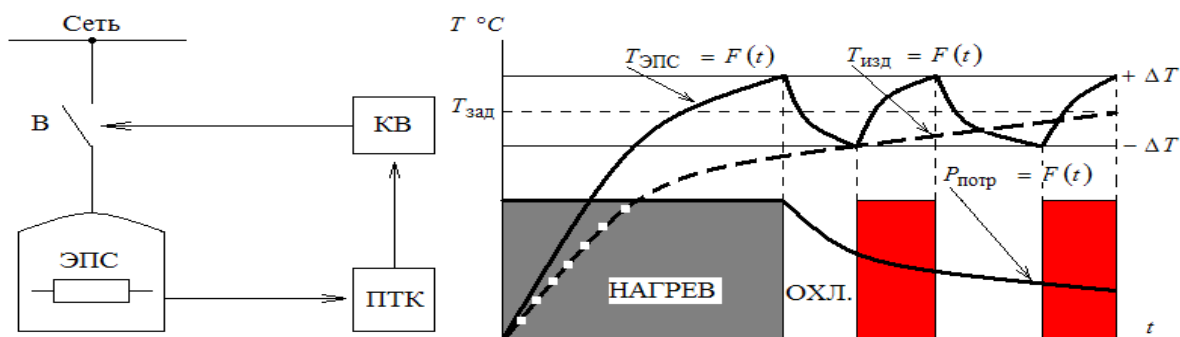


Рис. 1.10. Двухпозиционное регулирование температуры: ЭПС – электропечь; ПТК – прибор теплоконтроля; КВ – катушка выключателя (контактора) В. $T_{\text{ЭПС}}$ – температура рабочей камеры печи, $T_{\text{изд}}$ – температура садки, $P_{\text{потр}}$ – средняя мощность, потребляемая печью.

При включении печи температура рабочей камеры растет от температуры цеха до температуры $t_1 = t_{\text{зд}} + \Delta T$, где $t_{\text{зд}}$ – заданная температура рабочей камеры или ее зоны. Далее печь отключается и температура ее рабочей камеры снижается до значения $t_2 = t_{\text{зд}} - \Delta T$. Затем печь включается и процесс повторяется. Размах колебаний температуры $t = 2\Delta T$ определяется динамическими свойствами объекта регулирования, датчика, местом

его установки и чувствительностью регулятора РТ. Для специальных технологических процессов, требующих весьма точного регулирования температуры, используется импульсное регулирование мощности печи с помощью тиристорных регуляторов.

4.8. Электрооборудование и особенности электроснабжения.

Мощности электропечей сопротивления варьируются от долей киловатта до нескольких тысяч киловатт. Печи мощностью более 20 кВт выполняются трехфазными. В большинстве случаев питание печей осуществляется непосредственно от сетей 220/380 в. Многозонные печи со сложными законами регулирования температуры иногда оказывается экономически выгодным подключать к сети через понижающие трансформаторы, что дает возможность использовать нагреватели большого сечения, имеющие большую прочность и надежность. В случае использования нагревателей, изменяющих в широких пределах свое сопротивление в зависимости от температуры (глобаровые, силитовые, графитовые и т.д.), напряжение на печи регулируется специальными трансформаторами или автотрансформаторами.

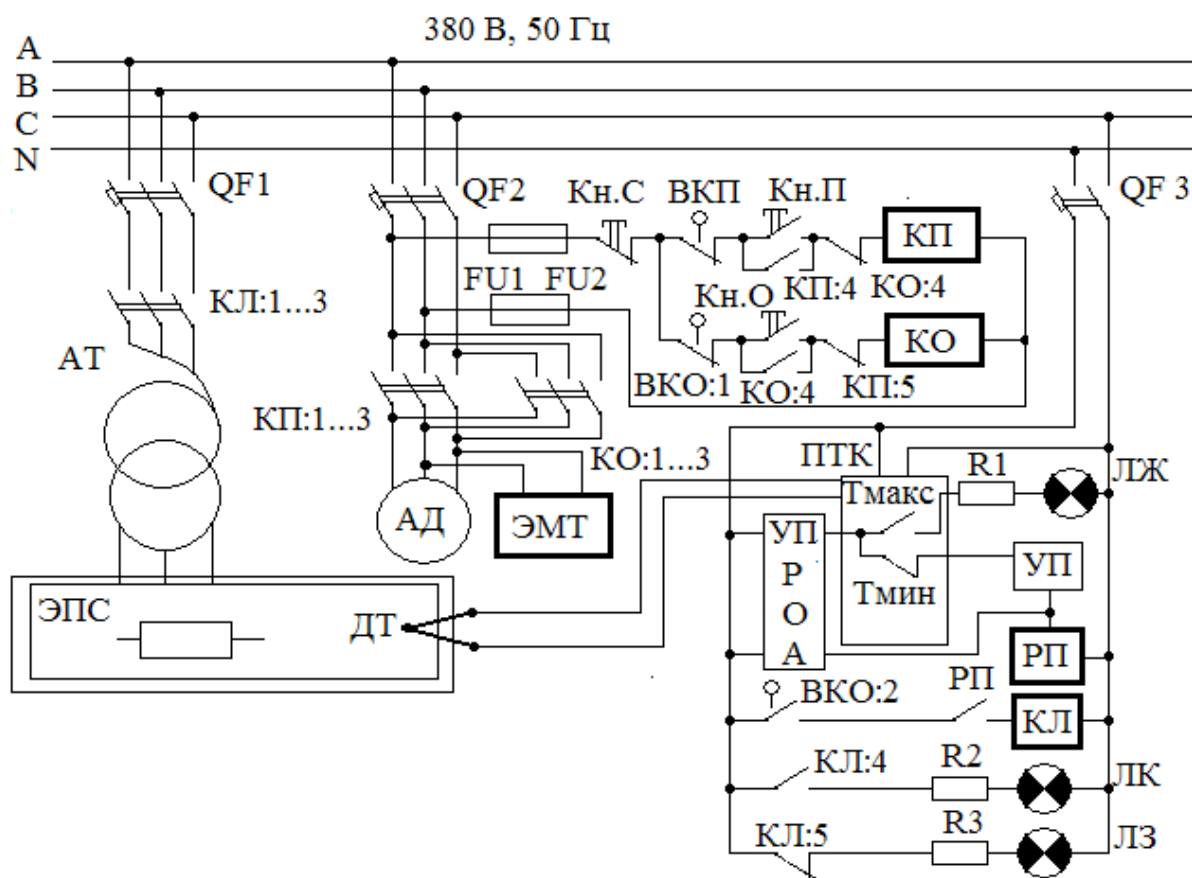


Рис. 1.11. Принципиальная электрическая схема управления печью сопротивления

Печи мощностью свыше 50 кВт подключаются на шины 0,4 кВ цеховых подстанций, меньшей мощности к распределительным пунктам (РП) или шиносборкам расположенным в цехе. Коэффициент мощности печей близок к единице, распределение нагрузок по фазам в трехфазных печах, как правило, равномерное. Однофазные печи следует распределять равномерно по фазам. Использование тиристорных регуляторов мощности связано с нелинейными искажениями питающего напряжения. Нелинейные искажения $U_{иск}$ в процентах от номинального рассчитывают по формуле:

$$U_{иск} = \frac{P_{п}}{P_{с}} U_{кз} \sqrt{\frac{1}{\left(U_{кп} + \frac{P_{п}}{P_{с}} U_{кз}\right) \pi}} \cdot 100\%,$$

где

- $P_{с}$, кВА – номинальная мощность сетевого трансформатора на подстанции;
- $P_{п}$, кВА – то же печного трансформатора;
- $U_{кз}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора на подстанции в долях номинального напряжения сети;
- $U_{кп}$ – то же печного трансформатора.

Нелинейные искажения не должны превышать 5%, поэтому допустимость установки тиристорных источников питания для группы печей определяют из условия $U_{иск} \leq 5\%$. При наличии печного трансформатора следует выполнять условие

$$U_{иск} \leq 5\%, \quad \text{если } \frac{P_{п}}{P_{с}} \leq 0,58 ;$$

а при отсутствии печного трансформатора $U_{иск} \leq 5\%$, если $\frac{P_{п}}{P_{с}} \leq 0,14$.

Здесь $P_{п}$ – мощность печи.

Резервирование питания предусматривается в зависимости от характера технологического процесса. К специальному электрооборудованию печей относятся печные трансформаторы, блоки тиристорных преобразователей. В остальном печи комплектуются стандартным электрооборудованием: силовой коммутационной и защитной аппаратурой, пирометрией, регулирующими потенциометрами и мостами. Печи поставляются в комплекте.

4.11. Электрические печи сопротивления прямого нагрева.

Принцип действия. Область применения.

В электрических печах сопротивления прямого нагрева электрический ток проходит непосредственно по нагреваемому изделию. При этом количе-

ство тепла, выделяемого при протекании электрического тока определяется по закону Джоуля-Ленца:

$$Q = I^2 R \cdot \tau,$$

где Q , Дж – тепло, выделившееся в нагреваемом изделии; τ , сек – время нагрева; I , А – действующее значение тока; R , Ом – активное сопротивление, вычисленное с учетом поверхностного эффекта.

В печах этого типа используется как переменный, так и постоянный ток, получаемый от тиристорных преобразователей. Преимущества таких печей: большая скорость нагрева и возможность получения высоких температур (до 2800°C).

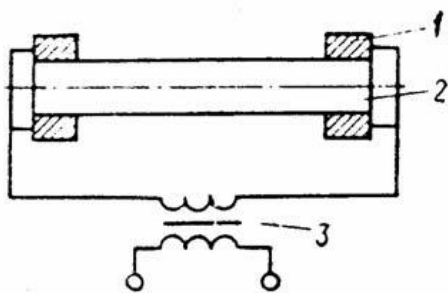


Рис. 1.12. Схема печи прямого нагрева: 1 – водоохлаждаемые зажимы из бронзы или меди; 2 – нагреваемое изделие; 3 – печной трансформатор.

На переменном токе значение КПД и коэффициента мощности печи прямого нагрева $\eta = 0,7 \div 0,8$, $\cos \varphi = 0,8$. Мощность печей прямого нагрева достигает 15000 кВ·А. Современная область применения – преимущественно спекание изделий, имеющих высокое сопротивление (порошки тугоплавких и редких металлов, графитизация угольных изделий, получение карборунда и т.д.). В традиционных областях использования – нагрев заготовок под ковку и штамповку, отжиг труб и т.т. Следует отметить, что электрические печи прямого нагрева в промышленности вытесняются индукционными, как менее энергозатратными и более производительными. Печи прямого нагрева проектируются и изготавливаются для конкретных технологических процессов и производств. В заводской практике часто встречается необходимость проектирования и изготовления своими силами небольших установок.

4.11.1. Особенности электроснабжения печей сопротивления

Мощные однофазные установки вызывают появление в питающих сетях напряжения обратной последовательности, которое по нормативам в точке подключения нагрузки не должно превышать 2% от номинального. В необходимых случаях установка к сети подключается через симметрирующее устройство по схеме Штейнмеца (рис. 1.13) или симметрирующий трансформатор.

Индуктивное сопротивление X_L и емкостное сопротивление конденсаторной батареи X_C выбираются таким образом, чтобы векторы линейных токов I_a , I_b , I_c питающей сети составляли симметричную трехлучевую

звезду. Это условие выполняется при выборе индуктивного X_L и емкостного X_C сопротивлений по формуле:

$$X_L = X_C = \frac{U^2 \cdot \sqrt{3}}{P},$$

где $X_L, X_C, \text{ Ом}$ – индуктивное и емкостное сопротивления реактора и конденсаторной батареи;

$U, \text{ В}$ – линейное напряжение питающей сети; $P, \text{ Вт}$ – активная мощность нагрузки.

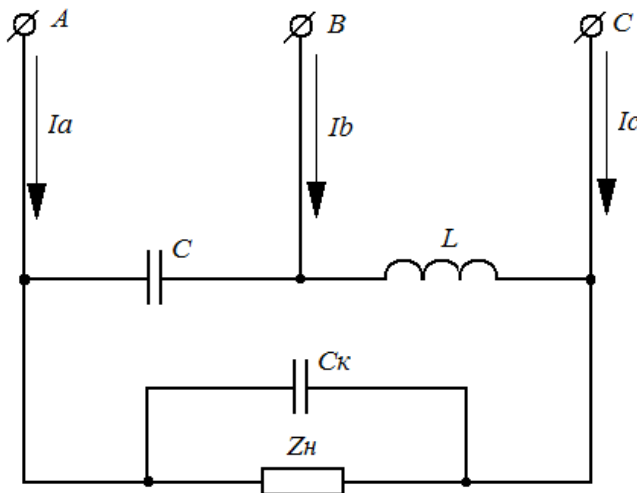


Рис. 1.13. Симметрирующее устройство по схеме Штейнмеца (Z_H – нагрузка; C_k – компенсирующая емкость; L, C – соответственно реактор и конденсаторная батарея симметрирующего устройства).

Устройство работает при значении $\cos \varphi$ нагрузки, стремящимся к единице. Реактивная мощность $Q_k, \text{ ВАр}$ компенсирующей емкости C_k при полной мощности нагрузки $S, \text{ ВА}$ определяется согласно выражению

$$Q_k = S \cdot \sin \varphi.$$

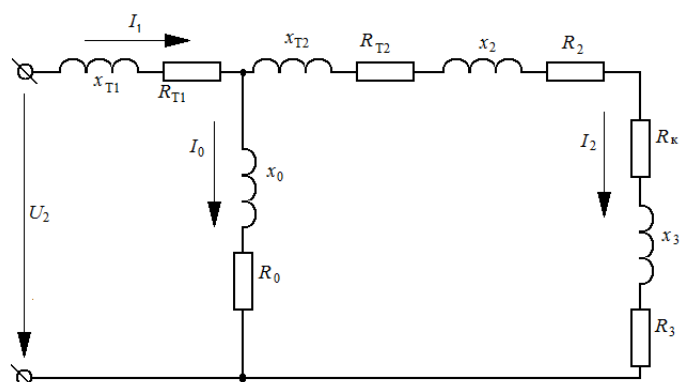
4.11.2. Схема замещения установки прямого нагрева.

Схемы замещения установки прямого нагрева показаны на рис.1.14. На схеме рис. 1.14 приняты обозначения:

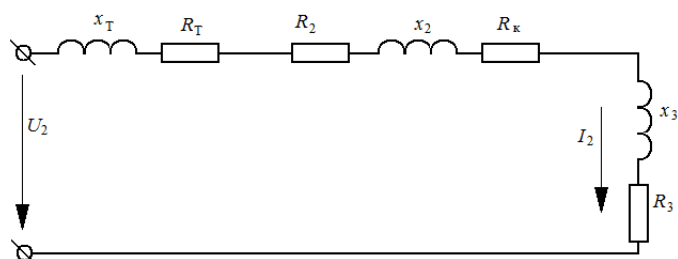
- X_3, R_3 – (Ом) – индуктивное и активное сопротивления заготовки с учетом поверхностного эффекта;
- R_k , (Ом) – активное сопротивление зажимов;
- X_2, R_2 , (Ом) – индуктивное и активное сопротивления вторичной цепи установки;
- X_T, R_T – индуктивное и активное сопротивления обмоток печного трансформатора приведенные к напряжению вторичной обмотки. Определяются по результатам рабочего проектирования трансформатора. Активное сопротивление вторичной цепи установки $(R_2 + R_k)$, (Ом) определяется ориенти-

ровочно в долях активного сопротивления материала заготовки $R_{3,п}$ постоянному току

$$R_2 + R_k \approx 0,1R_{3,п}$$



а)



б)

Индуктивное сопротивление вторичной цепи X_2 , (Ом) ориентировочно в долях индуктивного сопротивления материала заготовки: $X_2 = 0,1 X_3$

Рис. 1.14. Схемы замещения установки прямого нагрева. (а – с учетом, б – без учета потерь холостого хода печного трансформатора).

Инженерный расчет по схеме замещения рис. 1.14,б дает достаточную точность.

Для цилиндрической заготовки, ток I в которой направлен параллельно образующей цилиндра, эффективная глубина $\delta_э$, (м) проникновения электромагнитной волны в металл при угловой частоте тока питающей сети $\omega = 2\pi f$ определяется по выражению

$$\delta_э = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu\mu_0}}$$

где f , (Гц) – частота тока питающей сети; как правило, используется промышленная частота 50 Гц;

ρ , (Ом м) – удельное электрическое сопротивление нагреваемого материала постоянному току;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума;

μ – относительная магнитная проницаемость нагреваемого материала.

В слое толщиной $\delta_э$, выделяется 86,4% всей электромагнитной энергии, проникающей через поверхность заготовки. В приближенных расчетах принимается, что в слое $\delta_э$, выделяется вся тепловая энергия. Значения ρ и μ для ферромагнетиков нелинейно зависят от температуры, существенно нелинейна так же функция $\mu(H)$, где H – напряженность магнитного поля в заготовке. Ниже приведены зависимости $\mu(t), \rho(t), \delta_э(t)$ (t – температура

заготовки, °С), для стали, которые целесообразно использовать в приближенных расчетах.

Таблица 1.9

Температура заготовки $t, ^\circ\text{C}$	20	200	400	500	600	750		800	1000
						-	+		
μ	16	16	16	16	15	12	1	1	1
$\rho \cdot 10^{-6}, \text{Ом}\cdot\text{м}$	0,2	0,35	0,55	0,675	0,80	1,15	1,15	1,20	1,30
$\delta_3, \text{мм}$, при $f = 50 \text{ Гц}$	7,9	9,9	13,1	14,45	15,8	21,9	75,8	77,5	80,6

При температуре около точки Кюри (768°C для чистого железа) сталь теряет магнитные свойства и имеет $\mu = 1$. Для приближенных расчетов в интервале температур $20 \div 500^\circ\text{C}$ можно принять $\mu = \text{const} = \mu_{\text{ср}} = 16$. Для сталей активное и индуктивное сопротивления заготовки при частоте $f = 50 \text{ Гц}$ определяются в функции отношения r_0/δ_3 , где r_0 – радиус нагреваемой цилиндрической заготовки в миллиметрах.

Таблица 1.10

r_0/δ_3	0	1	2	3	4	5	6	7
R_3/R_{3n}	1	1,13	1,5	2,06	2,75	3,5	4,13	5,75
X_3/R_{3n}	0	0,25	0,81	1,25	1,63	2,06	2,5	3,06

Сопротивление заготовки постоянному току R_{3n} вычисляется исходя из ее геометрических размеров:

$$R_3 = \rho_{\text{п}} \cdot \frac{\ell}{F_3}$$

где ℓ , м – длина заготовки; $F_3, \text{м}^2$ – площадь ее поперечного сечения. Для стали удельное сопротивление постоянному току $\rho_{\text{п}} = 0,2 \cdot 10^{-6} = 0,2 \text{ мк}\cdot\text{Ом}\cdot\text{м}$. Для стали при частоте 50 Гц в интервале температур до точки Кюри можно принять $\delta_{3\text{ср}} = 10,9 \text{ мм}$, свыше точки Кюри $\delta_{3\text{ср}} = 80 \text{ мм}$. Для фасонных заготовок (прямоугольник, равнобокий уголок, двутавр) можно использовать данные табл. 1.10, заменив отношение r_0/δ_3 на $\frac{2F}{n \cdot \delta_{3\text{ср}}}$, где $F, \text{мм}^2$ – сечение заготовки, $n, \text{мм}$ – ее периметр.

4.11.3. Электрический расчет.

Ввиду высокой скорости нагрева стальной заготовки потерями на излучение тепла с ее поверхности можно пренебречь при расчете полной полезной мощности $P_{\text{пол}}$:

$$P_{\text{пол}} = \frac{c \cdot G \cdot (t_k - t_0)}{\tau}$$

Футерованные печи с длительным циклом нагрева рассчитываются аналогично камерным печам.

Рабочий ток заготовки I , А:

$$I = \sqrt{\frac{P_{\text{пол}}}{R_3}}$$

Полное сопротивление вторичной цепи установки Z (Ом):

$$Z = k \cdot \sqrt{(R_T + R_2 + R_k + R_3)^2 + (X_T + X_2 + X_3)^2},$$

k - коэффициент запаса, $k = 1,1 \div 1,15$.

Напряжение вторичной обмотки трансформатора U_2 , В: $U_2 = I \cdot Z$.
Коэффициент мощности $\cos \varphi_2$ на вторичной стороне трансформатора:

$$\cos \varphi_2 = \cos \tan^{-1} \frac{X_T + X_2 + X_3}{R_T + R_2 + R_k + R_3}$$

Примечание: на первичной стороне можно принять: $\cos \varphi_1 \approx \cos \varphi_2$.

Полная мощность трансформатора:

$$S = \frac{I \cdot U_2}{\eta_T}$$

η_T – кпд трансформатора, возможные значения от 0,85 до 0,92.

5. Порядок оформления отчета.

Отчёт составляется каждым студентом в соответствии с требованиями ЕСКД и должен содержать схему установки, результаты измерений и расчётов, необходимые построения и выводы, а также ответы на контрольные вопросы.

6. Контрольные вопросы.

1. Физические процессы, используемые в промышленных электротехнологических установках.
2. Процесс передачи тепла в электрической печи сопротивления.
3. Энергоэффективность устройств прямого и косвенного нагрева.
4. Футеровка. Материалы. Назначение. Требования.
5. Теплоизоляция. Материалы. Назначение. Отличие от футеровки.
6. Нагревательные элементы. Конструкция и материалы. Способы установки в электрической печи сопротивления.
7. Назначение и устройство низкотемпературного нагревательного элемента (ТЭН).
8. Сравнительные энергетические характеристики нагревательных элементов электрических печей сопротивления.
9. Классификация печей сопротивления по исполнению, по назначению и по конструкции.
10. Конструктивные особенности маломощной печи сопротивления.
11. Конструктивные особенности мощной печи сопротивления.
12. Сравнительные энергетические характеристики тигельных и камерных электрических печей сопротивления.
13. Двухпозиционные регуляторы температуры печи.
14. Приборы теплоконтроля непрерывного действия.
15. Источники питания приборов теплоконтроля.
16. Электрические параметры печей сопротивления.
17. Схема электропитания печи сопротивления.
18. Печной трансформатор.
19. Электропривод подъема и опускания дверцы печи сопротивления.
20. Силовое электрооборудование печей сопротивления.
21. Схемы электроснабжения печей сопротивления малой и большой мощности.
22. Аппаратура управления печью сопротивления.
23. Принципиальная электрическая схема управления электрической печью сопротивления.

Лабораторная работа № 2

Экспериментальные исследования сварочного трансформатора

Цель работы: В работе ставится цель – изучение конструкции сварочного трансформатора и экспериментальное исследование его характеристик под нагрузкой. В результате проведения работы студенты должны знать методы расчета сварочного трансформатора и основные формулы расчета внешних характеристик; уметь рассчитывать параметры сварочного трансформатора для обеспечения динамических характеристик электрической дуги; приобрести навыки экспериментального исследования режимов работы сварочного трансформатора под нагрузкой.

1. Объект и средства исследования.

Объектом исследования служит промышленный сварочный трансформатор СТН-500-1, который преобразует электрическую энергию напряжением 220 или 380 вольт в электрическую энергию напряжением холостого хода 60 В и предназначенный для питания электрической дуги при ручной или машинной сварке, резке или наплавке металлов однофазным переменным током промышленной частоты 50 Гц.

Основными конструктивными элементами сварочного трансформатора (рис. 2.1) являются: магнитная система 2, обмотки ВН 1 и НН 3 и реактор (дроссель), предназначенный для регулирования вторичного тока — тока сварки путем изменения воздушного зазора магнитной цепи. Реактор состоит из неподвижной магнитной системы 4 и ее обмоток 5 и подвижной 6, изменяющей воздушный зазор между ними. При подсоединении, как указано на схеме, проводов от трансформатора и реактора к свариваемой детали 7 и электроду 8 посредством токодержателя 9 между ними возникает электрическая дуга, плавящая металл.

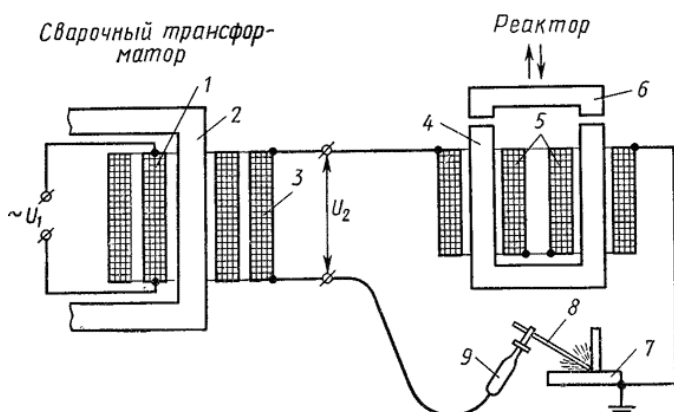


Рис. 2.1. Принципиальная схема устройства и работы сварочного трансформатора

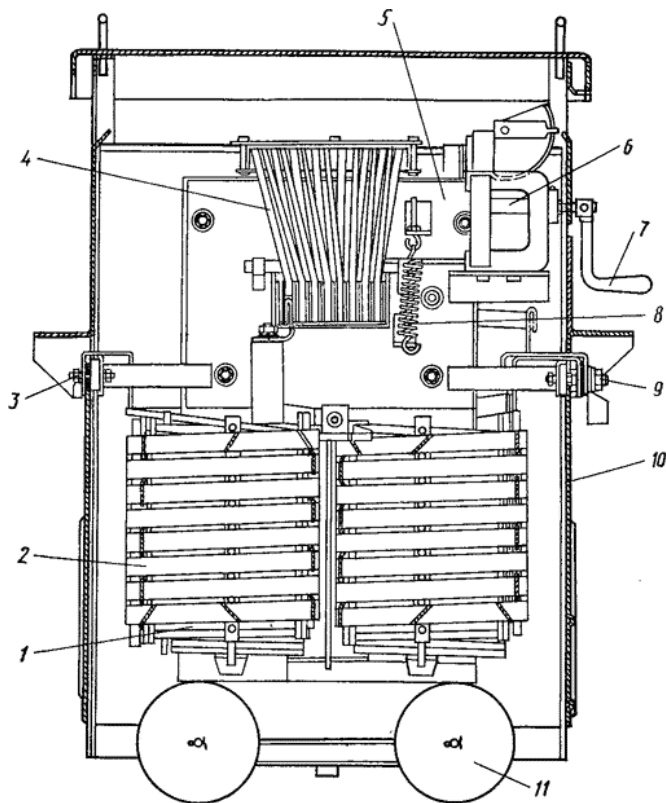


Рис. 2.2. Устройство сварочного трансформатора СТН-500-1

В настоящее время сварочные трансформаторы изготавливают в однокорпусном исполнении: обмотки трансформатора и реактора размещены на общей магнитной системе и закрыты одним кожухом.

На рис. 2.2 показан сварочный трансформатор типа СТН-500-1 (для сварки и наплавки металла). Его технические данные: первичное напряжение 380 и 220 В, вторичное напряжение холостого хода 60 В, номинальный сварочный ток 500 А, с регулированием в пределах 1500—700 А, номинальная мощность на зажимах вторичной цепи 15 кВт, потребляемая из сети 33 кВ·А. Магнитная система сварочного трансформатора СТН-500-1 собрана из покрытых лаком пластин электротехнической стали толщиной 0,5 мм и является общей для обмоток трансформатора и реактора. Обмотки трансформатора выполнены в виде цилиндрических катушек, каждая из которых состоит из двух слоев первичной обмотки **1** из изолированного алюминиевого провода и двух наружных слоев вторичной обмотки **2** из неизолированного алюминиевого провода.


Катушки насажены на стержни магнитной системы и соединены между собой при напряжении питающей электросети 380 В последовательно, при 220 В — параллельно. Между слоями обмоток и между обмотками проложены деревянные рейки, образующие воздушные каналы. Обмотки трансформатора выполнены с изоляцией класса **A** и для обеспечения влагостойкости пропитаны лаком и запечены. Обмотки **4** реактора выполнены из неизолированного алюминиевого провода с асбестовыми прокладками, пропитанными термостойким лаком. В верхнем ярме магнитной системы (на участке реакторной обмотки) имеется разъем — воздушный зазор, регулирование которого осуществляется перемещением подвижного пакета **5**,

Катушки насажены на стержни магнитной системы и соединены между собой при напряжении питающей электросети 380 В последовательно, при 220 В — параллельно. Между слоями обмоток и между обмотками проложены деревянные рейки, образующие воздушные каналы. Обмотки трансформатора выполнены с изоляцией класса **A** и для обеспечения влагостойкости пропитаны лаком и запечены. Обмотки **4** реактора выполнены из неизолированного алюминиевого провода с асбестовыми прокладками, пропитанными термостойким лаком. В верхнем ярме магнитной системы (на участке реакторной обмотки) имеется разъем — воздушный зазор, регулирование которого осуществляется перемещением подвижного пакета **5**,

набранного из пластин электротехнической стали. В подвижный пакет вмонтирована гайка, в которую входит ходовой винт **6**. Рукоятка **7** винта выведена наружу кожуха **10**. Подвижный пакет прижат книзу с помощью двух пружин **8**, это обеспечивает отсутствие значительной вибрации и гудения. Ходовой винт перемещается в специальной планке, прикрепленной к рамке, приваренной к остову трансформатора. Если рукоятки вращать по часовой стрелке, то зазор увеличивается, уменьшается индуктивное сопротивление, и, следовательно, возрастает сварочный ток, если против часовой стрелки, то сварочный ток уменьшается. Для указания значения сварочного тока в конструкции трансформатора предусмотрен механизм, состоящий из токоуказателя, закрепленного на угольниках активной части, и сектора, вращающегося на оси под воздействием рукоятки ходового винта. На секторе закреплена шкала механического токоуказателя, которая отградуирована в амперах и указывает значения сварочного тока при номинальном напряжении подводимой сети и при напряжении 30 В на выводных зажимах вторичной обмотки. С торцовых сторон трансформатора закреплены пластмассовые доски с зажимами: к зажимам 3 подведены концы первичной обмотки (220 или 380 В), а к зажимам 9 — конец вторичной обмотки и один конец реакторной обмотки. Вторые концы вторичной и реакторной обмоток соединены между собой внутри кожуха. Трансформатор снабжен емкостным фильтром, предназначенным для ослабления помех радиоприему, создаваемых трансформатором при сварке. Конденсаторы фильтра (два по 0,01 мкФ) смонтированы на задней стороне доски зажимов ВН и подключены к зажимам первичной обмотки трансформатора и к заземленному кожуху. При пробое конденсатора первичная обмотка соединяется с кожухом, что может быть опасным для жизни обслуживающего персонала; поэтому включение трансформатора в сеть без заземления не допускается! Для перемещения трансформатор имеет четыре колеса **11** и две ручки. В боковых стенках кожуха **10** трансформатора находятся отверстия, служащие для естественного охлаждения активной части воздухом. Кожух защищает трансформатор от попадания внутрь атмосферных осадков, благодаря чему трансформатор может работать на открытом воздухе, и от случайных механических повреждений активной части.

Измерение токов, напряжений и мощности при проведении лабораторной работы осуществляется амперметрами и вольтметрами, размещенными на лабораторном стенде и параметры которых приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

№ п/п	Тип прибора	Система	Пределы измерений	Кол-во
1	Вольтметр		0÷600 В	1
2	Вольтметр	- // -	0÷250 В	1
3	Амперметр	- // -	0,5÷1 А	2
4	Амперметр	- // -	2,5÷5А	1
5	Ваттметр	Электродинамическая	0 – 3000 Вт	2
6	Киловаттметр	электромагнитная	0 – 30 кВт	1

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 33 (находятся в лаборатории).

2. Подготовка к работе.

2.1. Ознакомиться с приведёнными ниже методическими указаниями и рекомендованной литературой [2], [3], [5].

2.2. Изучить конструкции, параметры и режимы работы сварочных трансформаторов под нагрузкой. Изучить методы расчета сварочных трансформаторов и основные формулы расчета внешних характеристик сварочного трансформатора для обеспечения динамических характеристик электрической дуги.

2.3. Ознакомиться с устройством и паспортными данными исследуемого сварочного трансформатора СТН-500-1.

2.4. Заполнить бланк отчета по лабораторной работе с изложением заданий раздела 2, изобразить необходимые схемы и таблицы. Привести основные расчетные формулы.

3. Рабочее задание.

3.1. Собрать электромонтажную схему модели сварочной установки в соответствии с принципиальной электрической схемой рис. 2.3 при питании от однофазного регулируемого источника (автотрансформатора) и после проверки схемы преподавателем включить питание стенда и снять внешнюю характеристику трансформатора при пониженном на 10% напряжении

питающей сети изменением эквивалентного сопротивления нагрузки (дроссель + электрическая дуга) от холостого хода до заданного значения (путем коммутации ключей $K1 - K3$ и дополнительной коммутации резисторов $R2$ и $R3$ составленных из групп резисторов фаз A и B блока резисторов лабораторного стенда), результаты измерений занести в табл. 2.2. Напряжение на участке электрической дуги изменять дросселем (перемещением обмотки $W2$ трансформатора T). Значение резистора $R1$ выбрать из условия ограничения тока короткого замыкания на уровне 1 А.

Таблица 2.2

Показания приборов	V1	V2	V3	A1	A2	A3	W
Проводимый опыт	В	В	В	А	А	А	Вт
Пониженное напряжение							
Номинальное напряжение							
Повышенное напряжение							

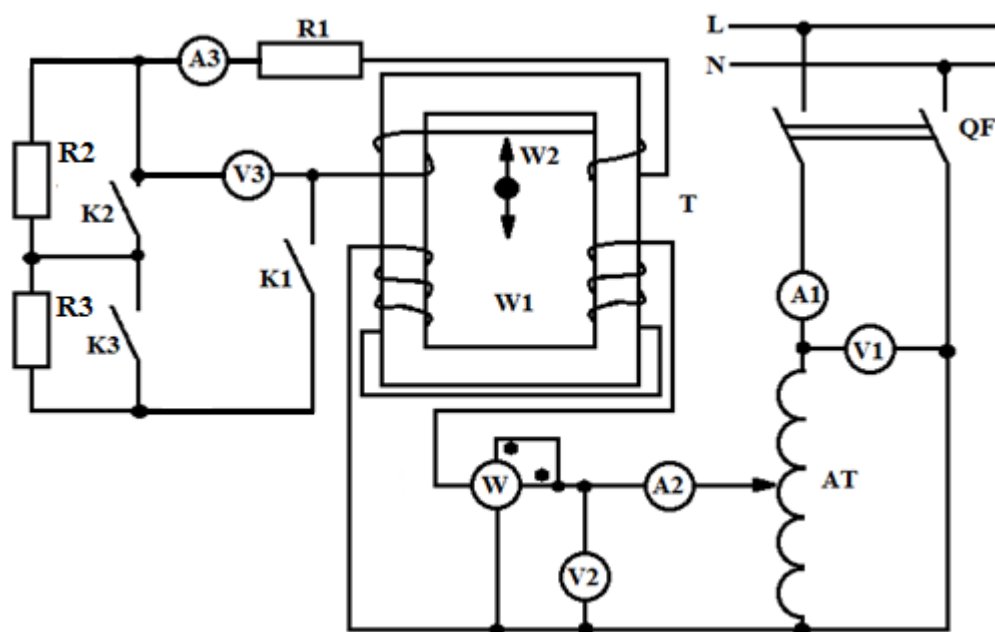


Рис. 2.3. Принципиальная электрическая схема модели лабораторной сварочной установки

3.2. Снять внешнюю характеристику трансформатора при номинальном напряжении питающей сети изменением эквивалентного сопротивления нагрузки (дроссель + электрическая дуга) от холостого хода до заданного значения (аналогично п. 3.1), результаты измерений занести в табл. 2.2. Напряжение на участке электрической дуги изменять дросселем (перемещением обмотки $W2$ трансформатора T).

3.3. Снять внешнюю характеристику трансформатора при повышенном на 10% напряжении питающей сети изменением эквивалентного сопротивления нагрузки (дроссель + электрическая дуга) от холостого хода до заданного значения (аналогично п. 31), результаты измерений занести в табл. 2.2. Напряжение на участке электрической дуги изменять дросселем (перемещением обмотки W_2 трансформатора T).

3.4. Данные опытов по пунктам 3.1 – 3.3 для трех различных значений напряжения питающей сети занести в табл. 2.2 и для каждого значения построить на одном графике кривые зависимости $U_2 = f(I_H)$ и $\cos \varphi = f(I_H)$.

4. Методические указания.

4.1. Электрическая дуга

Явление электрической дуги было открыто в 1802 году профессором физики Санкт-Петербургской медико-хирургической академии Василием Владимировичем Петровым, который указал на возможность её практического применения, как для электроосвещения, так и для плавления металлов. Однако только в 1882 году, талантливому русскому изобретателю Николаю Николаевичу Бенардосу удалось разработать промышленно пригодный способ электродуговой сварки металлов. Сварка способом Бенардоса велась с присадочным прутком, расплавляемым в пламени дуги, горячей между электродом (угольным, графитовым или вольфрамовым) и изделием. Данный способ используется и сейчас для сварки цветных металлов, а также при наплавке твёрдых сплавов. Несколько позже, в 1888 году, русский инженер-изобретатель Николай Гаврилович Славянов разработал способ сварки при помощи металлического плавящегося электрода (рис. 2). Первые конструкции электродов, содержащих покрытия, были созданы Н. Н. Бенардосом. Покрытые электроды современного вида изобретены шведским инженером Кельбергом в 1911 году.

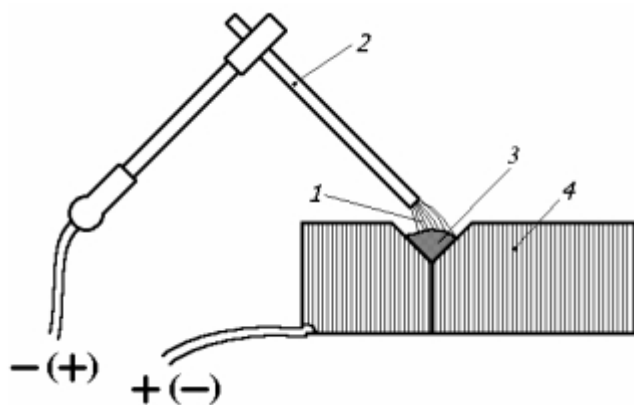


Рис. 2.4. Сварка плавящимся электродом по способу Славянова: 1 – электрическая дуга; 2 – электрод; 3 – свариваемый шов; 4 – изделие.

В настоящее время этот способ сварки, благодаря своей простоте и технологичности, наиболее широко распространён в сварочном произ-

водстве и обозначается аббревиатурой MMA (Manual Metal Arc), что означает - ручная дуговая сварка штучными металлическими плавящимися электродами с защитным покрытием. Сварка, обычно, производится либо постоянным, либо переменным током. Если сварка производится постоянным током, то возможны два варианта подключения электрода и свариваемого изделия к источнику сварочного тока:

- 1. Сварка на прямой полярности. Плюс источника сварочного тока подключен к изделию.

- 2. Сварка на обратной полярности. Плюс источника сварочного тока подключен к сварочному электроду.

В паспортных данных на сварочные электроды постоянного тока указывается, в какой полярности необходимо производить сварку. Обычно сварка производится на обратной полярности. Как уже говорилось раньше, сварочные электроды должны иметь защитное покрытие, назначение которого предохранить частицы расплавленного металла от окисления и сделать дугу более устойчивой, особенно при сварке переменным током и при работе на ветру. Для защиты расплавленного металла от кислорода воздуха, наряду с защитными покрытиями, используются различные флюсы и газы. Идея осуществления сварки с применением специальных порошков – флюсов принадлежит Н. Г. Славянову. В 1936 году американская фирма “Линде” получила патент на способ сварки стали под слоем порошкообразных расплавляющихся при сварке веществ. В СССР, сварка под расплавляющимися флюсами была разработана и внедрена в промышленность в 1938 – 1940 годах Институтом электросварки АН УССР (ныне имени Евгения Оскаровича Патона).

Сварка в струе защитных газов изобретена и исследована Н. Н. Бенардосом. Защита от кислорода воздуха осуществлялась светильным газом, затем получила развитие сварка в струе аргона или гелия неплавящимся вольфрамовым электродом и плавящимся электродом (рис. 2.5). Этим способам сварки присвоена аббревиатура TIG и MIG. TIG (Tungsten Inert Gas) – сварка неплавящимся (вольфрамовым) электродом в среде инертного защитного газа, например, так называемая, аргонно-дуговая сварка. MIG (Mechanical Inert Gas) - механизированная (полуавтоматическая) сварка в струе инертного защитного газа.

В 1952 году К. В. Любавским и Н. М. Новожиловым была изобретена специальная легированная проволока, применение которой позволило осуществлять сварку плавящимся электродом в среде углекислого газа. Этому способу сварки присвоена аббревиатура MAG. MAG (Mechanical Active Gas) - механизированная (полуавтоматическая) сварка в струе активного газа.

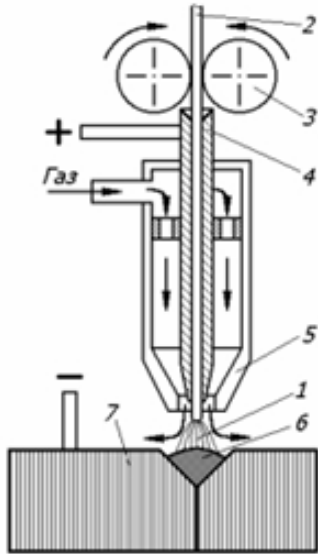


Рис. 2.5. Полуавтоматическая сварка плавящимся электродом в струе защитного газа: 1 – электрическая дуга; 2 – сварочная проволока; 3 – ролики механизма подачи проволоки; 4 – токопровод; 5 – сопло; 6 – свариваемый шов; 7 – изделие.

Электрической дугой обычно называют мощный длительный электрический разряд в среде ионизированных газов между электродами, находящимися под напряжением.

Процесс возбуждения дуги начинается с соприкосновения электродов между собой. В момент размыкания электродов между ними проскакивает искра, которая ионизирует газ в межэлектродном пространстве и создаёт канал проводимости. Под действием электрического поля электроны в ионизированной газовой среде перемещаются от катода к аноду, развивая при этом значительную скорость. Электроны на больших скоростях сталкиваются с нейтральными атомами газа. Выбивая электроны из нейтральных атомов, они производят непрерывную ионизацию газового пространства. При этом выделяется большое количество тепла. Газ в дуговом промежутке нагревается до температуры $5000 - 7000^{\circ}\text{C}$ и находится в состоянии плазмы. В свою очередь, образовавшиеся, положительные ионы движутся к катоду и, отдавая ему свою энергию, вызывают сильный нагрев электрода, образуя при этом катодное пятно. Электроны, прошедшие дуговой промежуток, ударяются о положительный электрод (анод), отдавая ему свою энергию, образуя при этом анодное пятно (рис. 2.6).

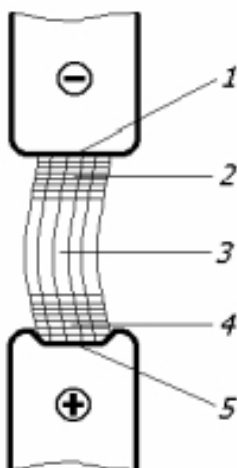


Рис. 2.6. Электрическая дуга, схема. - 1 – катодное пятно; - 2 – катодная зона; - 3 – столб дуги; - 4 – анодная зона; - 5 – анодное пятно.

Зажигание дуги может происходить и без первичного короткого замыкания, если между электродами, при помощи высоковольтного генератора – осциллятора, кратковременно приложить высокое напряжение, достаточное для электрического пробоя межэлектродного слоя газа. Электроны,

обладая меньшей массой, двигаются в электрической дуге значительно быстрее ионов. Поэтому в дуге преобладает электронный ток, направленный от катода к аноду и количество тепла, выделяемого электронами на аноде, больше чем на катоде. Исходя из вышесказанного, тепло в дуге распределяется неравномерно. Обычно на аноде выделяется 43% тепла, на катоде - 36% и в столбе дуги - 21%.

Статическая вольтамперная характеристика электрической дуги имеет три участка [2], соответствующие различным плотностям тока в сварочном электроде (рис. 2.7). При ручной и полуавтоматической сварке, на постоянном токе, процесс протекает на среднем участке статической вольтамперной характеристики дуги. На этом участке напряжение дуги зависит от её газового состава и от величины сварочного тока. Напряжение дуги, с точностью достаточной для практического применения, можно найти по эмпирической формуле: $U_d = K_r + 0,04 \cdot I_{св}$, где: $I_{св}$ - сварочный ток, А; U_d - напряжение дуги, В; K_r - коэффициент, зависящий от газовой среды, в которой горит дуга. Для воздуха $K_r = 20$, для углекислого газа $K_r = 14$ и для смеси аргона с углекислым газом $K_r = 11$.



Рис. 2.7. Статическая вольтамперная характеристика электрической дуги.

Если дуга включена в цепь переменного тока промышленной частоты, то процесс горения дуги протекает на нисходящем и горизонтальном участке её вольтамперной характеристики. В дуге переменного тока напряжение и ток непрерывно меняют свои значения и направления. При переходе тока через нулевое значение дуга гаснет и температура дугового промежутка снижается, что вызывает деионизацию дугового промежутка. В таких условиях для стабилизации процесса горения дуги надо принимать определённые меры. Одной из основных мер является применение специальных электродов переменного тока, в состав защитного покрытия которых входят элементы, имеющие низкие потенциалы ионизации. Устойчивость дуги улучшается так же при повышении напряжения холостого хода (напряжение на выходе источника при отключенной нагрузке) сварочного источника. Однако увеличения напряжения холостого хода сварочного источника приводит к увеличению массы и габаритов последнего. Кроме этого величина напряжения холостого хода ограничивается правилами техники безопасности, которые ограничивают максимальное действующее напряжение сварочного источника на уровне 80 В (ГОСТ95-77Е). С другой стороны напря-

жение холостого хода должно быть не менее чем в 1,8 – 2,5 раз, больше напряжения дуги. Общепринятой мерой повышения стабильности дуги переменного тока является включение в сварочную цепь, последовательно с дугой, индуктивного сопротивления, которое так же может использоваться для регулировки сварочного тока. В этом случае достаточно, чтобы напряжение холостого хода сварочного источника равнялось 60 – 65 В. В условиях пониженной ионизации дугового промежутка повторное зажигание дуги происходит при напряжении зажигания большем, чем напряжение дуги. Стабилизирующее действие индуктивности объясняется наличием фазового сдвига между напряжением и током в сварочной цепи переменного тока. Благодаря этому сдвигу напряжение, в момент обрыва дуги, близко к своему амплитудному значению, что благоприятно сказывается на повторном зажигании дуги. В процессе сварки длина дуги постоянно меняется. Одной из причин влияющих на длину дуги является процесс плавления и переноса металла электрода. Электродный металл, расплавленный электрической дугой, переходит в виде капель в ванну жидкого металла, которая образуется на поверхности свариваемого изделия у основания дуги (основание дуги называют также кратером). Процесс переноса металла схематично изображён на рис. 2.8.

В начальный момент времени на конце электрода образуется слой расплавленного металла (рис. 2.8,а). Затем, по мере накопления, расплавленный металл принимает вид капли (рис. 2.8,б), которая, через некоторое время переключает дуговой промежуток (рис. 2.8,в). В этот момент происходит короткое замыкание сварочной цепи и резкое возрастание величины сварочного тока. Резкое нарастание тока приводит к возникновению электромагнитных сил разрывающих каплю у её основания. Теперь дуга возникает между концом электрода и каплей. Под давлением паров и газов зоны дуги, капля с ускорением вводится в сварочную ванну металла [3]. При этом часть металла в виде брызг выбрасывается из зоны сварка поэтому всё пространство вдоль сварочного шва может оказаться залепленным каплями металла.

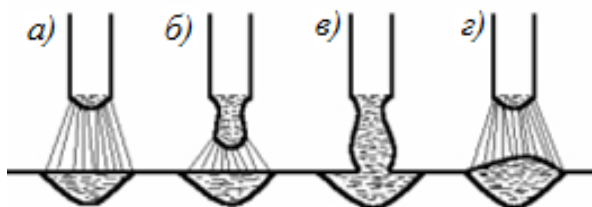
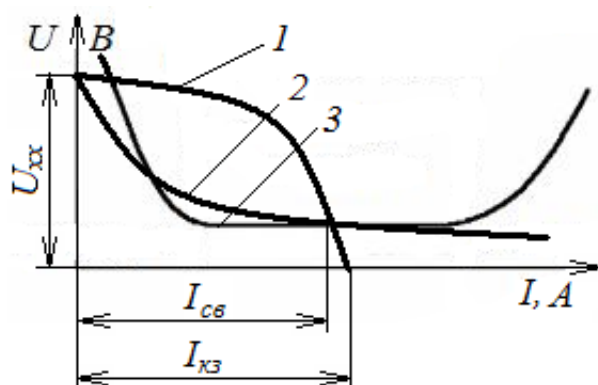


Рис. 2.8. Схема переноса металла электрода на свариваемое изделие.

Свойства сварочного источника определяются его внешними характеристиками: статической и динамической вольтамперными характеристиками. Статическая характеристика источника питания – это зависимость выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ от тока нагрузки $I_{\text{н}}$ в установившемся режиме.

Обычно статические характеристики источников питания бывают трёх видов: падающая, жёсткая и возрастающая. В установившемся режиме процесс горения дуги регламентируется статическими характеристиками сварочного источника и сварочной дуги (рис. 2.9). Отметим, что при ручной дуговой сварке процесс протекает на токах соответствующих горизонтальному участку статической характеристики сварочной дуги (80 – 300 А).

Для обеспечения высокого качества сварных изделий, при этом способе сварки, необходимо соблюдать следующие условия: изменения сварочного тока должны быть минимальными, а сила тока короткого замыкания не должна превышать удвоенное значение сварочного тока [4]. Этим условиям отвечает крутопадающая характеристика сварочного источника. При полуавтоматической сварке в среде защитного газа на больших плотностях тока, соответствующих началу восходящего участка статической вольтамперной характеристики дуги, для обеспечения саморегулирования



сварочного процесса, статическая характеристика сварочного источника должна быть жёсткой и даже возрастающей (при сварке тонкой проволокой, когда плотность тока максимальна).

Рис. 2.9. Семейство вольтамперных характеристик электрической дуги: 1 – крутопадающая характеристика; 2 – статическая характеристика дуги; 3 – жёсткая характеристика.

4.2. Сварочный трансформатор

Основным узлом современного сварочного аппарата переменного тока является специальный, как правило, однофазный сварочный трансформатор. Сварочный трансформатор предназначен для гальванической развязки между сварочной цепью и напряжением сети и понижения напряжения сети до величины необходимой для сварки и обычно содержит две, электрически не связанные между собой, обмотки. Для уменьшения потерь на вихревые токи, магнитопровод трансформатора набирается из листовой трансформаторной стали толщиной 0.35 – 0.5 мм. По характеру устройства магнитной цепи различают трансформаторы броневого и стержневого типов (рис. 2.10). Трансформаторы стержневого типа, по сравнению с трансформаторами

броневое типа, имеют более высокий КПД и допускают большие плотности токов в обмотках. Поэтому сварочные трансформаторы обычно, за редким исключением, бывают стержневого типа с цилиндрическими и дисковыми обмотками (рис. 2.10 и рис. 2.11). Регулировка сварочного тока, обычно, достигается изменением расстояния между обмотками, которые выполняются подвижными.

4.2.1. Внезапное короткое замыкание трансформатора.

Проведем анализ случая короткого замыкания на зажимах вторичной обмотки трансформатора с ферромагнитным сердечником при условии неизменной по амплитуде и частоте питающего напряжения в первичной цепи (идеальный источник напряжения) и равенстве нулю напряжения вторичной обмотки (по условию закорочена):

$$U_{1m} = \text{const}; u_2 = 0.$$

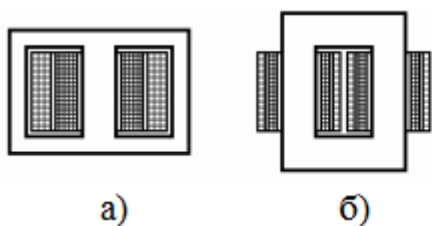


Рис.2.10. Трансформаторы броневое а) и стержневого б) типов

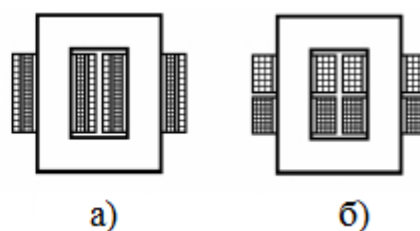


Рис.2.11. Трансформаторы с цилиндрическими а) и дисковыми б) обмотками

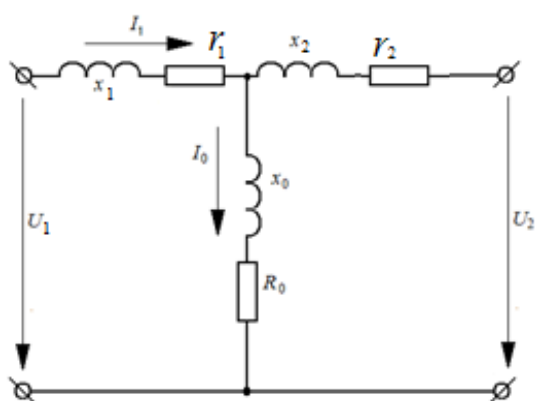
Рассмотрим простейший случай металлического короткого замыкания при замыкании накоротко вторичной обмотки трансформатора. В этом случае схема замещения каждой фазы трансформатора характеризуется параметрами короткого замыкания и представляет собой электрическую цепь с общим активным сопротивлением $r_k = r_1 + r'_2$ и общим индуктивным сопротивлением (рис. 2.12) (ветвь намагничивания шунтируется приведенным сопротивлением вторичной обмотки и её можно не учитывать):

$$x_k = x_1 + x'_2 = \omega L_{10} + \omega L'_{20} = \omega L_k,$$

где r'_2, x'_2 – приведенные к первичной обмотке активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки;

L_{10}, \dot{L}_{20} – индуктивность рассеяния первичной обмотки и приведенная индуктивность рассеяния вторичной обмотки.

Индуктивность рассеяния L_{10} первичной обмотки вызывается наличием магнитного потока рассеяния, не сцепляемого с другой обмоткой. В трансформаторах с цилиндрическими обмотками одна обмотка намотана поверх другой, поэтому практически весь магнитный поток первичной обмоткой сцепляется с витками вторичной обмотки. Только некоторая часть магнитного потока первичной обмотки, называемым потоком рассеяния, протекает в зазоре между обмотками и поэтому не связана с вторичной обмоткой. Так как ток ограничивается только омическим сопротивлением об-



моток, то трансформатор имеет жёсткую характеристику, и ток короткого замыкания на вторичной обмотке более чем в 10 раз превосходит рабочий ток трансформатора, что неприемлемо для ручной сварки.

Рис. 2.12. Схема замещения трансформатора.

Для получения падающей внешней характеристики сварочного источника, в этом случае, используют или балластный реостат или дроссель переменного тока. Наличие этих элементов сильно увеличивает массу и габариты сварочного источника, а так же уменьшают его КПД. Выход может быть в использовании трансформатора с дисковыми обмотками, имеющего падающую внешнюю нагрузочную характеристику. В трансформаторах с дисковыми обмотками одна обмотка разнесена от другой. При этом значительная часть магнитного потока первичной обмотки не связана с вторичной обмоткой, индуктивности рассеивания обмоток характеризуются большими значениями, и их реактивное сопротивление в большей мере влияет на ток трансформатора, чем в случае трансформатора с цилиндрическими обмотками. Трансформатор имеет падающую внешнюю характеристику, где рабочий ток составляет $\approx 80\%$ от тока короткого замыкания. Именно трансформаторы с развитым электромагнитным рассеянием, в основном, используются при ручной сварке на переменном токе. Индуктивность рас-

сеяния трансформатора зависит от взаимного расположения обмоток, от их конфигурации, от материала магнитопровода и даже от близко расположенных к трансформатору металлических предметов. Поэтому точный расчёт индуктивности рассеяния практически невозможен. Обычно, на практике, расчёт ведётся методом последовательных приближений с последующим уточнением обмоточных и конструктивных данных на практическом образце.

Поскольку потоки рассеяния трансформатора замыкаются, проходя главным образом в немагнитной среде, то индуктивность рассеяния трансформатора можно считать неизменной величиной:

$$L_k = L_{10} + \dot{L}_{20} = \text{const.}$$

Следовательно, при коротком замыкании, в соответствии со схемой замещения, справедливо соотношение

$$u_1 + e_k = i_k r_k \quad (2.1)$$

Где $u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \varphi_k)$ – напряжение на первичной обмотке;
 φ_k — начальная фаза напряжения (в момент короткого замыкания), аналогичная фазе включения φ_0 при холостом ходе;

$e_k = -L_k \frac{di_k}{dt}$ – э. д. с. приведенного трансформатора при коротком замыкании;

$i_k = i_{1k} = i'_{2k}$ – ток короткого замыкания приведенного трансформатора.

Подставляя значения u_1 и e_k в уравнение (2.1) и нормируя его относительно L_k , получим:

$$\frac{1}{T_k} i_k + \frac{di_k}{dt} = \frac{U_{1m}}{L_k} \sin(\omega t + \varphi_k), \quad (2.2)$$

где $T_k = \frac{L_k}{r_k}$ – постоянная времени приведенного трансформатора.

Решение уравнения (2.2) представляется в виде суммы принужденной и свободной составляющей:

$$i_k = i_{k.пр} + i_{k.св}$$

где $i_{k.пр}$, $i_{k.св}$ — мгновенные значения установившегося и переходного токов короткого замыкания.

Установившийся (принужденный) ток определяется по формуле:

$$i_{k.пр} = \frac{U_{1m}}{w_1 \sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}} \sin(\omega t + \varphi_k - \varphi_1) \cong \frac{U_{1m}}{z_k} \cos(\omega t + \varphi_k), \quad (2.3)$$

где $z_k = \sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}$ — кажущееся (полное) сопротивление короткого замыкания трансформатора;

$\varphi_1 \approx \frac{\pi}{2}$ (при $\omega L_1 \gg r_1$) — фазовый угол между током и напряжением первичной обмотки при установившемся режиме короткого замыкания.

Решая уравнение (2.2) при нулевом значении входного напряжения:

$$\frac{i_{k.св}}{T_k} + \frac{di_{k.св}}{dt} = 0,$$

получим временную зависимость свободного (переходного) тока короткого замыкания:

$$i_{k.св} = A e^{\frac{-t}{T_k}} \quad (2.4)$$

Постоянная интегрирования A в (2.4) определяется из начальных условий (при $t = 0$) в момент короткого замыкания.

Так как сварочный трансформатор замыкается накоротко на холостом ходу, то в этом случае временная зависимость тока короткого замыкания (во время переходного процесса) может быть представлена соотношением:

$$i_k = \frac{U_{1m}}{z_k} \left[e^{\frac{-t}{T_k}} \cos \varphi_k - \cos(\omega t + \varphi_k) \right], \quad (2.5)$$

Анализ уравнения (2.5) показывает, что характер переходного процесса при внезапном коротком замыкании трансформатора определяется значением начальной фазы напряжения φ_k , поэтому рассмотрим два возможных предельных случая:

1. В момент времени $t = 0$ угол $\varphi_k \approx \frac{\pi}{2}$ напряжение питающей сети проходит через максимум ($u_1 = U_{1m}$). При этих условиях свободный ток

не возникает:

$$i_{k.св} = \frac{U_{1m}}{Z_k} e^{\frac{-t}{T_k}} \cdot \cos \frac{\pi}{2} = 0.$$

Следовательно, в трансформаторе после включения наступает режим установившегося короткого замыкания с амплитудой тока:

$$I_{km} = \frac{U_{1m}}{Z_k}.$$

2. Неблагоприятным случаем, который также необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации трансформаторов, является короткое замыкание в момент, когда $\varphi_k = 0$, т. е. когда при $t = 0$ напряжение сети $u_1 = 0$. При этом ток короткого замыкания, согласно уравнению (2.5), достигает наибольшего значения через половину периода напряжения (при значении времени $t = \pi/\omega$).

$$i_{k.макс} = \frac{U_{1m}}{Z_k} \left(e^{-\pi/\omega T_k} - \cos \pi \right) = I_{km} \left(1 + e^{-\pi/\omega T_k} \right). \quad (2.6)$$

Изменение тока короткого замыкания во времени в соответствии с уравнением (2.6) при $\varphi_k = 0$ графически показано на рис. 2.13.

Для сварочных трансформаторов большой мощности всегда справедливо неравенство $r_k \ll \omega L_k$ поэтому можно полагать:

$$e^{-\pi/\omega T_k} = e^{-\pi r_k/\omega L_k} \approx 1,$$

тогда согласно (2.6) в самом неблагоприятном случае наибольшее значение тока короткого замыкания (ударный ток короткого замыкания) составляет:

$$i_{k.макс} = 2I_{km}.$$

Для трансформаторов сравнительно малой мощности, характеризующихся сравнительно большими значениями активных сопротивлений обмоток и относительно меньшими значениями индуктивного сопротивления, ударный ток несколько меньше:

$$i_{k.макс} = (1,2 \div 1,3)I_{km}.$$

Если короткое замыкание трансформатора происходит при номинальном напряжении на зажимах его первичной обмотки, то максимальное мгновенное значение тока короткого замыкания может в десятки раз превосходить величину номинального тока, в особенности для трансформаторов с небольшими значениями напряжения короткого замыкания.

Переходный процесс при коротком замыкании быстро затухает. Для трансформаторов сравнительно большой мощности он заканчивается практически в течение шести-семи периодов питающего напряжения промышленной частоты, для трансформаторов малой мощности – приблизительно в течение одного – двух периодов. Это объясняется тем, что с уменьшением мощности отношение $r_k/\omega L_k$ увеличивается. Несмотря на кратковременность процесса, неустановившийся ток короткого замыкания представляет большую опасность для трансформатора с точки зрения электродинамических усилий в обмотках, которые пропорциональны квадрату тока. Эти усилия могут привести к повреждению обмоток и изоляции трансформатора.

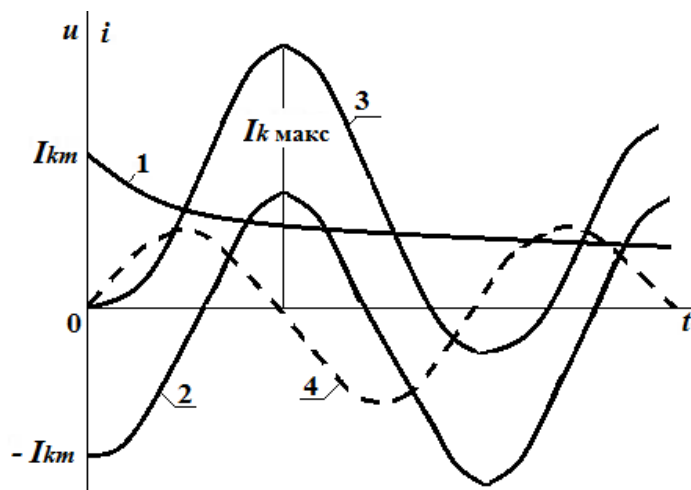


Рис. 2.13. Изменение тока внезапного короткого замыкания трансформатора при холостом ходе по нагрузке в момент: $\varphi_k = 0$; $u_1 = 0$;

$$1 - i_{k.св} = \frac{U_{1m}}{Z_k} e^{\frac{-t}{T_k}}; \quad 2 - i_{k.пр} = -I_{km} \cos \omega t; \quad 3 - i_k = f(t); \quad 4 - u_1 = U_{1m} \sin \omega t.$$

Установившийся ток короткого замыкания представляет опасность для термической прочности трансформатора. Он может вызвать недопустимый нагрев обмотки, который также приведет к повреждению электрической изоляции и возможному возгоранию. В связи с этим короткое замыкание вторичной обмотки трансформатора надо как можно скорее отключать.

5. Порядок оформления отчета

Отчёт составляется каждым студентом в соответствии с требованиями ЕСКД и должен содержать схему установки, результаты измерений и расчётов, необходимые построения, выводы, ответы на приведённые ниже вопросы.

6. Контрольные вопросы.

1. Условия возникновения и горения электрической дуги.
2. Начальные условия зажигания электрической дуги.
3. Структура электрической дуги.
4. Характеристики электрической дуги.
5. Способы и технические решения обеспечения устойчивого горения электрической дуги.
6. Основные элементы конструкции сварочного трансформатора.
7. Основные требования к сварочным трансформаторам.
8. Чем вызван бросок тока намагничивания при включении ненагруженного сварочного трансформатора в электрическую сеть?
9. Способы формирования заданных внешних вольтамперных характеристик сварочного трансформатора.
10. Почему в паспортных данных трансформатора обязательно сообщается о значении напряжения короткого замыкания?
11. Объясните, почему однопостовые источники сварочного тока должны иметь круто падающую внешнюю вольтамперную характеристику, а многопостовые жесткую внешнюю вольтамперную характеристику?

Лабораторная работа № 3

Экспериментальное исследование тиристорного регулятора напряжения ТРН-3 для активной нагрузки

Цель работы: В работе ставится цель – изучение принципа действия, схемного решения тиристорного регулятора напряжения ТРН-3 для активной нагрузки и экспериментальное исследование его характеристик под нагрузкой. В результате проведения работы студенты должны знать методы расчета тиристорного регулятора напряжения и основные формулы расчета внешних характеристик; уметь рассчитывать параметры тиристорного регулятора напряжения для обеспечения динамических характеристик электрической дуги; приобрести навыки экспериментального исследования режимов работы и снятия характеристик тиристорного регулятора напряжения под нагрузкой.

1. Объект и средства исследования.

Объектом исследования служит промышленный тиристорный регулятор напряжения ТРН-3, предназначенный для плавного регулирования (изменения) действующего значения напряжения на активной нагрузке при ручной или машинной сварке, резке или наплавке металлов однофазным переменным током промышленной частоты в стандартной сети 380 В, 50 Гц.

Таблица 3.1

Технические характеристики тиристорного регулятора напряжения ТРН-3

1.	Напряжение питания (Uпит.)	3x380В, 50 Гц
2.	Выходное напряжение (Uвых.)	5 % - 95 % Uпит
3.	Номинальный ток нагрузки (Iном.) при 380 В, А	140
4.	Максимальный ток нагрузки при 380 В, А	160
5.	Длительность 2-х кратной перегрузки не более, сек	10
6.	Стабилизация выходного напряжения	Нет
7.	Способ регулирования	Примечание 1
8.	Характер нагрузки	Активный
9.	Тип силового управляющего элемента	оптотиристорный модуль
10.	Охлаждение управляющего элемента	Естественное
11.	Защита от перегрузки	а) автоматический выключатель с тепловым расцепителем;(100 А) б) термостат $T = 70^{\circ}\text{C}$.
12.	Крепление	Вертикальное
13.	Габаритные размеры (не более), мм	650x500x280
14.	Масса устройства, кг (не более)	35
15.	Степень защиты корпуса	IP20

Таблица 3.2

Условия эксплуатации

1.	Температура окружающей среды, °С	0 – до + 35
2.	Относительная влажность воздуха, % при T=25 °С	80
3.	Атмосферное давление, мм рт. ст.	от 630 до 800

Окружающая среда невзрывоопасная, не содержащая токопроводящей пыли, агрессивных газов и паров в концентрациях, влияющих на работоспособность устройства.

Структурная схема тиристорного регулятора напряжения ТРН-3 со схемами подключения нагрузки показана на рис. 3.1.

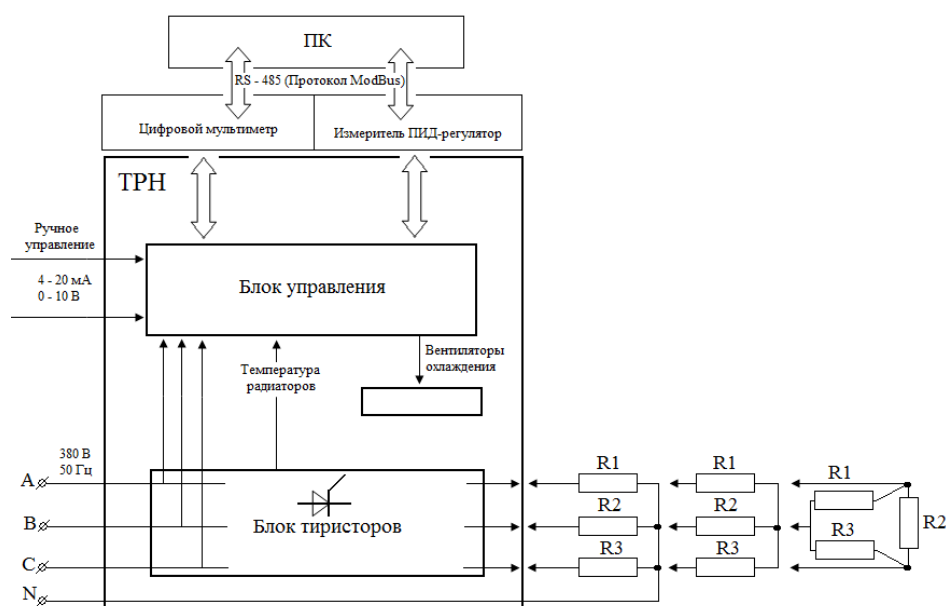


Рис. 3.1. Структурная схема регулятора напряжения ТРН-3.

Измерение токов, напряжений и мощности при проведении лабораторной работы осуществляется амперметрами, ваттметрами и вольтметрами, размещенными на лабораторном стенде и параметры которых приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3

№ п/п	Тип прибора	Система	Пределы измерений	Кол-во
1	Вольтметр		0÷600 В	1
2	Вольтметр	- // -	0÷250 В	1
3	Амперметр	- // -	0,5÷1 А	2
4	Амперметр	- // -	2,5÷5А	1
5	Ваттметр	Электродинамическая	0 – 3000 Вт	2
6	Киловаттметр	электромагнитная	0 – 30 кВт	1

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 33 (находятся в лаборатории).

2. Подготовка к работе.

2.1. Ознакомиться с приведёнными ниже методическими указаниями и рекомендованной литературой [2], [6].

2.2. Изучить конструкцию, схемное решение, параметры и режимы работы тиристорного регулятора напряжения ТРН-3 для активной нагрузки, а также два метода управления силовыми тиристорами: - фазоимпульсный; - числоимпульсный.

2.3. Изучить методы регулирования выходного напряжения:

- ручное (с помощью внешнего переменного резистора);
- дистанционное (с использованием универсального аналогового входа);
- автоматическое от встроенного ПИД-регулятора.

2.4. Изучить методы расчета тиристорного регулятора напряжения и основные формулы расчета внешних характеристик для обеспечения динамических характеристик электрической дуги.

2.5. Ознакомиться с устройством и паспортными данными исследуемого тиристорного регулятора напряжения ТРН-3.

2.6. Разработать принципиальную электрическую схему нагревательной установки при питании тиристорного регулятора напряжения от трехфазного регулируемого источника (аналогично принципиальной электрической схеме лабораторной модели печи сопротивления лабораторной работы №1).

2.7. Разработать электрическую принципиальную схему (с измерительными приборами) для исследования несимметричных режимов нагрузки в различных схемах включения.

2.8. Заполнить бланк отчета по лабораторной работе с изложением заданий раздела 2, изобразить необходимые схемы и таблицы. Привести основные расчетные формулы.

3. Рабочее задание.

3.1. Собрать электромонтажную схему модели нагревательной установки в соответствии с принципиальной электрической схемой пункта 2.6

при питании от трехфазного регулируемого источника (автотрансформатора) для исследования параметров тиристорного регулятора напряжения при симметричной нагрузке для четырех- и трехпроводной схемы включения. После проверки схемы преподавателем включить питание стенда и снять внешнюю характеристику одной фазы тиристорного регулятора напряжения при пониженном на 90% напряжении питающей сети изменением эквивалентного сопротивления нагрузки (путем коммутации резисторов фаз **A**, **B** и **C** блока резисторов лабораторного стенда) от холостого хода до заданного значения, результаты измерений записать в табл. 3.4 (разработать таблицу).

3.2. Снять внешнюю характеристику одной фазы тиристорного регулятора напряжения при пониженном на 80% напряжении питающей сети изменением эквивалентного сопротивления нагрузки (путем коммутации резисторов фаз **A**, **B** и **C** блока резисторов лабораторного стенда) от холостого хода до заданного значения, результаты измерений занести в табл. 3.4.

3.3. Снять внешнюю характеристику тиристорного регулятора напряжения при пониженном на 70% напряжении питающей сети изменением эквивалентного сопротивления нагрузки (путем коммутации резисторов фаз **A**, **B** и **C** блока резисторов лабораторного стенда) от холостого хода до заданного значения, результаты измерений занести в табл. 3.4.

3.4. Данные опытов по пунктам 3.1 – 3.3 для трех различных значений напряжения питающей сети занести в табл. 3.4 и для каждого значения построить на одном графике кривые зависимости $U_2 = f(I_H)$ и $\cos \varphi = f(I_H)$.

3.5. Исследовать параметры режима тиристорного регулятора напряжения **ТРН-3-160-Н** при номинальном напряжении питающей сети и несимметричной нагрузке для четырех- и трехпроводной схемы включения. Несимметрию нагрузки по фазам регулировать в пределах от нуля до 40 % и от 40 % до 80 %. Результаты измерения мощности, напряжений и токов внести в табл. 3.5 (разработать таблицу). Измерить фазные напряжения в точках присоединения нагрузки и напряжение смещения нейтрали в трехпроводной схеме. Рассчитать напряжение смещения нейтрали системы векторов фазных напряжений в точках присоединения нагрузки.

4. Методические указания.

Тиристорный регулятор напряжения **ТРН-3-160-Н** (в дальнейшем – ТРН) предназначен для плавного регулирования значения действующего напряжения на нагрузке в трехпроводной сети 380В, 50 Гц.

Конструктивно ТРН выполнен в виде металлического корпуса состоящего из ящика и дверцы рис. 3.2.

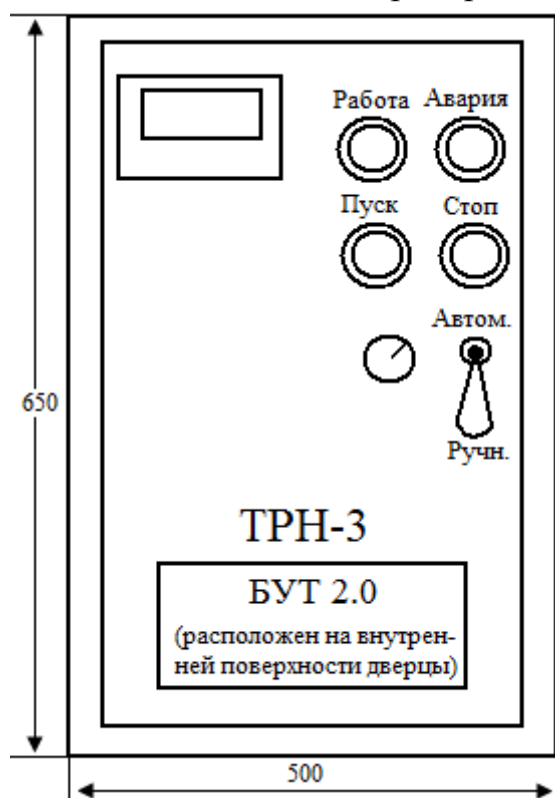


Рис. 3.2. ТРН-3-160-Н. Вид со стороны передней панели.

В ящике расположены:

- а) силовые полупроводниковые элементы (VS1, VS2, VS3 рис. 3.3) каждый на своём алюминиевом радиаторе;
- б) клеммные зажимы X1 для подключения питающей сети (3x380В, 50Гц) и нагрузки соответственно;
- в) клеммный зажим X2 для подключения цепей управления (рис. 3.3);
- д) блок питания (A2) и плата управления тиристорами БУТ 2.0 (A1, рис.3.3) расположены на панели ящика;

На дверце (рис. 3.1) расположены:

- а) вольтметр контроля линейного напряжения на нагрузке (PV1, рис. 3.2);
- б) переменный резистор (R2, рис. 3.2);
- в) переключатель источника управляющего сигнала (SA1, рис. 3.2);
- г) кнопка “Пуск” (SB1) и кнопка “Стоп” (SB2 - красный);
- д) индикатор “Работа” (HL1 - зелёный) и индикатор “Авария” (HL2 - красный) (рис. 3.2).

Область применения тиристорных регуляторов ТРН-3:

- линии производства лаков, красок, пластмасс, пищевых продуктов, стройматериалов;
- электрические печи различного назначения;
- электрообогрев трубопроводов, бункеров, сосудов, прессов;
- окрасочные и сушильные камеры;
- системы электроотопления (котлы, бойлеры, парогенераторы, воздуходувки и пр.);
- электрообогрев необслуживаемых объектов, строительный электрообогрев;
- системы подогрева нефти, мазута, битума;
- электрообогрев промышленных объектов и установок, теплиц, хранилищ, грунта, электрошкафов;

- системы автоматизации управления энергохозяйством и технологическими процессами с возможностью интеграции в действующие АСУТП;
- системы электроосвещения.

ТРН позволяет точно поддерживать температурные режимы технологических процессов, повысить качество выпускаемой продукции и снизить объем некондиционной продукции, резко снизить потребление электроэнергии. Срок окупаемости ТРН в зависимости от сферы применения составляет от 6 до 12 месяцев.

4.1. Устройство и принцип работы

Блок управления тиристорами БУТ 2.0 (А1) определяет момент перехода через “0” напряжения питания. На основании сигнала задания величины напряжения на нагрузке ($U_{упр}$ – с переменного резистора R2 или $I_{упр}$ – внешний токовый сигнал 4..20 мА) вырабатывает сигналы управления силовыми элементами (VS1, VS2 и VS3). Напряжение на нагрузки контролируется по вольтметру (PV1).

Перечень элементов схемы ТРН-3-160-Н представлен в табл. 3.6

Таблица 3.4

ТРН-3-160-Н. Схема электрическая принципиальная. Перечень элементов

Поз. Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
A1	Блок управления тиристорами БУТ 2.0	1	ЗАО “Энергис”
A2	Блок питания БП 2.0	1	ЗАО “Энергис”
VS1, VS2, VS3	МТГОТ-200-14	3	
M1	Вентилятор	1	
PV1	Вольтметр Э8030-М1	1	
HL1, HL2	Арматура сигнальная 220В 50Гц	2	
R2	Резистор переменный 100 Ом	1	
SB1, SB2	Кнопка SB-7	2	
SA2	Переключатель SS-1321 (ON-ON 250В, 10А)	1	
P1, P2, P3	Варистор 750В	3	800 В
X1, X3	Клемный зажим ЗНИ-70	8	ИЭК
X2	Клемный зажим ТВ2506	7	

4.2. Указания по мерам безопасности

К обслуживанию и монтажу ТРН-3-160-Н допускаются лица, изучившие данный паспорт и имеющие право самостоятельной работы на электроустановках до 1000 В.

Все работы по установке и монтажу ТРН необходимо производить только при снятом напряжении сети.

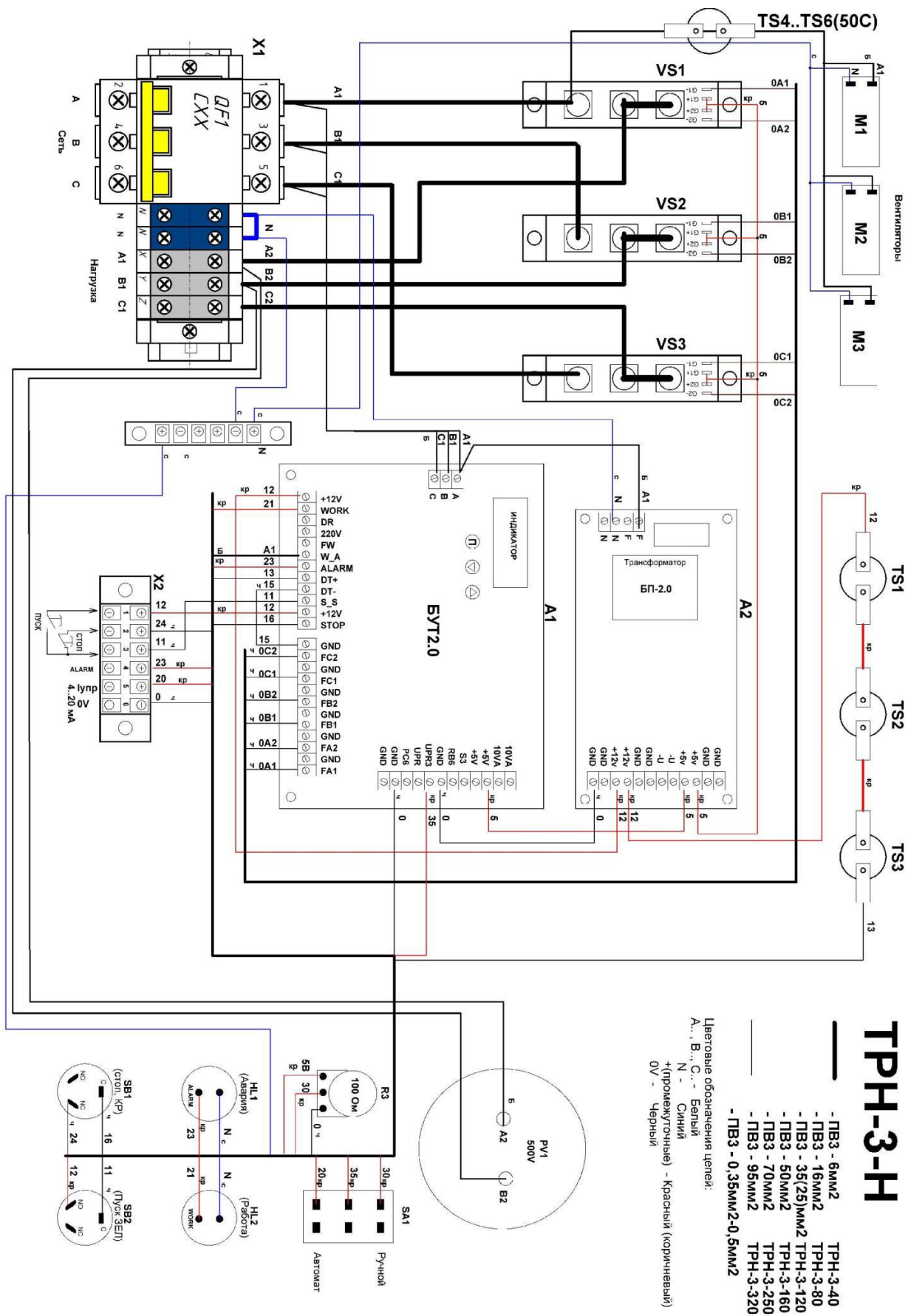


Рис. 3.3. ТРН-3-160-Н. Схема электрическая принципиальная

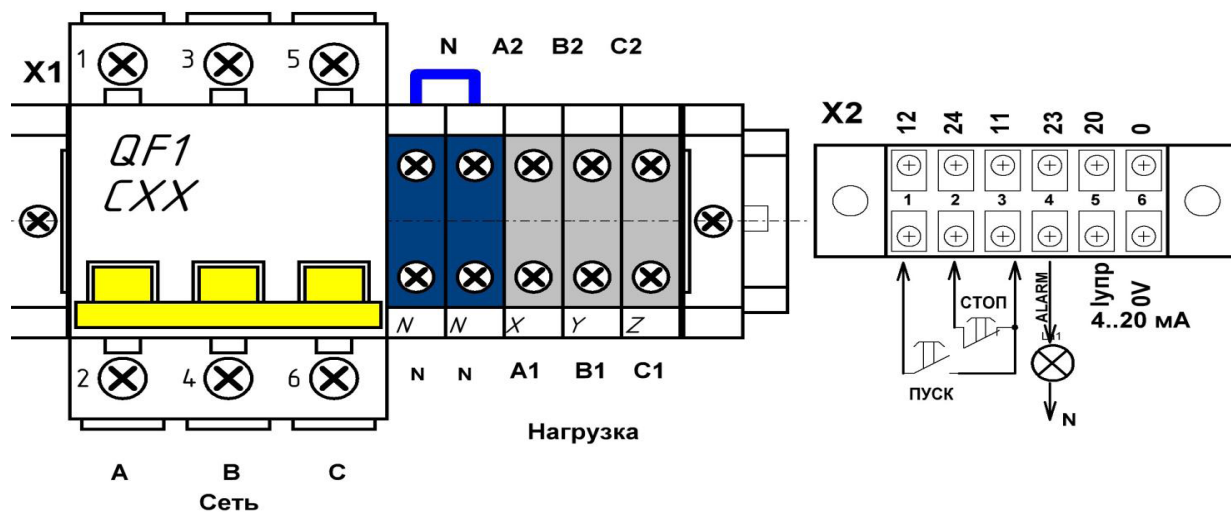


Рис. 3.4. ТРН-3-160-Н. Схема подключения

Не допускается использовать ТРН во взрывоопасных помещениях. Внимание! Все работы, при монтаже, ремонте и в процессе эксплуатации должны проводиться с соблюдением требований безопасности по ГОСТ 12.1.003 "Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей" и ГОСТ 12.1.006 "Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей".

Внимание! Запертый тиристор не является разрывом силовой цепи. Токи утечки могут достигать опасной величины.

4.3. Подготовка к работе ТРН-3-160-Н

- Аккуратно извлечь ТРН из транспортной тары. Произвести внешний осмотр ТРН на предмет наличия механических повреждения.
- Изучить паспорт и инструкцию по эксплуатации.
- ТРН на месте эксплуатации для надежного охлаждения тиристоров необходимо оставлять свободное пространство не менее 0,3 м снизу и сверху ТРН.
- Подключить ТРН в разрез силового кабеля трёхпроводной сети (3×380В 50 Гц) (рис. 3.3 и рис. 3.4). Входное напряжение подается на клеммы А, В, С, N (X1).
- Выходное напряжение снимается с клемм А1, В1, С1 и N.

- Подключение органов дистанционного управления (SB3, SB4 индикатор аварии) и сигнала задания (4..20 мА) осуществляется к клеммному зажиму X2 (рис. 3.3).

4.4. Порядок работы ТРН-3-160-Н

- Установить тумблеры: переключатель SA2 – “Руч.” (см. рис. 3.2, рис. 3.3). Переменный резистор R2 – крайнее левое положение. Подключить кнопки дистанционного управления SB3 и SB4. При отсутствии кнопок установить перемычку между клеммами X2.2 и X2.3 (вместо кнопки SB4 “Стоп”).

- Подать напряжение питания. Если все подключения (п.6) выполнены правильно, то на индикаторе БУТ 2.0 высвечивается «П000», что означает готовность к пуску. Цифры «000» означают, что напряжение на нагрузке равно нулю. Если на индикаторе высвечиваются показания отличные от «П000» (например “F - - В” – отсутствие фазы или “F - с” – неправильное чередование). Если напряжение есть, то поменять местами два любых провода на входе (чередования фаз);

- Запрограммировать значения начального напряжения («u»), максимального напряжения («U»), времени нарастания («п») и спада напряжения («с») в следующем порядке:

- нажать и отпустить кнопку «P» – символ «П» заменяется символом «п»; кнопками «▲» и «▼» установить желаемое *время нарастания напряжения* от нулевого до максимального. Число на индикаторе – время нарастания напряжения в сек. Диапазон уставок: 1 – 255 с (п = 10 сек. – заводская уставка).

- нажать и отпустить кнопку «P» – символ «п» заменяется символом «с»; кнопками «▲» и «▼» установить желаемое время спада напряжения от максимального до нулевого. Число на индикаторе – *время спада* напряжения в сек. Диапазон уставок: 1-255 с (с = 10 сек. – заводская уставка).

- нажать и отпустить кнопку «P» – символ «с» заменяется символом «u»; кнопками «▲» и «▼» установить *начальное напряжение*. Диапазон уставок: 0 – 100 % (u = 5 % . – заводская уставка). **Унач не может быть больше Uкон (u < U).**

- нажать и отпустить кнопку «P» – символ «u» заменяется символом «U»; кнопками «▲» и «▼» *установить конечное напряжение* . Диапазон уставок: 0 – 100 %.

- нажать и отпустить кнопку «P» – символ «U» заменяется символом «П000», происходит автоматическая запись уставок в энергонезависимую память и возврат в режим готовности к пуску.

- Нажать кнопку SB1 “Пуск” (или SB3). Напряжение на нагрузке за время «п» с величины «u» достигнет величины «U», а затем за время «с»

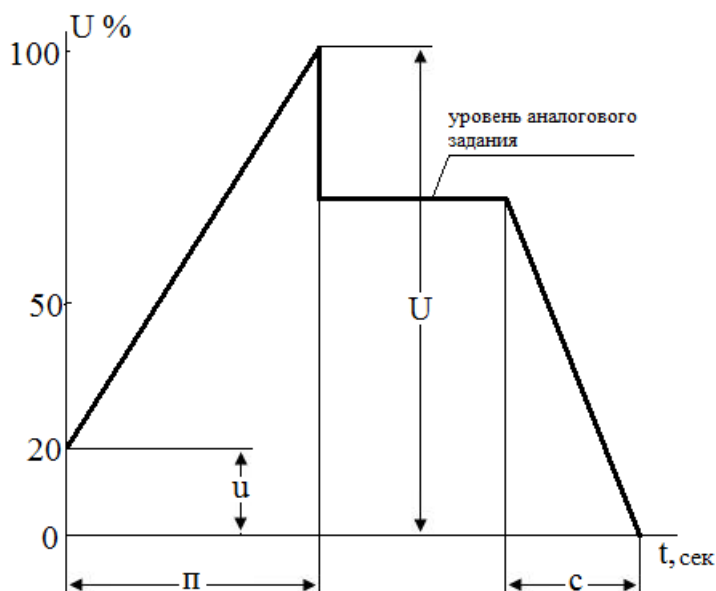
спадет до 0. На индикаторе высвечивается «A000», что соответствует переходу ТРН в режим работы по аналоговому сигналу.

- Вращая ручку резистора R2 выставить на нагрузке необходимое напряжение. Контроль напряжения в нагрузке вести при помощи вольтметра PV1 (рис. 1). - Для дистанционного изменения напряжения на нагрузке: сигнал 4..20 мА (клеммы X2.5 и X2.6) - перевести тумблер SA2 в положение «Авт.».

- По окончании технологического процесса нажать кнопку SB2 «Стоп» (или SB4). После того как напряжение на нагрузке спадет до 0 (на индикаторе «П000») выключить автоматический выключатель QF1.

4.5. Методика проверки ТРН-3-160-Н

- Нагрузка ТРН – лампы накаливания (3 шт. 500 Вт.).
- Отключить SB3 и SB4. Установить переключку между клеммам X2.2 и X2.3. Тумблер S2 перевести в положение «Руч.»



- Подать напряжение питания на ТРН – включить автоматический выключатель QF1.

- Нажать SB1. Вращая ручку переменного резистора R2 контролировать накал ламп.

Рис. 3.5. ТРН-3-160-Н. Типовая характеристика изменения напряжения, где:

- « π » – время нарастания напряжения (1..255 сек.);

- « σ » – время спада напряжения (1..255 сек.);

- « u » – начальное напряжение (0..100%);

- « U » – конечное напряжение (0..100%)*.

Таблица исполнений ТРН

Обозначение	Номинальный ток, А	Примечание
ТРН-1-25ЦВ	25	Однофазный
ТРН-1-40	40	Однофазный
ТРН-1-80	80	Однофазный
ТРН-1-160	25	Однофазный
ТРН-3-25	25	Трёхфазный
ТРН-3-40	40	Трёхфазный

ТРН-3-80	80	Трёхфазный
ТРН-3-160	160	Трёхфазный
ТРН-3-200	200	Трёхфазный
ТРН-3-320	320	Трёхфазный
ТРН-3-600	600	Трёхфазный

5. Порядок оформления отчета.

Отчёт составляется каждым студентом на листах формата А4 в соответствии с требованиями ЕСКД и должен содержать подробные ответы на задания раздела подготовки к работе, схемы исследуемой установки, результаты измерений и расчётов, необходимые построения и выводы, а также ответы на контрольные вопросы.

6. Контрольные вопросы.

1. Объясните принцип работы тиристорного регулятора напряжения.
2. Область применения тиристорных регуляторов ТРН.
3. Энергоэффективность устройств с тиристорными регуляторами ТРН.
4. Способы управления тиристорами.
5. В чем отличие тиристорного регулятора напряжения от инвертора?
6. Влияние тиристорных регуляторов напряжения на качество электрической энергии.
7. Почему в силовой цепи с нагрузкой под напряжением тиристор не обеспечивает её полного отключения?
8. Факторы, обуславливающие токи утечки тиристора.
9. Приведите примеры электротехнологических установок с плавным нарастанием и плавным спадом питающего напряжения.
10. Приведите примеры электротехнологических установок, требующих стабилизированного питающего напряжения.
11. Приведите примеры электротехнологических установок, питающее напряжение которых должно изменяться по закону графика рис. 3.5.
12. Особенности работы с тиристорным регулятором напряжения **ТРН-3-160-Н**.
13. Особенности вольтамперной характеристики тиристорного регулятора напряжения.

Лабораторная работа №4

Исследование энергетических характеристик индукционной нагревательной системы

Цель работы: В работе ставится цель – изучение принципа индукционного нагрева, влияния материала и диаметра нагреваемого цилиндра на электрический КПД и $\cos \varphi$ индукционного нагревателя. В результате проведения работы студенты должны знать физические процессы при поглощении электромагнитной энергии металлическим телом, помещенным в переменное электромагнитное поле; уметь рассчитывать параметры индукционной установки для обеспечения заданного режима нагрева металлической детали; приобрести навыки экспериментального исследования режимов работы и снятия характеристик индукционной установки.

1. Объект и средства исследования.

Объектом исследования служит лабораторная индукционная нагревательная панель (плита), в состав которой входят:

- индукционная катушка;
- преобразователь частоты;
- электронный блок управления;
- стеклокерамическая поверхность.

Индукционная настольная панель типа Endeaver IP-13 (рис. 4.1) представляет собой стеклокерамическую плиту с индуктором, выполненном в виде конфорки, и предназначенная для нагрева металлических деталей с ферромагнитными свойствами. Рабочий процесс происходит благодаря индукционной катушке, расположенной под поверхностью плиты (рис. 4.2). В процессе преобразования электрической энергии (нагрева) она является первичной обмоткой трансформатора, а нагреваемая деталь - вторичной. Индукционной «нагрев» возможен только при слаженной работе всех механизмов плиты и находящейся на ней ферромагнитной детали. Расположение конфорок индукционной настольной панели можно определить только по обведенным на стеклокерамической поверхности контурам. Главным элементом, который инициирует выделение тепловой энергии в ферромагнитном материале, является индукционная катушка, расположенная под конфоркой и по которой протекает ток частотой 30 – 60 кГц. Поверхность плиты обычно нагревается до 60 градусов и после ее выключения довольно быстро охлаждается, примерно за 6 минут. Индукционные конфорки обладают широким диапазоном мощности нагрева, от 50 до 3500 Вт, которая легко регулируется.



Рис. 4.1. Индукционная настольная панель типа Endeaver IP-13

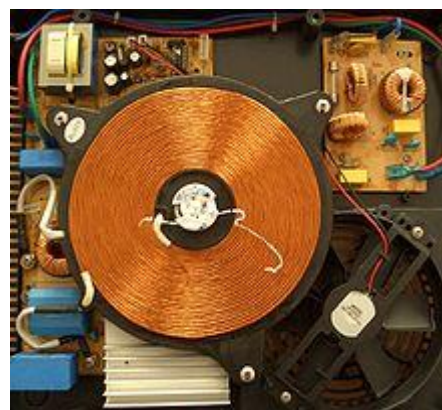


Рис.4.2. Индуктор индукционной настольной панели.


В зависимости от вида нагреваемой детали, настольная индукционная плита может иметь различные формы, такие как: плоскую, вогнутую или комбинированную. Несмотря на свою довольно хрупкую на вид стеклянную поверхность, плита выдерживает удар, равный падению двухкилограммовой детали с высоты 50 см.

Индукционная панель имеет защиту, автоматически срабатывающую в случае работы одной и той же настройки в течение нескольких часов. Также в панель встроен таймер, индикатор и клавиша блокировки для включения плиты.

Коэффициент полезного действия индукционной панели составляет 90 %, что свидетельствует о высокой энергоэффективности данного устройства и о незначительном нагреве поверхности плиты (обычно стеклокерамическая поверхность бывает слегка теплой). В случае разогрева панели до 200 °С загорается индикатор остаточного тепла, который информирует о том, что поверхность не безопасна. Но для того чтобы конфорка включилась, она должна быть перекрыта нагреваемым материалом на большую часть своей площади (не менее 70%). Это во многом зависит от магнитных свойств ферромагнитного материала. Например, деталь из нержавеющей стали марки 18/10, а также изготовленная из меди, алюминия для такой индукционной плиты не подойдет. Некоторые индукционные панели могут даже регулировать диаметр зоны генерации вихревых токов, "подгоняя" при помощи сенсоров панели диаметр зоны нагрева под диаметр детали (если он лежит в пределах, допустимых для данной конфорки). Если же, например, деталь имеет слишком маленький диаметр, некоторые плиты "сообщают" об этом при помощи светового индикатора над конфоркой.

Измерение токов, напряжений и мощности при проведении лабораторной работы осуществляется амперметрами, вольтметрами и ваттметрами, размещенными на панели и столе лабораторного стенда и параметры которых приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

№ п/п	Тип прибора	Система	Пределы измерений	Кол-во
1	Вольтметр		0÷600 В	1
2	Вольтметр	- // -	0÷250 В	1
3	Амперметр	- // -	0,5÷1 А	2
4	Амперметр	- // -	2,5÷5А	1
5	Ваттметр	Электродинамическая	0 – 3000 Вт	2
6	Киловаттметр	электромагнитная	0 – 30 кВт	1

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 33 (находятся в лаборатории).

2. Подготовка к работе.

2.1. Ознакомиться с приведёнными ниже методическими указаниями и рекомендованной литературой [2], [3], [5].

2.2. Изучить электрическую схему установки, порядок практического выполнения работы.

2.3. Разработать электрическую принципиальную схему установки для исследования параметров индукционной нагревательной панели с учетом оборудования стенда и наличия измерительных приборов.

2.4. Заполнить бланк отчета по лабораторной работе с изложением заданий раздела 2, изобразить необходимые схемы и таблицы. Привести основные расчетные формулы.

3. Рабочее задание.

3.1. Собрать электромонтажную схему модели индукционной установки в соответствии с принципиальной электрической схемой пункта 2.3 и после проверки схемы преподавателем установить нагреваемую деталь (из указанного преподавателем металла) на конфорку индукционной плиты подать напряжение на стенд, включив автоматический выключатель QF.

3.2. Отключить питание стенда автоматическим выключателем QF, сменить нагреваемую деталь, повторить эксперимент по пункту 3.1. Эксперимент проводить с тремя нагреваемыми деталями одного диаметра (задается преподавателем) из различных металлов (медь, латунь, сталь), затем с

три нагреваемыми деталями из одного металла (задается преподавателем) различного диаметра ($D_2 = 60, 80, 100$ мм). После окончания эксперимента отключить питание стенда автоматическим выключателем QF .

Таблица 4.2

Экспериментальные данные					
№ нагреваемой детали	Ток, потребляемый индуктором $I_{и}, А$	Напряжение на индукторе $U_{и}, В$	Активная мощность индуктора $P_{и}, Вт$	Разность температуры $\Delta T^{\circ}C$	
Расчетные данные					
Мощность, выделяющаяся в нагрузке $P_2, Вт$	Полная мощность индуктора $S, В\cdot А$	Электрический КПД индуктора η	Коэффициент мощности индуктора $\cos \varphi$		

3.3. По экспериментальным данным табл. 4.2 определить глубину проникновения электромагнитной волны в материал нагреваемой детали Δ_{Θ} , коэффициент мощности индукционного нагревателя $\cos \varphi$, электрический коэффициент полезного действия индукционного нагревателя η . Результаты расчетов записать в табл.4.2. Построить графики зависимостей $\cos \varphi = f(D_2)$, $\eta = f(D_2)$ и $\eta = f(\rho)$.

4. Методические указания

4.1. Индукционный нагрев.

Индукционный нагрев получил наиболее широкое распространение на металлургических, машиностроительных и металлообрабатывающих предприятиях, где он используется для плавки металла, термической обработки деталей, а также для нагрева мерных заготовок под пластическую деформацию (ковку, штамповку, прессовку, гибку, прокатку). Преимущества индукционного нагрева перед другими видами нагрева:

- высокая скоростью и равномерность нагрева, отсутствие контакта между нагревателем и загрузкой;
- высокий электрический и тепловой КПД;
- легкость механизации и обслуживания, простота управления процессом нагрева, возможность его полной автоматизации.

Индукционные установки по назначению разделяются на:

- плавильные печи для плавки металлов и сплавов в воздушной и нейтральной атмосферах, а также в вакууме (канальные и тигельные печи);
- нагревательные установки сквозного нагрева металла перед пластической деформацией;
- установки поверхностной закалки деталей из стали и чугуна;
- установки местного нагрева металлов для пайки, сварки, наплавки, цементации и т.д.;
- установки высокотемпературного нагрева в вакууме для спекания, дегазации, отжига деталей;
- установки низкотемпературного нагрева в воздушной атмосфере (отпуск, отжиг, нормализация и т.д.).

Принцип действия установок индукционного нагрева основан на поглощении электромагнитной энергии металлическим телом, помещенным в переменное электромагнитное поле и превращения ее в тепловую. Электрическая энергия от источника питания передается нагреваемому объекту за счет электромагнитной индукции.

Исходными уравнениями для исследования электромагнитных процессов при индукционном нагреве являются уравнения Максвелла для электромагнитного поля, которые в векторной форме имеют вид:

$$\operatorname{rot} H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (4.1);$$

$$\operatorname{rot} E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (4.2);$$

$$\operatorname{div} H = 0 \quad (4.3);$$

$$\operatorname{div} E = 0 \quad (4.4),$$

где D – электрическая индукция ($D = \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot E$);

B – магнитная индукция ($B = \mu_0 \cdot \mu \cdot H$);

J – плотность тока проводимости ($J = \gamma \cdot E$);

H, E – напряженности магнитного и электрического полей соответственно;

γ – удельная проводимость проводника;

μ, ϵ – относительные магнитная и диэлектрическая проницаемости соответственно;

- μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость вакуума, Гн/м
 ($\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м);
- ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м
 ($\varepsilon_0 = 1/(4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^9)$ Ф/м).

Уравнение (4.1) представляет собой обобщенный закон полного тока в дифференциальной форме. В его правой части первая составляющая – плотность тока проводимости, вторая – плотность тока смещения. Уравнение (4.2) есть закон электромагнитной индукции в дифференциальной форме. Эти уравнения выражают тот факт, что переменные магнитные и электрические поля существуют совместно и являются разными сторонами единого электромагнитного процесса. Уравнение (4.3) является выражением принципа непрерывности магнитного потока, означающего отсутствие источников магнитного поля. Уравнение (4.4) представляет собой дифференциальную форму теоремы Гаусса.

Так как индукционные установки питаются от источников переменного напряжения, то напряженности электрического и магнитного полей также изменяются во времени синусоидально, и их можно представить в комплексной форме. Тогда уравнения (4.1) – (4.4) запишутся как:

$$\operatorname{rot} \dot{H} = \gamma \cdot \dot{E} \quad (4.5);$$

$$\operatorname{rot} \dot{E} = -\mu_0 \cdot \mu \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \quad (4.6);$$

$$\operatorname{div} \dot{H} = 0 \quad (4.7);$$

$$\operatorname{div} \dot{E} = 0 \quad (4.8).$$

Качественный анализ характеристик индукционного нагрева удобно проводить, исследуя проникновение плоской электромагнитной волны в полубесконечное тело. В этом случае соотношения (4.1) и (4.2) преобразуются в уравнения:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \frac{j \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot \mu}{\rho} \cdot H \quad (4.9);$$

$$E = -\rho \cdot \frac{\partial H}{\partial z} \quad (4.10),$$

Уравнения (4.9) и (4.10) решаются при следующих граничных условиях:

- при $z = 0$

$$\begin{aligned} H &= H_0 \\ E &= E_0 \end{aligned} \quad (4.11);$$

- при $z \rightarrow \infty$

$$\begin{aligned} H &= 0 \\ E &= 0 \end{aligned} \quad (4.12).$$

Решение (4.9) и (4.10) показывает, что напряженности магнитного и электрического поля в проводящем теле изменяются по экспоненте

$$H = H_0 \cdot \exp\left(-\frac{1+j}{\Delta_{\text{э}}}\cdot z\right) \quad (4.13);$$

$$E = H_0 \cdot (1+j) \cdot \frac{\rho}{\Delta_{\text{э}}} \cdot \exp\left(-\frac{1+j}{\Delta_{\text{э}}}\cdot z\right) \quad (4.14),$$

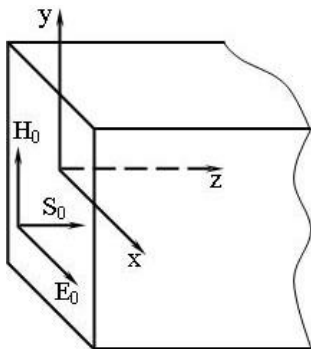
где $j = \sqrt{-1}$ - мнимая единица; $\Delta_{\text{э}}$ - глубина проникновения плоской электромагнитной волны в полубесконечное тело.

Глубина проникновения характеризует быстроту спада напряженностей электромагнитного поля в глубину металла и определяется по формуле

$$\Delta_{\text{э}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu}} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} \quad (4.15).$$

Плотность потока энергии снижается пропорционально квадрату экспоненты расстояния на поверхности

$$S = H_{0m}^2 \cdot (1+j) \cdot \frac{\rho}{2 \cdot \Delta_{\text{э}}} \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot z}{\Delta_{\text{э}}}\right) \quad (4.16).$$



Отметим, что плоская электромагнитная волна характеризуется определенными направлениями векторов H , E и S по осям координат y , x и z (рис. 4.3) и сдвигом по фазе между H и E , равным 45° .

Рис. 4.3. Ориентация векторов H , E и S по осям координат y , x и z

Соотношение (4.16) позволяет получить формулы для расчета активной и реактивной мощностей электромагнитного поля в полубесконечном проводящем теле, отнесенном к единице площади поверхности тела, причем численно эти мощности совпадают

$$P_0 = |Q_0| = 10^{-6} \cdot H_{0m}^2 \cdot \sqrt{\rho \cdot \mu \cdot f} \quad (4.17).$$

Анализ выражений (4.15) и (4.17) позволяет сделать следующие выводы:

- на глубине Δ_3 напряженность электромагнитного поля уменьшается в $e = 2,718$ раз по сравнению с ее значением на поверхности металлического тела. В слое толщиной Δ_3 выделяется 86,4 % всей энергии, прошедшей через поверхностный слой загрузки;

- выделение энергии в проводнике зависит как от параметров поля, так и от свойств проводника;

- неравномерность выделения энергии, т.е. поверхностный эффект в проводнике также определяется параметрами поля и проводника.

4.2. Расчет энергетических параметров индуктора.

Рассмотрим наиболее распространенный случай системы "индуктор-загрузка", когда индуктор и загрузка имеют цилиндрические формы, причем загрузка находится внутри индуктора (рис. 4.4). Основными энергетическими параметрами индуктора, характеризующими эффективность его работы, являются КПД и коэффициент мощности $\cos \varphi$. К величинам, составляющим эти параметры, относятся активная и реактивная мощности индуктора (P_1 и Q_1), активная и реактивная мощности загрузки (P_2 и Q_2) и реактивная мощность зазора (Q_3).

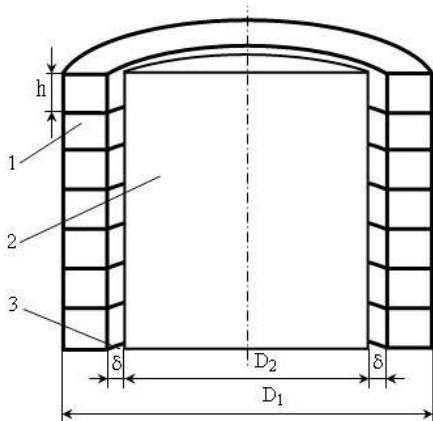


Рис. 4.4. Цилиндрическая осесимметричная система "индуктор-загрузка": 1 – индуктор; 2 – загрузка; 3 – зазор между индуктором и загрузкой.

Известно, что удельная мощность, выделяющаяся в цилиндрическом нагреваемом теле, не зависит от абсолютной величины радиуса цилиндра, а зависит только от относительного

радиуса загрузки. Поэтому при заданных значениях ρ и μ наиболее быстрый нагрев можно получить только в том случае, если принять для сквозного нагрева относительный радиус загрузки равным десяти

$$\frac{R_2 \cdot \sqrt{2}}{\Delta_9} = 10, \quad (4.18),$$

что соответствует большинству практических случаев. Тогда активная и реактивная мощности загрузки равны, что позволяет с достаточным приближением считать поверхность загрузки и индуктора плоскими, т.е. пренебречь кривизной поверхности.

$$P_2 = Q_2. \quad (4.19)$$

Отсюда P_1 , кВт/м, и Q_1 , квар/м, создаваемые за счет поглощения электромагнитной энергии индуктором на 1 метр его длины, определяются как

$$P_1 = 6,2 \cdot 10^{-6} \cdot (I \cdot w_{1,0})^2 \cdot D_1 \cdot \sqrt{\rho_1 \cdot f} \cdot F_{\text{ц}} / k_{\text{зи}} \quad (4.20);$$

$$Q_1 = 6,2 \cdot 10^{-6} \cdot (I \cdot w_{1,0})^2 \cdot D_1 \cdot \sqrt{\rho_1 \cdot f} \cdot G_{\text{ц}} / k_{\text{зи}} \quad (4.21),$$

где I – ток индуктора, А;

$w_{1,0}$ – число витков индуктора на единицу его длины;

D_1 – диаметр индуктора (внутренний), м;

ρ_1 – удельное электрическое сопротивление материала индуктора, Ом·м;

f – частота источника питания, Гц;

$k_{\text{зи}}$ – коэффициент заполнения индуктора.

Внутренний диаметр индуктора определяется по формуле

$$D_1 = D_2 + 2\delta. \quad (4.22)$$

Активная и реактивная мощность P_2 , кВт/м, и Q_2 , квар/м, загрузки на 1 метр ее длины определяется как:

$$P_2 = 6,2 \cdot 10^{-6} \cdot (I \cdot w_{1,0})^2 \cdot D_2 \cdot \sqrt{\rho_2 \cdot \mu_2 \cdot f} \cdot F_{\text{ц}}, \quad (4.23)$$

$$Q_2 = 6,2 \cdot 10^{-6} \cdot (I \cdot w_{1,0})^2 \cdot D_2 \cdot \sqrt{\rho_2 \cdot \mu_2 \cdot f} \cdot G_{\text{ц}}, \quad (4.24)$$

где D_2 – диаметр загрузки, м; ρ_2 – удельное электрическое сопротивление материала загрузки, Ом·м; μ_2 – относительная магнитная проницаемость материала загрузки.

Потери мощности в зазоре Q_3 , квар/м, имеют только реактивную составляющую и зависят от взаимных размеров индуктора и загрузки

$$Q_3 = 6,2 \cdot 10^{-9} \cdot (I \cdot w_{1,0})^2 \cdot f \cdot D_2^2 \cdot \left[\left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 - 1 \right] \quad (4.25).$$

Электрический КПД системы "индуктор-загрузка" определяется из соотношения полезной активной мощности, выделяющейся в металле, и активных потерь в индукторе

$$\mu_{\text{эл}} = \frac{P_2}{(P_1 + P_2)} \quad (4.26).$$

При определении коэффициента мощности системы "индуктор-загрузка" необходимо учитывать активную и реактивную мощности, выделяющиеся в индукторе, загрузке, а также в зазоре

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{P_1 + P_2} \right)^2}} \quad (4.27).$$

Вследствие высокой собственной индуктивности индукционного нагревателя естественный коэффициент мощности его практически всегда намного меньше максимально теоретически возможного, равного 0,707. Для повышения значения коэффициента мощности используются средства искусственной компенсации (как правило, батареи статических конденсаторов), необходимую мощность которых определяют по формуле

$$Q_{\text{ку}} = (P_1 + P_2) \cdot (tg\varphi_{\text{ест}} - tg\varphi_{\text{н}}). \quad (4.28)$$

4.3. Режимы и стадии нагрева заготовки.

Энергия, передаваемая в заготовку, выделяется в поверхностном слое, равном глубине проникновения электромагнитной волны Δ_3 . При нагреве ферромагнитных тел глубина проникновения резко возрастает при температуре магнитных превращений и далее остается постоянной. У парамагнит-

ных материалов глубина проникновения изменяется незначительно. Во всех случаях для получения достаточно высокого КПД глубина проникновения должна быть значительно меньше размеров поперечного сечения заготовки. Поэтому большая часть сечения тела нагревается за счет теплопроводности.

Скорость теплопередачи зависит от градиента температуры. Если в начале нагрева обеспечить передачу в нагреваемую поверхность достаточной мощности, можно за несколько секунд нагреть поверхностный слой в пределах горячей глубины проникновения до ковочной температуры (для стали около 1200°C). При этом перепад температуры между поверхностью и сердцевиной, а также скорость передачи тепла от поверхности к сердцевине достигнут максимального значения. По мере повышения температуры центра скорость теплопередачи уменьшается.

Повышать температуру поверхности для сохранения градиента температуры и скорости теплопередачи обычно нельзя, так как поверхность начинает усиленно окисляться, структура поверхностного слоя ухудшается, а при быстром нагреве заготовки некоторых марок стали растрескиваются. Поэтому мощность, передаваемую в нагреваемую деталь, приходится постепенно уменьшать, чтобы температура на поверхности оставалась постоянной. При таком режиме в течение всего процесса нагрева обеспечивается максимально возможный градиент температуры между поверхностью и сердцевиной и, следовательно, максимально возможная скорость передачи тепла к центру. Очевидно, что при рассматриваемом режиме нагрева при любой продолжительности температура его поверхности всегда будет несколько выше температуры центра. Обычно нагрев прекращают, когда разница в температуре поверхности и центра не превышает $100 \div 150^{\circ}\text{C}$ для конструкционных нелегированных сталей и $50 \div 100^{\circ}\text{C}$ для сталей с более узким интервалом ковочных температур.

Во время передачи заготовки из индуктора к ковочному агрегату температура ее поверхности несколько падает. Таким образом, происходит еще большее выравнивание температуры. Время, необходимое для нагрева детали от 20°C до ковочной температуры с заданным перепадом температур, называется временем нагрева. Очевидно, что время нагрева зависит от частоты источника питания f (глубины проникновения Δ_3), физических свойств заготовки (ее теплопроводности), а также от ее диаметра.

Описанный режим, при котором, как указано выше, получается минимальное время нагрева, называется нагревом при постоянной температуре поверхности.

Удельную мощность, передаваемую в нагреваемую поверхность, можно подобрать таким образом, чтобы температура на поверхности поднималась постепенно и достигала ковочной (около 1200°C), а температура сердцевины $1050 \div 1100^{\circ}\text{C}$. Очевидно, что для получения такого режима нагрева потребуется меньшая удельная мощность, чем при первом режиме. При этом время нагрева будет в два-три раза больше. Дальнейшее уменьшение удельной мощности нецелесообразно, так как приводит к росту потерь и увеличению времени нагрева. При нагреве стали изменяются ее электрофизические параметры: удельное электрическое сопротивление и магнитная проницаемость [3]. Магнитная проницаемость слабо зависит от температуры до точки Кюри (примерно до $650 \div 700^{\circ}\text{C}$), затем резко уменьшается и достигает значения, примерно равного проницаемости вакуума (рис. 4.7). В приближенных расчетах обычно считается, что она падает скачком до $\mu = 1$ в точке магнитных превращений (точке Кюри), примерно соответствующей температуре $750 \div 770^{\circ}\text{C}$. На рис. 4.7 исходное значение магнитной проницаемости принято равным 16, что объясняется применением при индукционном нагреве весьма сильных магнитных полей. Часто ее исходное значение составляет $5 \div 6$.

Зависимость удельного сопротивления от температуры для стали с содержанием углерода $0,4 \div 0,5\%$ приведена на том же рис. 4.5. Из кривой видно, что в промежутке $15 \div 800^{\circ}\text{C}$ удельное сопротивление возрастает примерно в 5 раз. В дальнейшем рост удельного сопротивления замедляется, причем значения его для разных сортов стали становятся почти равными. В среднем можно принять, что в интервале температур $800 \div 900^{\circ}\text{C}$ удельное сопротивление равно 10^{-6} Ом·м.

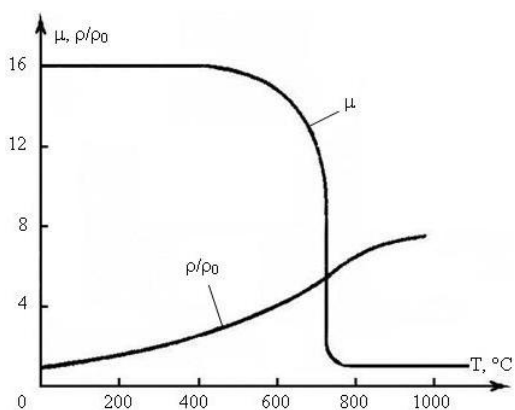


Рис. 4.5. Зависимость μ и ρ/ρ_0 от температуры T для среднеуглеродистой стали.

В результате падения магнитной проницаемости и роста удельного сопротивления в процессе нагрева глубина проникновения тока возрастает в $8 \div 10$ раз. Для определения глубины проникновения тока в сталь, нагретую выше точки магнитных превращений, можно написать простую формулу, подставив в (4.15) значения $\rho = \rho_k = 10^{-6}$ Ом·м и $\mu = 1$.

Тогда

$$\Delta_k = \frac{1}{2\sqrt{f}}, \quad (4.29)$$

Индекс k указывает, что значения соответствующих величин относятся к температуре, превышающей точку магнитных превращений. Глубину проникновения тока в этом случае считают горячей глубиной проникновения тока.

При нагреве сталь теряет магнитные свойства, прогреваясь постепенно, от слоя к слою, от поверхности вглубь. Распределение плотности тока, приведенное на рис. 4.6, искажается, а металл становится как бы двухслойным. При качественном рассмотрении можно считать, что распределение плотности тока изобразится ломаной линией, состоящей из отрезков двух экспонент, первая из которых соответствует стали, нагретой выше точки магнитных превращений, а вторая – стали, обладающей магнитными свойствами. В [3] показано, что кривая для наружного слоя идет более полого из-за частичного отражения проникающей в металл электромагнитной волны от границы раздела слоя.

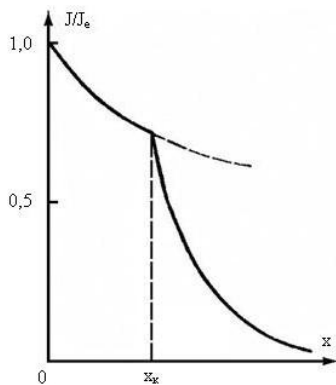
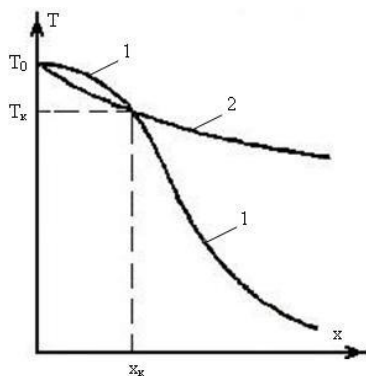


Рис. 4.6. Распределение плотности тока в стальной загрузке, нагретой до температуры выше точки магнитных превращений на глубину X_k

Излом кривой ярко выражен, если глубина прогретого слоя X_k меньше Δ_k . В этом случае выделение энергии в слое X_k наиболее равномерно, вследствие чего нагрев происходит быстро, без большого перепада температуры в нагреваемом слое и с малыми тепловыми потерями на нагрев сердцевины.

На рис. 4.7 представлено распределение температуры при нагреве под поверхностную закалку на глубину X_k . Кривая 1 соответствует режиму $X_k < \Delta_k$, называемому глубинным, так как теплота выделяется по всей глубине слоя X_k . Кривая 2 соответствует случаю $X_k > \Delta_k$. Здесь основную роль играет теплопроводность, так же, как и при нагреве внешними источниками тепла, например, в соляной ванне или печи сопротивления. Такой тип нагрева называется чисто поверхностным. Он характеризуется большими потерями на утечку тепла в глубь нагреваемого объекта, чем



глубинный. Время нагрева при том же перепаде температуры в нагреваемом слое резко увеличивается и становится таким же, как при нагреве с внешними источниками тепла. Этот тип нагрева является невыгодным.

Рис. 4.7. Распределение температуры T по сечению нагреваемого тела при индукционном нагреве.

Изменение свойств стали с ростом температуры вызывает также значительное изменение эквивалентных параметров индуктора. В соответствии с [3] полное электрическое сопротивление индуктора

$$Z_H = r_1 + r_2' + j \cdot (x_S + x_{M2}') = r_H + j \cdot x_H \quad (4.30).$$

Активное сопротивление r_1 для весьма длинного индуктора и индуктивное сопротивление рассеяния x_S не зависят от физических свойств нагреваемого объекта. Однако сопротивления r_2' и x_{M2}' нагреваемого объекта существенно зависят от его удельного сопротивления ρ_2 и относительной магнитной проницаемости μ , претерпевающих значительные изменения в процессе нагрева.

При рассмотрении индукционного нагрева стали до температуры, превышающей точку магнитных превращений, целесообразно ввести понятия о стадиях нагрева, характеризующих режим работы системы. Выделим три основные стадии нагрева:

- начало нагрева – холодный режим. Удельное сопротивление постоянно по всему сечению и равно исходному. Магнитная проницаемость в любой точке сечения определяется кривой намагничивания. Магнитная проницаемость возрастает от поверхности, где сталь находится в состоянии сильного магнитного насыщения, вглубь;

- промежуточный режим. Температура поверхности нагреваемого объекта выше исходной, но ниже точки магнитных превращений. Для последней примем среднее значение $T_\mu = 750^\circ\text{C}$. Эта стадия нагрева отличается от первой зависимостью удельного сопротивления от координаты, так как функцией координаты является температура, убывающая от поверхности вглубь объекта. Очевидно, что непостоянство удельного сопротивления

существенно лишь в пределах участка, равного глубине проникновения электромагнитной волны: $X_\lambda = (1,5 \div 2,0) \cdot \Delta_2$. На таком расстоянии от поверхности температура и удельное сопротивление, как это следует из расчета и опыта, падают не более, чем в два раза, что несоизмеримо с изменением магнитной проницаемости, возрастающей от поверхности вглубь в сотни и тысячи раз. Поэтому в практических расчетах удельное сопротивление в этом режиме может быть принято равным его значению на поверхности. Обычно расчет ведется для температуры поверхности $T_0 = 600 \div 650^\circ\text{C}$, при которой в среднем $\rho_2 \approx (6,0 \div 6,5) \cdot 10^{-7}$ Ом·м;

- горячий режим. Начало горячего режима соответствует образованию у поверхности слоя глубиной X_k , нагретого выше точки магнитных превращений, в то время как остальная часть сечения, имеющая более низкую температуру, постепенно спадающую по мере удаления от поверхности, остается ферромагнитной. Переменными являются ρ_2 и μ , причем μ изменяется почти скачком на границе слоя X_k . Расчетной моделью этой стадии нагрева является двухслойная среда, в которой на границе слоев магнитная проницаемость меняется скачком от $\mu = 1$ до некоторого значения $\mu > 1$.

В предельном случае горячего режима все сечение прогрето, и ρ_2 и μ можно считать постоянными ($\mu = 1$, $\rho_2 = \rho_k$).

При расчете установок для сквозного нагрева стальных объектов горячий режим будет подразделяться на две стадии: второй промежуточный режим ($X_k < \Delta_k$) и собственно горячий режим ($X_k > \Delta_k$). При этом КПД индуктора от начала первой стадии нагрева к концу второй стадии повышается вследствие роста удельного сопротивления. С начала третьей стадии нагрева КПД падает, так как сталь теряет магнитные свойства.

4.4. Обработка результатов эксперимента

При обработке результатов эксперимента необходимо руководствоваться следующей методикой :

а) определить глубину проникновения электромагнитной волны в материал нагреваемой детали

$$\Delta_\Theta = 503 \sqrt{\frac{\rho_2}{\mu_2 \cdot f}},$$

где ρ_2 – удельное электрическое сопротивление материала загрузки, Ом·м;

μ_2 – относительная магнитная проницаемость материала загрузки;

f – частота тока источника питания, Гц ($f = 200$ Гц).

Электрофизические параметры используемых металлов: сталь - $\mu = 20$, $\rho = 1,2 \cdot 10^{-7}$ Ом·м; медь - $\mu = 1$, $\rho = 2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; латунь - $\mu = 1$, $\rho = 6 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

б) определить коэффициент мощности индукционного нагревателя:

$$\cos \varphi = P_{\text{и}} / S_{\text{и}},$$

где $P_{\text{и}}$ – удельное электрическое сопротивление материала загрузки, Ом·м;

$S_{\text{и}}$ – относительная магнитная проницаемость материала загрузки.

Построить график зависимости $\cos \varphi = f(D_2)$.

в) определить электрический коэффициент полезного действия индукционного нагревателя

$$\eta = P_2 / P_{\text{и}},$$

где P_2 – полезная мощность, выделившаяся в нагреваемом цилиндре, Вт.

Мощность P_2 определяется калориметрическим методом по разности температур охлаждающей воды ΔT на входе и выходе индуктора.

$$P_2 = C_{\text{в}} g_{\text{в}} \Delta T,$$

где $C_{\text{в}}$ – теплоемкость воды, Дж/кг;

$g_{\text{в}}$ – расход воды, л/с.

Построить графики зависимостей $\eta = f(D_2)$ и $\eta = f(\rho)$.

5. Порядок оформления отчета.

Отчёт составляется каждым студентом на листах формата А4 в соответствии с требованиями ЕСКД и должен содержать подробные ответы на задания раздела подготовки к работе, схемы исследуемой установки, результаты измерений и расчётов, необходимые построения и выводы, а также ответы на контрольные вопросы.

6. Контрольные вопросы.

6.1. Объяснить принцип индукционного нагрева.

6.2. Объяснить физическую сущность глубины проникновения электромагнитной волны в материал нагреваемой детали.

6.3. Как влияют электрофизические свойства (ρ и μ) нагреваемой детали на выделение активной мощности P_2 и η индукционного нагревателя?

6.4. Как влияет диаметр D_2 нагреваемой детали на электрический η индукционного нагревателя?

6.5. Как влияет диаметр D_2 нагреваемой детали на $\cos \varphi$ индукционного нагревателя?

6.6. Какова конструкция индукционных нагревательных установок для сквозного нагрева?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макаров, Ф.К. Промышленные электротехнологические установки: учеб. пособие / Ф.К. Макаров, С.А. Сбитнев, М.Н. Староверов. – Владимир, 2004. – 128 с.
2. Шеховцов, В.П. Электрическое и электромеханическое оборудование: учеб. пособие / В.П. Шеховцов. – М.: ФОРУМ – ИНФРА-М. 2004. 408 с.
3. Болотов, А.В. Электротехнологические установки: учебное пособие для вузов / А.В. Болотов, Г.А. Шепель. – М.: Высшая школа, 1988. – 355 с.
4. Больфер, М.Г. Оборудование для дуговой и шлаковой сварки и плавки / М.Г. Больфер, Б.Е. Патон. – М.: Высшая школа, 1974. – 245 с.
5. Электротехнологические промышленные установки / под ред. А.Д. Свенчанского. – М.: Энергоиздат, 1982. – 400 с.
6. Чиженко, И.М. Основы преобразовательной техники: учеб. пособие для спец. «Промышленная электроника» / И.М. Чиженко, В.С. Руденко, В.И. Сенько. – М.: Высшая школа, 1974. – 430 с.
7. Костенко М.П. Электрические машины. В 2-х ч. Ч. 1 – Машины постоянного тока. Трансформаторы. / М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский Л.М. Учебник для студентов высш. учеб. заведений. Изд. 3-е, перераб. – Л.: Энергия, 1972. – 544 с.
8. Закс М.И. Трансформаторы для электродуговой сварки. / М.И. Закс, Б.А. Коганский, А.А. Печенин. – Л.: «Энергоатомиздат». 1988г. – 136 с.
9. *Источник: http://el-shema.ru/publ/ehlektrika/indukcionnaja_plita/10-1-0-158.*