



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Белорусский национальный
технический университет**

Кафедра «Электроснабжение»

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

Лабораторный практикум

**Минск
БНТУ
2014**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Электроснабжение»

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

Лабораторный практикум
для студентов специальности
1-43 01 03 «Электроснабжение»

Минск
БНТУ
2014

УДК 621.311.(075.8)
ББК 31.29-5я7
П81

Составитель
В. А. Анищенко

Рецензенты:
А. С. Красько, А. А. Тишечкин

Промышленная электротехнология : лабораторный практикум
П81 для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение» /
сост. В. А. Анищенко. – Минск : БНТУ, 2014. – 120 с.
ISBN 978-985-550-094-1.

Лабораторный практикум соответствует учебной программе дисциплины «Промышленная электротехнология» для специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение». Лабораторные работы позволяют студентам лучше усвоить основные разделы данной дисциплины и приобрести определенные практические навыки при эксплуатации и техническом обслуживании электротехнологических установок.

УДК 621.311.(075.8)
ББК 31.29-5я7

ISBN 978-985-550-094-1

© Белорусский национальный
технический университет, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
<i>Лабораторная работа № 1</i> ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПОСТОЯННОГО ТОКА. СХЕМА С УРАВНИТЕЛЬНЫМ РЕАКТОРОМ.....	5
<i>Лабораторная работа № 2</i> ИЗУЧЕНИЕ ГАЗОВОГО ЛАЗЕРА	25
<i>Лабораторная работа № 3</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ.....	42
<i>Лабораторная работа № 4</i> ИЗУЧЕНИЕ МАШИНЫ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ.....	57
<i>Лабораторная работа № 5</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО МАШИННОГО ГЕНЕРАТОРА.....	67
<i>Лабораторная работа № 6</i> ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ СВАРОЧНОЙ ДУГИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	73
<i>Лабораторная работа № 7</i> ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВОК ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЗАКАЛКИ И СКВОЗНОГО ПРОГРЕВА ЗАГОТОВОК.....	103

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум содержит подробное описание выполнения лабораторных работ, разработанных в разные годы профессорско-преподавательским составом кафедры «Электроснабжение» БНТУ.

При написании лабораторного практикума использована информация, приведенная в методических указаниях к выполнению лабораторных работ.

Целью лабораторных работ является ознакомление студентов с рядом электротехнологических установок, применяемых на производстве, изучение устройства этих установок, принципов их работы и приобретение навыков проведения экспериментов и снятия характеристик установок. В ходе выполнения лабораторных работ студенты приобретут практические навыки, которые закрепят теоретические знания, приобретенные студентами в процессе лекционных занятий по данному курсу.

Каждая лабораторная работа содержит цель работы, сведения теоретического и практического характера, поясняющие принципы действия электротехнологической установки, план выполнения работы, перечень вопросов, которые должны быть отражены в отчете и контрольные вопросы, ориентирующие студента в нужном направлении и помогающие усвоить теоретическую сущность работы.

В конце практически всех лабораторных работ приводится список литературы, необходимой для подготовки и выполнения работы и позволяющей более широко и глубоко изучить ее содержание.

Лабораторная работа № 1

ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПОСТОЯННОГО ТОКА. СХЕМА С УРАВНИТЕЛЬНЫМ РЕАКТОРОМ

Цель работы: изучить источники питания электротехнологических установок (ЭТУ) постоянного тока и исследовать схему с уравнительным реактором.

Общие сведения

Производство и распределение электрической энергии в основном осуществляется на переменном токе. В то же время из всей вырабатываемой электрическими станциями СНГ электроэнергии более 25 % потребляется в виде постоянного тока. Это связано с тем, что часть потребителей может работать только на постоянном токе. Другая часть потребителей имеет на постоянном токе лучшие характеристики и параметры.

Для получения постоянного тока могут быть использованы аккумуляторные батареи, генераторы постоянного тока и выпрямители. Среди перечисленных способов особое место занимает выпрямление тока, при котором преобразование переменного тока в постоянный осуществляется непосредственным путем, без промежуточного преобразования электрической энергии.

Схемы выпрямления: принцип действия и основные соотношения

В общем случае выпрямитель может быть представлен в виде структурной схемы, показанной на рис. 1.1.

Выпрямители могут быть классифицированы по следующим основным признакам:

- *выходной мощности*: установки малой (единицы киловатт), средней (десятки киловатт) и большой мощности;
- *числу фаз источника питания*: выпрямители однофазного тока, выпрямители трехфазного тока;
- *возможности регулирования*: неуправляемые выпрямители, управляемые выпрямители.

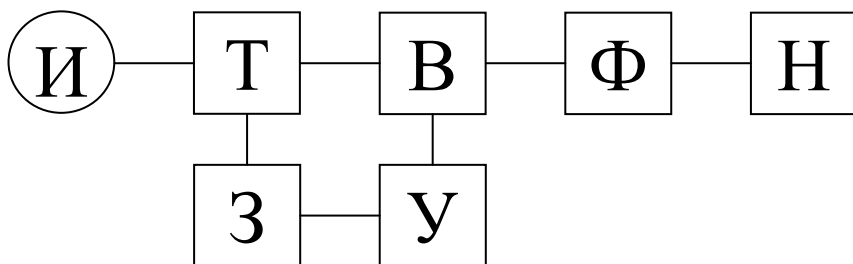


Рис. 1.1. Структурная схема выпрямителя:

И – источник переменного тока; *Т* – силовой трансформатор; *В* – вентильный блок; *Ф* – сглаживающий фильтр; *З* – система защиты и сигнализации; *У* – блок управления вентилями и система автоматического регулирования; *Н* – нагрузка

Выпрямители однофазного и трехфазного тока в зависимости от схемы включения вентиляей и схемы соединения обмоток трансформатора, в свою очередь, подразделяются на различные типы (схемы со средней точкой, мостовые и т. д.).

В большинстве случаев выпрямители средней и большой мощности питаются от сети трехфазного тока. Из большого числа известных схем выпрямления трехфазного тока практически применяются следующие схемы:

- трехфазная схема со средней точкой;
- шестифазная схема с уравнительным реактором;
- трехфазная мостовая схема.

Основными исходными данными для расчета выпрямителя являются выпрямленные напряжения U_d и тока I_d (среднее значение), также действующее значение напряжение питающей сети.

В процессе расчета подлежат определению:

1. Параметры, характеризующие условия работы вентиляей (табл. 1.1).

2. Определяющие параметры трансформатора (табл. 1.1):

I_1 – первичный ток трансформатора;

I_2 – вторичный ток трансформатора;

I_a – действующее значение тока анодной цепи;

$I_{a\text{ ср}}$ – средний ток анодной цепи;

$I_{a\text{ max}}$ – максимальный ток анодной цепи;

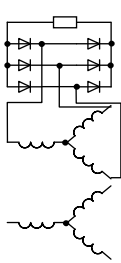
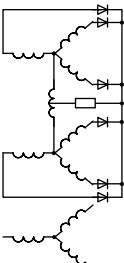
I_d – средний выпрямленный ток;
 U_d – среднее выпрямленное напряжение;
 $U_{1ф}$ – действующее фазное первичное напряжение;
 $U_{2ф}$ – действующее фазное вторичное напряжение;
 $U_{в\ max}$ – обратное максимальное напряжение на вентиле;
 U_{1m} – амплитуда первой гармоники;
 $U_{ср}$ – среднее значение выпрямленного напряжения;
 q – коэффициент пульсаций;
 U_d^* – относительное падение U_d , %;
 S_1 – потребляемая мощность трансформатора;
 S_2 – входная мощность трансформатора;
 $S_{тр}$ – типовая мощность трансформатора;
 P_d – мощность выпрямителя на постоянном токе;
 m – число пульсаций I_d за один период переменного тока;
 $K_{сх}$ – коэффициент схемы.

Таблица 1.1

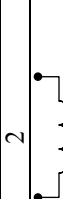
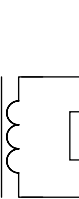
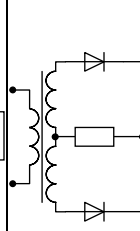
Расчетные формулы

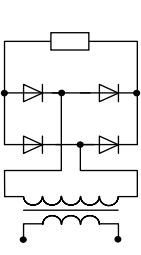
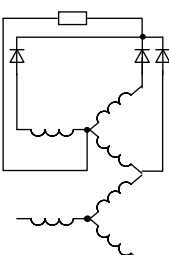
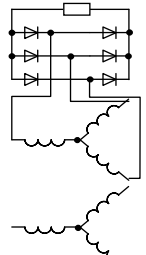
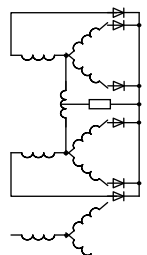
Название схемы	Изображение схемы	$U_{2\phi}$	$U_{a \max}$	ΔU_d^*	$\frac{U_{в \max}}{U_{2\phi}}$	I_a	$I_{a \text{ ср}}$	$I_{a \max}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1-фазная 3-й полу-период		$\frac{\pi U_d}{\sqrt{2}}$	πU_d	0	$\sqrt{2}$	$\frac{\pi I_d}{2}$	I_d	πI_d
2-й полу-период		$\frac{\pi U_d}{2\sqrt{2}}$	πU_d	$\frac{2 U_k^*}{\pi}$	$2\sqrt{2}$	$\frac{\pi I_d}{4}$	$\frac{1}{2} I_d$	$\frac{\pi I_d}{2}$
1-фазный мост		$\frac{\pi U_d}{4\sqrt{2}}$	$\frac{\pi U_d}{2}$	$\frac{1}{\pi} U_k^*$	$2\sqrt{2}$	$\frac{\pi I_d}{4}$	$\frac{1}{2} I_d$	$\frac{\pi I_d}{2}$
3-фазный звезда		$\frac{2\pi U_d}{3\sqrt{6}}$	$\frac{2\pi U_d}{3}$	$\frac{\sqrt{3}}{2} U_k^*$	$\sqrt{2} \cdot \sqrt{3}$	0,587 I_d	$\frac{1}{3} I_d$	$\frac{2\pi I_d}{3\sqrt{3}}$

Продолжение табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
3-фазный мост		$\frac{2\pi}{3\sqrt{6}} U_d$	$\frac{\pi}{3} U_d$	$\frac{1}{2} U_k^*$	$\sqrt{2} \cdot \sqrt{3}$	$\frac{\sqrt{3}}{3} I_d$	$\frac{1}{3} I_d$	I_d
6-фазная звезда с уравнительным реактором		$\frac{2\pi}{3\sqrt{6}} U_d$	$\frac{2\pi}{3} U_d$	$\frac{1}{2} U_k^*$	$\sqrt{2} \cdot \sqrt{3}$	$\frac{\sqrt{3}}{6} I_d$	$\frac{1}{6} I_d$	$\frac{1}{2} I_d$

Продолжение табл. 1.1

Название схемы	Изображение схемы	I_2	I_1	S_2	S_1	$S_{тр}$	$K_{сх}$	m	$\frac{U_{1m}}{U_{\phi}}$
1		10	11	12	13	14	15	16	17
1-фазная 3-й период		$\frac{\pi}{2} I_d$	$1,21 I_d$	$3,51 P_d$	$2,7 P_d$	$3,1 P_d$	1	1	1,57
2-й период		$\frac{\pi}{4} I_d$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} I_d$	$1,74 P_d$	$1,23 P_d$	$1,48 P_d$	1	2	0,667

1	2	10	11	12	13	14	15	16	17
1-фазный мост		$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} I_d$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} I_d$	$1,23P_d$	$1,23P_d$	$1,23P_d$	2	2	0,667
3-фазный звезда		$0,587I_d$	$0,483I_d$	$1,5P_d$	$1,24P_d$	$1,37P_d$	1	3	0,25
3-фазный мост		$\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_d$	$\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_d$	$1,05P_d$	$1,05P_d$	$1,05P_d$	2	3	0,57
6-фазная звезда с уравнительным реактором		$\frac{\sqrt{3}}{6} I_d$	$\frac{\sqrt{6}}{6} I_d$	$1,48P_d$	$1,05P_d$	$1,26P_d$	1	3	0,057

Кроме первичных, имеется еще ряд параметров и зависимостей, характеризующих работу выпрямителя. К ним относятся:

1. Гармонический состав кривой выпрямленного напряжения.
2. Гармонический состав кривой переменного тока, потребляемого из питающей цепи.
3. Внешняя характеристика выпрямителя, которая представляет собой зависимость среднего значения выпрямленного напряжения от среднего значения выпрямленного тока: $U_d = f(I_d)$.
4. Регулировочная характеристика управляемого выпрямителя, которая определяет зависимость среднего значения выпрямленного напряжения от угла управления: $U_d = f(\alpha)$.
5. Коэффициент мощности выпрямительной установки: $X = P/S$.
6. Коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{U_d \cdot I_d}{U_d \cdot I_d + \Delta P}.$$

Для преобразования переменного тока в постоянный в настоящее время чаще всего применяются полупроводниковые преобразователи электрической энергии – выпрямители.

Сравнение схем выпрямления

Основными показателями, по которым проводится сравнение различных схем выпрямления являются:

- 1) режим работы трансформатора и его относительная типовая мощность;
- 2) эффективность использования вентилей по напряжению и току;
- 3) гармонический состав выпрямленного напряжения U_d и потребляемого тока.

Многофазные схемы обладают по сравнению с однофазными рядом определенных преимуществ. К ним относятся меньшие высшие гармоники в кривой выпрямленного напряжения и кривой потребляемого тока, хорошее использование трансформатора и вентилей, а также симметричная нагрузка фаз питающей сети.

К наиболее часто употребляемым многофазным схемам относятся следующие:

- 1) трехфазная мостовая схема;
- 2) шестифазная схема с уравнительным реактором.

Трехфазная мостовая схема является наиболее совершенной с точки зрения использования трансформатора и вентилях. Целесообразно использование этой схемы в случае создания выпрямителей на повышенное напряжение, где нежелательно применение большого числа последовательно включенных вентилях.

Шестифазную схему с уравнительным реактором применяют только для выпрямителей на низкое напряжение и большой ток, так как в этой схеме нагрузочный ток протекает параллельно через два вентиля, а не последовательно через два, как в трехфазной мостовой схеме.

С точки зрения практического использования, к выпрямителю предъявляются следующие главные требования:

- 1) наличие минимальных пульсаций на выходе выпрямителя;
- 2) форма внешней вольтамперной характеристики;
- 3) возможность регулирования величины выпрямленного тока и напряжения.

Внешняя характеристика выпрямителя

Одной из важнейших характеристик, определяющих работу выпрямителей, является его внешняя характеристика, которая представляет собой зависимость среднего выпрямленного напряжения от среднего выпрямленного тока: $U_d = f(I_d)$.

Для управляемых выпрямителей существует семейство внешних характеристик, соответствующих различным углам регулирования. Внешняя характеристика выпрямителя охватывает все режимы работы, начиная с холостого хода и кончая коротким замыканием. С увеличением тока нагрузки выпрямленное напряжение падает.

Поскольку неуправляемый выпрямитель можно рассматривать как частный случай управляемого при угле $\alpha = 0$, то в общем виде выражение для внешней характеристики можно записать так:

$$U_d = U_{d0} \cdot \cos \alpha - \Delta U_X - \Delta U_T - \Delta U_V - \Delta U_\Phi,$$

где U_{d0} – выпрямленное напряжение на нагрузке при холостом при $\alpha = 0$;

ΔU_X – снижение напряжения за счет коммутации;

ΔU_T – падение напряжения в активном сопротивлении трансформатора;

ΔU_V – падение напряжения на вентиле;

ΔU_Φ – падение напряжения на фильтре.

Некоторые характеристики выпрямителей представлены на рис. 1.2, 1.3.

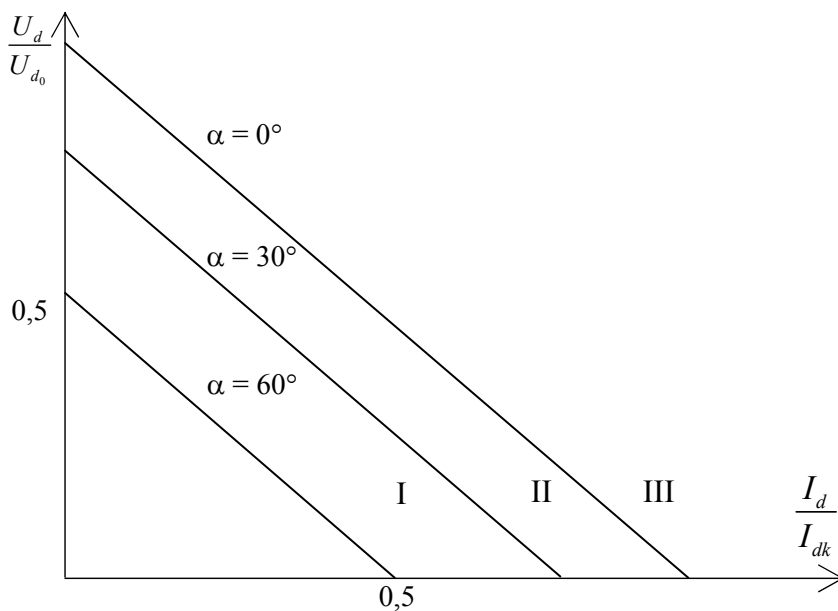


Рис. 1.2. Внешние характеристики двухполупериодной схемы со средней точкой:

I, II, III, – рабочие зоны при различных углах коммутации (в зависимости от нагрузки и, следовательно, количества проводящих вентилях);

I_{dk} – ток короткого замыкания

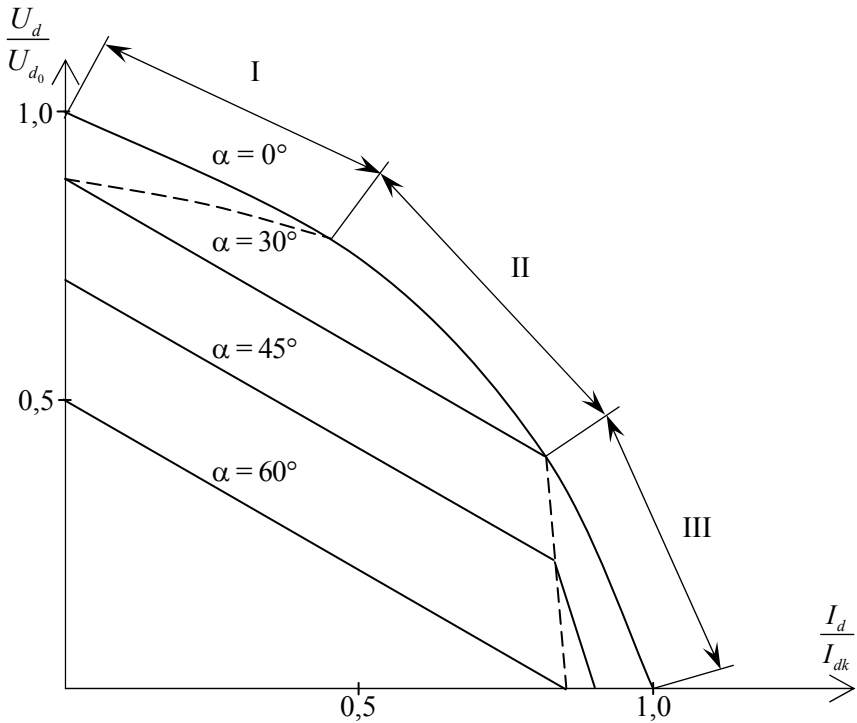


Рис. 1.3. Полные внешние характеристики трехфазной мостовой схемы

В зависимости от характера нагрузки к источникам питания постоянного тока предъявляются различные требования к форме их внешней вольтамперной характеристики (рис. 1.4): жесткая (1, 2) или крутопадающая 3.

Для получения крутопадающей внешней характеристики используют включение на вторичной стороне трансформатора дополнительных индуктивностей (анодных реакторов)

Особые требования предъявляет к источнику постоянного тока такая специфическая нагрузка как сварка. Наряду с полупроводниковыми выпрямителями используются *сварочные генераторы*, которые должны удовлетворять следующим основным требованиям:

1) выдерживать режим короткого замыкания, которое имеет место при замыкании электродов накоротко (например, в момент зажигания дуги);

2) обеспечивать более или менее постоянную величину тока при переменном сопротивлении дуги (переменная длина дуги).

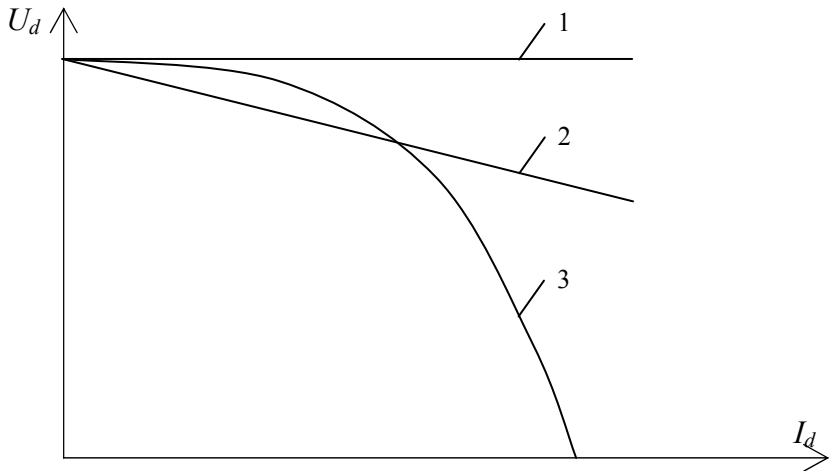


Рис. 1.4. Предельный вид внешней вольтамперной характеристики выпрямителя:
1 – жесткая, 2 – пологая, 3 – крутопадающая

Выполнение поставленных условий достигается тем, что внешняя характеристика сварочного генератора имеет сильно падающий характер.

Характеристику крутопадающей формы (рис. 1.4) можно получить в генераторе с тремя обмотками возбуждения (рис. 1.5):

- 1) независимой;
- 2) параллельной;
- 3) последовательной, намагничивающая сила которой направлена навстречу намагничивающей силе первых двух обмоток.

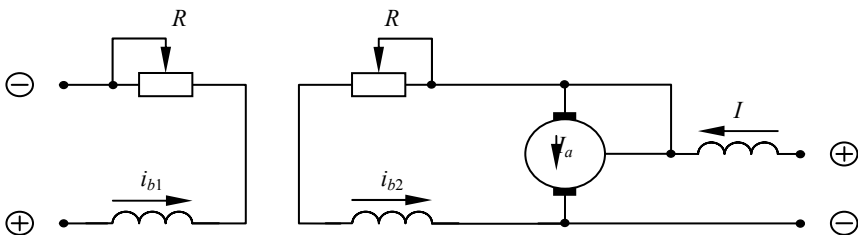


Рис. 1.5. Схема генератора с тремя обмотками возбуждения

Шестифазная схема выпрямления с уравнительным реактором

Выпрямитель этой схемы является одним из самых распространенных и экономичных из всех применяемых в промышленности для питания электротехнологических установок.

Такое широкое распространение обусловлено прежде всего высоким КПД, а также надежностью, благоприятным характером внешней характеристики, хорошим использованием трансформатора.

Шестифазная схема с уравнительным реактором выполнена на основе трансформатора с расщепленными вторичными обмотками. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки приведена на рис. 1.6. Схема представляет собой два трехфазных выпрямителя (*Аи Б*) со средней точкой, работающих параллельно через уравнительный реактор (УР) на общую нагрузку R_n . УР в данном случае обеспечивает независимую параллельную работу выпрямителей.

Питание схемы осуществляется через трехобмоточный трансформатор *Tr*. На каждом стержне трансформатора расположено по две одинаковых вторичных обмотки. При этом в выпрямителе с нечетными вентилями *Б* вторичные обмотки подключены к катодам вентилей начальными, а в выпрямителе с четными вентилями *А* обмотки подключены к катодам внешними концами. В результате соответствующие фазные напряжения двух вторичных обмоток трансформатора смещены друг относительно друга на 180 градусов (рис. 1.6). УР представляет собой катушку, имеющую две одинаковые обмотки на сердечнике с замкнутым магнитопроводом. Обмотки УР включены последовательно и согласованно, т. е. конец первой обмотки соединен с началом второй.

Рассмотрим идеализированные выпрямители при намагничивающем токе УР, равном нулю. Подобная идеализация исключает возможность рассмотрения процессов, происходящих в реальной схеме при нагрузке ниже критической. **Критической нагрузкой** называется такая минимальная нагрузка реального выпрямителя (равная 1–2 % номинальной), при которой постоянная составляющая выпрямленного тока становится равной намагничивающему току УР.

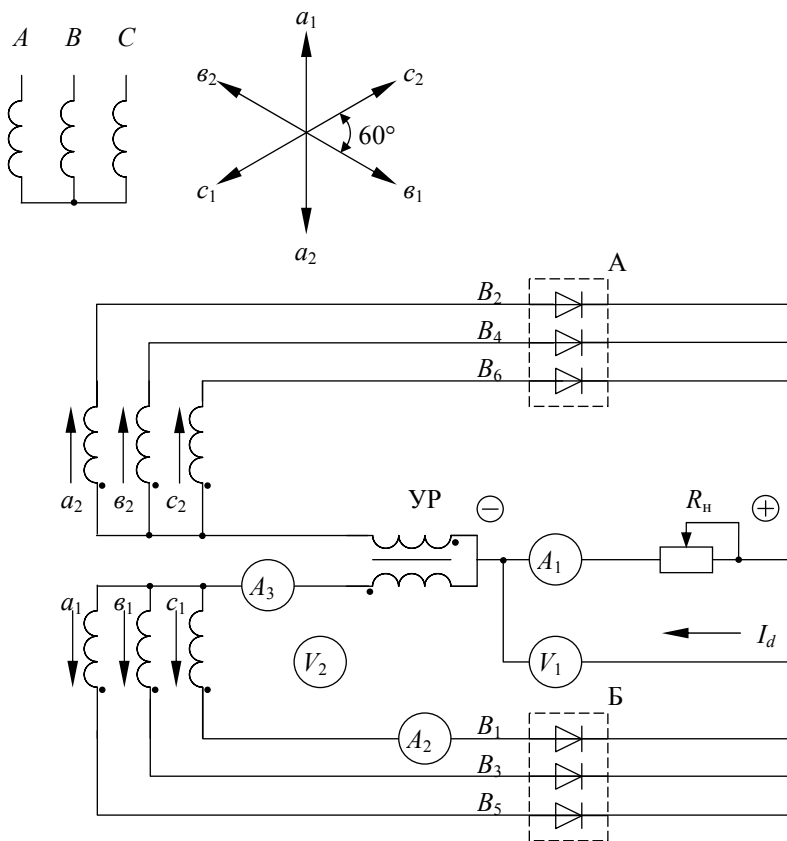


Рис. 1.6. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки

Для пояснения принципа действия схемы представляют каждый трехфазный выпрямитель (*A* и *B*) в виде последовательно включенных генераторов напряжения: генераторы E'_d и E''_d в эквивалентной схеме (рис. 1.7) моделируют постоянные составляющие напряжения отдельных выпрямителей, а генераторы e'_n и e''_n – их переменные составляющие. Поскольку напряжения вторичных обмоток трансформатора, питающих схемы *A* и *B* смещены по фазе, возникает смещение по фазе и у ЭДС e'_n и e''_n .

Таким образом, получим

$$U_{d1} = E'_d + e'_n,$$

$$U_{dII} = E''_d + e''_n,$$

где U_{d1} и U_{dII} – мгновенные напряжения на выходе выпрямителей А и Б.

Как видно из схемы замещения, генераторы постоянного напряжения E'_d и E''_d вследствие равенства их ЭДС будут работать параллельно на нагрузку R_H , создавая в ней ток I_d . Каждый из генераторов примет на себя половину нагрузочного тока $I_d/2$. Следовательно, постоянная составляющая напряжения на нагрузке будет точно равна постоянной ЭДС ($U_d = E'_d = E''_d$). Прохождение по обмоткам уравнивающего реактора двух равных постоянных токов, создающих ЭДС противоположных напряжений, не изменит магнитного состояния магнитопровода реактора.

Таким образом, схема замещения может быть значительно упрощена, если в ней оставить только генераторы переменного напряжения и рассмотреть распределение переменной составляющей.

Как видно из упрощенной схемы замещения (рис. 1.8), мгновенное напряжение на уравнительном реакторе равно

$$U_k = e'_n = e''_n = U_{d1} - U_{dII}.$$

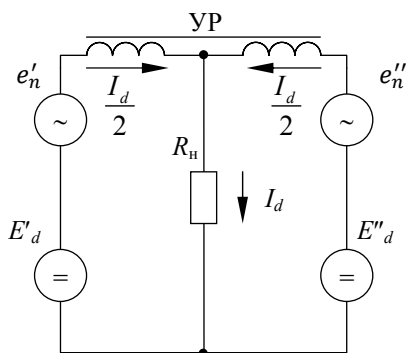


Рис. 1.7. Эквивалентная схема замещения преобразователя

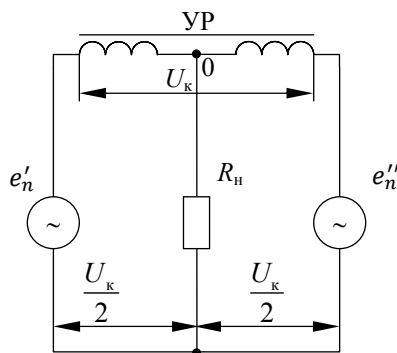


Рис. 1.8. Упрощенная схема замещения преобразователя

Предполагается, что коэффициент связи обмоток УР равен единице.

Вследствие автотрансформаторного эффекта на каждой обмотке уравнительного реактора появится напряжение, равное $U_{\kappa}/2$. В результате для мгновенного выпрямленного напряжения на нагрузке U_d имеем

$$U_d = U_{d1} - \frac{U_{\kappa}}{2} = U_{dII} + \frac{U_{\kappa}}{2} = \frac{U_{d1} + U_{dII}}{2}.$$

На рис. 1.9 представлены кривые напряжения на выходе отдельных трехфазных выпрямителей. Кривая выпрямленного напряжения U_{d1} (схема А) выполнена сплошной линией, а кривая U_{dII} (схема Б) – пунктирной (рис. 1.9, а). Кривая напряжения на уравнительном реакторе меняется с частотой, в 3 раза большей частоты питающей сети (рис. 1.9, б). Кривую напряжения на нагрузке U_d можно построить графически, вычитая из кривой U_{d1} величину $U_{\kappa}/2$ (помечена на рис. 1.9, б пунктиром). Результирующая кривая U_{d1} обведена на рис. 1.9, а жирной линией.

В интервале $V_1 - V_2$, когда ток проводят вентили фаз α_1 и c_2 , искомое напряжение U_d равно

$$U_d = U_{d1} - \frac{U_{\kappa}}{2} = U_{a1} - \frac{U_{a1} - U_{c2}}{2} = \frac{U_{a1} + U_{c2}}{2}.$$

Кривая выпрямленного напряжения U_d имеет шестикратную пульсацию и сформирована из участка синусоид с амплитудой, равной $7 \frac{\sqrt{6}}{2} U_{2\phi}$.

Среднее выпрямленное напряжение выпрямителя

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} U_{2\phi} = 1,17 \cdot U_{2\phi}.$$

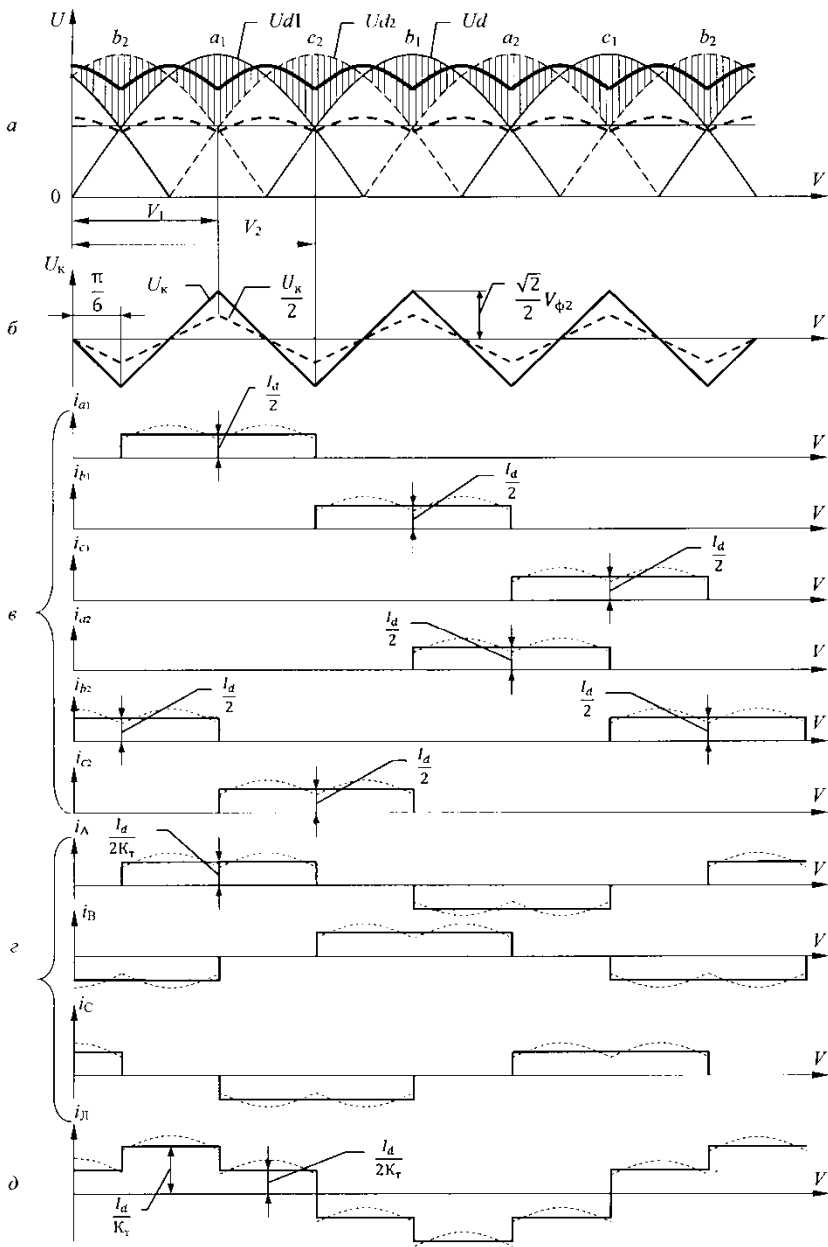


Рис. 1.9. Токи и напряжения на элементах схемы при $\alpha = 0$

Кривая выпрямленного тока i_d в случае работы на активную нагрузку в точности повторяет кривую выпрямленного напряжения. Так как трехфазные схемы А и Б работают параллельно на общую нагрузку, то мгновенные токи через вентили будут равны половине мгновенных выпрямленных токов, т. е. кривая тока в вентилях будет по своей форме повторять кривую выпрямленного тока в соответствующих интервалах. Кривые токов в вентилях (вторичных фазных токов) и кривые фазных токов первичной обмотки трансформатора приведены соответственно на рис. 1.9, в, г.

Основные расчетные соотношения для рассматриваемой схемы выпрямления приведены в табл. 1.1.

Типовая мощность уравнительного реактора может быть досчитана по формуле

$$S_{ур} = 0,0572 \cdot P_{дн}.$$

Семейство нагрузочных характеристик управляемого выпрямителя с уравнительным реактором показано на рис. 1.10.

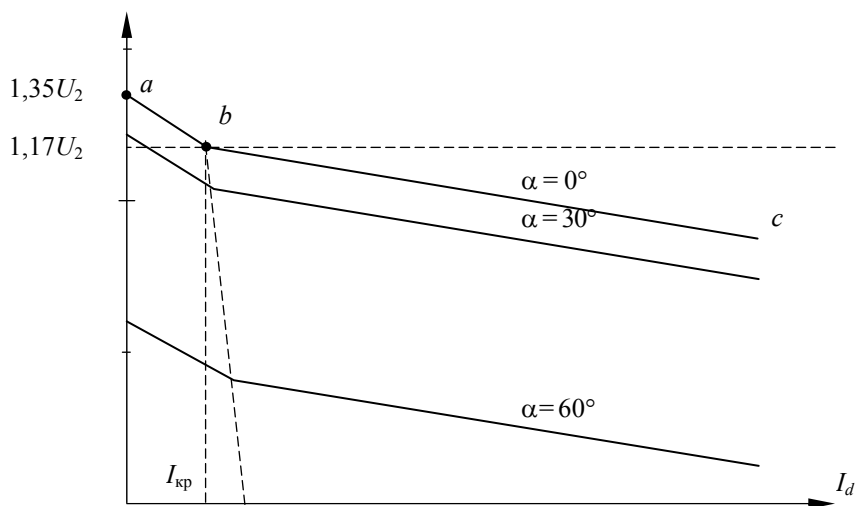


Рис. 1.10. Внешняя характеристика с уравнительным реактором

Характеристика ($\alpha = 0$) состоит из двух прямолинейных участков. Участок ab с большим падением напряжения соответствует изменению тока нагрузки от 0 до $I_{кр}$. Участок bc – рабочая часть характеристики, который можно описать уравнением

$$U_d = U_{d0} \cdot \cos \alpha - 3I_d \cdot \frac{X_s}{4\pi},$$

где U_d – напряжение условного холостого хода схемы.

Характеристика имеет слабопадающий вид.

При необходимости регулирование выпрямленного напряжения на нагрузке осуществляют как на стороне переменного тока (изменение коэффициента трансформации, использование автотрансформатора), так и на стороне постоянного тока (управляемые вентили-тиристоры, добавочные сопротивления в цепи нагрузки).

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с электрической принципиальной схемой шестифазной схемы выпрямления, выполненной на учебном стенде с уравнительным реактором.

2. Подготовить результаты измерений по предлагаемому образцу (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Результаты измерений и расчетов

№ п/п	Измеренные параметры					Расчетные параметры					
	I_d	U_d	U_ϕ	I_ϕ	$\frac{I_d}{2}$	I_1	I_2	P_d	$S_{тр}$	$U_{в\ max}$	R_H
1											
2											
3											
4											
5											
6											

3. При отключенной схеме установить максимальные значения R_H .

4. По разрешению преподавателя включить лабораторную установку.

5. При помощи R_H установить пять–шесть фиксированных значений и занести показания приборов в таблицу измерений.

6. Произвести расчеты, используя результаты измерений и формулы табл. 1.1, и занести их в табл. 1.2.

7. По результатам измерений построить внешнюю вольт-амперную характеристику.

8. Построить эпюры токов и напряжений в точках включения измерительных приборов.

Содержание отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Назначение, область применения и сравнительную оценку выпрямителей.
3. Принципиальную электрическую схему лабораторной установки.
4. Таблицу измерений и расчетов.
5. Временные диаграммы токов и напряжений в точках включения приборов.
6. График зависимости $U_d = f(I_d)$.
7. Краткие ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Где используется постоянный ток в электротехнологии?
2. Классификация выпрямителей.
3. Сравнительная оценка выпрямителей.
4. Внешняя вольт-амперная характеристика.
5. Как получается и где используется крутопадающая вольт-амперная характеристика?
6. Что такое критическая нагрузка выпрямителя?
7. Основные соотношения в шестифазной схеме с УР.

Литература

1. Электротехнологические промышленные установки / А. Д. Свенчанский [и др.]. – М. : Энергоиздат, 1982. – 396 с.
2. Ковалев, Ф. И. Полупроводниковые выпрямители / Ф. И. Ковалев, Г. П. Мостковой. – М. : Энергия, 1978. – 442 с.
3. Богословский, А. С. Силовые полупроводниковые выпрямители / А. С. Богословский. – М. : Воениздат, 1965. – 205 с.
4. Красько, А. С. Промышленная электроника / А. С. Красько, К. Г. Скачко. – Минск : Высшая школа, 1984. – 207 с.

Лабораторная работа № 2

ИЗУЧЕНИЕ ГАЗОВОГО ЛАЗЕРА

Цель работы: изучить принцип работы и устройство газового лазера.

Общие сведения

Световые лучи высокой интенсивности, сфокусированные с помощью системы зеркал или линз, позволяют получить в фокусе весьма высокие температуры (до 4000 К). В качестве источника излучения может быть использовано солнце, электрическая дуга, вольфрамовые нити лампы накаливания, угольные и графитовые нагреватели, газоразрядные лампы высокого давления и плазменные выключатели. Световая энергия высокой концентрации используется в технологических целях для обработки отверстий, сварки, термообработки, резки материалов и других целей. Однако такие оптические печи не получили широкого распространения в промышленности из-за сложности и малого КПД. Положение изменилось, когда в начале 60-х годов XX в. были созданы источники света иного типа, получившие название *оптических квантовых генераторов* (ОКГ) или *лазеров*.

Уникальность свойств лазерного излучения:

1. Малая расходимость луча.
2. Высокая степень когерентности.
3. Высокая степень монохроматичности.
4. Способность к концентрации энергии во времени и пространстве.

Все это обусловило широкое, все более возрастающее применение ОКГ во многих областях науки и техники.

Физические основы работы ОКГ

Физические основы генерации оптического излучения рассмотрим в приближении двухуровневой схемы. Пусть макроскопическая система состоит из N одинаковых частиц (атомов, молекул). Каждый из атомов системы может находиться либо в стационарном со-

стоянии с энергией E_1 , либо в стационарном состоянии с энергией E_2 , т. е. энергетическая система каждого из атомов системы имеет вид, представленный на рис. 2.1.

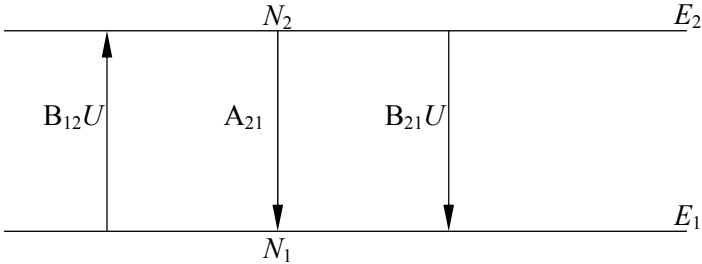


Рис. 2.1. Состояние системы атомов

Пусть N_1 атомов в данный момент времени имеют энергию E_1 , а $N_2 = N - N_1$ – энергию E_2 . Тогда N_1 – населенность первого, основного уровня, N_2 – населенность второго, возбужденного уровня. Если рассматриваемая система находится в термодинамическом равновесии с окружающей средой, то соотношение населенностей описывается распределением Больцмана:

$$\frac{N_2}{N_1} \approx e^{-\frac{E_2 - E_1}{KT}}, \quad (2.1)$$

где T – температура, К;

$K = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж;

K^{-1} – постоянная Больцмана.

Как видно из формулы (2.1), в случае термодинамического равновесия при любых значениях температуры $N_2 < N_1$. Если $N_2 > N_1$, то такое соотношение населенностей является инверсным (инверсная населенность). Состояние системы в этом случае является неравновесным.

Согласно квантовой теории излучения Эйнштейна, между уровнями 1 и 2 могут наблюдаться *оптические переходы* трех типов:

1. Спонтанные (самопроизвольные) переходы ($2 \rightarrow 1$) из возбужденного состояния в основное с испусканием кванта света с частотой

$$\nu_{21} = \frac{E_2 - E_1}{h}. \quad (2.2)$$

2. Вынужденные переходы ($2 \leftarrow 1$) из основного состояния в возбужденное, происходящие в результате поглощения внешнего излучения с частотой

$$\nu_{12} = \frac{E_2 - E_1}{h}.$$

3. Вынужденные переходы ($2 \rightarrow 1$) из возбужденного состояния в основное с испусканием света с частотой, рассчитываемой по формуле (2.2), происходящие в результате возбуждения на систему внешнего излучения той же частоты, что и частота испускания.

Спонтанные переходы в различных атомах системы протекают независимо друг от друга. Вследствие этого фотоны, испущенные в результате спонтанных переходов, нескоррелированы между собой по направлению, фазе и поляризации. Наоборот, фотоны, испущенные в результате вынужденных переходов, по направлению, фазе и поляризации идентичны фотонам внешнего вынуждающего излучения. В этом заключается *основное различие спонтанных и вынужденных переходов*. Частота испускаемого фотона не зависит от типа перехода, поскольку она определяется лишь разностью комбинированных уровней $\Delta E = E_2 - E_1$.

Квантовые переходы в различных атомах системы случайны во времени, для их количественного описания вводится понятие *вероятности перехода*. Число спонтанных переходов $2 \rightarrow 1$ за время dt пропорционально населенности возбужденного уровня в данный момент времени $N_2(t)$ и интервалу времени dt . Изменение населенности возбужденного уровня dN_2 , обусловленное наличием спонтанных переходов, равно числу этих переходов. Тогда

$$dN_2 = -A_{21} \cdot N_2(t)dt. \quad (2.3)$$

Коэффициент пропорциональности A_{21} называется *вероятностью спонтанного перехода для данной системы* или *коэффициентом Эйнштейна для спонтанных переходов*. Величина вероятности спонтанных переходов неодинакова для различных переходов в реальной многоуровневой квантовой системе (атоме, молекуле) и зависит от свойств данной системы. Например, для различных переходов в атоме $A \approx 10^8 - 10^{-2}, \text{с}^{-1}$.

Изменение населенностей уровней, обусловленное наличием вынужденных переходов, можно записать аналогично (2.3):

$$dN_2 = -B_{21}IN_2(t)dt + B_{12}IN_1(t)dt;$$

$$dN_1 = B_{21}IN_2(t)dt - B_{12}IN_1(t)dt,$$

где B_{12} и B_{21} – коэффициенты Эйнштейна для вынужденных переходов с поглощением и испусканием, соответственно;

I – объемная плотность энергии внешнего (вынужденного) излучения;

$B_{12}I$ и $B_{21}I$ – вероятности вынужденных переходов с поглощением и испусканием.

Рассмотрим в приближении двухуровневой схемы процессы поглощения усиления света. Интенсивность света, прошедшего через вещество, связана с интенсивностью падающего на вещество излучения по закону Бугера:

$$I = I_0 e^{-x\alpha},$$

где I_0 и I – интенсивности плоской монохроматической световой волны на входе в слой поглощающего вещества толщиной α и на выходе из него;

x – линейный коэффициент поглощения света веществом.

Если $N_2 \neq 0$, то под действием падающего излучения, помимо переходов с поглощением фотонов, будут происходить и вынужденные переходы с излучением. Так как вынужденно испущенные фотоны неотличимы от фотонов падающего света, то происходит частичная компенсация убыли фотонов в прошедшем пучке.

Экспериментально измеряемый коэффициент поглощения пропорционален разности населенностей основного и возбужденного уровней при $B_{12} = B_{21}$:

$$x = \frac{h\nu_{21}}{C}(N_1B_{12} - N_2B_{21}).$$

Это также справедливо и для невырожденных уровней:

$$x = \frac{h\nu_{21}}{C}B_{12}(N_1 - N_2).$$

Рассмотрим три случая:

1. $N_2 < N_1$. Число вынужденных переходов с испусканием меньшего числа поглощательных переходов $x > 0, I < I_0$. Наблюдается поглощение света.

2. При увеличении объемной плотности падающего излучения I , когда спонтанными переходами можно пренебречь, происходит выравнивание населенностей основного и возбужденного уровней. Это приводит к уменьшению коэффициента поглощения.

При $N_2 = N_1$ вынужденные переходы с испусканием полностью компенсируют убыль фотонов в прошедшем пучке, обусловленную поглощательными переходами. В этом случае $x = 0, I = I_0$. Среда не поглощает света. Отсюда вытекает также принципиальная невозможность создания инверсной заселенности в двухуровневой системе при оптическом возбуждении.

3. Пусть в системе каким-либо способом (не оптическим) создана инверсная населенность $N_2 > N_1$. Вынужденные переходы с испусканием преобладают над поглощательными переходами. Это приводит к тому, что $I > I_0$, т. е. наблюдается усиление света. Для описания этого процесса вводится понятие отрицательного коэффициента поглощения

$$x = \frac{h\nu_{21}}{C}B_{12}(N_1 - N_2) < 0$$

или коэффициента усиления

$$x_{yc} = -x = \frac{h\nu_{21}}{C} B_{12}(N_2 - N_1).$$

Принцип действия ОКГ

Основными элементами ОКГ являются активная среда (среда с инверсной населенностью) и резонатор. Простейший оптический резонатор состоит из двух плоских параллельных зеркал, одно из которых полностью отражает излучение, второе является частично прозрачным (рис. 2.2).

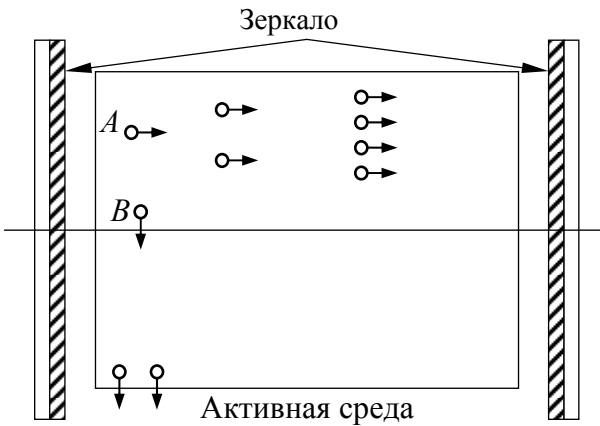


Рис. 2.2. Оптический резонатор

Среда с инверсной населенностью способна когерентно усиливать излучение «затравкой», для процесса генерации служит спонтанное испускание фотонов атомами среды. Фотоны, распространяясь в активной среде, вызывают вынужденные переходы с излучением в других возбужденных атомах. Вторичные фотоны по направлению распространения, фазе и поляризации совпадают с первоначальными. Таким образом, в активной среде происходит когерентное усиление светового потока. Пусть возбужденные атомы, расположенные в точках A и B , испускают фотоны в результате спонтанного

перехода $2 \rightarrow 1$. Чем больше путь, проходимый фотонами в активной среде, тем больше усиление. Для направлений, перпендикулярных к оси резонатора, усиление оказывается наименьшим, для направления вдоль оси – наибольшим. На рис. 2.2 это схематически показано увеличением числа стрелок в усиливающихся световых потоках. Дойдя до полупрозрачного зеркала, световой поток частично отразится, частично пройдет сквозь зеркало наружу. При распространении отраженной части фотонов в активной среде происходит дальнейшее усиление светового потока. После отражения от второго зеркала процесс повторяется и фотоны, проходящие сквозь полупрозрачное зеркало, образуют выходящий из лазера луч. Для получения стационарной генерации необходимо, чтобы усиление на пути, пройденном фотонами между двумя отражениями, компенсировало соответствующие потери (дифракция, рассеяние и поглощение в среде резонатора, потери при отражении от зеркал).

Классификация по типу активных сред и принцип устройства ОКГ

По типу применяемых сред ОКГ различают:

- 1) твердотельные;
- 2) газовые;
- 3) жидкостные;
- 4) полупроводниковые;
- 5) стримерные.

Каждый из перечисленных классов включает огромное семейство лазеров (порядка нескольких сотен), отличающихся устройством, способом накачки, режимом работы, спектральными и энергетическими параметрами генерации.

Твердотельные ОКГ

Твердотельные лазеры находят преимущественное применение в промышленности. Этот генератор был исторически первым квантовым генератором в видимой области спектра. Активная среда – рубин – представляет собой кристалл окиси алюминия Al_2O_3 (корунд), активированный ионами хрома (0,04–0,05 %), которые и определяют спектроскопические свойства кристалла. Используется так-

же неодимовое стекло (с содержанием до 5 % неодима). Применяется оптическая накачка излучением импульсных газоразрядных ламп, питаемых от батарей конденсаторов. Схематическое устройство твердотельного лазера на синтетическом рубине представлено на рис. 2.3.

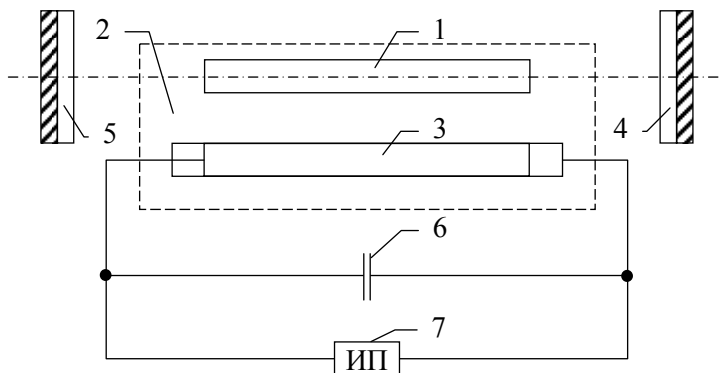


Рис. 2.3. Твердотельный лазер

Рабочее тело *1* помещено внутри светообразующей камеры *2*, в которой размещена также импульсная газоразрядная лампа *3*. Перпендикулярно оси рабочего тела *1* размещены полупрозрачное зеркало *4* и непрозрачное *5* зеркало. Выводы импульсной газоразрядной лампы *3* подключены к батарее конденсаторов *6* и источнику питания *7*.

Батарея конденсаторов *6* периодически заряжается от источника питания *7* и разряжается на газоразрядную лампу *3*, вспышка которой возбуждает рабочее тело *1*. Процесс возбуждения рабочего тела часто называют накачкой или подкачкой. Работу рубинового ОКГ можно описать в приближении трехуровневой схемы (рис. 2.4). В результате поглощения света импульсных ламп ионы хрома переходят на возбужденный уровень *3*. Время нахождения возбужденных атомов на уровне E_3 мало и составляет 10^{-8} с. Возвращение возбужденных атомов с уровня E_3 на уровень E_1 происходит в результате двух последовательных переходов.

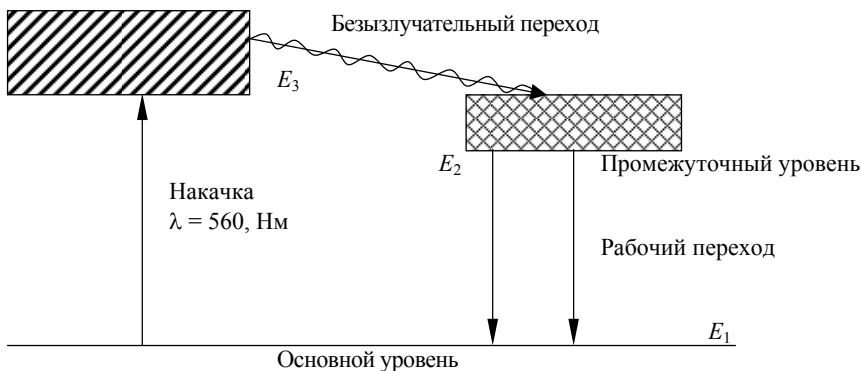


Рис. 2.4. Трехуровневая система работы твердотельного ОКГ

Опыт показывает, что большая часть возбужденных ионов хрома сначала отдает часть своей энергии кристаллической решетке корунда без излучения света и переходит на возбужденный уровень 2. Этому безызлучательному переходу на рис. 2.4 соответствует волнистая стрелка. Среднее время жизни ионов хрома в состоянии с энергией E_2 во много раз превышает среднее время жизни в состоянии E_3 и составляет промежуток времени 10^{-4} –1 с. Вследствие этого происходит накопление частиц с энергией E_2 . Другими словами, происходит увеличение заполненности уровня 2 и уменьшение населенности основного уровня, т. е. возникает инверсия населенности в канале 2–1. Именно в этом канале и развивается генерация. Длина волны лазерного излучения рубина $\lambda = 694,3$ нм. Наиболее распространены рубиновые ОКГ, работающие в импульсном режиме. Длительность импульса генерации можно изменять в пределах 10^{-3} – 10^{-11} с. Энергия светового импульса рубинового лазера сравнительно невелика и составляет несколько джоулей. Но так как длительность импульса мала, мощность может достигать величины порядка 10^9 Вт.

Газовые ОКГ

В газовом лазере рабочим телом являются газы или смеси газов (Ar, CO₂, CO₂–N₂–He). Достаточно широкое распространение получили гелий-неоновые лазеры. Они излучают монохроматический

пучок мощностью до нескольких десятков милливольт, работают в импульсном и непрерывном режимах, просты и сравнительно безопасны в эксплуатации. Принципиальная схема гелий-неонового ОКГ изображена на рис. 2.5.

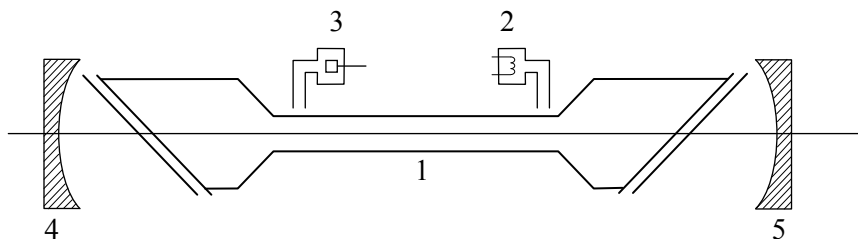


Рис. 2.5. Гелий-неоновый лазер:

1 – газоразрядная стеклянная трубка, диаметром несколько миллиметров и длиной от нескольких десятков сантиметров до 1,5 м и более; 2 – катод, накаливаемый низковольтным источником питания; 3 – анод; 4 и 5 – зеркала резонатора

Напряжение между анодом и катодом 1–2,5 кВ, разрядный ток составляет несколько миллиампер. Давление гелия в трубке примерно равно 1 мм рт. ст., давление неона – 0,1 мм рт. ст.

За генерацию лазерного излучения ответственны атомы неона (рис. 2.6). Генерация может развиваться в каналах 2–1 ($\lambda = 1150$ нм), 3–1 ($\lambda = 632,8$ нм) или 3–4 ($\lambda = 3390$ нм). Заселение уровней 2 и 3 осуществляется путем неупругих соударений с электронами газоразрядной плазмы и возбужденными атомами гелия.

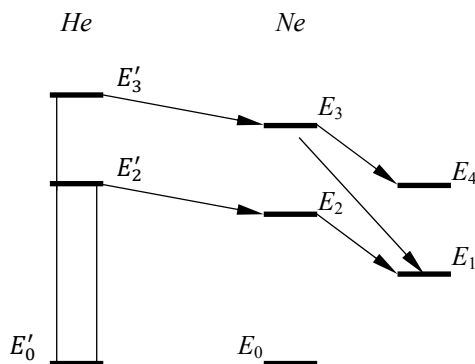


Рис. 2.6. Уровни лазерного излучения

Многочисленные варианты гелий-неонового лазера нашли весьма разнообразные применения в биологических исследованиях, в системах лазерной связи, в голографии, машиностроении и многих других областях естествознания и техники.

Жидкостные ОКГ

Основное достоинство ОКГ на растворах молекул – возможность получения генерации на любых частотах в видимой и ближней инфракрасной области спектра, плавного изменения (перестройки) частоты. Генерация развивается на электронно-колебательных переходах.

Оптическая схема лазера на красителе (например, родамине), функционирующего в непрерывном режиме, представлена на рис. 2.7.

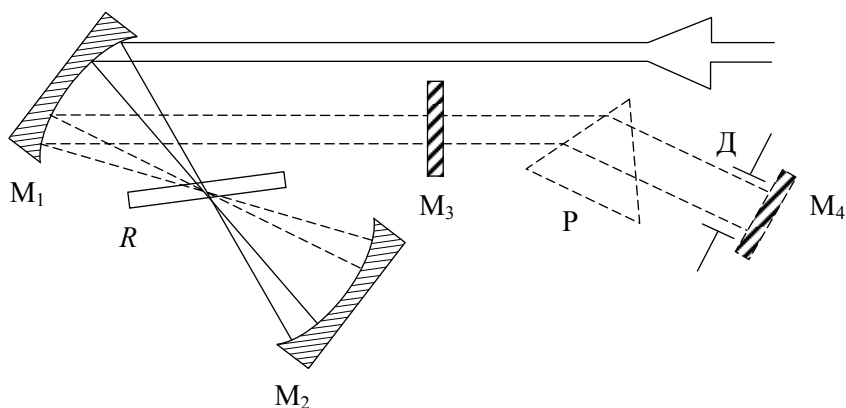


Рис. 2.7. Жидкостный лазер

Область применения ОКГ

Длительность импульса излучения твердотельного лазера обычно составляет от 0,2 до 5 мс, их частота равна 1–10 Гц. Такой режим позволяет получить высокую концентрацию энергии в момент импульса в луче лазера (пиковая мощность импульсов может достигать десятков киловатт) при небольшой средней мощности. Коэффициент полезного действия лазера на твердом теле очень мал

(КПД = 1,0 %); почти вся энергия, подводимая к лампе накачки, превращается в теплоту, которая нагревает активный элемент. Благодаря сравнительно малой средней мощности луча, измеряемой ваттами, диаметр светового пятна на изделии не может превысить 1–2 мм, поэтому лазеры на твердом теле могут применяться лишь в тех технологических процессах, которые не требуют больших затрат энергии. Это точечная сварка мелких деталей (в основном тонких проволочек), прошивание мелких отверстий, в частности в алмазных волокнах и в часовых камнях, резка тонких полупроводниковых материалов, обработка тонких пленок в производстве интегральных микросхем.

Энергоемкие процессы, такие как сварка швом, резка более толстых диэлектрических материалов, требуют применения более мощных газовых лазеров на азоте и углекислоте. Такие лазеры могут выполняться на мощности в луче при работе в непрерывном режиме в сотни и тысячи ватт (до 10–12 кВт). Для того, чтобы газ при этом не нагревался, его непрерывно прокачивают через лазер. Только мало-мощные газовые лазеры, работающие в импульсном режиме, могут выполняться отпаянными с замкнутым объемом. Обычно в газовую смесь добавляют гелий, способствующий ее охлаждению благодаря высокой теплопроводности. Так как концентрации активных частиц в газовой среде (10^{13} – 10^{16} см⁻³) намного ниже, чем в твердотельных излучателях (10^{17} – 10^{20} см⁻³), высокие мощности излучения можно получить лишь при большой длине активной части излучателя (десятки метров). Удельная мощность, снимаемая с одного метра газовой трубы, составляет около 50 Вт. Ведутся работы по повышению удельной мощности до 1 кВт с 1 м длины трубы. Наиболее высоким КПД обладают лазеры на CO₂. Они выполняются по схеме свернутой конструкции, когда газоразрядные трубки расположены параллельно друг другу, а их луч проходит последовательно, поворачиваясь при каждом переходе на 180° с помощью двух установленных под углом 45° зеркал. Появление мощных лазеров позволило расширить области их технологического применения (поверхностная закалка металлических изделий сканирующим лазерным лучом).

Оптические квантовые генераторы на красителях (с плавной перестройкой частоты) служат основой для спектральных приборов с исключительно высокой разрешающей силой.

Как выше отмечалось, для усиления излучательной способности лазера увеличивают размеры рабочего тела и применяют резонаторную систему. При многократном возбуждении волны в резонаторе все большее и большее количество атомов, вызывая резонансное усиление излучения. Усиленное излучение выводится наружу через полупрозрачное зеркало.

Угловая расходимость луча лазера определяется по формуле

$$\Theta = 1,22 \frac{\lambda}{\alpha},$$

где λ – длина волны;

α – диаметр источника излучения.

Луч лазера дополнительно фокусируется посредством оптических систем. Плотность излучения определяют согласно следующему выражению

$$H = \frac{F}{S} = 0,25 \frac{FD}{\alpha^2 f^2},$$

где F – поток излучения;

S – площадь;

D – диаметр входного отверстия объектива;

f – фокусное расстояние объектива.

Таких же удельных плотностей мощности, как в лазере, удается достигнуть при использовании электронно-лучевых устройств. Однако эти установки существенно сложнее и дороже лазерных, кроме того, у них существует жесткое рентгеновское излучение.

Обработываемость различных материалов световым лучом определяется при определенных параметрах луча, в основном теплофизическими свойствами материалов (температурой плавления и кипения, теплоемкостью и теплопроводностью).

В табл. 2.1 приведены показатели относительной обработываемости световым лучом различных материалов. За единицу принята относительная обработываемость алюминия.

Таблица 2.1

Обрабатываемость материалов лазером

Материал	Относительная обрабатываемость	Материал	Относительная обрабатываемость
Алюминий	1,00	Молибден	0,41
Вольфрам	0,22	Сталь	1,26
Медь	0,32	Титан	1,42

Основные особенности светолучевой обработки:

- высокая импульсная мощность излучения, достигающая 10^9 кВт/м³;
- отсутствие химических и структурных изменений обработанного материала;
- возможность точной локализации обрабатывающего луча на заданном участке обработки;
- импульсное возникновение высокой температуры и давления в зоне обработки;
- высокая когерентность и яркость луча, а также монохроматичность;
- отсутствие обрабатывающего инструмента;
- возможность производить обработку на воздухе и в вакууме.

Все это предопределило многообразное применение ОКГ в науке и технике.

Описание установки

Назначение

Газовые лазеры непрерывного действия ЛГ-52-2 предназначены для использования в аппаратуре в качестве источника когерентного излучения.

Лазеры рассчитаны на эксплуатацию в нормальных климатических условиях:

- температура окружающей среды – от +25 до –10 °С;
- атмосферное давление – 630–800 мм рт. ст.

При работе с лазером вибрации не допускаются.

Технические характеристики

Длина волны генерируемого излучения	– 0,63 мкм.
Мощность излучения	– не менее 4 мВт.
Относительная нестабильность мощности излучения за 30 мин непрерывной работы	– не более 10 %.
Диаметр пучка излучения на выходном зеркале, измеренного на уровне 0,5 мощности излучения	– не более 0,6 мм.
Расходимость пучка излучения, измеренная на уровне 0,5 мощности излучения	– не более $1,74^{\circ}10'3''$ рад.
Пульсации мощности излучения	– не более 5 %.
Время готовности	– не более 30 мин.
Предельные значения допустимых режимов эксплуатации должны соответствовать следующим нормам:	
– напряжение питающей сети	– 198–231 В;
– частота питающей сети	– 49,6–50,4 Гц;
– ток через активный элемент излучателя	– не более 15 мА.
Выходное напряжение холостого хода источника питания при напряжении питающей сети 220 В	– не более 8,5 кВ.
Коэффициент пульсации выходного напряжения источника питания	– не более 5 %.
Потребляемая мощность	– не более 95 Вт.
Габаритные:	
– размеры излучателя	– 620 × 93 × 120 мм,
– источника питания	– 242 × 380 × 132 мм.
Масса составных частей лазера:	
– излучателя	– не более 6,5 кг,
– источника питания	– не более 9,5 кг.

Устройство и принцип работы

Лазер ЛГ-52-2 состоит из излучателя и источника питания.

Излучатель

Основными элементами излучателя являются:

- активный элемент,
- оптический резонатор,
- балласт.

Активный элемент представляет собой двухэлектродную газоразрядную трубку постоянного тока, наполненную смесью газов: гелия и неона. Оптический резонатор образован двумя зеркалами: плоским и сферическим. Зеркала закреплены в торцевых фланцах держателя оптики. Вывод излучателя осуществляется со стороны плоского зеркала.

Источник питания

Источник питания представляет собой высоковольтный выпрямитель. Высокое напряжение получается с помощью схемы удвоения напряжения вторичной обмотки трансформатора. Для поджига лазера полученное напряжение удваивается с помощью конденсатора величины не менее 8,5 кВ.

После поджига лазера напряжение источника питания снижается из-за малой величины емкости конденсатора до величины 4,7 кВ.

Постоянная времени фильтра выпрямителя обеспечивает пульсации напряжения не более 5 %.

При снятии верхней крышки источника питания разрядник автоматически подключает цепь высокого напряжения к цепи заземления.

Меры безопасности

К работе с лазером допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности и ознакомившиеся с настоящей инструкцией.

При работе с лазером могут возникнуть следующие виды опасности:

- электроопасность;
- облучение.

Перед началом работы необходимо проверить выполнение на рабочем месте требований техники безопасности в соответствии с «Правилами технической эксплуатации электроустановок для установок с напряжением выше 1000 В».

Запрещается замена предохранителей в источнике питания при включенном в сеть приборе.

Запрещается включение лазера без заземления.

Порядок работы с лазером

Порядок включения лазера

Включите в сеть сетевой шнур источника питания. Установите выключатель «Сеть» во включенное положение, при этом должна загореться лампочка «Сеть» и появиться излучение.

Установите ручку переключателя «Ток лазера» в положение, указанное в паспорте лазера; через 30 мин приступите к работе.

Порядок выключения лазера

Установите выключатель «Сеть» в выключенное положение, при этом должна погаснуть лампочка «Сеть».

Отключите сетевой шнур источника питания от сети.

Подъюстировка излучателя

Установите на выходе излучателя измеритель мощности. Отвинтите гайки на торцах кожуха излучателя. Снимите торцевые крышки.

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Цель работы: получить общие сведения об электрических печах сопротивления и ознакомиться с их классификацией; исследовать шахтную лабораторную печь косвенного нагрева СШОЛ-1.1,6/12-МЗ-У4.2; разобрать принципы измерения и регулирования температуры в электрических печах сопротивления.

Общие сведения об электрических печах сопротивления и их классификация

Электрические печи сопротивления *по способу превращения электрической энергии в тепловую* разделяются на печи косвенного действия и печи и установки прямого нагрева.

Печи сопротивления косвенного нагрева широко распространены и весьма разнообразны по технологическому назначению и конструкции.

По технологическому назначению печи сопротивления косвенного нагрева можно разделить на три группы:

- 1) термические печи для различных видов термической и термохимической обработки черных и цветных металлов, стекла, керамики, металлокерамики, пластмасс и других материалов;
- 2) плавильные печи для плавки легкоплавких цветных металлов и химически активных тугоплавких металлов и сплавов;
- 3) сушильные печи для сушки лакокрасочных покрытий, литейных форм, обмазок сварочных электродов, металлокерамических изделий, эмалей и т. п.

По характеру работы печи можно разделить на печи периодического и непрерывного действия.

Для печей периодического действия (садочных) характерно неизменное положение нагреваемого тела (садки) в течение всего времени пребывания в печи.

Цикл работы печи включает загрузку, тепловую обработку по заданному режиму и выгрузку. Печь может работать круглосуточно (в этом случае циклы непрерывно следуют друг за другом) или с перерывами в одну или две смены.

В печах непрерывного действия (методических) нагреваемые изделия или материалы перемещаются в процессе тепловой обработки от загрузочного конца к разгрузочному, и изменение температуры нагреваемых тел происходит вместе с их движением.

Печи сопротивления косвенного нагрева разделяются *по температурному режиму* на низко-, средне- и высокотемпературные.

У первых верхняя температурная граница лежит в пределах 600–650 °С, и процессы теплообмена идут со значительной или даже преобладающей ролью конвекции. Эти печи часто называют конвекционными.

В средне- и высокотемпературных печах теплообмен внутри осуществляется в основном излучением, а доля конвективного теплообмена незначительна. Эти печи иногда называют радиационными.

Среднетемпературные печи имеют верхнюю температурную границу 1200–1250 °С, определяемую возможностью применения для нагревательных элементов специальных сплавов сопротивления. Технологические применения этих печей: закалка, отжиг, термохимическая обработка черных металлов, нагрев под обработку давлением черных и цветных металлов и др.

Высокотемпературные печи (с рабочей температурой выше 1250 °С) за последние годы получили значительное распространение для ряда технологических процессов: выращивания монокристаллов, термообработки и нагрева под горячую деформацию тугоплавких металлов, спекания металлокерамических изделий и др.

Для многих технологических процессов требуются вакуум или инертные газы в рабочем пространстве печи, поэтому в ряде случаев печи сопротивления выполняют вакуумными, газонаполненными или вакуумно-компрессионными.

В отличие от печей сопротивления косвенного действия, снабженных нагревательными элементами в установках и печах прямого нагрева преобразование электрической энергии в тепловую происходит непосредственно в нагреваемом теле (заготовке), включенном в цепь тока.

Назначение и параметры печи СШОД-1.1,6/12-МЗ-У4.2

Электропечь шахтная лабораторная косвенного нагрева СШОД-1.1,6/12-МЗ-У4.2 предназначена для плавки и термообработки раз-

личных материалов при температуре до 1100 °С в стационарных лабораториях.

Печь имеет следующие параметры:

– мощность, потребляемая при разогреве	– 2,5 кВт;
– мощность, потребляемая для поддержания рабочей температуры	– 1,5 кВт;
– номинальная рабочая температура	– 1100 °С;
– время разогрева до номинальной рабочей температуры незагруженной печи	– 150 мин;
– неравномерность температуры в рабочем пространстве при номинальной температуре незагруженной печи	– 5 °С;
– точность автоматического регулирования при номинальной температуре	– ±2 °С;
– рабочая среда	– воздух;
– размеры рабочего пространства:	
диаметр	– 100 мм,
длина	– 300 мм;
– масса	– 60 кг.

Конструкция шахтной лабораторной печи

Электропечь СШОД-1.1,6/12-МЗ-У4.2 представляет собой прямоугольный корпус, выполненной из тонколистовой стали, в котором размещены камера нагрева и блок управления (рис. 3.1).

Камера нагрева состоит из керамического фланца 1, нагревателя 2, дна 3, кольца 4 и теплоизоляции.

Нагреватель выполнен в виде керамической трубы, на которой высокоглиноземной обмазкой закреплена проволока из сплава с высоким удельным сопротивлением. Внутренняя поверхность трубы нагревателя образует рабочее пространство электропечи.

Блок управления электропечи служит для автоматического поддержания заданной температуры с точностью, указанной в технической характеристике.

Элементы блока управления – регулирующий милливольтметр 5, электронная приставка, тиристор, сигнальная лампа 6 и выключатель расположены на передней панели 8, которая крепится на боковых стенках корпуса камеры нагрева четырьмя винтами 9.

Для уменьшения тепловых потерь через отверстие рабочей камеры последнее закрывается крышкой 10.

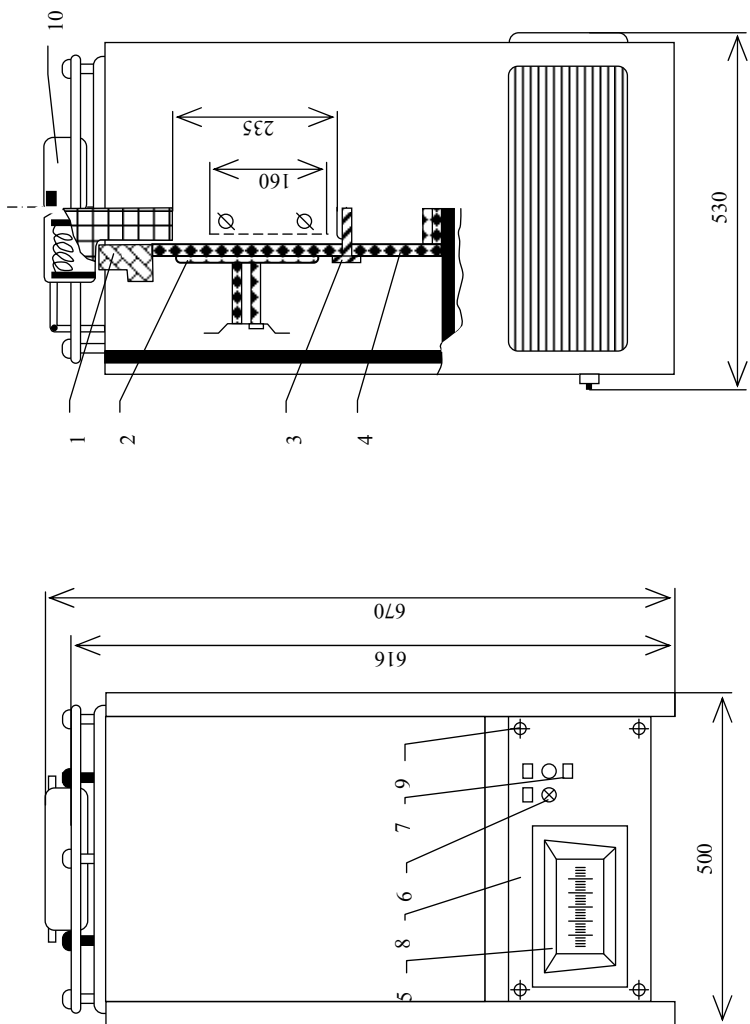


Рис.3.1. Устройство электролампы.

1 – фланец; 2 – нагреватель; 3 – дно; 4 – кольцо; 5 – милливольтметр; 6 – сигнальная лампа; 7 – выключатель; 8 – передняя панель; 9 – винты; 10 – крышка

Функциональная схема шахтной лабораторной печи

Функциональная схема приведена на рис. 3.2. К шинам питания непосредственно или через выключатель подключены: электропечь последовательно с тиристором, узел управления тиристором, регулирующий милливольтметр и узел эталонного напряжения. Тиристор выполняет функцию бесконтактного выключателя. Измерение и регулирование температуры осуществляется посредством термопары ТП и регулирующего милливольтметра.

Узел управления тиристором предназначен для выработки управляющих сигналов, поступавших в цепь управления тиристора по командам от регулирующего милливольтметра. Узел эталонного напряжения служит для выработка эталонного напряжения, необходимого для работы регулирующего милливольтметра.

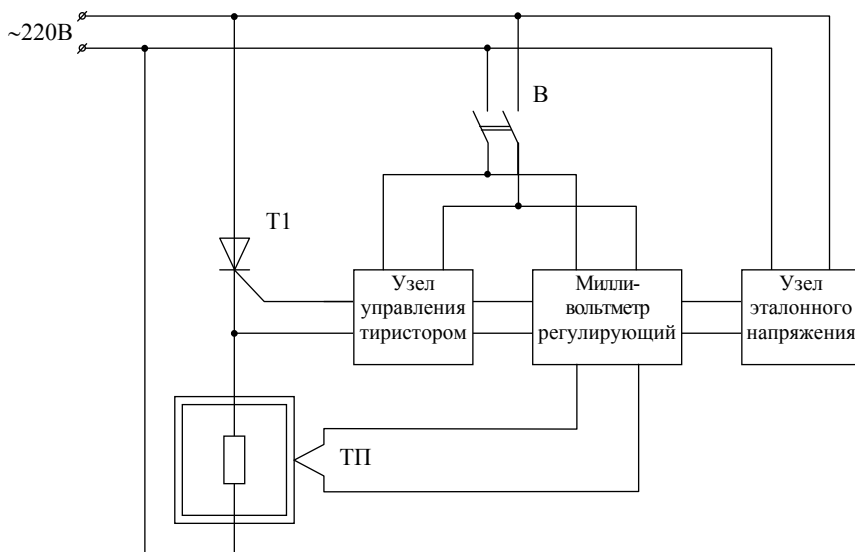


Рис. 3.2. Функциональная схема шахтной лабораторной печи

Принципиальная схема шахтной лабораторной печи

Принципиальная схема печи приведена на рис. 3.3.

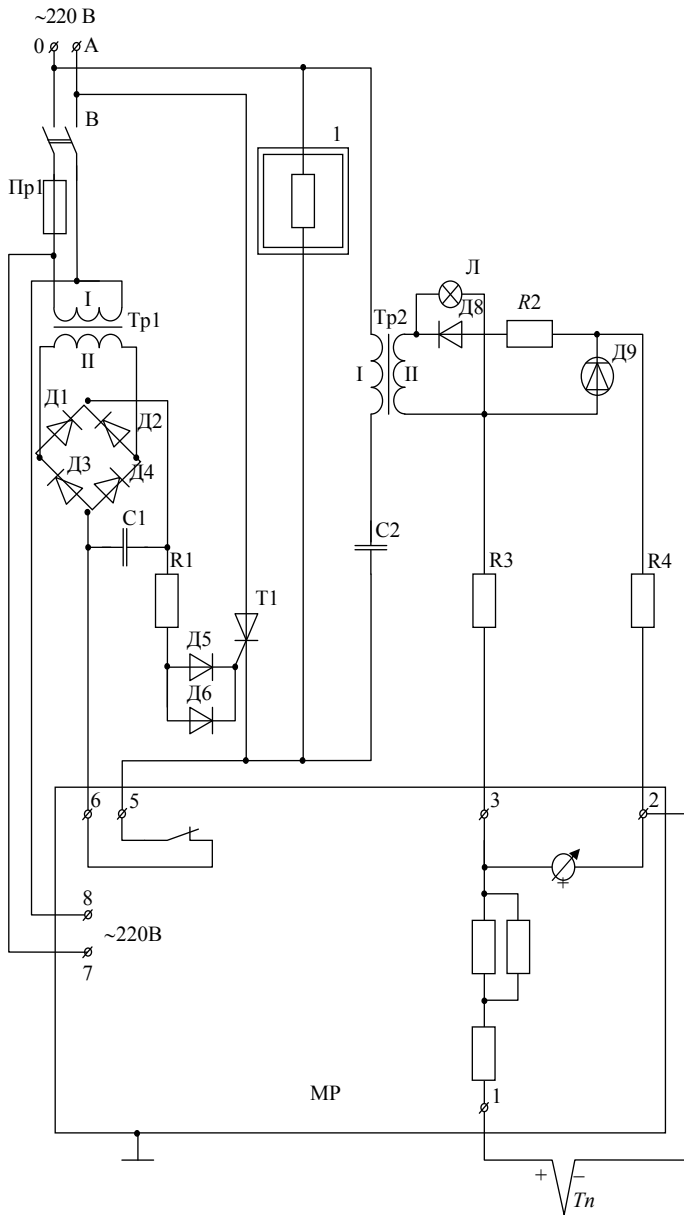


Рис. 3.3. Электрод-печь ШОД-1.1,6/12-МЗ-У4.2:
схема электрическая принципиальная

Собственно электропечь I через тиристор Т1 подключена непосредственно к входным шинам источника питания напряжением 220 В. Узел управления тиристором выполнен на основе трансформатора Тр1, выпрямительного моста на диодах Д1–Д4, конденсатора С1, резистора R1 и диодов Д5, Д6.

Регулирующий милливольтметр состоит из собственно милливольтметра МВ, включенного в диагональ моста, образованного термопарой ТП, резисторами R2–R7 и узлом эталонного напряжения. К зажимам 5, 6 подключены размыкающие контакты, установленные на механизме задания температуры. Эти контакты размыкаются упором, связанным со стрелкой милливольтметра.

Узел эталонного напряжения выполнен на трансформаторе Тр2, в первичную обмотку которого включен токоограничивающий конденсатор С2, а во вторичную – выпрямитель на диоде Д8. Резистор R2 является токоограничивающим и служит для задания рабочей точки стабилитрона Д9. Напряжение, снимаемое со стабилитрона, является выходным для узла эталонного напряжения.

Принципы измерения температуры

В электрических печах для измерения температуры и в качестве датчиков для автоматического управления температурным режимом применяют в основном термоэлектрические термометры.

Термоэлектрические термометры состоят из датчика (термопары), измерителя термоЭДС и соединительных проводов. Термопара состоит из двух разнородных проводников А и В (рис. 3.4, *а*), соединенных друг с другом и образующих замкнутую цепь. Если температуры мест соединения проводников не одинаковы, то в образованной ими цепи появляется термоЭДС и начинает протекать ток. Значение термоЭДС зависит от материала обоих проводников и разности их температур. Если температуру одного из соединений t_0 поддерживать неизменной (обычно принято считать ее равной 0 °С), то термоЭДС будет зависеть лишь от температуры t этого соединения (второго спая).

Если цепь из двух таких проводников разрезать (в любом месте, в том числе и в одном из спаев) и вставить в цепь третий проводник (см. рис. 3.4, *б* и 3.4, *в*), то термоЭДС не изменится, если температуры обоих концов третьего проводника будут одинаковыми. Поэто-

му можно в разрез цепи вставить электроизмерительный прибор (рис. 3.4, *з* и 3.4, *д*); требуется лишь, чтобы на концах, ведущих к нему, от термопары проводников, была одна и та же температура t_0 и t , – они должны присоединяться к термоэлектродам рядом. Прибор будет измерять термоЭДС, а, следовательно, и температуру t рабочего спая.

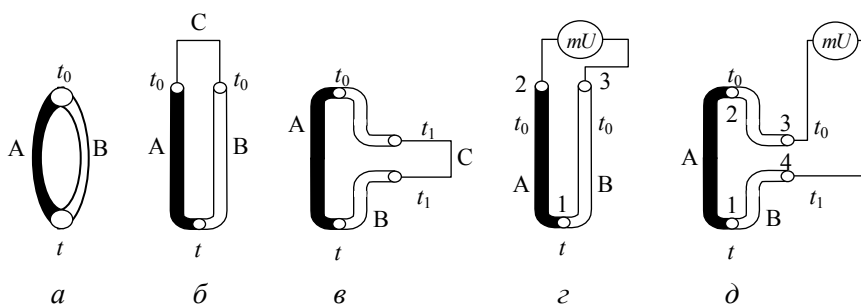


Рис. 3.4. Схема термоэлектрической цепи из двух (*а*) и трех (*б*, *в*) проводников; схема включения электроизмерительного прибора в спай и термоэлектрод термоэлемента (*з*, *д*)

В высокотемпературных печах, особенно, когда нужно измерить температуру жидкого металла, используют *пирометры излучения*. Они позволяют измерять температуру объекта при невозможности непосредственного контакта с ним датчика по причине слишком высокой температуры, агрессивного характера среды или быстрого перемещения объекта.

Пирометры излучения основаны на связи между температурой тела и количеством излучаемой им энергии. При этом можно использовать для измерения температуры излучающего тела всю излучаемую им энергию – в этом случае мы будем иметь дело с *пирометрами полного излучения (радиационными)*. Можно использовать лишь часть спектра излучения, выделив с помощью светофильтра узкий участок монохроматического излучения (*пирометры частичного излучения* или *оптические*) В цветковых пирометрах выделяют два монохроматических участка излучения в разных частях спектра и судят по температуре объекта, сравнивая их интенсивность.

В радиационных пирометрах полное излучение тела, направляется с помощью оптической системы на рабочий конец термоэле-

мента и нагревает последний. Чем выше температура излучающего тела, тем больше его излучение и тем больше, следовательно, температура рабочего конца термоэлемента и его термоЭДС.

Оптические пирометры работают на принципе сравнения яркости свечения измеряемого тела с яркостью свечения нити электрической лампочки, температура которой однозначно связана с проходящим через нее током. Сравнение осуществляется наблюдателем, причем человеческий глаз способен весьма точно уловить момент равенства яркостного свечения обоих объектов, когда температуры нити измеряемого тела будут равны и определяются по показанию включенного в цепь лампы прибора, проградуированного непосредственно в градусах.

Автоматическое регулирование температурного режима

В печах сопротивления в большинстве случаев применяется простейший вид регулирования температуры – *двухпозиционное регулирование*, при котором исполнительный элемент системы регулирования – контактор или тиристор – имеет лишь два крайних положения: «включено» и «выключено». Во включенном состоянии температура печи растет, так как ее мощность всегда выбирается с запасом и соответствующая ей установившаяся температура значительно превосходит ее рабочую температуру. В выключенном состоянии температура печи снижается по экспоненциальной кривой. Для идеализированного случая, когда в системе «регулятор–печь» отсутствует динамическое запаздывание, процесс изменения температуры при двухпозиционном представлен в верхней части рис. 3.5, в нижней части которого показано соответствующее изменение мощности печи.

При разогреве в начале мощность печи будет постоянной и равной номинальной P_n , поэтому ее температура будет расти до точки 1, когда она достигнет значения $t_{зад} + \Delta t$, где $t_{зад}$ – заданная температура, а $2\Delta t$ – зона нечувствительности регулятора. В этот момент регулятор сработает, коммутационный аппарат отключит печь и ее мощность упадет до нуля. Вследствие этого температура печи начнет уменьшаться по кривой 1–2 до тех пор, пока не будет достигнута нижняя граница зоны нечувствительности $t_{зад} - \Delta t$. В этот момент печь вновь включится, и ее температура начнет увеличиваться.

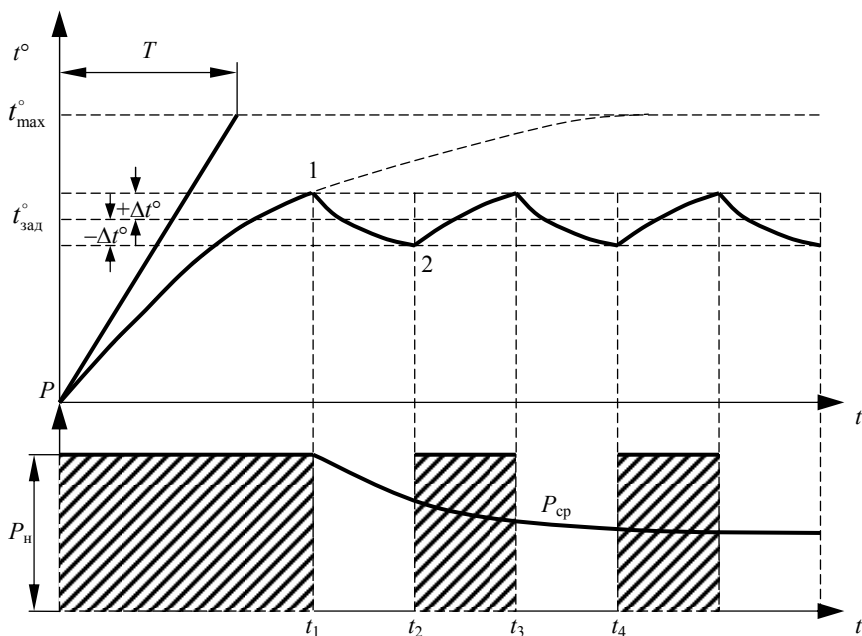


Рис. 3.5. Зависимости температуры и потребляемой мощности электропечи от времени

Таким образом, регулирование температуры печи по двухпозиционному принципу заключается в ее изменении по пилообразной кривой около заданного значения в пределах зоны нечувствительности регулятора. Средняя мощность печи зависит от соотношения интервалов времени ее включенного состояния и выключенного состояния. По мере прогрева печи кривая нагрева будет идти круче, а кривая остывания – положе. Поэтому отношение интервалов включения и отключения будет уменьшаться, а, следовательно, будет падать и средняя мощность $P_{\text{ср}}$.

Зоны нечувствительности современных терморегуляторов могут быть сделаны весьма малыми и доведены до $0,1-0,2^\circ\text{C}$. Однако действительные колебания температуры печи могут быть во много раз большими из-за динамического запаздывания в системе «регулятор–печь». Основным источником этого запаздывания является инерция датчика–термопары, особенно если она снабжена двумя защитными чехлами: керамическим и металлическим. Чем больше

это запаздывание, тем больше колебания температура нагревателя превышают зону нечувствительности регулятора. В тех случаях, когда колебания недопустимы, применяют незащищенные термоэлементы с открытым концом. Это, однако, не всегда возможно ввиду возможных механических повреждений датчика.

Чтобы фактическая температура не выходила за пределы зоны нечувствительности прибора, применяют также следующие способы регулирования:

- переключение нагревателей печи, например, с «треугольника» на «звезду»;
- включение последовательно с печью регулируемого сопротивления (однако этот способ связан с большими потерями энергии);
- питание печи через регулировочный трансформатор или автотрансформатор с переключением печи на разные ступени напряжения;
- фазовое регулирование с помощью полупроводниковых приборов (питание печи осуществляется через тиристоры, угол включения которых изменяется системой управления; таким путем можно добиться плавного регулирования печи в широких пределах почти без дополнительных потерь).

Работа шахтной лабораторной печи

При выключенном выключателе В1 (см. рис. 3.3) на зажимы печи подается напряжение 220 В. Указатель заданной температуры устанавливают на требуемое значение.

Тиристор Т1 заперт, так как в цепи его управляющего электрода не протекает ток. Нагрев печи не происходит.

При включении выключателя В1 тиристор отпирается, так как через его управляющий электрод начинает протекать ток по цепи: катоды диодов Д1, Д3 – резистор R1 – диоды Д5, Д6 – управляющий электрод тиристора Т1 – катод тиристора Т1 – размыкающий контакт регулирующего милливольтметра МВ – аноды диодов Д2, Д4. Электродпечь начинает нагреваться.

В момент времени t_1 размыкающий контакт регулирующего милливольтметра разрывает цепь управляющего электрода тиристора Т1. Тиристор запирается, и печь отключается. Температура начинает понижаться. В момент времени t_2 электродпечь включает-

ся, и ее температура начинает повышаться. В результате температура электропечи колеблется около заданного значения, как это показано на рис. 3.5.

Порядок проведения лабораторной работы

1. Ознакомиться с принципом работы импульсного регулятора.
2. Приготовить таблицу наблюдений по образцу (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Таблица наблюдений

Время t , мин	0	2	4	6	8	10	12
Температура, $t_{шт}$, °C							
Температура t_3 , °C							

Примечание. $t_{шт}$ – показания штатного датчика температуры, а в данном случае – термопары, стационарно смонтированной в корпусе электропечи и предназначенной для использования в процессе повседневной эксплуатации электропечи; t_3 – показания экспериментального датчика температуры, в данном случае ртутного термометра, временно устанавливаемого на время проведения наблюдений.

3. Установить заданную температуру $t_{зад} = 200$ °C. Она намного ниже номинальной рабочей температуры, на которую рассчитана конструкция данной печи. Выбор столь низкой заданной температуры позволяет уменьшить время разогрева печи до заданного значения и провести лабораторный эксперимент в отведенное ему учебным расписанием время. Процесс изменения температуры в этом случае (см. рис. 3.6) будет отличен от представленного на рис. 3.5. Обусловлено это тем, что при заданной температуре, намного меньшей номинальной рабочей, нагрев до заданного значения занимает немного времени и достаточно близок к адиабатическому, т. е. почти все поступающее от нагреваемого элемента тепло идет на печи при номинальной отдаче в окружающую среду. Поэтому после дос-

тижения температуры $t_{\text{зад}} + \Delta t$ и первого отключения тиристора температура печи будет медленно продолжать расти. Когда печь полностью прогреется, тепло начнет уходить в окружающую среду и температура печи начнет снижаться. Чем ближе заданная температура к номинальной рабочей, тем короче интервал времени от первого отключения тиристора до его второго включения и тем ближе характер процесса изменения температуры соответствует зависимости, представленной на рис. 3.5.

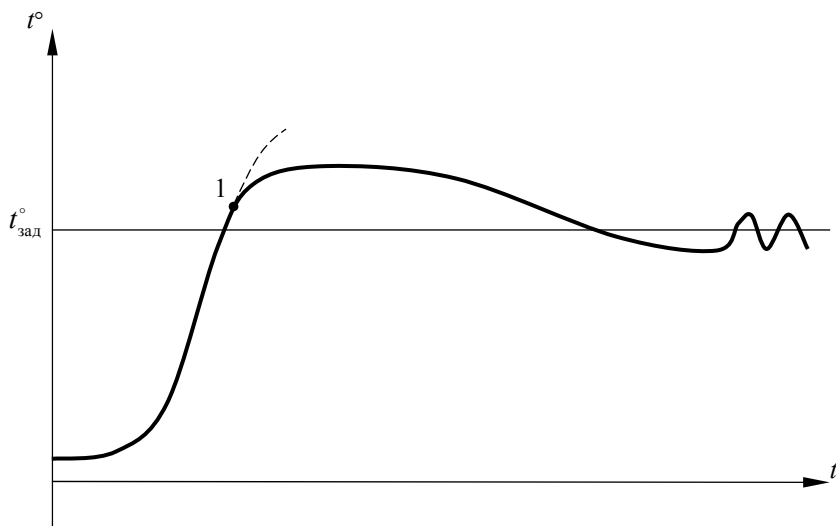


Рис. 3.6. Зависимость температуры электропечи от времени при $t_{\text{зад}} \ll t_{\text{ном}}$

Результаты измерения температуры в переходном (неустановившемся) режиме работы существенно зависят от места, где установлен датчик температуры. Обусловлено это тем, что электропечь представляет собой не сосредоточенный, а распределенный объект. Следовательно, температуры в различных точках печи в один и тот же момент времени в переходном процессе неодинаковы. Для иллюстрации этого положения в лабораторной работе температура измеряется двумя датчиками: 1) штатной термопарой, измерительный элемент которой проходит через канал в корпусе и изоляции печи и соприкасания с внешней стенкой керамической трубы; 2) ртут-

ным термометром, заставляемым в канале печи через отверстие в крышке печи на время проведения измерений.

Показания ртутного термометра растут значительно быстрее, чем показания термопары. Причина этого явления в том, что тепловая инерция тракта нагревательный элемент рабочее пространство электропечи меньше тепловой инерции тракта нагревательный элемент – рабочий конец термопары. При достижении стационарного режима показания обоих датчиков выравниваются.

При проведении эксперимента следует обратить внимание на то обстоятельство, что при достижении температуры $t_{\text{зад}} + \Delta t$, показывающая стрелка милливольтметра «зависает», хотя фактическая температура продолжает расти. Обусловлено это устройством механизма задания температуры. При достижении температуры $t_{\text{зад}} + \Delta t$ лепесток стрелки милливольтметра попадает в зазор электромагнита реле и тем самым увеличивает активное сопротивление обмотки электромагнита. Вследствие этого электрический ток обмотки уменьшается, размыкаются контакты реле и обесточивается силовая цепь нагревательного элемента. Движение стрелки милливольтметра при этом ограничивается механическим упором механизма задания температуры. При отсутствии такого ограничителя лепесток стрелки милливольтметра вышел бы из зазора электромагнита, и замкнулась бы силовая цепь нагревательного элемента, хотя заданная температура уже достигнута.

4. Включить лабораторную установку в присутствии преподавателя.

5. Убедиться в нормальном функционировании схемы и приступить к отсчету показания термопары. Интервалы времени между отсчетами принять равными 2 мин. Отсчет показаний прекратить спустя 4–6 мин после первого отключения тиристора.

6. Построить полученную зависимость температуры печи от времени.

Содержание отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Функциональную схему электропечи.

3. Процесс изменения температуры и мощности при двухпозиционном регулировании при нагреве до $t_{\text{ном}}$ (теоретический).

4. Таблицу наблюдений.

5. Графическую зависимость температуры электропечи от времени, построенную по результатам наблюдений по разным датчикам при нагреве до $t_{\text{зад}} \ll t_{\text{ном}}$.

Контрольные вопросы

1. Классификация электрических печей сопротивления.

2. Назначение и конструкция шахтной лабораторной печи.

3. Что представляет собой функциональная схема исследуемой печи?

4. Принцип измерения температуры.

5. Как происходит автоматическое регулирование температурного режима печи?

Литература

1. Электротехнологические промышленные установки : учеб. для вузов / под ред. А. Д. Свенчанского. – М. : Энергоиздат, 1982.

2. Свенчанский, А. Д. Электрические промышленные печи / А. Д. Свенчанский. – М. : Энергия, 1975.

3. Болотов, А. В. Электротехнологические установки / А. В. Болотов, Г. А. Шепель. – М. : Высшая школа, 1988.

Лабораторная работа № 4

ИЗУЧЕНИЕ МАШИНЫ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ

Цель работы: изучить машины точечной сварки.

Общие сведения о машинах точечной сварки

Современные машины для точечной сварки представляют собой электромеханические агрегаты с электронным управлением циклом сварки.

Функциональная схема машины точечной сварки приведена на рис. 4.1.

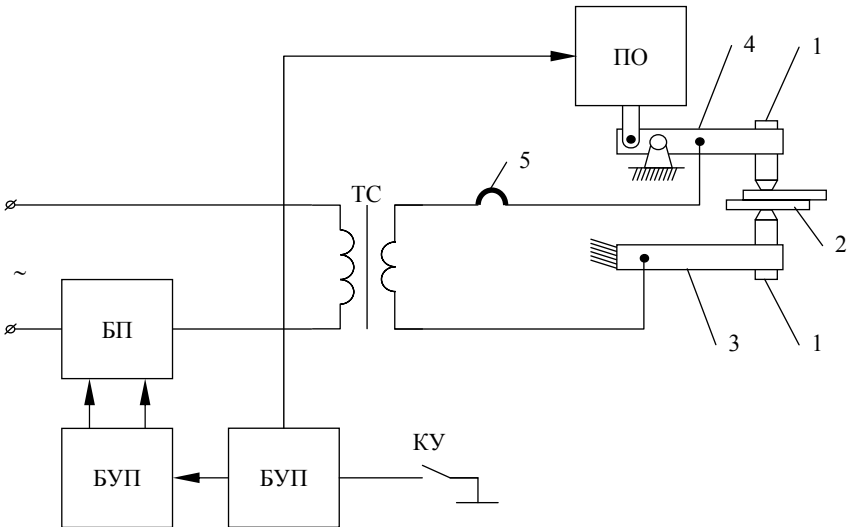


Рис. 4.1. Функциональная схема машины точечной сварки:

1 – электроды; 2 – свариваемые детали; 3, 4 – нижнее и верхнее плечо сварочной машины; 5 – гибкий токоподвод; ТС – трансформатор сварочный; КУ – контакт управления; БУМ – блок управления машиной; ПО – привод обжатия; БУП – блок управления прерывателем; БП – бесконтактный прерыватель

Между электродами 1 располагаются свариваемые детали 2. Электроды закреплены в нижнем неподвижном плече 3 и верхнем, радиально перемещающемся плече 4 сварочной машины. Электрическое напряжение от вторичной обмотки сварочного трансформатора ТС через гибкий токоподвод 5 подводится к верхнему плечу сварочной

машины и через жесткий токоподвод к нижнему плечу. Первичная обмотка сварочного трансформатора ТС через бесконтактный прерыватель БП включается в сеть.

При замыкании контакта управления КУ оператором или автоматически блок управления машиной БУМ дает команду на привод обжатия ПО и свариваемые детали сжимаются электродами. Через некоторое время блок управления машиной БУМ через блок управления прерывателем БУП включает на определенное время бесконтактный прерыватель БП. Спустя определенное время после прекращения протекания тока блок управления машиной БУМ вырабатывает команду на привод обжатия ПО для подъема электродов. Цикл сварки заканчивается.

Контактная электросварка осуществляется путем нагрева металла электрическим током до оплавления или пластического состояния в сочетании со сжатием деталей. В соответствии с законом Джоуля-Ленца за время сварки $t_{св}$ в месте контакта генерируется определенное количество теплоты:

$$Q = 0,24 \int_0^{t_{св}} I^2(t) R_3(t) dt,$$

где $I(t)$ – сварочный ток;

$R_3(t)$ – эквивалентное сопротивление контакта.

Сопротивление R_3 состоит из контактного сопротивления «деталь–деталь» $R_{дд}$ двух сопротивлений «электрод–деталь» $R_{эд}$ и собственного сопротивления деталей $R_{д}$:

$$R_3(t) = R_{дд} + 2R_{эд} + R_{д}.$$

Все составляющие общего сопротивления изменяются в процессе сварки.

Время сварки одной точки зависит от толщины свариваемых деталей, свойств свариваемого металла, мощности сварочной машины, степени сжатия деталей и колеблется от тысячных долей секунды при сварке тонких листов из цветного металла до нескольких секунд при сварке толстых стальных деталей.

Температурное поле в конечной стадии сварки приведено на рис. 4.2. Наибольшая температура будет в центре сварочной точки, а наименьшая – на поверхности деталей, прилегающих к электродам. Температура в центре сварочной точки обычно несколько выше температуры плавления свариваемого металла. Диаметр сварочной точки примерно равен диаметру электродов.

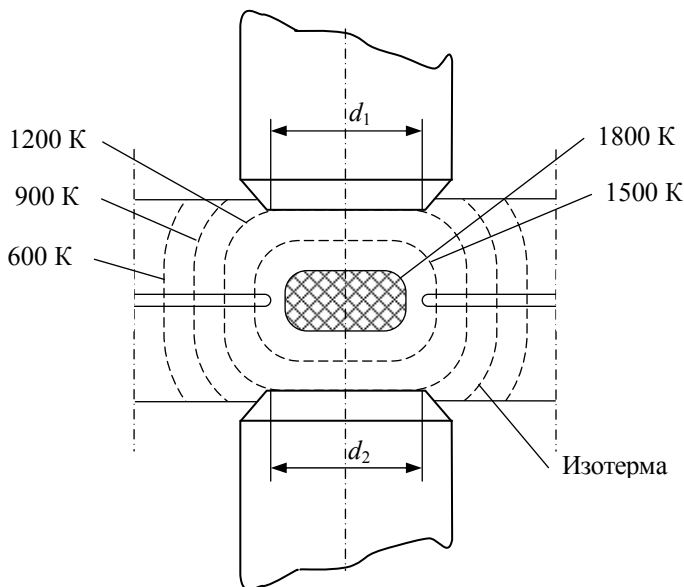


Рис. 4.2. Температурное поле в конечной стадии точечной сварки

Трансформатор машин контактной сварки работает в режиме кратковременных повторяющихся нагрузок с большими токами, поэтому, его обмотки испытывают значительные динамические нагрузки. Вторичная обмотка трансформатора чаще всего имеет один виток. Первичная обмотка выполняется секционированной. Переключением секций первичной обмотки регулируют вторичное напряжение, а следовательно, и сварочный ток.

Бесконтактный прерыватель включается в цепь первичной обмотки сварочного трансформатора. Принципиальная схема бесконтактного прерывателя приведена на рис. 4.3. Тиристоры Т1, Т2 прерывателя включены встречно-параллельно. Управляющие электроды подключены к блоку управления прерывателем БУП. Цепочка

R_1C_1 служит для снижения скорости нарастания напряжения на тиристорах. Через эту цепочку подается небольшое напряжение на первичную обмотку сварочного трансформатора при отключенных тиристорах, что может вызвать искрение при размыкании электродов машины. Для устранения этого явления первичную обмотку сварочного трансформатора шунтируют резистором R_2 .

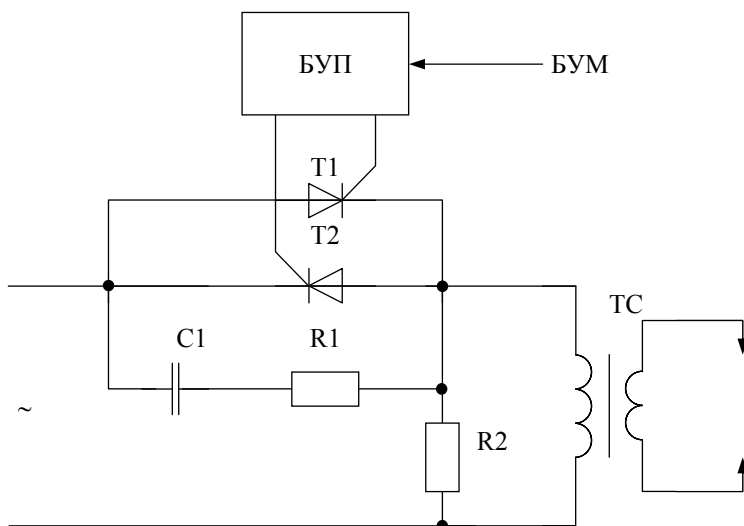


Рис. 4.3. Принципиальная схема бесконтактного прерывателя:
 T1, T2 – тиристоры; БУП – блок управления прерывателем; ТС – трансформатор сварочный; R_1C_1 – цепочка, шунтирующая прерыватель; R_2 – резистор, шунтирующий сварочный трансформатор

Блок управления прерывателем БУП предназначен для выработки импульсов управления, поступающих в соответствующие моменты времени на управляющие электроды тиристоров. Управление величиной сварочного тока осуществляется плавным изменением угла задержки отпирания тиристора по отношению к моменту прохождения напряжения сети через нулевое значение. Импульсы управления вырабатываются только по сигналу от блока управления машиной БУМ.

Различают два метода управления тиристорами – горизонтальный и вертикальный. На рис. 4.4 приведены блочная схема и диаграммы напряжений в характерных точках схемы при управлении горизонтальным методом.

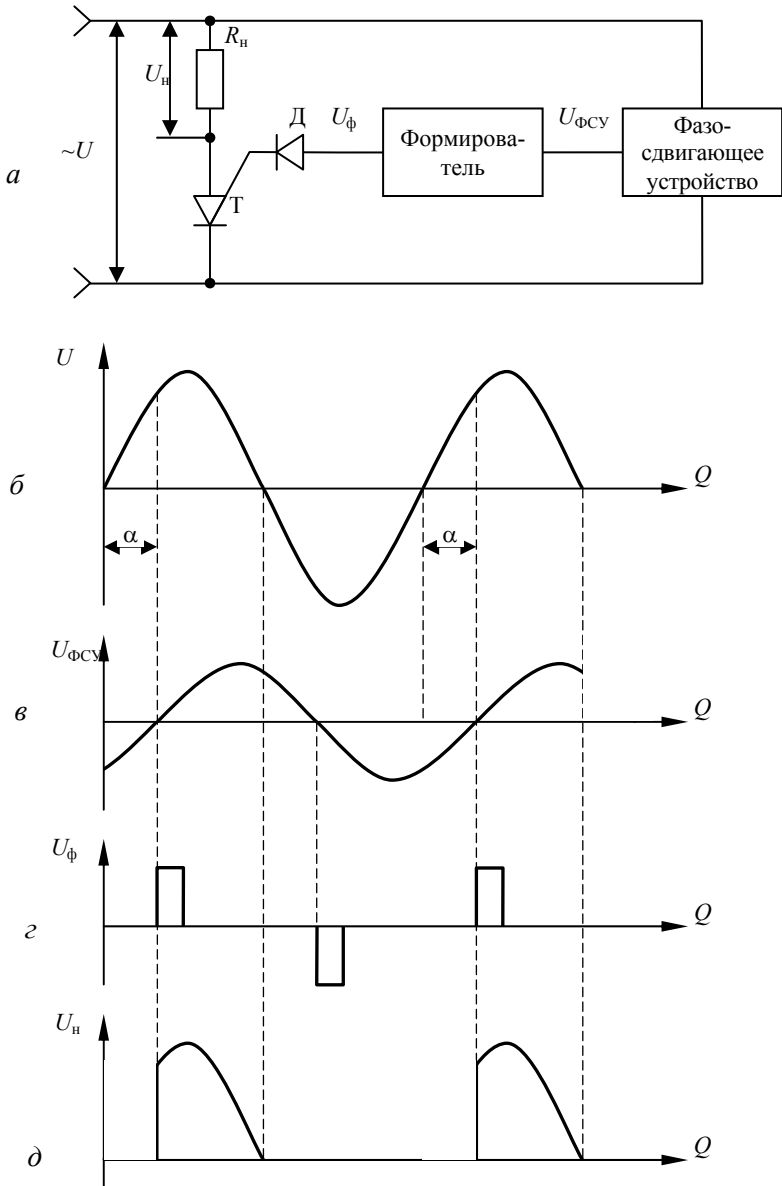


Рис. 4.4. Горизонтальный метод управления тиристором:
a – блочная схема; *б, в, г, д* – диаграммы напряжений сети, фазосдвигающего устройства, формирователя и нагрузки соответственно

Последовательно с тиристором Т включено сопротивление нагрузки R_n . Фаза напряжения питания посредством фазосдвигающего устройства изменяется на угол α . В момент прохождения напряжения фазосдвигающего устройства $U_{\text{ФСУ}}$ через нуль формирователь вырабатывает импульсы ограниченной длительности. Эти импульсы через диод Д в положительной полярности поступают на управляющий электрод тиристора, и тиристор лавинообразно отпирается. Напряжение на нагрузке имеет вид усеченной полуволны питающего синусоидального напряжения. Тиристор запирается в момент прохождения положительной полуволны питающего напряжения через нуль.

Изменение фазы обеспечивается изменением параметров (сопротивление, индуктивность) фазосдвигающего устройства. При этом момент перехода синусоидального напряжения через нуль плавно смещается горизонтально. Поэтому этот метод управления называют *горизонтальным*.

На рис. 4.5 приведены блочная схема и диаграммы напряжений в характерных точках схемы при вертикальном методе управления тиристором. При *вертикальном* методе формирование управляющего импульса для тиристора производится в результате сравнения периодического и постоянного напряжений. В момент равенства этих напряжений устройство сравнения формирует импульсы запуска тиристора. За периодическое напряжение принимают синусоидальное, пилообразное или треугольное. В рассматриваемом случае используется пилообразное напряжение, синхронизированное с напряжением сети.

Опорное напряжение $U_{\text{оп}}$ поступает на устройство сравнения с потенциометра R_n . Напряжение постоянного тока поступает на генератор пилообразного напряжения и потенциометр R_n от источника питания, подключенного к напряжению питающей сети.

Блок управления машиной БУМ предназначен для организации работы сварочной машины по заданной циклограмме. Циклограмма работы машины представляет собой совмещенные во времени графики основных параметров процесса сварки. Типовые циклограммы работы машины точечной сварки приведены на рис. 4.6.

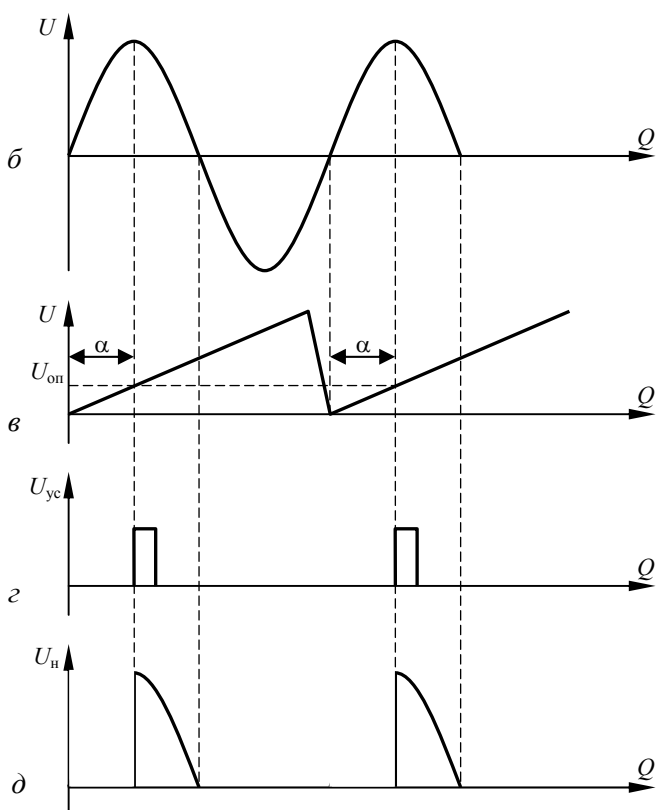
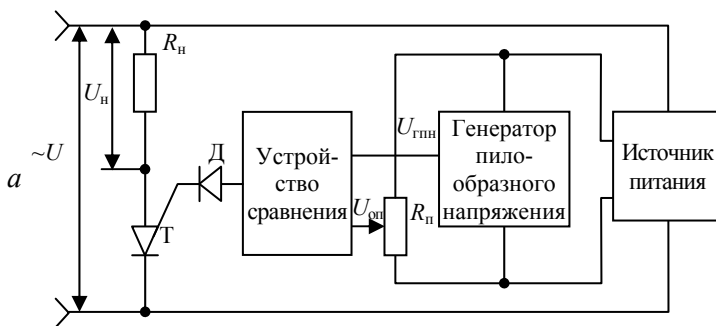


Рис. 4.5. Вертикальный метод управления тиристором:
a – блочная схема; *б, в, з, д* – диаграммы напряжений сети, генератора пилообразного напряжения совместно с опорным напряжением, устройства сравнения и нагрузки, соответственно

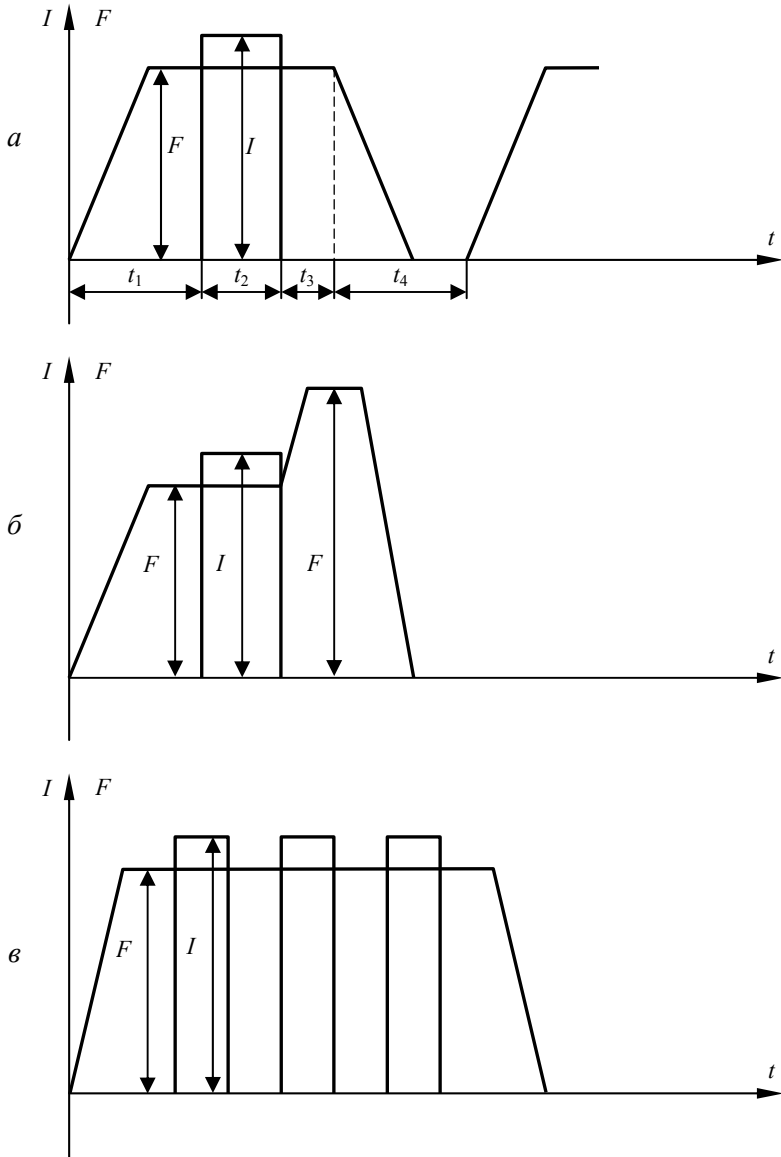


Рис. 4.6. Циклограммы работы машин точечной сварки:
a – с постоянным давлением; *б* – с ковочным давлением;
в – с пульсирующим током

Наиболее простая циклограмма с постоянным давлением приведена на рис. 4.6, *а*. Циклограмма содержит четыре временных интервала: t_1 – предварительного обжатия; t_2 – включения сварочного тока; t_3 – проковки; t_4 – паузы.

Более сложная реализация циклограммы с ковочным давлением рис. 4.6, *б*. Циклограмма, приведенная на рис. 4.6, *в*, используется для сварки металла большой толщины (более 3 мм) пульсирующим током. Этот режим характеризуется длительностью протекания сварочного тока и длительностью бестоковых интервалов.

Реализация требуемых интервалов времени осуществляется на элементах задержки, в качестве которых используют электронные, пневматические и цифровые устройства. Электронные устройства чаще всего работают на принципе заряда времязадающего конденсатора через резистор до определенного уровня напряжения. Действие пневматических элементов задержки основано на изменении скорости прохождения воздуха из одной камеры в другую через тонкий канал с регулируемым сечением. Цифровые элементы задержки работают на принципе подсчета заданного количества импульсов на счетчиках с регулируемым коэффициентом пересчета.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с конструкцией машины точечной сварки и отдельных ее элементов.
2. Включить машину в сеть, подав на ее входы необходимые напряжения питания.
3. Произвести в присутствии преподавателя сварку нескольких точек при различных режимах сварки.
4. По окончании лабораторной работы выключить установку.

Содержание отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Функциональную схему машины точечной сварки.
3. Принципиальную схему бесконтактного прерывателя.
4. Функциональную схему управления тиристором по горизонтальному и вертикальному методу.

Контрольные вопросы

1. Назначение и области применения машины точечной сварки.
2. Устройство бесконтактного прерывателя.
3. Что представляет собой функциональная схема машины точечной сварки?
4. От чего зависит ток сварки?
5. Как происходит включение тиристора при управлении по горизонтальному методу?
6. Как происходит включение тиристора при управлении по вертикальному методу?
7. Какие циклограммы работы машины точечной сварки вам известны?

Литература

1. Гормасов, В. В. Электротехнология основных производств / В. В. Гормасов. – М. : Высшая школа, 1970.
2. Глебов, Л. В. Установка и эксплуатация машин контактной сварки / Л. В. Глебов, Ю. И. Филиппов, П. Л. Чулошников. – Л. : Ленинград. отд., 1973.
3. Технология и оборудование контактной сварки / под ред. В. Д. Орлова. – М. : Машиностроение, 1975.

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО МАШИННОГО ГЕНЕРАТОРА

Цель работы: исследовать высокочастотный машинный генератор; ознакомиться с принципом компенсации реактивных составляющих напряжения.

Общие сведения о высокочастотном машинном генераторе

Высокочастотные машинные генераторы предназначены для генерирования повышенной частоты, используемой для индукционного нагрева. Выходная частота машинных генераторов находится в пределах 400–60 000 Гц. Для получения переменного тока частотой 150–500 Гц используются обычные многополюсные синхронные генераторы с неявно выраженными полюсами, вращаемые со скоростью 157–314 рад/с, электродвигателями, питающимися от сети переменного тока с частотой 50 Гц.

Для более высоких частот синхронные генераторы обычной конструкции не пригодны, поэтому для частот 1000–8000 Гц генераторы преобразователей частоты выполняются по типу индукторных машин, у которых на роторе нет никаких обмоток, а на статоре располагаются обмотка статора и обмотка возбуждения.

Основным отличием машин индукторного типа от обычных синхронных машин является наличие у индукторных машин пульсирующего магнитного потока, создаваемого за счет изменения сопротивления магнитной петли возбуждения при вращении ротора, который по всей своей окружности имеет зубцы. При вращении ротора меняется величина зазора под полюсом обмотки возбуждения в зависимости от того, проходит под ним зубец или паз ротора, что приводит к изменению амплитуды магнитного потока в обмотке возбуждения. При этом в рабочей обмотке статора наводится переменная ЭДС повышенной частоты, равной

$$f = \frac{Z_p \cdot n}{60} \cdot \frac{\pi}{30} = \frac{Z_p \cdot n}{2\pi},$$

где n – скорость вращения ротора, рад/с;

Z_p – число зубцов ротора.

Коэффициент полезного действия для машинных преобразователей частоты равен 65–85 %, верхний предел для машин большей мощности или (при равной мощности) более низкой частоты.

Масса ротора индуктивного генератора больше, чем у низкочастотных машин. Поэтому, время разгона (пуска) и выбега (торможения) у них также больше. При пуске короткозамкнутые обмотки приводного двигателя сильно нагреваются и испытывают большие динамические усилия. Поэтому время между повторными пусками является регламентируемым и достигает для некоторых машин четырех часов.

Машинные преобразователи частоты выпускаются однофазными мощностью до 1500 кВт, причем преобразователи до 100 кВт – однокорпусные. Для обмотки возбуждения генераторов повышенной частоты требуются автоматически регулируемые источники питания, что необходимо для поддержания постоянства напряжения генераторов. Такими источниками являются полупроводниковые выпрямители с автотрансформаторами или электромашинные усилители.

Для компенсации реактивной мощности установок индукционного нагрева используются отечественные конденсаторы типа ЭМВ с водяным охлаждением, которые изготавливаются с расчетом на частоты 1000, 2500 и 8000 Гц. Так как контурные токи достигают больших величин, то для уменьшения потерь в ошиновке конденсаторные батареи устанавливаются вблизи индукторов в специальных шкафах.

Контакты служат для включения нагревательных контуров на генераторные шины повышенной частоты. Выбор их производится по величине тока, частоте включения и режиму работы.

Понижающие трансформаторы устанавливаются между индуктором и генератором повышенной частоты. Они необходимы для понижения напряжения и увеличения силы тока в индукторе, т. е. для согласования параметров генератора и нагрузки. Трансформаторы со стальным сердечником на повышенные частоты состоят из магнитопровода, первичной обмотки (из охлаждаемой водой трубки), вторичной обмотки в виде разомкнутого витка, к которому подключается индуктор. Между стальными листами магнитопрово-

да помещаются медные листы с припаянными к ним медными трубками, по которым циркулирует вода.

Литы магнитопровода стягиваются изолированными шпильками из немагнитного материала.

Индукционные нагревательные и закалочные установки могут питаться от машинных генераторов повышенной частоты по схемам индивидуального и централизованного электроснабжения. При большом числе нагревательных и закалочных станков (например, в кузнечном или термическом цехе) рациональнее применить централизованное питание, так как машинные преобразователи частоты большой мощности имеют более высокий КПД и, кроме того, при питании группы станков, повышается коэффициент использования преобразователей.

Нагрузочные характеристики индукторной машины при постоянном токе возбуждения приведены на рис. 5.1.

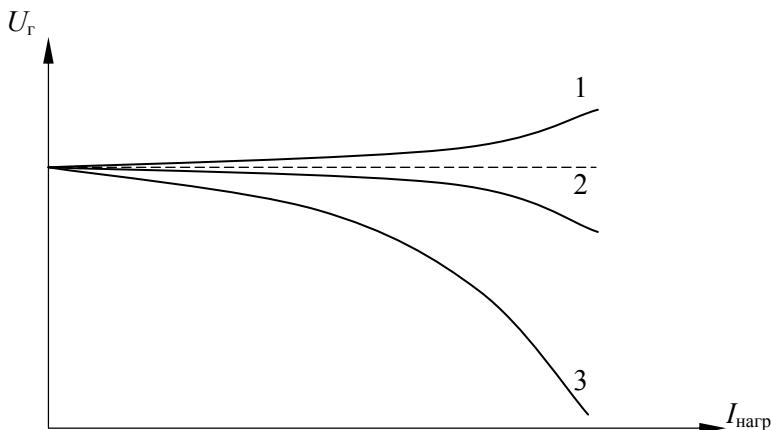


Рис. 5.1. Нагрузочные характеристики индукторной машины при постоянном токе:
1 – опережающий $\cos \varphi$ (емкостная нагрузка); 2 – $\cos \varphi = 1$; 3 – отстающий $\cos \varphi$ (индуктивная нагрузка)

Включение на параллельную работу индукторных генераторов не требует каких-либо специальных синхронизирующих устройств.

Функциональная схема лабораторной установки для исследований высокочастотного машинного генератора

Функциональная схема лабораторной установки для исследования высокочастотного машинного генератора приведена на рис. 5.2.

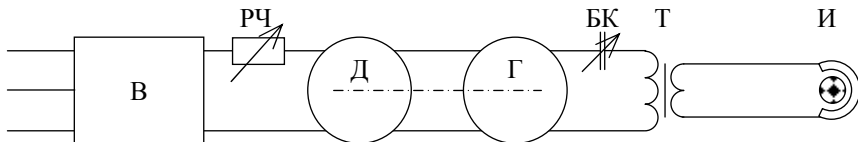


Рис. 5.2. Функциональная схема лабораторной установки
для исследования высокочастотного машинного генератора:

В – выпрямитель; РЧ – регулятор частоты вращения двигателя; Д – двигатель постоянного тока; Г – индукционный генератор; БК – батарея конденсаторов; Т – трансформатор; И – индуктор

Выпрямитель В предназначен для преобразования переменного тока промышленной частоты в постоянный ток, предназначенный для питания двигателя постоянного тока Д.

Регулирование частоты двигателя постоянного тока Д осуществляется регулятором частоты РЧ. Регулятор частоты выполнен в виде реостата, включенного в цепь обмотки якоря двигателя. К валу двигателя присоединен высокочастотный индукторный генератор (400 Гц). Нагрузка генератора представляет собой индуктор, включенный через согласующий: трансформатор Т и батарею конденсаторов переменной емкости БК на зажимы генератора.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Составить таблицу по прилагаемому образцу (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Результаты экспериментов

Электроемкость, нФ	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
Напряжение, В								
U_n								
U_c								
U_r								

2. Ознакомиться со схемой лабораторной установки.
3. Переключатель БК установить в положение «ОТКЛ.».
4. Регулятор частоты поставить в среднее положение.
5. Включить питание (с разрешения преподавателя).
6. Установить $f = 400$ Гц .
7. Установить емкость на БК минимальное значение.
8. Установить $f = 400$ Гц .
9. Измерить напряжение нагрузки U_H , емкости U_C , генератора U_G .
10. Увеличить емкость БК по указанию преподавателя.
11. Повторить пп. 8–9.
12. Выключить установку.
13. По результатам измерения построить треугольник напряжений.
14. По положению вектора напряжений в треугольнике определить характер нагрузочного тока (индуктивный, емкостной).

Примечание. Построение треугольника напряжений производится следующим образом:

- 1) выбирается определенный масштаб для выражения векторов напряжения U_H, U_C, U_G ;
- 2) вектор напряжения по нагрузки U_H откладывается вертикально вверх;
- 3) из начала вектора U_H вправо делается засечка циркулем с расстоянием циркуля, численно равным U_G ;
- 4) из конца вектора U_H вправо делается засечка циркулем, с расстоянием циркуля, численно равным U_C ;
- 5) из начала и конца вектора U_H проводят векторы U_G и U_C в точку пересечения засечек, выполненных согласно пп. 3–4 данного примечания;
- 6) из точки начала вектора U_H пунктирной линией опускается перпендикуляр на направление вектора U_C . По направлению этой пунктирной линии из точки начала U_H в любом масштабе, откладывается вектор тока I (В цепи с емкостью кривая тока опережает кривую напряжения на емкости на 90° .);
- 7) по характеру сдвига фаз между током и напряжением нагрузки определяют характер нагрузки (индуктивный, активный, емкостной).

Содержание отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Функциональную схему лабораторной установки.
3. Таблицу экспериментов по форме, приведенной в п. 1 раздела «Порядок проведения лабораторной работы».
4. Векторные диаграммы, построенные на основании экспериментов по указанию преподавателя.

Контрольные вопросы

1. Назначение и область применения машинных генераторов повышенной частоты.
2. В чем отличие машин индукторного типа от обычных синхронных машин?
3. Как осуществляется согласование параметров генераторов с параметрами нагрузки?
4. На какие частоты выпускаются генераторы для индукционно-го нагрева?
5. От каких факторов зависит выходная частота индукторных генераторов?
6. Как строится векторная диаграмма напряжений индукторного генератора?
7. Виды нагрузочных характеристик индукторного генератора при постоянном возбуждении и различных характерах нагрузки (активная, индуктивная, емкостная).
8. Как определить направление тока в цепи нагрузки индукторного генератора?

Литература

1. Некрасова, К. М. Промышленные электротермические установки / К. М. Некрасова. – М. :Энергия, 1979.
2. Гормасов, В. В. Электротехнология основных производств/ В. В. Гормасов. – М. : Высшая школа, 1970.
3. Шамоу, А. Н. Проектирование и эксплуатации высокочастотных установок / А. Н. Шамоу, В. А. Водажков. – Л. : Машиностроение, 1974.

Лабораторная работа № 6

ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ СВАРОЧНОЙ ДУГИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы: изучить принципы работы, конструкцию и особенности эксплуатации источников питания сварочной дуги переменного тока.

Общие сведения

Сваркой называют способ получения неразъемного соединения с обеспечением непосредственной сплошности. Как правило, процессы сварки протекают с нагревом соединяемых поверхностей до температуры плавления или до температуры пластичного соединения.

По виду энергии, используемой для нагрева, различные виды сварки можно разделить на две группы: *химическую сварку* и *электрическую сварку*. Технически более совершенной и перспективной является электрическая сварка плавлением и в частности дуговая сварка.

Классификация электрической сварки представлена на рис. 6.1.

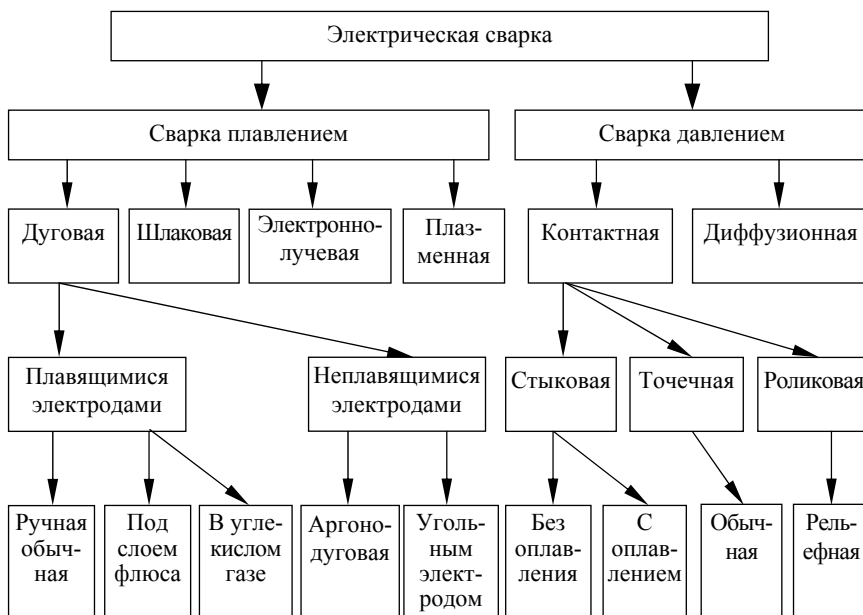


Рис. 6.1. Классификация электрической сварки

Использование дугового разряда для сварки

При дуговой сварке для плавления металлов используется энергия дугового разряда, возбуждаемого и поддерживаемого в пространстве между электродом и изделием. Энергию для поддержания дугового разряда доставляет источник питания. Для сварки плавлением необходим источник тепловой энергии с весьма высокой концентрацией мощности. Так, при сварке стали для обеспечения достаточной производительности и экономичности процесса источник тепловой энергии должен развивать в рабочей зоне сварки температуру выше $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$, в противном случае, в виду значительной теплопроводности металла и высокой теплоотдачи в окружающую среду, производительность сварки резко падает, и сварка оказывается не экономичной.

Таким высокотемпературным источником теплоты является *электрическая дуга*.

Физические явления, протекающие в сварочной дуге

В пространстве между изделием и электродом, где горит дуга, протекают весьма сложные физико-химические и электромагнитные процессы. Для рассмотрения строения дуги принято изображение сварочной дуги в виде цилиндра (рис. 6.2). В осевом направлении различают:

– столб дуги, имеющий длину $l_{\text{ср}}$ порядка десятых долей сантиметра и температуру $T \geq (6 - 8)10^3\text{ K}$;

– при электронные области – катодную и анодную ($l_{\text{к}} \approx 10^{-5} - 10^{-3}\text{ см}$).

Ввиду малой протяженности этих областей за длину дуги принимают длину столба ($l_{\text{д}} \approx l_{\text{ср}}$).

Столб дуги – это ионизированный газ, нейтральные атомы и молекулы газов и паров, свободные электроны и положительные ионы, возникающие при ионизации газа. Столб дуги является средой, свойства которой (температура, напряженность электрического поля, электрическая проводимость, давление и др.) в аксиальном и радиальном направлениях различны.

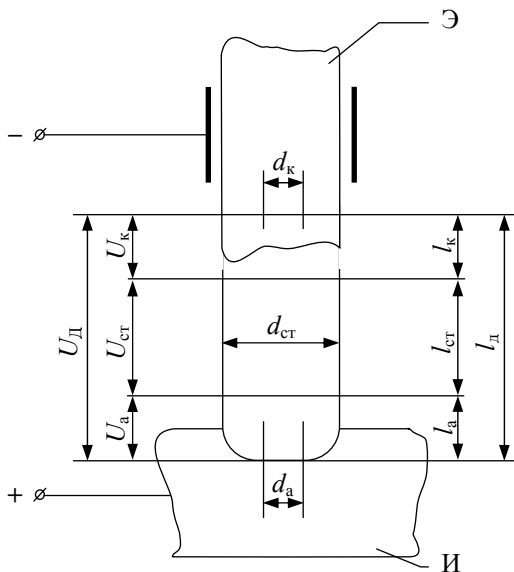


Рис. 6.2. Цилиндрическая каналовая модель сварочной дуги

В столбе дуги наблюдаются две формы движения заряженных частиц: хаотическое тепловое и упорядоченное движение под действием сил электрического поля. Упорядоченное движение свободных электронов обуславливает электронную составляющую тока дуги, а положительных ионов – ионную составляющую тока. Электронная составляющая тока дуги в сотни раз больше ионной. Сварочным током I считают ток проводимости, обусловленный упорядоченным движением свободных электронов.

Под действием сил электрического поля свободные электроны ускоряясь, движутся к аноду, а положительные ионы, скорость которых значительно меньше вследствие их большой массы, – к катоду, где, благодаря разным скоростям свободных электронов и положительных ионов, образуется пространственный (объемный) положительный заряд. Основным источником ионизации в столбе дуги является термическая ионизация. Столб дуги не создает своего электрического поля и поэтому квазинейтрален. Степень ионизации газа в столбе дуги составляет несколько процентов. Такой ионизированный газ называется *низкотемпературной плазмой*. Степень ионизации

ции газа определяется температурой нейтрального газа потенциалами ионизации и возбуждения компонентов смеси газов и паров межэлектродного промежутка. Минимальный потенциал ионизации V_j некоторых химических элементов колеблется в пределах 3,9–24,5 В: цезия Cs – 3,9 В; меди Cu – 7,7 В; железа Fe – 7,8 В; водорода H – 13,5 В; азота N – 14,5 В; аргона Ar – 15,7 В; гелия He – 24,5 В.

Абсолютная температура сварочной дуги в установившемся режиме может быть определена по формуле

$$T = 810V_j,$$

где V_j – потенциал ионизации газа или смеси газов в столбе дуги, В.

Так как столб обычной сварочной дуги содержит пары металлов с потенциалами ионизации 5–10 В, наиболее вероятны значения температуры сварочной дуги 5000–8000 К. Вообще температура какого-либо участка дуги тем выше, чем больше величина преобразуемой энергии δE (δ – плотность тока проводимости; E – напряженность электрического поля) и чем меньше излучательная способность этого участка и теплоотвод от него. Закон Ома для межэлектродного промежутка, записанный в дифференциальной форме, имеет вид

$$\delta = \gamma E,$$

где γ – удельная проводимость среды.

Напряженность электрического поля в столбе дуги невысока: $E_{ст} = 10\text{--}35\text{ В/см}$. Это объясняется высокой проводимостью столба дуги. Напряженности электрического поля E_k и E_a в приэлектронных областях, вследствие появления там при горении дуги пространственных (объемных) разрядов значительно больше, чем в столбе дуги, и могут достигать значений порядка $10^6\text{--}2 \cdot 10^6\text{ В/см}$.

Характеристики сварочной дуги

При изучении свойств сварочной дуги и определении требований к источнику питания пользуются понятиями статических и динамических характеристик сварочной дуги. Зависимость напряже-

ния горения дуг от силы тока называют *вольт-амперной характеристикой дуги*. Если ток дуги $I_d = \text{const}$ и неизменны все факторы, влияющие на физические условия существования дуги, то зависимость U_d и l_d может быть выражена соотношением

$$U_d = \frac{I}{\gamma \cdot S_{\text{ст}}} l_d. \quad (6.1)$$

Это справедливо для изотропных сред, в которых $\gamma = \frac{\delta_{\text{ст}}}{E_{\text{ст}}} = \text{const}$ и $S_{\text{ст}} = \text{const}$. Графически зависимость (6.1) представлена на рис. 6.3. Как видно, эта зависимость имеет линейный характер.

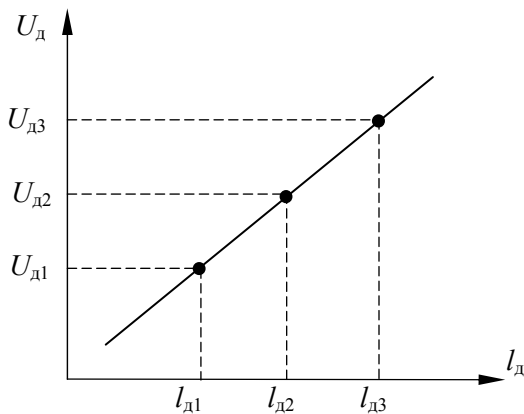


Рис. 6.3. Зависимость напряжения на дуге от длины дуги при $I = \text{const}, \gamma = \text{const}$

Вольт-амперные характеристики свободно горящих дуг, как правило, нелинейны и являются падающими. Для расчета вводится понятие *дифференцированного сопротивления нелинейного участка цепи (дуги)*:

$$R_{\text{диф}} = \lim_{\Delta I \rightarrow 0} \frac{\Delta U_d}{\Delta I} = \frac{dU_d}{dI}.$$

Форма вольт-амперной характеристики сварочной дуги отражает свойства дуги длиной l_d и проводимостью G . Известны статические вольт-амперные характеристики сварочных дуг трех видов:

- падающая (рис. 6.4, а);
- жесткая (рис. 6.4, б);
- вырастающая (рис. 6.4, в).

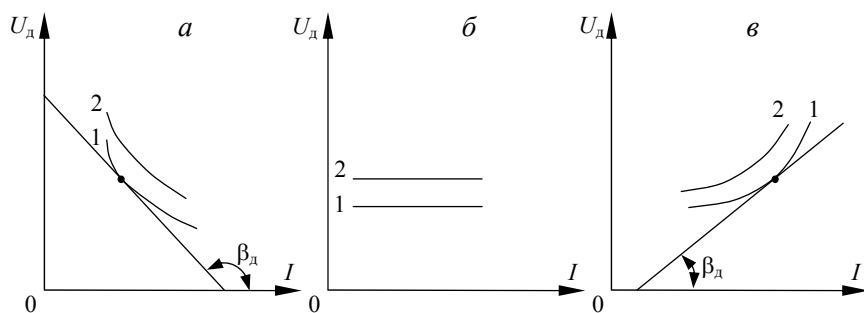


Рис. 6.4. Вольт-амперная характеристика дуги ($l_{d1} < l_{d2}$ и $G_{d1} > G_{d2}$)

Падающие вольт-амперные характеристики имеют свободные малоамперные ($I \leq 70\text{--}80$ А) дуги, горящие в атмосфере воздуха и в среде аргона.

Жесткую вольт-амперную характеристику имеют сварочные дуги при сварке под флюсом с током ($I \geq 80$ А).

Крутовозрастающую характеристику имеют сжатые дуги, горящие в среде аргона.

Устойчивость электрических дуг

Так как напряжение горения начавшегося разряда с ростом тока в большинстве случаев снижается, то вопрос об устойчивости системы «источник питания–дуга–ванна» представляет огромный интерес для различных отраслей электротехники. В результате исследований установлено, что электрическая дуга падающей вольт-амперной характеристики при питании от источника с постоянным выходным напряжением устойчиво горит лишь в том случае, когда последова-

тельно с дугой включено определенной величины добавочное сопротивление R . Критерии устойчивости записываются в виде

$$\frac{dU_{\text{д}}}{dI} + \frac{dU_R}{dI} > 0, \quad (6.2)$$

где $\frac{dU_{\text{д}}}{dI}$ – дифференциальное сопротивление дуги;

$\frac{dU_R}{dI}$ – дифференциальное сопротивление резистора.

Рассмотрим это условие графически (рис. 6.5, 6.6).

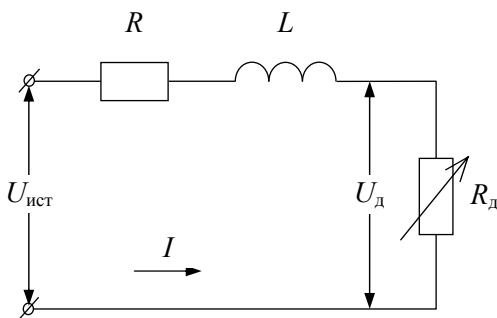


Рис. 6.5. Электрическая схема цепи с дугой

По второму закону Кирхгофа для приведенной цепи (рис. 6.5) неравенство (6.2) можно записать в виде

$$U_{\text{ист}} = IR + L \frac{dI}{dI} + IR_{\text{д}}.$$

Графическое решение этого уравнения представлено на рис. 6.6.

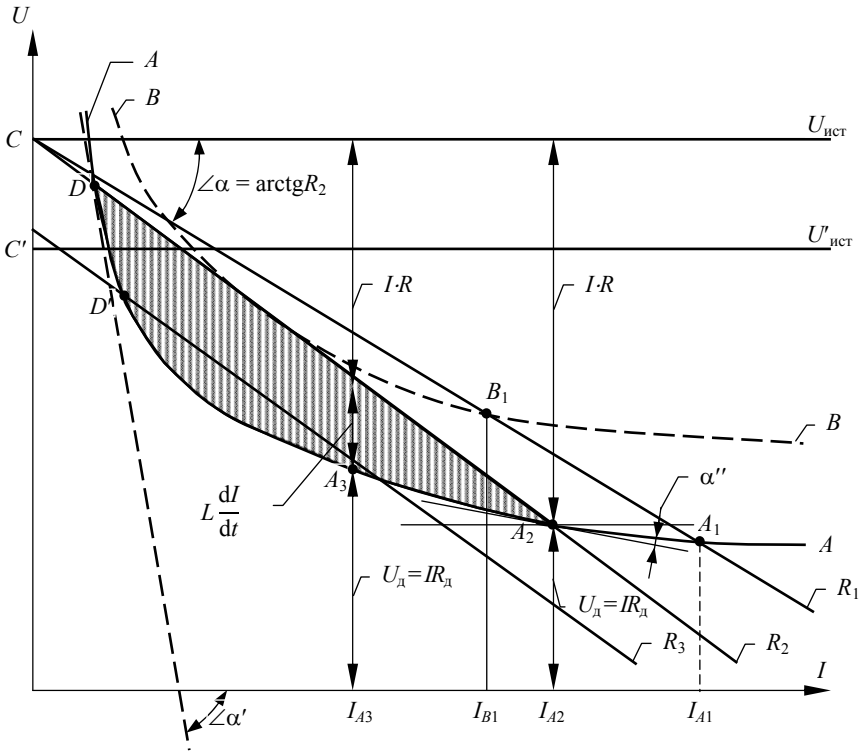


Рис. 6.6. К вопросу об устойчивости дуги и способах регулирования тока

Предположим, что напряжение источника $U_{ист}$, сварочная дуга имеет характеристику A и в цепь последовательно включено сопротивление R_2 . Очевидно, что существование дуги возможно при условиях, соответствующих точкам A_3 и D . В точке D касательная к кривой A образует с осью абсцисс $\angle\alpha'$, который больше $\angle\alpha = \arctg R_2$. Следовательно, в этой точке

$$\frac{dU_д}{dI} = \operatorname{tg}\alpha' > R$$

и условие (6.2) не выполняется и точка D – точка неустойчивого равновесия. В точке A_3 касательная к кривой образует с осью абсцисс $\angle\alpha''$, меньший $\angle\alpha$, поэтому

$$\frac{dU_{\text{д}}}{dI} = \text{tg}\alpha'' < R.$$

Условие (6.2) выполнено, следовательно, точка A_3 является точкой устойчивого равновесия.

На рис. 6.6 отчетливо видно соблюдение условия устойчивости, заключающееся в том, что характеристика дуги и сопротивления в области рабочей точки должна быть возрастающей.

Как показано на рис. 6.6, существуют возможности регулирования дуги:

1) путем перехода на другую вольт-амперную характеристику при увеличении длины дуги и $R_1 = \text{const}$ рабочая точка переместится с A_1 в B_1 , сила тока I уменьшится с I_{A1} до I_{B1} ;

2) путем изменения напряжения источника питания, например, при $U_{\text{ист}} < U'_{\text{ист}}$ точка A_1 перейдет в A_3 и ток уменьшится до I_{A3} ;

3) путем изменения величины сопротивления R при $U_{\text{ист}} = \text{const}$ и $R_2 > R_1$ ток уменьшится до I_{A2} .

Первые два способа широко используются для регулирования режима дуговых установок, третий способ практически не применяется ввиду его неэкономичности.

Сварочная дуга переменного тока

При питании дуги переменным током условия ее горения существенно меняются, так как дуга дважды в течение перехода гаснет и вновь зажигается. При переменном токе статическая характеристика дуги не имеет смысла, можно лишь говорить о связи действующих значений напряжения и тока. Поэтому вопрос об устойчивости дуги переменного тока значительно сложнее. При решении его приходится иметь дело с *динамической характеристикой* дуги, которая представляет собой соотношение между током и напряжением дуги при изменении силы тока со скоростью, исключающей возможность установления стационарного равновесия.

На рис. 6.7 приведена электрическая схема питания дуги от источника переменного тока. Схема включает в себя однофазный понижающий трансформатор Т, обладающий жесткой внешней характеристикой, и регулятор тока R , представляющий собой регулируемое линейное резисторное сопротивление. Резистор формирует внешнюю падающую характеристику источника.

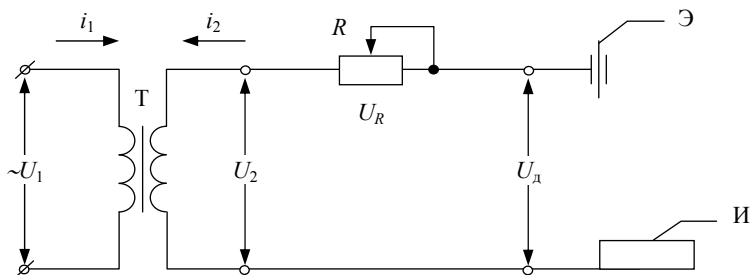


Рис. 6.7. Электрическая схема питания дуги переменного тока

График изменений во времени мгновенных значений U_2 , i_2 , U_d приведен на рис. 6.8.

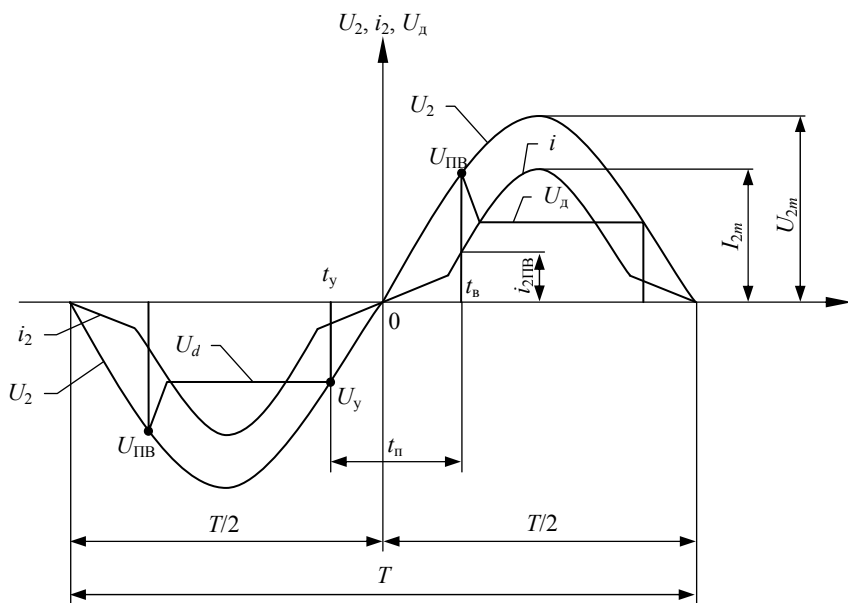


Рис. 6.8. Графики изменений во времени U_2 , i_2 , U_d

Как видно на рис. 6.8, ток i_2 и напряжение на дуге U_d несинусоидальны. Последнее объясняется тем, что нагрузкой трансформатора является нелинейная среда разрядного промежутка. При наличии в сварочном контуре только резистивного сопротивления максимумы и нулевые значения i_2 и U_d совпадают во времени. В отрицательный полупериод при $t = t_y$, когда $U_2 = U_d$, разряд угасает до момента t_b его возбуждения. Интервал времени от $t = t_y$ до $t = t_b$ называют временем перерыва $t_{\text{п}}$ в горении сварочной дуги. В течение $t_{\text{п}}$ ток $i_2 \neq 0$ за счет остаточной проводимости низкотемпературной плазмы и эмиссионной способности нагретых электродов. В следующий полупериод, когда $U_2 = U_{\text{ПВ}}$ в момент $t = t_b$, i_2 составляет 1–2 % от действующего значения i_2 , вновь создаются условия для повторного возбуждения дугового разряда. Возбуждение дуги произойдет, как только в дуговом промежутке будет создана требуемая напряженность электрического поля.

Следовательно, можно сделать вывод, что при наличии в сварочном контуре только R в течение $t_{\text{п}}$ дуговой разряд отсутствует и процесс сварки нестабилен.

Для уменьшения $t_{\text{п}}$ в горении дуги и увеличения di_2 / dt при смене полярности можно идти несколькими путями:

1) уменьшать $U_{\text{ПВ}}$, изменяя физико-химические свойства среды между электродом Э и изделием И (состав флюса или фитиля);

2) изменять свойства источника питания (увеличивать U_{2m} , а следовательно, $U_{2XX} = \frac{U_{2m}}{\sqrt{2}}$ и обычно $\frac{U_{2XX}}{U_d} = \Pi = 2-4$). Однако увели-

чение напряжения ограничено не только технико-экономическими показателями (увеличивается сечение сердечника, растет расход обмоточных материалов), в первую очередь, условиями безопасности при выполнении сварочных работ;

3) увеличивать частоту U_2 . Экспериментально установлено, что $f_{\text{опт}} = 250-450$ Гц. Сварочная дуга повышенной частоты издает резкий звенящий звук и не благоприятно воздействует на сварщика;

4) применять осцилляторы и возбудители;

5) включать в цепь дуги не резистор, а катушку с ферромагнитным сердечником, обладающим значительной индуктивностью, или осуществлять питание дуги от трансформатора, обмотки которого обладают большой индуктивностью.

На практике чаще всего используют последний способ. Условия устойчивого горения дуги переменного тока при включенной последовательно с дугой индуктивности можно сформулировать таким образом: амплитуда падения напряжения на индуктивности $X_L \cdot I_{2m} \geq U_{ВП}$.

Если принять $n = 2$, то можно получить $\cos \varphi_2 = 0,56$; $\varphi = 55^\circ$, $\frac{X_L}{R_d} = 5$.

Для известного способа сварки при известных соотношениях $\frac{U_{2XX}}{U_d}$

можно получить данные для подбора величины $\frac{X_L}{R_d}$.

Требования к источникам питания

Источник питания должен при определенных режимах работы удовлетворять следующим требованиям:

1) для устойчивого горения дуги необходимо соответствие формы внешней характеристики источника питания форме статической характеристики дуги;

2) соответствие динамических характеристик в системе «источник питания–дуга–ванна»;

3) для легкого зажигания дуги U_{XX} должно быть в 2–3 раза больше напряжения горения дуги ($U_{XX} = 50\text{--}60\text{ В}$);

4) источник питания с крутопадающей характеристикой должен обеспечивать ограничение тока короткого замыкания в пределах $1,25 < I_{кз}/I_p < 2$;

5) при изменении напряжения горения дуги сварочный ток I_p не должен существенно изменяться. В противном случае небольшие изменения длины дуги в процессе сварки $U_d = f(I_d)$ привели бы к нарушению режима и качества сварки;

6) источник питания должен позволять регулировать сварочный ток.

Режимы работы источников питания

Различают три режима работы источников питания для дуговой сварки: продолжительный, перемежающийся и повторно кратковременный.

Продолжительным режимом называется такой режим, при котором источник за время работы успевает нагреться до установившейся температуры.

Перемежающийся режим характерен тем, что время t_p работы (сварки) чередуется со временем перерывов в работе t_n (пауз). При этом температура источника не успевает достигнуть значения установившейся температуры, а за время перерывов в работе источник не успевает охладиться до температуры окружающей среды. Перемежающийся режим для нагрузки циклического типа характеризуется относительной продолжительностью нагрузки за время цикла: $t_{\text{ц}} = t_p + t_n$. Перемежающийся режим записывают следующим образом:

$$\text{ПН}\% = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} \cdot 100$$

или

$$\text{ПН}\% = \frac{t_p}{t_p + t_n} \cdot 100.$$

Повторно-кратковременный режим отличается от перемежающегося тем, что источник питания, получающий энергию от силовой сети, во время пауз в работе отключается от сети. Повторно-кратковременный режим характеризуется продолжительностью включения

$$\text{ПН}\% = \frac{t_p}{t_p + t_n} \cdot 100.$$

Номинальным режимом работы однопостовых источников для обычной дуговой сварки, как правило, является режим с ПВ = 60 или 65 % при длительности цикла 5 мин. Источник питания для многопостовой дуговой сварки рассчитывается на режим работы с ПВ = 100 %.

Источники тока для автоматической дуговой сварки обычно имеют номинальным режим с ПВ = 50 или 60 % при длительности цикла 10 мин.

Если величина ПН% (или ПВ%) отличается от номинальной, то величину сварочного тока, соответствующую другому значению ПН% (или ПВ%), можно найти, пользуясь формулой

$$I = I_{\text{н}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПН}_{\text{н}}\%}{\text{ПН}\%}} = I_{\text{н}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{н}}\%}{\text{ПВ}\%}}.$$

Электрическая нагрузка сварочного трансформатора рассчитывается по формуле

$$P_{\text{н}} = S_{\text{н}} \sqrt{\text{ПВ}\%} \cdot \cos \varphi_{\text{н}},$$

где $S_{\text{н}}$ – номинальная (паспортная) мощность сварочного трансформатора;

$\cos \varphi_{\text{н}}$ – коэффициент мощности сварочного трансформатора при нагрузке, равной $S_{\text{н}}$.

Классификация источников питания сварочной дуги

Среди источников питания можно выделить следующие:

- 1) *по роду тока* – постоянного тока и переменного тока;
- 2) *по виду внешних характеристик* – крутопадающие, пологопадающие, жесткие и полого-возрастающие;
- 3) *по способу получения энергии* – зависимые и независимые (автономные);
- 4) *по количеству обслуживаемых постов* – однопостовые и многопостовые;
- 5) *по назначению* – для ручной сварки покрытыми электродами, для автоматической и полуавтоматической сварки под флюсом и т. д.;
- 6) *по принципу действия* – сварочные трансформаторы с нормальным магнитным рассеянием и трансформаторы с увеличенным магнитным рассеянием;
- 7) *по применению* – общепромышленные и специализированные;
- 8) *по способу установки и монтажа* – стационарные и передвижные.

Вольт-амперные характеристики источников питания

Источники питания могут иметь внешние характеристики, представленные на рис. 6.9, а.

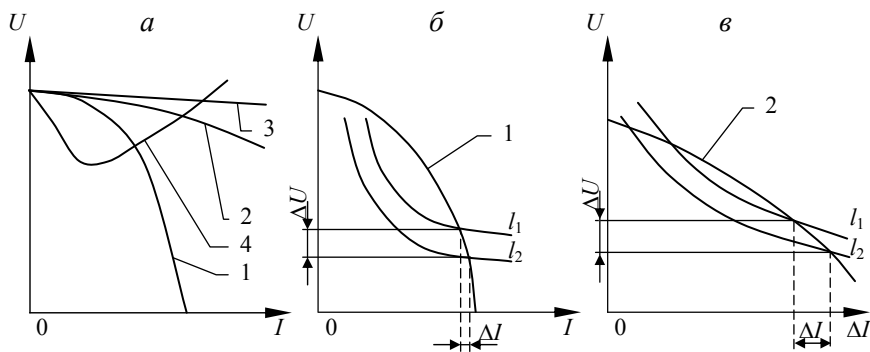


Рис. 6.9. Внешние характеристики источников питания:
1 – крутопадающая; 2 – пологопадающая; 3 – жесткая; 4 – возрастающая

Как правило, источник питания имеет одну из указанных характеристик. Однако, конструкция некоторых из них позволяет получать для каждого по две или три характеристики.

Выбор источника питания по виду внешней характеристики производится в зависимости от заданного способа сварки.

Для ручной дуговой сварки, а также для сварки неплавящимся электродом наилучшая характеристика источника питания – крутопадающая. На рис. 6.9, б видно, что при довольно частых изменениях длины дуги ($l_{д1} > l_{д2}$), а следовательно, и напряжение ΔU , возможных вследствие ручного управления электродом, сварочный ток ΔI меняется незначительно. При этом устойчивость дуги высокая, и в сварочном шве будут отсутствовать дефекты.

Для автоматической и полуавтоматической сварки под флюсом необходим источник с пологопадающей характеристикой. Как видно на рис. 6.9, в, даже незначительных изменений длины дуг ($l_1 > l_2$), а следовательно, и напряжения, ток соответственно резко изменяется, что вызывает, в свою очередь, быстрое изменение скорости плавления электродной проволоки. Таким образом, пологопадаю-

шая характеристика обеспечивает саморегулирование дуги и высокую стабильность процесса сварки.

Для автоматической и полуавтоматической сварки в защитных газах источники питания должны иметь жесткие и пологовозрастающие характеристики с целью получения ускоренного процесса саморегулирования и устойчивости сварочной дуги.

Источники питания сварочной дуги переменного тока

В тех случаях, когда сварка на переменном токе обеспечивает необходимое качество соединения, она обладает существенными преимуществами перед сваркой на постоянном токе:

- 1) меньшая стоимость источника сварочного тока и соответственно меньшие амортизационные затраты на единицу свариваемой продукции;
- 2) простота устройства и высокая степень надежности сварочного оборудования переменного тока;
- 3) меньший расход электроэнергии на единицу свариваемой продукции.

Общие сведения

Для обычной ручной дуговой сварки, а также для полуавтоматической и автоматической дуговой сварки с неплавящимися электродами однопостовые сваренные трансформаторы должны иметь крутопадающую внешнюю характеристику.

Существует два принципиально отличных пути создания таких источников:

1. На основе трансформатора с нормальным магнитным рассеянием и с жесткой внешней характеристикой. Падающая характеристика источника в этом случае может быть обеспечена:

- а) дополнительным включением в цепь дуги катушки с ферромагнитным сердечником – дросселя (т. е. большого индуктивного сопротивления);
- б) использование трансформатора с дросселем, встроенным в обший магнитопровод.

2. На основе трансформатора с падающей внешней характеристикой, которая обеспечивается созданием различными способами усиленных магнитных полей рассеяния:

а) трансформаторы с магнитными шунтами (*магнитный шунт* – это подвижный или неподвижный пакет, набранный из листов электротехнической стали и расположенный в окне трансформатора, на пути силовых линий полей рассеяния, замыкающихся от стержня к стержню);

б) трансформаторы с подвижными катушками обмоток.

Трансформатор с отдельным дросселем

Источник состоит (рис. 6.10) из двух узлов: трансформатора с жесткой внешней характеристикой $U_2 = f(I_2)$ и дросселя L с ферромагнитным сердечником, включенного последовательно с дугой. Сердечник дросселя имеет регулируемый воздушный зазор l_B (рис. 6.10, в). Подвижный пакет ПП сердечника дросселя перемещающийся с помощью рукоятки Р, набран из листов электротехнической стали.

Дроссель формирует падающую внешнюю характеристику источника $U_2 = f(I_2)$ (рис. 6.10, а). С помощью дросселя производится настройка режима, т. е. он одновременно является и регулятором сварочного тока. Наличие значительной индуктивности в сварочном контуре обуславливает сдвиг кривой тока I_2 в сторону отставания от вторичного синусоидального напряжения U_2 , чем создаются благоприятные условия для устойчивого горения дуги переменного тока.

По второму закону Кирхгофа для цепи (рис. 6.10, б) можно написать

$$E_L = I_2 \cdot R_L + I_D - I_2, \quad (6.3)$$

где $E_L = -jI_2 \cdot X_L = -jI_2 \cdot 2\pi fL$ – действующее комплексное значение ЭДС дросселя;

R_L – резисторное сопротивление обмотки дросселя.

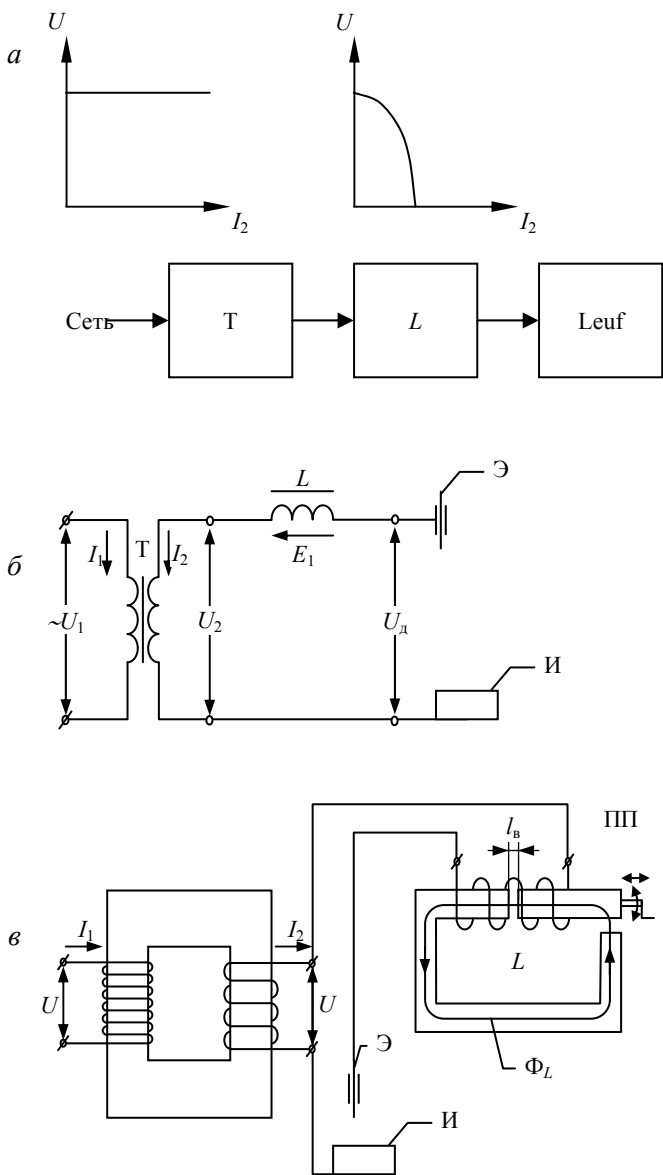


Рис. 6.10. Источник питания типа СТЭ:
a – функциональная блок-схема; *б* – принципиальная электрическая схема;
в – рабочая электрическая схема

Из уравнения (6.3) при $R_L \ll X_L$ получаем

$$I_2 = \frac{U_2 - U_d}{jX_L}.$$

При коротком замыкании, когда $U_d = 0$, имеем

$$I_{2к} = \frac{U_2}{jX_L}.$$

Зависимость сварочного тока I_2 от регулируемого воздушного зазора приведена на рис. 6.11.

При $l_B = 0$ имеем $I_2 = I_{2\min}$, так как магнитный поток в сердечнике дросселя максимальный, то ЭДС самоиндукции тоже максимальна. Индуктивное сопротивление дросселя максимальное:

$$X_L = \omega L = 2\pi f \frac{\omega^2 S \mu}{l_B},$$

так как магнитная проницаемость всего сердечника дросселя μ максимальна в связи с тем, что на пути магнитного потока Φ в сердечнике дросселя нет воздушного зазора. При $l_B = l_{B\max}$ имеем $\mu = \mu_{\min}$, $X = X_{L\min}$ и $I_2 = I_{2\max}$.

Существенным недостатком дросселя с регулируемым воздушным зазором является вибрация подвижного пакета. Это влияет на устойчивость процесса сварки, особенно при малых сварочных токах. Из-за значительных эксплуатационных недостатков и низких технико-экономических показателей источники с отдельным дросселем сняты с производства, но имеются в эксплуатации на ряде предприятий.

Трансформатор со встроенным дросселем

Трансформатор со встроенным дросселем относится к трансформаторам с нормальным магнитным рассеянием и реактивной обмот-

кой на общем стержне. Реактивная обмотка включена в сварочную цепь последовательно, с таким расчетом, что ее магнитный поток направлен навстречу основному магнитному потоку трансформатора (рис. 6.11).

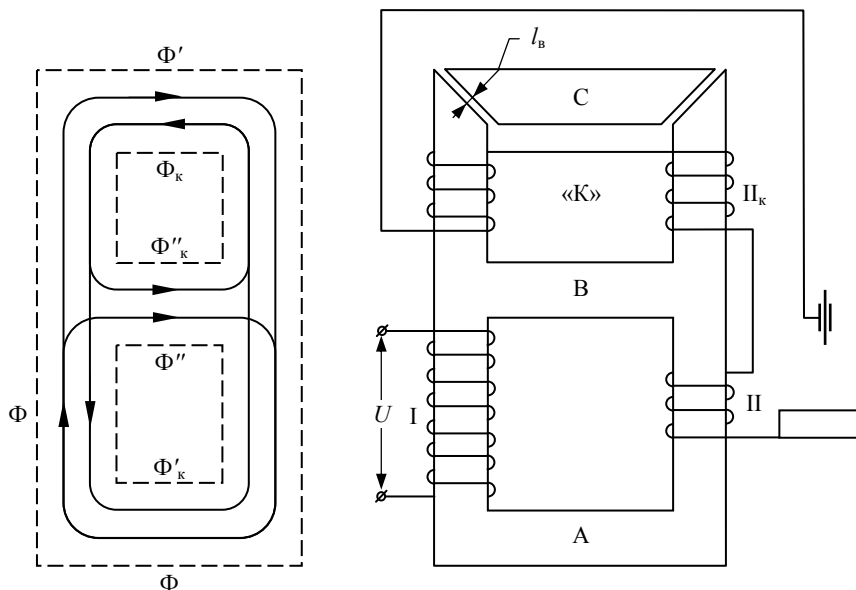


Рис. 6.11. Электромагнитная схема сварочного трансформатора со встроенным регулятором

На общем магнитопроводе помимо обычной вторичной обмотки II размещается реактивная катушка. Вторичное напряжение трансформатора определяется суммарной ЭДС обмоток Π и Π_{κ} .

При согласованном включении обмоток в режиме холостого хода магнитный поток трансформатора создается только током первичной обмотки и разветвляется между средним и верхним стержнями магнитопровода:

$$\begin{cases} \Phi_A = \Phi; \\ \Phi_B = \Phi''; \\ \Phi_C = \Phi'; \end{cases} \left\{ \begin{array}{l} \Phi_A = \Phi_B + \Phi_C; \\ \Phi = \Phi'' + \Phi'. \end{array} \right.$$

ЭДС во вторичной цепи складывается из ЭДС обмоток II и II_к:

$$E_2 = E_{II} + E_{IIк} = C_{II} \cdot \Phi + C_{IIк} \cdot \Phi'.$$

В режиме нагрузки магнитный поток трансформатора создается током первичной обмотки, а также током, протекающим во вторичной и реактивной обмотках.

Потоки в отдельных стержнях равны:

$$\begin{cases} \Phi_A = \Phi - \Phi'_к; \\ \Phi_B = \Phi'' + \Phi''_к; \\ \Phi_C = \Phi' - \Phi_к \end{cases}$$

и соответственно ЭДС

$$\begin{aligned} E_{II} &= C_{II} (\Phi - \Phi'_к), \\ E_{IIк} &= C_{IIк} (\Phi' - \Phi_к), \end{aligned}$$

напряжение на дуговом промежутке

$$U_d = E_2 - I_2 Z_2 = C_{II} (\Phi - \Phi'_к) + C_{IIк} (\Phi' - \Phi_к) - I_2 (Z_{II} + Z_{IIк}). \quad (6.4)$$

При изменениях режима нагрузки Φ нижней части магнитопровода существенно измениться не может, ввиду наличия включенной в сеть первичной обмотки. Вследствие этого напряжение на дуговом промежутке с изменением нагрузки будет зависеть от второго и третьего членов формулы (6.4).

С повышением тока нагрузки $\Phi_к$ возрастает, значение выражения $C_{IIк} (\Phi' - \Phi_к)$ уменьшается и может стать отрицательным.

Значение выражения $I_2 (Z_{II} + Z_{IIк})$ увеличивается с ростом тока. Таким образом, с повышением тока нагрузки U_d резко падает, что и является необходимым для сварочного аппарата.

Регулирование тока I_2 осуществляется плавным изменением величины зазора l_B . Регулировочные и внешние характеристики трансформатора приведены соответственно на рис. 6.12 и рис. 6.13.

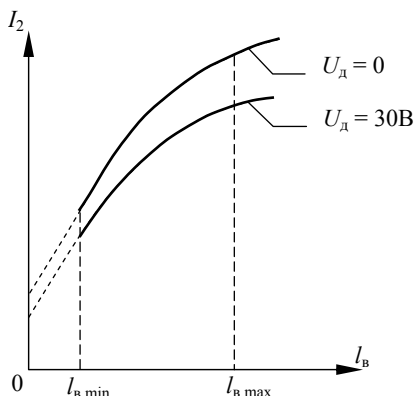


Рис. 6.12. Регулировочные характеристики трансформатора

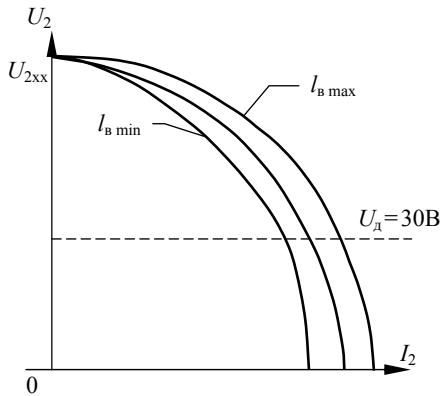


Рис. 6.13. Внешние характеристики трансформатора

Для обеспечения регулирования трансформатора должны быть выполнены следующие условия:

- 1) в любой момент времени стержень В не должен быть насыщен;
- 2) воздушный зазор должен находиться внутри катушки К, что расширяет диапазон регулирования;
- 3) величина I_B должна быть минимальной.

Рабочие параметры трансформаторов этого типа:

$$I_{св} = 450-2000 \text{ A};$$

$$U_H = 30-42 \text{ В};$$

$$S = 30-180 \text{ кВ}\cdot\text{А};$$

$$\text{ПН}\% = 50; 60; 65.$$

Трансформатор с подвижным магнитным шунтом

Функциональная блок-схема трансформатора с усиленными полями рассеяния приведена на рис. 6.14.

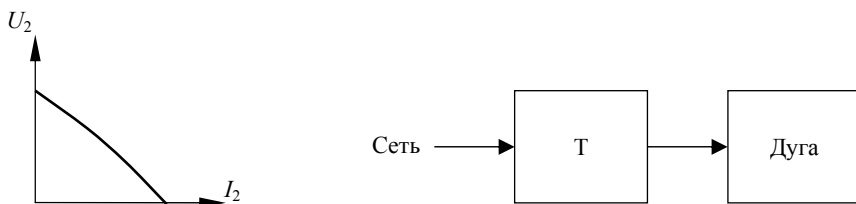


Рис. 6.14. Функциональная блок-схема трансформатора

Трансформатор Т выполняет следующие функции:

1) формирует падающую внешнюю характеристику;

2) создает условия для устойчивого горения дуги.

3) служит для плавного регулирования сварочного тока в широком диапазоне.

В результате дальнейшего развития общей схемы трансформатора был создан комбинированный трансформатор (рис. 6.15), имеющий увеличенное индуктивное сопротивление, за счет которого достигается главным образом ограничение тока короткого замыкания, и внешняя характеристика приобретает крутопадающую форму.

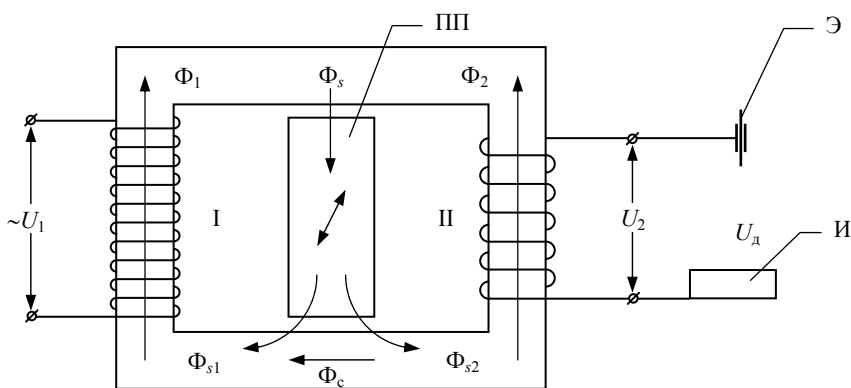


Рис. 6.15. Принципиальная схема трансформатора

Средний сердечник трансформатора III подвижный и имеет воздушные зазоры. При нагрузке через средний подвижный сердечник с большим магнитным сопротивлением замыкается почти весь поток рассеяния трансформатора. Реактивное действие обмотки II увеличивается. Поток Φ_s , проходящий через воздушные зазоры и средний стержень, который в данном случае является магнитным шунтом, представляет собой геометрическую сумму потоков рассеяния от основной и вспомогательной цепи. При изменении нагрузки величины Φ_2 и Φ_s также изменяются (рис. 6.16), в то время как в основном магнитопроводе поток Φ_c остается почти без изменения. При коротком замыкании поток Φ_c почти полностью является по-

током рассеяния. С изменением положения подвижного пакета ПП изменяется и величина магнитного сопротивления, а следовательно, изменяется магнитная связь K и коэффициент рассеяния δ . Коэффициент рассеяния растет и достигает наибольшего значения при коротком замыкании, когда через средний стержень замыкается поток лишь немного меньший основного потока. При выдвинутом среднем стержне коэффициент рассеяния имеет минимальное значение.

Регулирование тока в трансформаторах этого типа применяется комбинированное: ступенчатое (путем секционирования части вторичной обмотки, находящейся на отдельном стержне) и плавное, в пределах одной ступени (путем перемещения подвижного пакета).

Внешние характеристики трансформатора представлены на рис. 6.17.

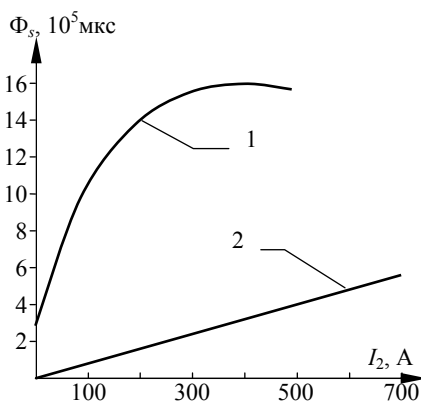


Рис. 6.16. Зависимость потока рассеяния от сварочного тока:
1 – I ступень, шунт выдвинут;
2 – II ступень, шунт выдвинут

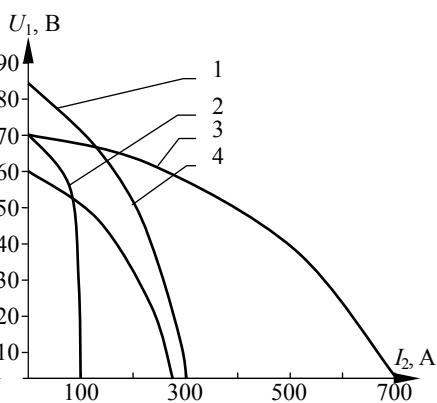


Рис. 6.17. Внешние характеристики трансформатора:
1 – I ступень, шунт выдвинут; 2 – I ступень, шунт вдвинут; 3 – II ступень, шунт выдвинут; 4 – II ступень, шунт вдвинут

Регулировочная характеристика трансформатора изображена на рис. 6.18.

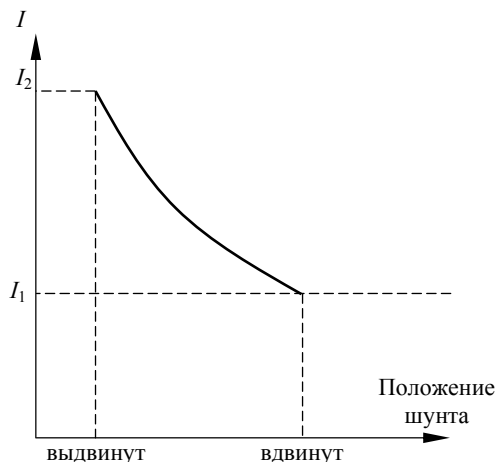


Рис. 6.18. Регулировочная характеристика трансформатора

К достоинствам такого типа трансформатора следует отнести простоту устройства механизма перемещения подвижного пакета, а также более низкие вибрация и шум при сварке на малых токах.

Трансформатор с подвижными катушками обмоток

Катушки обмоток сварочного трансформатора с подвижными катушками обмоток (рис. 6.19) расположены иначе, чем у обычного силового трансформатора.

У данного трансформатора первичные и вторичные обмотки разделены на две равные части каждая. Катушки одной обмотки могут быть закреплены, а катушки другой обмотки могут с помощью специального ходового винта перемещаться вдоль боковых стержней сердечника в пределах расстояния h .

Увеличенные магнитные потоки рассеяния вызывают появление во вторичной обмотке трансформатора реактивных ЭДС. С увеличением сварочного тока магнитные потоки рассеяния возрастают, реактивная ЭДС увеличивается и вторичное напряжение падает:

$$e = W \frac{d\Phi}{dt};$$

$$U = 4,44 f W\Phi.$$

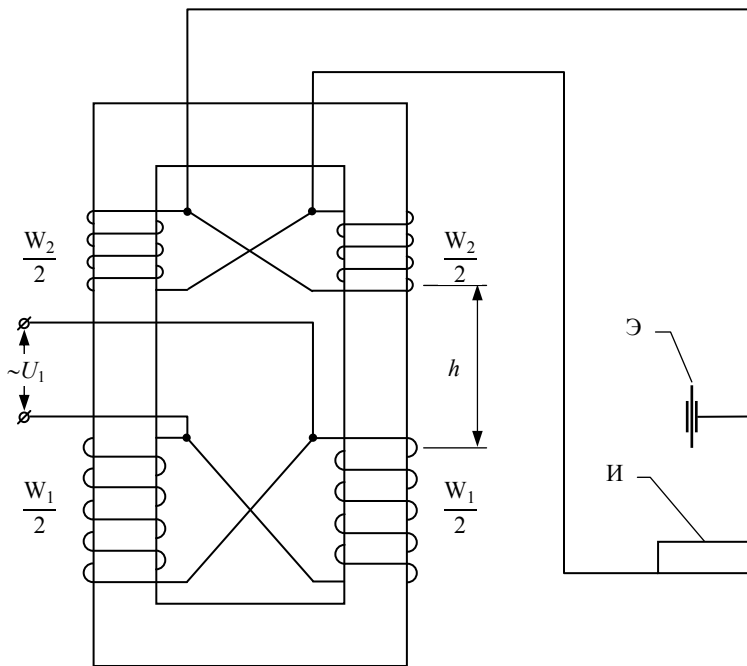


Рис. 6.19. Сварочный трансформатор с подвижными катушками обмоток

Сумма резистивных сопротивлений обмоток трансформатора пренебрежимо мала по сравнению с суммой индуктивных сопротивлений. Следовательно, при коротком замыкании

$$I_{2к} = \frac{U_1 W_1}{W_2 (X_1 + X'_2)}$$

Из этого выражения видно, что сварочный ток трансформатора с усиленными полями рассеяния можно регулировать за счет изменения следующих величин:

- 1) подводимого к первичной обмотке напряжения U_1 ;
- 2) числа витков обмоток;
- 3) индуктивных сопротивлений обмоток.

У рассматриваемых трансформаторов регулирование сварочного тока комбинированное: ступенчатое и плавное. Ступенчатое регулирование (рис. 6.20) осуществляется переключением катушек об-

моток с параллельного на последовательное. Ступенчатое регулирование производится барабанным переключателем при отключенной нагрузке. Плавное регулирование сварочного тока в пределах установленной ступени осуществляется изменением расстояния между катушками обмоток. Внешние и регулировочные характеристики представлены на рис. 6.21 и рис. 6.22.

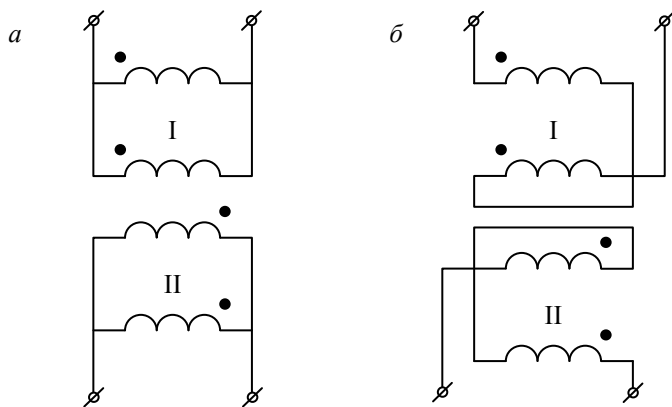


Рис. 6.20. Схемы переключения катушек трансформатора при ступенчатом регулировании сварочного тока:
а – ступень большого тока; *б* – ступень малого тока

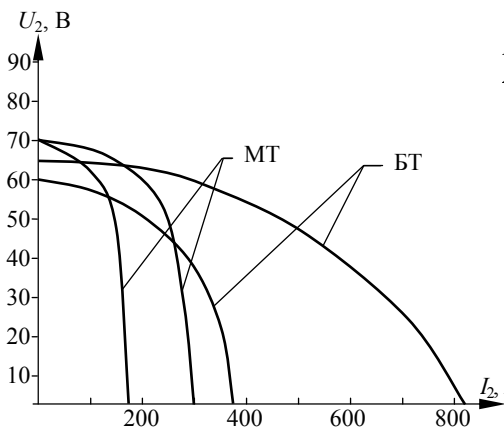


Рис. 6.21. Внешние характеристики трансформатора для режимов больших (БТ) и малых (МТ) токов

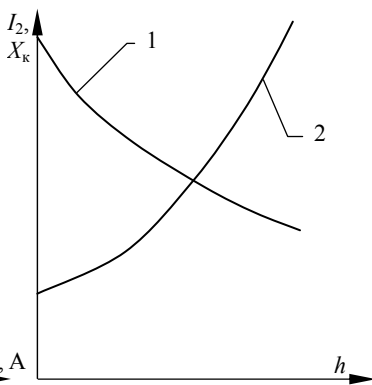


Рис. 6.22. Регулировочная характеристика трансформатора
 $1 - I_2 = f(h)$; $2 - X_k = f(h)$

Основными недостатками трансформатора с подвижными катушками обмоток являются:

- 1) трудность надежного крепления подвижных катушек, на которые действуют значительные силы;
- 2) необходимость перемещения катушек вдоль осей стержней трансформатора для плавного регулирования сварочного тока, что увеличивает габариты и массу трансформатора;
- 3) возникновение добавочных потерь из-за полей рассеяния в кожухе и других конструктивных элементах трансформатора.

Порядок выполнений работы

1. Ознакомиться со схемой и оборудованием лабораторной установки.
2. Подготовить таблицу результатов измерений и расчетов по предлагаемому образцу (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Результаты измерений и расчетов

№ п/п	Измеренные параметры					Расчетные параметры					
	U_1	I_1	U_2	I_2	h	S (ПВ = = 100 %)	Z	$\eta = \frac{U_M}{U_2}$	S (ПВ = = 50 %)	S (ПВ = = 60 %)	S (ПВ = = 65 %)
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											

3. При отключенной схеме установить $R_H = R_{H \max}$.
4. По разрешению преподавателя включить лабораторную установку.
5. При разных значениях R_H снять 5–7 фиксированных значений для двух трансформаторов и занести их в таблицу.

6. Используя таблицу произвести необходимые расчеты.
7. По результатам расчетов построить семейство вольт-амперных характеристик для трансформатора с подвижным магнитным шунтом и трансформатора с подвижными катушками обмоток.
8. Оформить черновик отчета и представить преподавателю на подпись.

Содержание отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Назначение и область применения источников питания переменного тока.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Принципиальную электрическую схему установки.
5. Таблицу измерений и расчетов.
6. Семейство вольт-амперных характеристик $U_2 = f(I_2)$ двух трансформаторов.
7. Регулировочные характеристики двух трансформаторов.
8. Выводы.
9. Краткие ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. В чем заключаются особенности дуги переменного тока?
2. Понятие устойчивости дуги в установившемся и динамическом режимах.
3. Источники питания и требования к ним.
4. Способы получения крутопадающей характеристики источника питания.
5. Какие существуют способы регулирования сварочного тока?
6. Область рабочих параметров источников питания сварочной дуги переменного тока.
7. Режимы работы сварочного оборудования.
8. Сравнительная характеристика сварочного оборудования для ручной и автоматической сварки.

Литература

1. Электротехнологические промышленные установки / А. Д. Свенчанский [и др.]. – М. : Энергоиздат, 1982.
2. Сергеев, К. П. Справочник молодого электросварщика / К. П. Сергеев. – М. : Высшая школа, 1980,
3. Браткова, О. Н. Источники питания сварочной дуги : учеб. / О. Н. Браткова. – М. : Высшая школа, 1982.
4. Никитин, В. П. Основы теории трансформаторов и генераторов для дуговой сварки / В. П. Никитин. – М. : Академия наук СССР, 1956.
5. Ястребов, П. П. Электрооборудование. Электротехнология : учебное пособие для химико-технологических специальностей вузов / П. П. Ястребов, И. П. Смирнов. – М. : Высшая школа, 1987.

Лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВОК ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЗАКАЛКИ И СКВОЗНОГО ПРОГРЕВА ЗАГОТОВОК

Цель работы: исследовать различные установки для высокочастотной закалки и сквозного прогрева заготовок (изделий).

Общие сведения

Установок, в которых происходит преобразование электрической энергии в другие виды энергии с одновременным осуществлением технологических процессов, очень много. Электрические и магнитные поля в этих установках могут быть постоянными или быстроменяющимися во времени и в пространстве, иметь широкий диапазон изменения частоты и напряженности, величины тока и напряжения и т. д. Посредством электрических и магнитных полей с заготовкой (изделием, веществом), находящейся в каждом из агрегатных состояний, можно совершать бесчисленное множество операций – изменение формы, структуры, состава, температуры и т. д. Совершенствование электротехнологических процессов повлекло за собой создание материалов, обладающих новыми свойствами – более высокими термостойкостью, устойчивостью к агрессивному действию химических реакций, поверхностной прочностью, т. е. износостойкостью деталей при трении, сверлении, резании, фрезеровании и т. д.

Из огромного перечня электротехнологических установок индивидуального изготовления или серийного производства в данной работе рассматриваются установки для высокочастотной закалки и сквозного прогрева заготовок (изделий). В этих установках используется электронагрев (электротермия) вместо пламенного нагрева, что позволяет экономить топливо и время нагрева, повышать экологию окружающей среды, сокращать объем обслуживающего персонала в связи с удобством автоматизации процессов, получать строго заданные температуры, создавать сосредоточенный тепловой поток с целью нагрева отдельных участков деталей, контролировать длительность выделения энергии, быстроту и высокое качество нагре-

ва, нагревать заготовки в газовых средах любого химического состава, выделять тепловую энергию непосредственно в нагреваемом изделии и т. д.

В электротермии используются следующие *способы преобразования электрической энергии в тепловую*:

- 1) нагрев сопротивлением;
- 2) индукционный;
- 3) диэлектрический;
- 4) дуговой;
- 5) электронно- и ионно-лучевой;
- 6) плазменный;
- 7) лазерный.

Рассмотрим более подробно те установки, в которых используется индукционный нагрев заготовок (изделий), т. е. установки для высокочастотной закалки и сквозного прогрева заготовок.

Физические основы индукционного нагрева

Индукционным называют такой способ нагрева, при котором нагревающие токи создаются в нагреваемом материале (заготовке, изделии) электромагнитной индукцией. Несмотря на схожесть с нагревом методом сопротивления в отношении конечной стадии преобразования электрической энергии, выделение тепла при прохождении тока в материале подчиняется закону Джоуля-Ленца, передача его к нагреваемому материалу (заготовке, изделию) происходит специфическим путем. Электрическая энергия источника питания преобразуется в энергию магнитного поля, которая в нагреваемом материале (заготовке, изделии) вновь превращается в энергию электрическую и затем в тепловую. Именно специфика передачи электрической энергии путем ее двойного преобразования представляет основную особенность индукционного нагрева. Метод индукционного нагрева основан на проникновении электромагнитной волны на нагреваемый металл (материал, изделие, заготовку).

Устройство для индукционного нагрева (рис. 7.1) в самом общем виде представляет собой катушку в виде соленоида, называемую индуктором, внутри которой помещается электропроводниковый материал (изделие, заготовка).

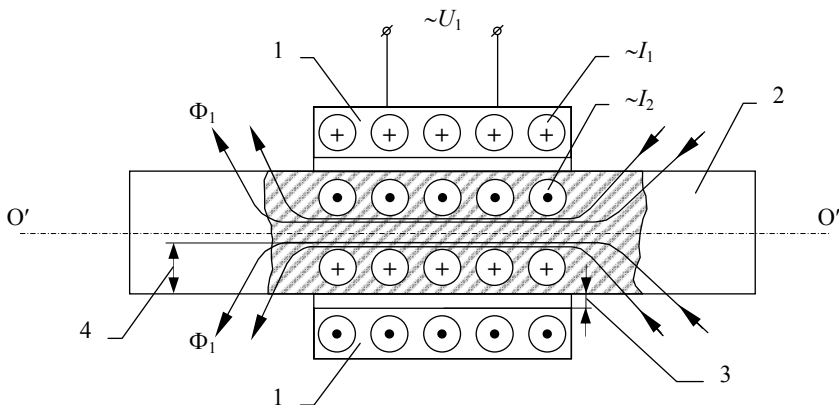


Рис. 7.1. Принципиальная схема индукционного нагревателя:
 1 – индуктор; 2 – нагреваемое тело (заготовка, изделие); 3 – воздушный зазор;
 4 – глубина проникновения тока I_2 в тело; I_1 – ток индуктора I ;
 I_2 – вихревой ток в заготовке (детали) 2

Переменный ток I_1 , протекая по индуктору, создает переменный магнитный поток Φ_1 , который сцепляется с нагреваемой заготовкой (изделием) 2. Индуктор 1 по отношению к нагреваемой заготовке 2 является первичной обмоткой трансформатора. Нагреваемая заготовка выполняет роль вторичной обмотки трансформатора, содержащей один короткозамкнутый виток.

Магнитный поток Φ_1 прямо пропорционален МДС индуктора I и обратно пропорционален сопротивлению магнитной цепи. При изменении магнитного потока Φ_1 (а значит, I_1) в заготовке 2 возбуждается ЭДС, магнитное значение которой

$$e_1 = \frac{d\Phi_1}{dt}.$$

При синусоидальной изменении магнитного потока Φ_1 (тока индуктора I_1) действующее значение ЭДС в нагреваемом теле будет равно

$$E_M = 4,44 f_1 W_1 \Phi_M 10^{-8}, \quad (7.1)$$

где Φ_M – амплитудное значение магнитного потока Φ_1 , сцепляющегося с контуром, образованным заготовкой 2;

f_M – частота индуктора тока, Гц;

W_1 – число витков индуктора I .

Под действием ЭДС E_M в контуре (заготовке) возникает вихревой ток I_2 (см. рис. 7.2):

$$I_2 = I_M \frac{E_M}{Z_M}, \quad (7.2)$$

где Z_M – полное сопротивление контура металла заготовки.

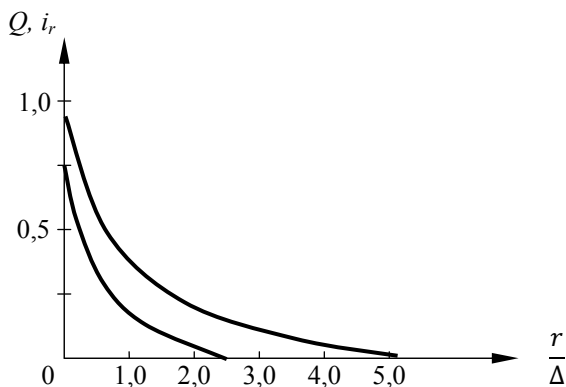


Рис. 7.2. Закономерности изменения плотности тока i_r и спада интенсивности выделяемого тела Q

Мощность, выделяющаяся в контуре металла при прохождении тока I_2 , в общем случае равна

$$P_M = I_2^2 r_M \frac{E_M^2 r_M}{Z_M^2}, \quad (7.3)$$

где r_M – активное сопротивление контура металла заготовки.

Рассмотрим электромагнитные процессы, происходящие в цилиндрической заготовке, находящейся во внешнем магнитном поле (см. рис. 7.1). Магнитное поле с некоторой конечной скоростью проникает в цилиндр. В первый момент оно заполнит из всей массы цилиндра только внешнее кольцо некоторой толщины. В нем возникнут индуцированные токи I_2 , обратные по направлению току индуктора I_1 . Эти токи I_2 образуют магнитное поле Φ_2 , которое, складываясь с магнитным полем индуктора Φ_1 , ослабит его. В следующий момент уже ослабленное магнитное поле Φ_1 будет далее проникать вглубь заготовки и заполнит второй слой в цилиндре, лежащий под первым. Так, постепенно ослабляясь, магнитное поле Φ_1 индуктора I будет проникать в цилиндр, вызывая в нем ток I_2 , плотность которого будет падать от наружной поверхности к его центру. При сравнительно больших значениях частоты и радиуса заготовки (изделия) изменения плотности тока будет происходить по экспоненте (кривая I на рис. 7.2):

$$i_r = i_0 e^{-\frac{r}{\Delta}}, \quad (7.4)$$

где i_0 – значение плотности тока на поверхности заготовки, А/м²;

Δ – расстояние от поверхности заготовки по направлению к центру, на которой плотность тока убывает в e раз, м;

r – радиус заготовки, м.

Расстояние Δ по предложению Ч. П. Штейнмеца называется *глубиной проникновения магнитного поля* и математически выражается в виде

$$\Delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f_1}}, \quad (7.5)$$

где μ , ρ – соответственно относительная магнитная проницаемость и удельное сопротивление (Ом·м) материала заготовки.

Выражение (7.5) имеет глубокий физический смысл. Уменьшение плотности тока i_r в выражении (7.4) тем значительнее, т. е.

глубина проникновения Δ тем меньше, чем выше частота тока f_1 . Чем больше частота, тем больше величина наведенной в заготовке ЭДС $E_2 = E_m$ в выражении (7.1) и, соответственно, ток I_2 , рассчитанный по формуле (7.2). Размагничивающее действие этих токов приводит к быстрому падению напряженности поля и плотности тока по мере перемещения к оси $0'-0'$ заготовки 2 (см. рис. 7.1).

Чем меньше ρ заготовки в выражении (7.5), тем сильнее падение плотности тока i_r . Это объясняется тем, что при одинаковой E_m в выражении (7.1) величина токов I_2 в выражении (7.2) и их размагничивающее действие будет больше в заготовке (изделии) с меньшим ρ .

При одной и той же силе и частоте тока I_1 индуктора магнитный поток Φ_2 в заготовке тем больше, чем больше абсолютная магнитная проницаемость материала заготовки, которая определяется по формуле

$$\mu_\alpha = \mu_\alpha \mu = \frac{B}{H}, \text{ Гн/м,}$$

где μ – относительная магнитная проницаемость;

$\mu_\alpha = 4\pi 10^{-7}$ Г/к – магнитная постоянная.

В свою очередь, наводимые токи тем больше, чем больше магнитный поток. Вследствие этого падения плотности тока вдоль радиуса цилиндра материала тем сильнее, чем больше магнитная проницаемость материала заготовки μ_α .

Тепло, выделяемое током, пропорционально квадрату действующего значения плотности тока на данном участке металла, т. е. $Q = I_r^2$. Кривая спада интенсивности выделяемого тепла Q является экспонентой, показатель которой равен удвоенному показателю экспоненты спада плотности тока (кривая 2 на рис. 7.2). Отсюда следует, что в поверхностном слое металла заготовки, толщина которого равна глубине проникновения Δ , выделяется значительная часть всей тепловой энергии ($\approx 85,4\%$). Поэтому для расчетов, не требующих точности выше 10 %, обычно предполагают, что ток

проходит равномерно в слое толщиной Δ , а в остальном объеме металла заготовки (изделия) плотность тока равна нулю. В этом случае активное сопротивление контура металла, по которому протекает вихревой ток I_2 (см. рис. 7.1), будет равно

$$r_m = \rho \frac{\Pi}{\Delta l}, \quad (7.6)$$

где Π – периметр контура вихревого тока, м;

l – длина заготовки, м.

Приняв, что вихревой ток $I_2 \approx I_1 W_1$, получим

$$P_m = (I_1 W_1)^2 \rho \frac{\Pi}{\Delta l},$$

где I_1 , W_1 – соответственно ток и число витков индуктора.

Индукционные нагревательные установки широко применяются в различных технологических процессах в машиностроительной и других отраслях промышленности. Их подразделяют на два основных типа:

- 1) установки поверхностного нагрева для высокочастотной закалки;
- 2) установки сквозного прогрева заготовок.

Установки для высокочастотной поверхностной закалки заготовок (изделий)

Установки поверхностного нагрева применяются для нагрева заготовок (деталей) под последующую термохимическую обработку:

1) цианирование и цементацию (насыщение поверхностных слоев углеродом – науглероживание), азотирование, покрытие деталей более твердыми металлами и т. п.;

- 2) поверхностно-индуктивную закалку.

Цель термохимической обработки – повышение поверхностной твердости, износостойкости, коррозионной стойкости (на воздухе и в воде), усталостной прочности, а поверхностной закалки – получение высокой твердости поверхностного слоя при сохранении вязкой (мягкой) сердцевины детали.

Поверхностной закалке подвергаются трущиеся поверхности деталей для уменьшения износа, а «сырая» (мягкая) сердцевина позволяет выдерживать ударные и знакопеременные динамические нагрузки.

Процесс поверхностной индукционной закалки заключается в быстром нагреве детали на заданную глубину токами высокой или повышенной частоты с последующим быстрым охлаждением на воздухе, в воде, водных растворах солей или масле. При этом происходят структурные изменения, обеспечивающие нужную твердость поверхности, определяемую по одному из многих способов испытания твердости металлов (Бринелля, Роквелла, Виккерса).

При индукционном нагреве интенсивный нагрев поверхностного слоя происходит только до температуры, при которой сталь теряет магнитные свойства, после этого скорость нагрева резко снижается и область интенсивного нагрева перемещается к более глубоким слоям, поверхностный слой предохраняется от значительного перегрева.

Такой перегрев возможен только при поверхностном нагреве под закалку при использовании газового пламени или нагреве в электродите.

Существует несколько *видов поверхностного нагрева под закалку* (рис. 7.3):

1) *Одновременный* – вся закаливаемая поверхность детали находится сначала в зоне индуктора, а затем в зоне охладителя (рис. 7.3, а) – шейки валов, фланцы, втулки и т. п.;

2) *одновременно-поочередный* – закалке подвергаются одновременно отдельные участки изделия (шестерни, кулачки, шейки кулачков распределительные валов автомобилей и т. д.). Индуктор 2 и деталь 1 передвигаются относительно друг друга толчками с одного участка на другой (рис. 7.3, б);

3) *непрерывно-последовательный* – применяется при большой протяженности закаливаемой поверхности с большой суммарной площадью. Заключается в нагреве участков детали при непрерывно-последовательном движении детали относительно индуктора и движении индуктора относительно детали. Охлаждение нагретых участков следует за их нагревом (рис. 7.3, в).

Охладитель 3 и индуктор 2 (рис. 7.3) при непрерывно-последовательной закалке могут быть как совмещенными, так и раздельными.

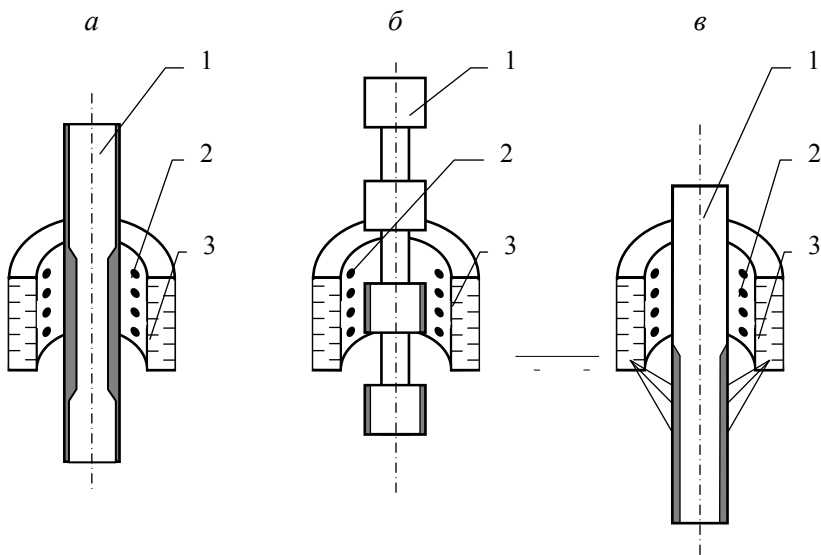


Рис. 7.3. Виды поверхностной закалки деталей:
 а – одновременная закалка; б – одновременно-поочередная закалка;
 в – непрерывно-последовательная закалка;
 1 – деталь; 2 – индуктор; 3 – охладитель

В зависимости от вида поверхностного нагрева для поверхностной закалки и формы заготовки (детали) могут применяться различные конструкции закалочных индукторов (рис. 7.4).

Закалочные индукторы различаются по назначению:

- 1) для закалки плоских поверхностей заготовок (рис. 7.4, а, б);
- 2) для закалки внешних поверхностей цилиндрических деталей (рис. 7.4, в);
- 3) для закалки внутренних поверхностей цилиндрических и плоских деталей;
- 4) для закалки поверхностей сложной формы.

По форме индукторы могут быть:

- 1) в виде прямоугольника (см. рис. 7.4, а) или квадрата;
- 2) в виде петли (см. рис. 7.4, б);
- 3) цилиндрическими (см. рис. 7.4, в);
- 4) спирально-плоскими или спирально-цилиндрическими.

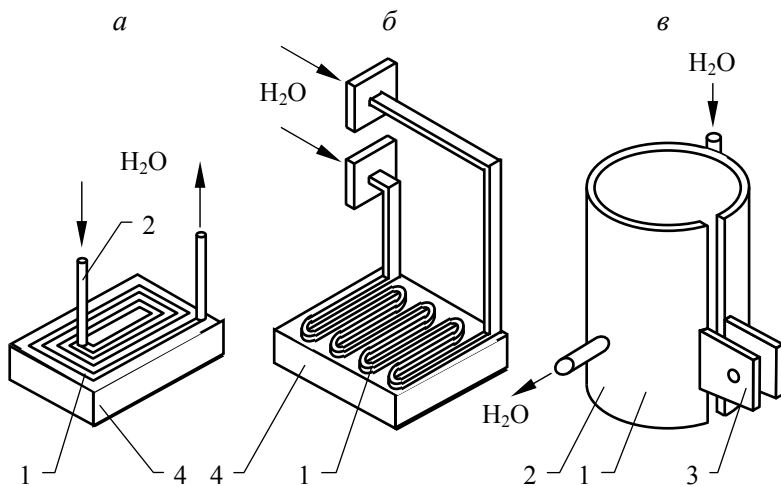


Рис. 7.4. Различные конструкции закалочных индукторов:
а – прямоугольный многовитковый; *б* – петлевой; *в* – цилиндрический;
1 – индуктор; *2* – трубка для подвода охлаждающей воды; *3* – токопроводы;
4 – заготовка

Закалочные индукторы могут быть *одновитковыми* и *многовитковыми*. У одновиткового индуктора вода пропускается через отверстие в нижней части индуктора под углом $45\text{--}60^\circ$ к нагретой поверхности заготовки. При многовитковом индукторе, когда шаг невелик, охладитель выполняется отдельно от индуктора в виде одного витка, окружающего нагреваемую поверхность детали.

Одновитковые индукторы применяются при $f = 1\text{--}8$ кГц и питаются от мощных трансформаторов. Многовитковые (рис. 7.5) – получают питание от ламповых генераторов при $f = 70\text{--}500$ кГц. Поверхностная закалка осуществляется, как правило, на повышенных и высоких частотах.

Глубина закалочного слоя, а также рекомендуемая толщина деталей зависят от частоты тока (табл. 7.1).

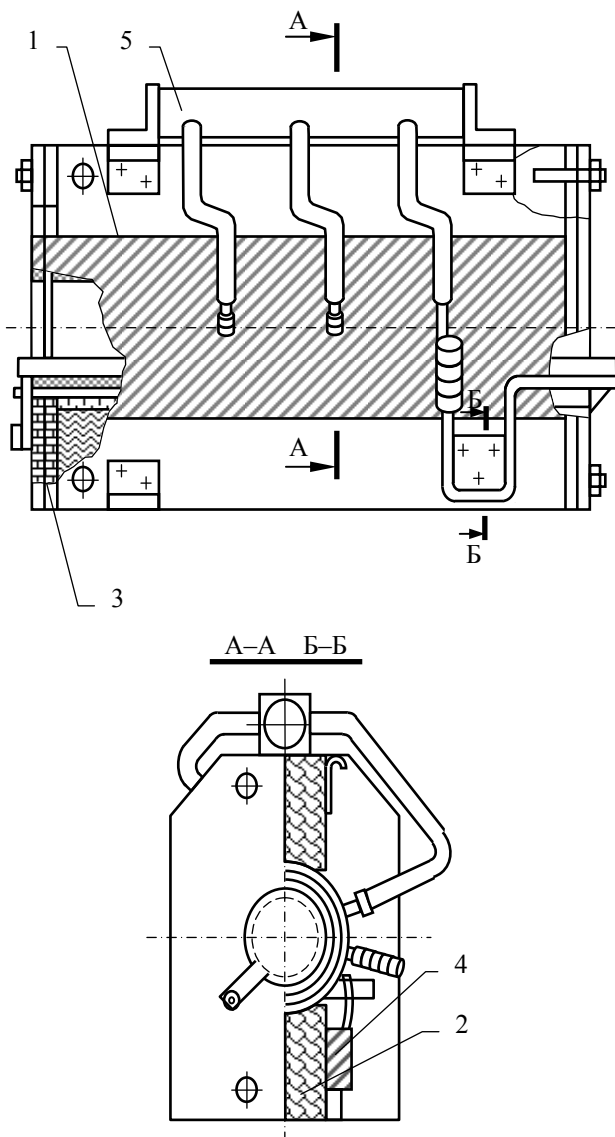


Рис. 7.5. Многовитковый индуктор для сквозного подгрева кузнечных цилиндрических заготовок:

- 1 – катушка из медной трубки круглого сечения; 2 – деревянный брус для крепления витков катушки; 3 – торцевые плиты; 4 – контактная пластина; 5 – охлаждающий водяной коллектор

Таблица 7.1

Глубина закаленного слоя и рекомендуемая толщина (диаметр) деталей в зависимости от частоты питающего тока

Частота тока f , Гц	Глубина закаленного слоя Δ , мм	Рекомендуемая толщина деталей, мм
500	7,0–20	100–150
1000	3,5–15,0	70–100
2000	2,3–14,0	40–90
2400	1,5–12,0	30–70
3000	1,3–7,0	25–60
8000	1,1–4,0	20–50
70 000	0,5–3,5	15–0
200 000	0,25–1,5	10–15
500 000	0,15–1,0	5–8

Различают два вида нагрева под поверхностную закалку:

а) *глубинный*, когда глубина проникновения тока I_2 больше глубины (толщины) закаленного слоя, т. е. $\Delta > x_k$;

б) *поверхностный*, когда $\Delta < x_k$,

где x_k – толщина закаленного слоя, мм.

Обычно x_k задается в пределах $x_k = (0,007 \dots 0,15) d_m$,

где d_m – диаметр детали.

Оптимальная частота определяется по эмпирическим формулам:

1) для закалки деталей с цилиндрической или плоской поверхностью

$$f_{\text{опт}} = \frac{0,5 \cdot 10^5}{x_k^2}, \text{ Гц};$$

2) для закалки деталей сложной формы

$$f_{\text{опт}} = \frac{5 \cdot 10^5}{x_k^2}, \text{ Гц}.$$

Оптимальное соотношение между f и диаметром изделия d_m (см) определяется по формуле

$$f_{\text{опт}} \approx \frac{(1...5)10^5}{d_k^2}, \text{ Гц.}$$

Для осуществления закалки мощность генератора определяется по соотношению

$$P_{\text{ген}} = P_0 S_{\text{пов}},$$

где $P_0 = 0,5 + 0,3 \text{ кВт/см}^2$ – удельная мощность, отдаваемая генератором изделию в зависимости от частоты тока f , глубины нагрева и диаметра заготовки;

$S_{\text{пов}}$ – поверхность нагрева детали под закалку, см^2 .

Потребляемую индукционной установкой из сети активную мощность P_c определяют через полезную мощность $P_{\text{пол}}$ и КПД системы:

$$P_c = \frac{P_{\text{пол}}}{\eta_c} = \frac{P_{\text{пол}}}{\eta_{\text{инд}} \eta_{\text{к.б}} \eta_{\text{л}} \eta_{\text{и.п}}},$$

где $\eta_c, \eta_{\text{инд}}, \eta_{\text{к.б}}, \eta_{\text{л}}, \eta_{\text{и.п}}$ – соответственно КПД системы, индуктора, конденсаторной батареи, линии, источника питания.

Полезная мощность определяется по формулам

$$P_{\text{пол}} = C_p (t_k - t_0) g n,$$

$$P_{\text{пол}} = \frac{C_p (t_k - t_0) g n}{\tau},$$

где C_p – средняя удельная теплоемкость в интервале температур $t_k - t_0$, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;

t_k и t_0 – конечная и начальная температуры заготовки, К ;

g – масса одной детали, кг ;

n – количество заготовок, одновременно нагреваемых в индукторе для последующей закалки;

τ – время нагрева, с.

Время нагрева определяется нарастанием температуры в закаливаемой зоне до температуры выше критической на 100–200 °С со скоростями 200–400° С/с в зоне магнитных превращений, обеспечивающими поверхностный нагрев слоя, подлежащего закалке, с последующим охлаждением этого слоя со скоростью охлаждения до 600–800° С/с путем применения водяного душа или сброса детали в охлаждающую среду. Удельная поверхностная мощность $P_{\text{пов}}$ обычно находится в пределах $(1,5...2)10^4$ кВт/м², поэтому мощность источника питания равна

$$P_{\text{и.п}} = (1,2...1,3)10^4 P_{\text{пов}} S_{\text{пов}}, \text{ кВт},$$

где $S_{\text{пов}}$, м².

Установки для сквозного прогрева заготовок (изделий)

Индукционные установки сквозного (глубинного) прогрева применяются для нагрева заготовок до температур 1500 К под последующую пластическую деформацию:

- 1) ковку, штамповку, прессовку, прокатку, гибку, волочение;
- 2) отжиг и отпуск деталей;
- 3) пайку или напайку инструмента (сверл, резцов, фрез, долбяков);
- 4) нагрев листов при сушке лакокрасочных покрытий и пр.

Нагрев считается глубинным, если соблюдается условие

$$\frac{r\sqrt{2}}{\Delta_{\text{э,гор}}} > 3...5,$$

где $\Delta_{\text{э,гор}} = (0,25...0,45)r$ – глубина проникновения тока I_2 в металл горячей заготовки.

Необходимая частота тока при этом определяется из условия максимального поглощения электромагнитной энергии нагреваемой заготовкой и определяется по соотношению

$$f \approx \frac{3 \cdot 10^4}{d_M^2}.$$

Преимуществом индукционного прогрева перед другими является:

- а) малое время разогрева;
- б) малый угар металла;
- в) меньший брак из-за попадания окалины в обрабатываемое изделие.

Поэтому установки располагают рядом у молотов, прессов, прокатных станов, гибочных машин и т.п.

Для индукционного нагрева кузнечных заготовок применяется $f = 50\text{--}10\,000$ Гц с использованием промышленных сетей и машинных генераторов повышенной частоты. В связи с этим *в зависимости от частоты* индукционные установки сквозного прогрева подразделяются:

- 1) на установки промышленной частоты $f = 50$ Гц – для массивных заготовок (изделий) с диаметром $d_M > 150$ мм;
- 2) установки повышенной частоты: $f = 50\text{--}10\,000$ Гц;
- 3) установки высокой частоты: $f = 70\text{--}500$ Гц.

Установки сквозного прогрева выполняются однофазными и трехфазными. Последние имеют преимущества перед однофазными, так как равномерно загружается каждая фаза заводской сети.

По режиму работы установки сквозного нагрева подразделяют:

- 1) на установки периодического действия;
- 2) установки методического (непрерывного) действия.

В установках периодического действия нагревается только одна заготовка или ее часть. При нагреве заготовок из магнитного материала происходит изменение потребляемой мощности: в начале она возрастает, а затем по достижении точки Кюри, снижается до 60–70 % от начальной. При нагреве заготовок из цветных металлов мощность в конце нагрева несколько увеличивается за счет роста ρ .

В установках непрерывного действия одновременно находится несколько заготовок, расположенных в продольном или поперечном магнитном поле.

При необходимости иметь большую длину нагревателя индукторы выполняются из отдельных секций, соединенных между собой в последовательно-параллельные группы, как, например, нагреватели для сквозного прогрева длинных прутков.

Для мерных заготовок небольшой длины разработана серия кузнечных индукционных нагревателей мощностью от 500 до 1000 кВт на частоту 50 Гц (рис. 7.5). Короткие мерные заготовки могут быть расположены поперек оси индуктора и скатываться по направляющим, уложенным вдоль оси индуктора.

Конструкция индуктора для сквозного прогрева зависит от формы и размеров деталей. Индукторы выполняют круглого, овального, квадратного или прямоугольного сечения. Для нагрева концов заготовок индукторы выполняют щелевыми или петлевыми (см. рис. 7.4).

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Назначение и область применения индукционных установок поверхностного и сквозного нагрева.
3. Краткие теоретические сведения.
4. По заданию преподавателя выполняется расчет глубины проникновения магнитного поля вглубь заготовки при поверхностном и глубинном нагреве, а также подсчитываются $P_{\text{ген}}$, $P_{\text{с}}$, $P_{\text{пол}}$, $P_{\text{и.п}}$, $f_{\text{опт}}$ и другие параметры индукционных установок.

Контрольные вопросы

1. Какие преимущества электротермии перед пламенным нагревом деталей (изделий)?
2. Какие способы преобразования электроэнергии в тепловую используются в электротермии?
3. В чем заключается физическая сущность индукционного поверхностного нагрева заготовок?

4. В чем заключается физическая сущность глубинного прогрева?
5. В чем заключается сущность электромагнитных процессов, происходящих в нагреваемом теле?
6. Как влияют величины ρ , μ , и f на плотность тока в заготовке (изделии)?
7. В чем специфика передачи электрической энергии путем двойного преобразования?
8. Что называется индукционным способом нагрева заготовок?
9. Что представляет собой индуктор?
10. В чем заключается физический смысл глубины проникновения магнитного поля Δ ?

Литература

1. Евтюкова, И. П. Электротехнологические промышленные установки : учеб. для вузов / И. П. Евтюкова [и др.] ; под ред. А. Д. Свенчанского. – М. : Энергоиздат, 1932.
2. Болотов, А. В. Электротехнологические установки / А. В. Болотов, Г. А. Шепель. – М. : Высшая школа, 1933.

Учебное издание

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

Лабораторный практикум
для студентов специальности
1-43 01 03 «Электроснабжение»

Составитель
АНИЩЕНКО Вадим Андреевич

Редактор *Т. А. Зезюльчик*
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 23.12.2013. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 6,98. Уч.-изд. л. 5,46. Тираж 100. Заказ 1309.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.